

ПРОГРАММА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ



ФИЗИКА.СПБ/2021

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

18-22 ОКТЯБРЯ 2021 ГОДА



Тезисы докладов
международной конференции

ФизикА.СПб

18–22 октября 2021 года

Физик А.СПб: тезисы докладов международной конференции 18–22 октября 2021 г.
— СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021

Организатор

ФТИ им. А. Ф. Иоффе

При поддержке

ООО «ИННО-МИР»

Программный комитет

Аверкиев Никита Сергеевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) — председатель
Соколовский Григорий Семенович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) — заместитель председателя
Арсеев Петр Иварович (ФИАН)
Гавриленко Владимир Изяславович (ИФМ)
Дьяконов Михаил Игоревич (Université Montpellier II, France)
Зайцев Кирилл Игоревич (ИОФ РАН)
Иванчик Александр Владимирович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Калашникова Александра Михайловна (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Карачинский Леонид Яковлевич (ООО «Коннектор Оптикс»)
Конников Семен Григорьевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Кучинский Владимир Ильич (СПбГЭТУ, А. Ф. Иоффе)
Пихтин Никита Александрович (ООО «Эльфолком», ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Рудь Василий Юрьевич (СПбПУ)
Степина Наталья Петровна (ИФП им. А. В. Ржанова)
Сурис Роберт Арнольдович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Нестоклон Михаил Олегович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Устинов Виктор Михайлович (НТЦ микроэлектроники РАН)

Организационный комитет

Соколовский Григорий Семенович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) — председатель
Поняев Сергей Александрович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) — заместитель председателя
Азбель Александр Юльевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Дюделев Владислав Викторович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Когновицкая Елена Андреевна (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева)
Лосев Сергей Николаевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Рябочкина Полина Анатольевна (МГУ им. Н. П. Огарёва)
Серин Артем Александрович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)
Черотченко Евгения Дмитриевна (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Международная конференция 2021 года продолжает традицию Итоговых семинаров по физике и астрономии по результатам конкурсов грантов для молодых ученых, проводившихся в Санкт-Петербурге с середины 1990-х годов.

Исследование генетических связей метеорного потока h-Виргиниды с околоземными астероидам

Сергиенко М. В.1, Соколова М.Г.1

¹КФУ

e-mail: star1955@mail.ru

В работе впервые на основе авторского многопараметрического метода исследованы генетические связи малого метеорного потока h-Виргиниды (HVI) с астероидами группы Аполлона, пересекающими орбиту Земли и относящимся к околоземным объектам (near Earth objects NEO). Использован многофакторный подход для поиска малых тел с близкими орбитами. Для идентификации привлечены D критерий Драммонда [1], метрика Холшевникова [2], постоянная Тиссерана [3], квазистационарные параметры μ и ν [4] ограниченной задачи трех тел, долгота перигелия орбиты π [5]. В качестве исходных данных были использованы телевизионные каталоги метеорных орбит, представленные в открытом доступе – каталог Meteoroid Orbit Database v2.0 за 2010-2012 г. (<http://cams.seti.org/>) (далее CAMS) и Европейской метеорной сети EDMOND за 2001-2016 гг. (<https://www.meteornews.net/>) (далее EDMOND). Показано, что по значению постоянной Тиссерана, рассчитанной по данным каждого из используемых каталогов, метеорная орбита потока h-Виргиниды является переходной и раньше невозможно было точно утверждать, какое происхождение потока h-Виргиниды - астероидное или кометное. В результате выполнения настоящей работы по совокупности всех используемых критериев и одновременно по двум телевизионным каталогам метеорных орбит были определены как генетически близкие к метеорному потоку астероиды 2001SZ269, 2014HD19. Причем астероид 2001SZ269 выделен как наиболее вероятный объект, в качестве родительского тела потока h-Виргиниды. Все полученные данные являются важными для использования при разработке эволюционной теории Солнечной системы. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант РФФИ 19-32-90024.

Список литературы

1. Babadzhanov P.B., Kokhirova G.I., Densities and porosities of meteoroids // *Astronomy & Astrophysics*, 495 (1), pp. 353 - 358, (2009);
2. Kholshchevnikov, K. V. Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin// *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 462, Issue 2, pp. 2275 – 2283, (2016);
3. Jenniskens P., Mostly dormant comets and their disintegration into meteoroid streams: a review// *Earth Moon Planet*, 102 (1–4), pp. 505–520, (2008);
4. Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I., Near-earth objects in the Taurid complex// *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 386 (3), pp. 1436–1442, (2008);
5. Sokolova M., Sergienko M., Nefedyev Y., Andreev A., Nefedyev L., Genetic analysis of parameters of near earth asteroids for determining parent bodies of meteoroid streams// *Advances in Space Research*, Vol. 62, Issue 8, pp. 2355–2363, (2018).

Моделирование фундаментальных параметров для лунного телескопа

Андреев А. О.¹, Петрова Н.К.¹, Нефедьев Ю.А.¹

¹КФУ

e-mail: alexey-andreev93@mail.ru

Запуск космических научных спутников «Clementine», «LRO» и «Kaguya» быстро и радикально изменил ситуацию при изучении Луны. Мощный поток высокоточной и многопараметрической информации, полученной с бортов современных космических аппаратов, вызвал значительный всплеск интереса и энтузиазма к промышленному роботизированному исследованию Луны и пилотируемому полету на Марс после создания долгосрочных пилотируемых лунных баз [1]. Современный уровень проводимых и планируемых лунных исследований характеризуется высокой точностью наблюдений и разнообразием наблюдательных методов, важное место среди которых, в силу специфики условий на Луне, занимает изучение параметров лунной динамики (ПЛД). Поэтому требуются новые способы анализа большого количества высокоточных данных по наблюдению ПЛД и извлечения из них максимального количества полезной информации. Такие космические технологии требуют создания на Луне системы налунных телескопов [2]. Многолетние лазерные измерения дали богатую наблюдательную информацию о Луне [3], позволившую описать динамику Луны с необходимой на современном этапе точностью: погрешность в определении расстояния до Луны не более метра, а в определении параметров вращения-миллисекунды дуги [4]. Тем не менее, существует необходимость в получении наблюдаемых данных, не зависящих от лазерных измерений [5]. В первую очередь, для того чтобы выявить возможные систематические ошибки, повысить точность измерений путём исключения из наблюдений движение Земли т.д. [6]. Одним из вариантов таких экспериментов рассматривается возможность установки на лунной поверхности одного или несколько оптических телескопов, которые по прямым измерениям звёзд, позволят определять параметры лунного вращения и в дальнейшем будут использоваться для астрофизических наблюдений [7]. В данной работе рассмотрены результаты компьютерного моделирования измерений для лунных телескопов, расположенных на разных широтах. По результатам расчётов сделаны оценки чувствительности лунной селенографической системы к параметрам вращения, на основании которых делается вывод об оптимальном расположении телескопов. В работе представлены конструктивные предложения по реализации эксперимента, выявлены проблемы, которые позволят принять или отклонить вопрос о его практической реализации. Результаты проведенной авторами компьютерной симуляции наблюдений телескопом, установленным на лунной поверхности, показали, что подобного рода эксперимент открывает новые возможности для обнаружения тонких эффектов во вращении Луны, которые, в свою очередь, позволят проникнуть в сложную структуру ее внутреннего строения. Разработана методика компьютерного моделирования наблюдений на лунном телескопе, который может быть расположен в любой точке поверхности Луны. По анализу моделируемых остаточных разностей сделаны выводы, что для определения углов физической либрации в наклоне и узле, эффективным будет размещение автоматизированного телескопа на лунном полюсе, а для определения либрации по долготе потребуется второй телескоп, который желательно разместить на широте в окрестности экватора. Моделирование также показало, что можно ограничиться и одним телескопом, если его разместить на широте 30 градусов, где все три параметра физической либрации будут доступны для определения и иметь одинаковую

чувствительность к любым вариациям измеряемых селенографических координат. Однако, в случае неполярного размещения телескопа, потребуется дополнительная техническая проработка обеспечения работоспособности измерительного оборудования, тщательное продумывание методики отождествления звёзд и расписания наблюдений. При этом необходимо учитывать и различные условия проведения измерений на Луне в отличие от наблюдений с поверхности Земли [8]. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Научному Фонду: грант РНФ 20-12-00105.

Список литературы

1. Weber R., Lin P., Garnero E.J., Williams Q., Lognonné P., Seismic Detection of the Lunar Core// *Science*, 331(6015), pp. 309-312, (2011).
2. Rambaux N., Williams J. G. The Moon's physical librations and determination of their free modes. // *Celest Mech Dyn Astr*, 109, pp. 85–100, (2011).
3. Weiren W., Chunlai L., Wei Z., Hongbo Z., Jianjun L., et al. Lunar farside to be explored by Chang'e-4// *Nature Geoscience*, 12, pp. 222–223, (2019)
4. Williams J. G., and Boggs D. H. Tides on the Moon: Theory and determination of dissipation// *Journal of Geophysical Research E: Planets*, 120 (4), pp. 689-724 (2015).
5. Williams J. G., Konopliv A.S., Boggs D.H., et al. Lunar interior properties from the GRAIL mission// *J. Geophys. Res. Planets*, 119, pp. 1546–1578 (2014).
6. Lainey V., Karatekin Ö., Desmars J., et al. Strong tidal dissipation in Saturn and constraints on Enceladus' thermal state from astrometry// *The Astrophysical Journal*, 752, 14 (2012).
7. Lainey V., Jacobson R., Tajeddine R., et al. New constraints on Saturn's interior from Cassini astrometric data// *Icarus*, V. 281, pp. 286-296, (2017)
8. Zhang J., Dauphas N., Davis A.M., Leya I. & Fedkin A. The proto-Earth as a significant source of lunar material// *Nature Geoscience* V. 5, pp. 251–255 (2012).

Модель метеоритной опасности для космической миссии к Марсу

Демина Н. Ю.¹, Нефедьев Ю.А.¹, Андреев А.О.¹,

¹КФУ

e-mail: vnu_357@mail.ru

В настоящее время роботическое освоение Марса является одной из самых востребованных мировыми космическими агентствами задач. Сейчас на поверхности планеты активно работает Mars Science Laboratory (MSL) и марсоход третьего поколения “Curiosity” [1]. Работа направлена на моделирование метеоритной опасности на маршруте Земля-Марс [2] и подготовку данных для Государственного стандарта (Метеорное вещество, модель пространственного распределения). Данное научное направление является новым и важным. До сих пор данный Стандарт является лучшим по сравнению с американским, разработанным НАСА, и европейским и представляет собой обязательный документ при проектировании космических аппаратов. Сложность выполнения работы по анализу метеоритной опасности на маршруте Земля-Марс заключается в том, что наблюдения метеоров у поверхности Земли не могут дать полную метеорную ситуацию на всех этапах полета КА к Марсу: чем ближе к Марсу, тем меньше орбит метеоров с одинаковыми

элементами пересекает орбиту Земли и участок траектории орбиты космического аппарата. Поэтому в работе производилось модельное экстраполирование данных наземных наблюдений совместно данными космических миссий на основе авторского метода регрессионного анализа. В работе использовались результаты наблюдений, которые были выполнены миссиями Mariner-2, Mariner-4, Pioneer-10 и Pioneer-11, Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN), Phoenix, Trace Gas Orbiter [3, 4]. Использовались также данные о зодиакальном свете [5]. Полученная в работе формула пересчета плотности потока спорадических тел метеороидов из одной системы координат в другую позволила переработать результаты наблюдений за метеорами американских космических аппаратов Маринер-4 и Пионер-10 и получить то, что не смогли сделать американские исследователи. Как результат, по данным трех датчиков, установленных на борту космических аппаратов, определено, что на траектории полета КА с орбиты Земли на орбиту Марса наблюдается экспоненциальный рост плотности потока спорадических тел метеороидов. Плотность увеличивается в 2 раза для тел массой более 6-10 г и в 6 раз больше для метеороидов в диапазоне масс 10-12 г. Плотность потока резко уменьшается до нормальной за пределами орбиты Марса. Из этого можно сделать вывод, что поверхность Марса и его спутников Фобос и Деймос является источником вторичных выбросов метеороидных тел во время их бомбардировки метеоритами из пояса астероидов [6, 7]. Впервые данная гипотеза и теоретические исследования были проведены в Санкт-Петербургском государственном университете и наши исследования эти выводы подтвердили. При анализе высоты геопотенциала северного полушария была подтверждена гипотеза о существовании геострофических ветров. Известно, что приливные температуры оказывают существенное влияние на прогнозируемое движение геострофических ветров, причем определение высотных характеристик является достаточно сложной проблемой. Поэтому разработка соответствующих методов учета этих процессов является новой и перспективной задачей. В результате было проведено исследование околоземного космического пространства, включая нижнюю атмосферу, нижнюю верхнюю мезосферу, нижнюю термосферу и ионосферу с использованием радиофизических методов и определены параметры влияния динамики нижней и средней атмосферы на распространение радиоволн. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому научному фонду: грант РНФ 19-72-00033.

Список литературы

1. Rampe E. B., Bristow T. F., Morris R. V., et al. Mineralogy of Vera Rubin Ridge from the Mars Science Laboratory CheMin Instrument// *Journal of Geophysical Research: Planets*, 5(9):e2019JE006306, (2020).
2. Granvik M. & Brown P. Identification of meteorite source regions in the Solar System// *Icarus*, 311, pp. 271–287, (2018).
3. Filiberto J., Olsson-Francis K., & Schwenzer S. P. Conclusions and Implications for Habitability of the Martian Crust// *Volatiles in the Martian Crust*, pp. 393–399, (2019).
4. Das S., & Sarkar P., General Geographical Overview of Mars// *Asian Journal of Geographical Research*, 2(3), pp. 1-6, (2019).
5. Lasue J., Levasseur-Regourd A.-C., & Renard J.-B., Zodiacal light observations and its link with cosmic dust: A review// *Planetary and Space Science*, 190, 104973, (2020).
6. Oberst, J., Wickhusen, K., Willner, K., et al. DePhine – The Deimos and Phobos Interior Explorer// *Advances in Space Research*, Vol. 62, Issue 8, pp. 2220-2238, (2018).

7. Nallapu R., Dektor G., Kenia N., et al. Trajectory Design of Perseus: A CubeSat Mission Concept to Phobos. *Aerospace*, 7(12), 179, pp. 1-31, (2020).

Структурный анализ кометы 45P/Honda на основе изофотного моделирования

Чуркин К. О.¹, Андреев А.О.¹, Нефедьев Ю.А.¹,

¹КФУ

e-mail: konstantinch-n87@mail.ru

Считается, что ядра комет образовались из вещества протопланетного диска. Поэтому изучение структуры и физических свойств комет помогает понять эволюцию формирования всей планетной составляющей солнечной системы [1]. Наиболее интенсивные исследования кометных атмосфер, структуры и планетофизики производились с использованием наблюдений ярких околоземных комет [2]. Однако, необходимо отметить две кометных эволюционных проблемы. Первая заключается в том, что современные данные по сравнению параметров околоземных и имеющих большие гелиоцентрические расстояния комет показали различную степень их активности [3]. Вторая состоит в мнении, что в поясе Койпера и Облаке Оорта находится основная масса кометного вещества [4]. При этом кометы Облака Оорта сформировались около планет-гигантов, а короткопериодические кометы семейства Юпитера были образованы в поясе Койпера. При этом современные теории образования Солнечной системы показали более сложные динамические процессы. Таким образом, моделирование и анализ структуры различных комет дает возможность создать и более точную теорию их эволюции. Полученные в работе результаты моделирования изофот кометы 45P/Honda позволили получить кометную модель с более четкой структурой, чем в работах предыдущих авторов [4, 5]. Это позволило выполнить оценку структурных параметров более точно и достоверно. Были определены изофоты ядра, комы и хвоста кометы 45P/Honda. Хорошо видно последовательное изменение структуры кометы от центральной области к периферийной в зависимости от времени. Около кометного ядра изофоты имеют кольцевую форму. Если в центре модели изофоты имеют форму близкую к узким кольцам, то к периферийным областям появляются вытянутости по направлению кометного хвоста и утолщение их структуры. Можно выделить большой и малый хвостовые лучи и хорошо обозначено ядро. Поскольку ядро кометы является элементом динамической эволюции и процессов в Солнечной системе [6], а комета 45P/Honda является долгопериодической, изучение цифровой базы данных по ней позволит уточнить теорию ее образования и эволюции. В дальнейшем, разработанный в работе авторский изофотный метод моделирования позволит исследовать структуру различных кометных объектов и на основании результатов определять степень активности комет. С другой стороны, оценка степени кометной активности позволяет изучать вопросы процессов динамической эволюции в Солнечной системе. Однако, при выполнении данных работ нужно учитывать тот факт, что определенные кометы являются межзвездными объектами [7]. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому научному фонду: грант РНФ 20-12-00105.

Список литературы

1. Di Santi M.A., Bonev B.P., Russo N.D., et al., Hypervolatiles in a Jupiter-family Comet: Observations of 45P/Honda-Mrkos-Pajdusakova Using iSHELL at the NASA-IRTF// The Astronomical Journal, 154, pp. 154:246, (2017).
2. Dlugach J.M., et al. Dlugach J.M., Ivanova O.V., Mishchenko M.I., Afanasiev V.L. Retrieval of microphysical characteristics of particles in atmospheres of distant comets from ground-based polarimetry. JQSRT// Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 205, 80–90 (2018).
3. Lis, D. C., Biver N., Bockelée-Morvan D., Hartogh P., et al., A Herschel Study of D/H in Water in the Jupiter-family Comet 45P/Honda-Mrkos-Pajdušáková and Prospects for D/H Measurements with CCAT// The Astrophysical Journal Letters, 774, L3 (2013).
4. Moulane, Y., Jehin E., Opitom C., et al., Monitoring of the activity and composition of comets 41P/Tuttle–Giacobini–Kresak and 45P/Honda–Mrkos–Pajdusakova// A&A, 619, A156. (2018).
5. Mumma M.J., Russo N.D., DiSanti M.A., et al., Organic Composition of C/1999 S4 (LINEAR): A Comet Formed Near Jupiter// Science, 292:1334-1339, (2001).
6. Sergienko M., Sokolova M., Nefedyev Y., Andreev A., Kappa Cygnids meteor shower and its connections with Near-Earth asteroids/ // Astronomy reports , Vol. 64, No. 12, pp. 1087–1092, (2020).
7. Usanin V.S., Nefedyev Y.A., Andreev A.O. Use of long-term nongravitational force models for fitting astrometric observations of comet Encke// Advances in Space Research, Vol. 60, Issue 5, pp. 1101-1107, (2017).

Разрушающее напряжение в коре нейтронной звезды

Кожберов А. А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: d-5o3@yandex.ru

Принято считать, что модель кулоновского кристалла может быть использована для описания вещества в коре нейтронной звезды. В работе [1] мы исследовали свойства деформированных кулоновских кристаллов и то, как их стабильность зависит от поляризации электронного фона. На основе анализа электростатической энергии и фононного спектра кристалла рассчитано разрушающее напряжение в коре $\sigma_{\max}$ при нулевой температуре. В данной работе я кратко обсуждаю влияние энергии нулевых колебаний и тепловой составляющей на $\sigma_{\max}$. Показано, что вклад от нулевых колебаний не превышает нескольких процентов. Результаты при высоких температурах, полученные в гармоническом приближении, хорошо согласуются с результатами молекулярно-динамических симуляций [2], а влиянием поляризации электронного фона при этом можно пренебречь (при используемой точности).

Список литературы

1. Kozhberov A. A., Yakovlev D .G., Deformed crystals and torsional oscillations of neutron star crust, MNRAS, том. 498, 5149-5158, 2020 г.
2. Chugunov A. I., Horowitz C. J., Breaking stress of neutron star crust, MNRAS, том. 407, L54-58, 2010 г.

Hybrid simulation of the rotational discontinuity interaction with the Earth bow shock

Кропотина Ю. А.¹, Быков А.М.¹, Артемьев А. В.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²University of California, Los Angeles, California, USA

e-mail: juliett.k@gmail.com

The rotational discontinuities are frequently detected by satellites in the solar wind. Interactions of the solar wind rotational discontinuity with the Earth bow shock are simulated with the 3D kinetic hybrid code 'Maximus' of the second-order accuracy. It is shown that the current inside the transmitted discontinuity grows after shock crossing. The dependence of the current amplification on upstream plasma beta, shock inclination and Mach number is studied. It is found that independently of shock inclination parameters the discontinuity generally keeps its alfvénic nature.

Изучение фрактальных свойств Цереры

Мубаракишина Р. Р.¹, Ахмедшина Е.Н.¹, Андреев А.О.¹

¹КФУ

e-mail: sky0606@mail.ru

В настоящее время малая планета Церера является одним из наиболее изученных малых небесных тел. Считается, что анализ вещественного состава и структуры поверхности Цереры позволяет изучить ее внутреннее строение и построить теорию эволюции Цереры. На основе данных космического аппарата «Dawn» NASA была определена и согласована элементная база с геологическим строением Цереры, что позволило сопоставить полученные параметры малой планеты с происходящими на ней физическими процессами [1]. В результате было установлено, что малая планета представляет собой силикатное тело, заполненное водой. В процессе эволюции Церера была нагрета и структурно видоизменилась, а геологические процессы на ней продолжают до сих пор [2]. Следует отметить, что для создания полной картины как современного состояния, так и эволюции Цереры, знания о вещественном составе должны быть интегрированы со структурными параметрами ее поверхности [3]. В данной работе фрактальные свойства астероида Церера были проанализированы с использованием данных космической миссии «Dawn». Нами с использованием разложения по сферическим функциям была построена 3D модель планеты, которая оказалась сложной фрактальной системой. Исследование таких объектов требует использования гармонических многопараметрических методов. В данном случае использовался метод фрактального моделирования Вейерштрасса-Мандельброта. Согласно этому подходу, модели сложных фрактальных структур не могут представлять собой отдельный фрактал и описываются мультифракталами – взаимосвязанной системой фракталов [4]. Эти составные фракталы рекурсивны, поскольку они инвариантны для всей модели сложной структуры как по масштабу, так и по симметрии [4]. Таким образом, многопараметрический фрактальный анализ позволяет представить системы, подобные модели Цереры, в виде спектра фрактальных размерностей. Преимущество фрактального анализа состоит в том, что можно исследовать локальные области физической

поверхности. В работе для этой цели использовался алгоритм Минковского. Модель поверхности астероида Церера была построена путем разложения функции высоты в регрессионный гармонический ряд [5]. Порядок разложения функции высоты зависит от количества реперных точек. На заключительном этапе была решена переопределенная система для различных локальных областей топоцентрической информации с целью постулирования модели, учитывающей внешние меры. Используя гармоническое разложение функции высоты в сферические функции [6], была построена трехмерная модель Цереры для проведения ее фрактального анализа. Определены фрактальные размерности D для локальных областей и всей модели планеты. Фрактальные размерности изменяются от 1,37 до 1,92 в зависимости от долготы и широты Цереры. Основные результаты следующие: 1) структура поверхности Цереры более существенно изменяется по долготе; 2) по широте структура Цереры более гладкая; 3) коэффициент самоподобия довольно быстро меняется по долготе, что говорит о том, что разные локальные области малой планеты были сформированы под воздействием различных физических процессов. Следует отметить, что полученные фрактальные измерения значительно разбросаны как по долготе, так и по широте Цереры. Этот факт подтверждает наличие сложной структуры в пространственной модели малой планеты. Это также относится к реальной физической поверхности Цереры. Результаты работы позволяют сделать вывод, что фрактальное моделирование может дать независимые значения фрактальной размерности как для всей модели астероида Церера, так и для его локальных макроструктурных областей. Согласно работ [7, 8] можно сделать вывод, что дальнейшее развитие представленного метода сравнительного фрактального анализа позволит астрономам исследовать больше локальных химических и физических параметров и аномалий Цереры. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант РФФИ 19-32-90024.

Список литературы

1. Rousseau B., De Sanctis M. C., Raponi A., et al., The surface of Ceres in visible light as seen by Dawn VIR// *Astronomy & Astrophysics*, 642, A74 (2020).
2. McCord T. B. and Zambon F. The surface composition of Ceres from the Dawn mission// *Icarus*, Vol. 318, pp. 2-13, (2019).
3. Frigeri, A., De Sanctis, M. C., Ammannito, E., Tosi, F., Ciarniello, M., Zambon, F., ... Russell, C. T. The spectral parameter maps of Ceres from NASA/DAWN VIR data// *Icarus*, Vol. 318, pp. 14-21, (2019).
4. Kempkes S.N., Slot M.R., Freeney S.E., et al., Design and characterization of electrons in a fractal geometry// *Nature Physics*, Vol. 15, pp.127–131(2019).
5. Adams, B., Iverson, L., Matthews, S., Peters, M., Prasad, A., & Hix, D. M., Mapping Forest Composition with Landsat Time Series: An Evaluation of Seasonal Composites and Harmonic Regression// *Remote Sensing*, 12(4), 610, (2020).
6. Andreev A.O., Nefedev Yu.A., Nefediev L.A., Ahmedshina E.N., Demina N.Yu., Zagidullin A.A., The use of multi-parameter analysis and fractal geometry for investigating the structure of the lunar surface// *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, Vol. 162, no. 2, pp. 223–236, (2020).
7. Atangana, A., Fractal-fractional differentiation and integration: Connecting fractal calculus and fractional calculus to predict complex system// *Chaos, Solitons & Fractals*, 102, pp. 396–406, (2017).

8. Turcotte D.L., A fractal interpretation of topography and geoid spectra on the Earth, Moon, Venus, and Mars// Journal of Geophysical Research, 92/B4, pp. 597-601, (1987).

Стохастический анализ динамических процессов солнечной активности

Костина Е. Ю.¹, Демина Н.Ю.², Хусаенова Э.В.²

¹МГУ им. М. В. Ломоносова

²КФУ

e-mail: kostina_elena_1955@mail.ru

Природные процессы, существующие в сложных объектах неживой и живой материи, носят стохастический и неравновесный характер. Основная проблема при исследовании таких систем заключается в определении величины энтропии как количественной меры неопределенности и систематичности состояний разнесенных по различным фазовым пространствам динамических систем. В настоящей работе представлен новый метод анализа активных процессов солнечной динамики с использованием теории немарковских случайных дискретных процессов (НСДП). В основе теории НСДП лежат кинетические уравнения Цванцига-Мори в конечно-разностной дискретной интерпретации. Это соответствует концепции неравновесной статистической физики конденсированного состояния. Качественную информацию о совокупности закономерностей поведения, релаксационных процессах, динамических характеристиках и внутренних свойствах солнечной активности можно получить с помощью моделирования НСДП с использованием разработанного в работе методического авторского подхода. Данный подход ориентирован на анализ спектральных частотных функций памяти, динамических ортогональных параметров, фазовых трансформаций, релаксационных и кинетических процессов и самоорганизации в сложных физических системах. Динамика параметров солнечной активности характеризуется цикличностью и имеет максимумы и минимумы [1]. Это происходит по той причине, что влияние магнитно-гидравлической составляющей изменяется в зависимости от внутренней динамики. В работе для моделирования НСДП использовался авторский программный пакет APSASA (automated program for solar activity stochastic analysis), который также позволяет прогнозировать тренд солнечной активности на ограниченный период времени. В качестве исходных параметров для вычислений использовался наблюдательный ряд из 574 чисел Вольфа. В результате обнаружено, что гидромагнитное динамо в зоне солнечной конвекции является основой эволюции солнечного цикла [2]. Соответственно, присутствие гидромагнитного динамо в конвективной зоне подтверждает также наличие магнитных процессов в зоне лучистого равновесия. Данный эффект объясняется тем, что при формировании Солнца при гравитационном сжатии газопылевого облака магнитное поле этого облака трансформировалось в остаточное магнитное поле эволюционного происхождения, независимое от гидромагнитного динамо. При этом радиационная зона имеет дифференциальное вращение, которое является нестационарным процессом перераспределения внутренних возмущений в конвективной зоне под действием магнитного давления [3]. Таким образом, существование солнечной активности является производной влияния сложной нелинейной магнитодинамической спиральной структуры [4]. Количественное описание стохастической памяти системы можно осуществить через параметр немарковости. При исследовании дискретной неравновесной эволюции таких

сложных процессов, как солнечная активность, все разнообразие и нестандартные характеристики эффектов памяти описываются на основе набора соответствующих функций [5]. Это требует выполнения анализа динамики системы безразмерных стохастических характеристик с параллельным оцениванием влияния эффектов памяти на формирование солнечной активности. Моделирование НСДП связанных с активными процессами, происходящими на Солнце, позволило построить математическую модель, с помощью которой можно изучать закономерности и хаотичность стохастических процессов, а также выявлять закономерности возникающие из-за цикличности и периодичности солнечной активности.

Список литературы

1. Weiss N.O., Tobias, S.M. 2000 Physical Causes of Solar Activity. Space Science Reviews 94(1) 99-112.
2. Mansour N.N. 2016 Understanding solar torsional oscillations from global dynamo models// Astrophysical Journal Letters 828, 1 Article number L3.
3. Subramanian K. and Brandenburg A. 2006 Magnetic helicity density and its flux in weakly inhomogeneous turbulence// The Astrophysical Journal Letters 648 L71–L74.
4. Kitiashvili I.N., 2016 Data assimilation approach for forecast of solar activity cycles// Astrophysical Journal 831 1, Article number 15.
5. Zou Peng, Li Qi-Xiu, Wu Nan 2014 Non-linear analysis of the long-term behaviour of solar filaments// Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 437, 1, 38–45,

Анализ современных наблюдений метеорных потоков на основе методов ФТМ

Шарафутдинова А. А.¹, Нефедьев Ю.А.¹, Сергиенко М.В.¹

¹КФУ

e-mail: sharafutdinova_270796@mail.ru

Работа сфокусирована на анализе современных наблюдений за метеороидами, включенными в банк данных, сформированный как профессиональными исследователями, так и астрономами-любителями. На основе современной физической теории метеоров (ФТМ) [1] разработан новый метод анализа измерений, обеспечивающий сопоставимость по точности с результатами радиолокационных наблюдений. Благодаря тому, что точность нового метода анализа наблюдений метеороидов существенно возросла, появилась возможность обрабатывать наблюдения потоков Персеид и Леонид за период 120 лет. Применение ФТМ позволило впервые объяснить наблюдаемое на высоте 2 МГц распределение метеорных эхо-сигналов, при котором верхняя часть данного распределения относится к высотам 140 км.

Нами также исследована эволюция орбит двух крупных метеорных потоков: Geminids и Quadrantid, которые интенсивно наблюдались, и была исследована вероятность генетических связей Quadrantid с кометами 1860 I, Tuttle, Pons-Broocks, Stephan-Oterma и Kosik-Peltier. [2]. Также были исследованы орбиты метеорных потоков Bootid и Bielid [3]. Как результат, была исследована орбита метеорного потока Perseids и ее связь с выбросом вещества кометой 1862 III Swift-Tuttle [4] и кометой Grigg-Skjellerup. Это периодическая комета, вращающаяся вокруг Юпитера, которая в то же время проходит вблизи Земли и представляет большой интерес для исследователей, занимающихся кометами. В 1967 году

расстояние между ней и Землей оценивалось в 0,003 а.е. Данный метеорный поток предсказывался и действительно наблюдался. Однако притяжение Юпитера может повлиять на орбиту кометы. В связи с этим близкое сближение с ним приведет к изменению радианта потока, и если выброс из ядра продолжится, практически одновременно будет наблюдаться от 2 до 3 метеорных потоков, различающихся по склонению на 10° и 20° соответственно.

Установлено, что активность потока Perseids [5] увеличилась с момента его исследования в четыре раза, причем долгота Солнца, соответствующая максимуму активности, не изменилась [6]. Исследования показали, что активность потока Leonids не изменилась за этот период, но долгота Солнца в максимуме активности линейно увеличилась, и это увеличение составляет $2,6^\circ$ за 120 лет. Все эти результаты для обоих потоков относятся только к стабильным периодам, но плоскости орбит родительских комет этих потоков - Swift, Tuttle и Tempel-Tuttle - далеки от совпадения с плоскостью эклиптики. В процессе работы также разработаны методы определения плотности метеорного потока по радионаблюдениям и новый метод «томографии» для расчета распределения плотности спорадических метеоров на небесной сфере с использованием радиолокационных наблюдений метеоров на одной станции с гониометром. Метод позволяет рассчитать плотность метеорного потока на небесной сфере с угловым разрешением 2° .

Использование данных методов послужило доказательством того, что распределение плотности потоков метеороидов на небесной сфере имеет две плоскости симметрии: первая совпадает с плоскостью эклиптики, другая перпендикулярна плоскости эклиптики, причем первая проходит через полюса Земли. Это объясняется тем, что метеороиды, движущиеся по орбитам с одинаковыми элементами орбиты имеют равномерное распределение аргумента перигелия [7]. Как итог, было выполнено моделирование эволюции от момента образования потока до изучения гравитационных и негравитационных возмущений от родительской кометы на основе корреляционного анализа с наблюдаемой структурой данного потока [8]. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант РФФИ 19-32-50071 мол_нр.

Список литературы

1. Bragin M.D., Tirskiy G.A., Analytical Solution of Equations of the Physical Theory of Meteors for a Non-Fragmenting Body with Ablation in a Non-Isothermal Atmosphere// Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol. 60, pp.793–797, (2019)
2. Sokolova M.G. and Sergienko M.V., Comparison of the structures of meteor streams of cometary and possible asteroidal origin// Solar System Research, Vol. 50 Iss. 6. pp. 379-389, (2016).
3. Seargent D.A.J., More Comet Oddities: Outbursts, Disruptions and Other Strange Behavior. In: Weird Comets and Asteroids. Astronomers' Universe. Springer, Cham., (2017))
4. Margonis A., Christou A., & Oberst, J., Characterisation of the Perseid meteoroid stream through SPOSH observations between 2010–2016// Astronomy & Astrophysics, 626, A25, (2019).
5. Shrbený, L. and & Spurný, P., September epsilon Perseids observed by the Czech Fireball Network// Astronomy & Astrophysics, 629, A137, (2019).
6. Bel'kovich O.I. and Ishmukhametova M.G. Mass distribution of Perseid meteoroids// Solar System Research, Vol. 40. Iss. 3, pp. 208-213, (2006).
7. De la Fuente Marcos C., & de la Fuente Marcos R., On the orbital evolution of 2020 AV2, the first asteroid ever observed to go around the Sun inside the orbit of Venus//

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Vol. 494, Issue 1, pp.s L6–L10, (2020).

8. Sergienko M.V., Sokolova M.G. & Kholshevnikov K.V., Multifactorial Method of Search for Small Bodies in Close Orbits// Astronomy Reports, Vol. 64(5), pp. 458–465, (2020).

Метод анализа комплекса спорадических метеоров

Скворцова М. Н.¹, Андреев А.О.¹, Нефедьев Ю.А.¹

¹МГУ им. М. В. Ломоносова

²КФУ

e-mail: Maria_1992MA@mail.ru

В настоящее время большое внимание уделяется изучению систем спорадических метеоров [1, 2]. Одна из важнейших задач метеорной астрономии - построение модели комплекса спорадических метеорных тел (СМТ) в окрестности орбиты Земли [3]. Практическая ценность такой модели определяется возможностью ее использования в астрофизических, космических исследованиях и в метеорной радиосвязи [4]. С теоретической точки зрения важность этой модели состоит в том, что она служит основой для моделирования распределения СМТ в Солнечной системе [5]. При построении модели СМТ используются результаты наземных наблюдений метеоров фото и радио методами как наиболее точных и статистически обоснованных. Большое значение при этом являются достижения в области теории физики метеорных явлений в атмосфере Земли и современные методические разработки [6]. Одним из возможных методов моделирования комплекса СМТ на гелиоцентрическом расстоянии r с массой m , большей чем некоторая заданная масса m_0 , является определение параметров плотности потока метеорных тел на небесной сфере [7]. Такие параметры, как яркость и амплитуда отраженного сигнала, превышающие определенный уровень, могут быть найдены из наблюдений за метеорным потоком [8]. Учет влияния движения по орбите и гравитационного потенциала Земли на плотность потока СМТ [9] дает распределение плотности потока в гелиоцентрической системе координат [10]. Согласно последнему замечанию, разработанный в настоящей работе метод моделирования комплекса СМТ в результате дает систему гелиоцентрических радиантов и распределения скоростей на основе аналитических зависимостей. Для функции распределения гелиоцентрической скорости $f(v)$ и ее дисперсии $d(f)$ определены аналитические зависимости от угла гелиоцентрической элонгации, а также зависимость гелиоцентрических радиантов от элонгации и азимутального угла. Для оценки адекватности аппроксимации модельных распределений скоростей было выполнено сравнение с данными, полученными из наблюдений. Зависимости гелиоцентрической скорости и дисперсии распределения скоростей в зависимости от углов элонгации сравнивались для двух случаев: 1) с данными полученными из наблюдений и 2) с модельными параметрами. В качестве одного из условий в настоящей работе рассматривалась модель распределения метеорных тел для узкого диапазона масс. Как правило, такие метеоры генерируют метеорные потоки, регистрируемые единой методикой наблюдений. Недостатком указанного метода моделирования, рассматривающего весь комплекс СМТ как единое целое, является невозможность моделирования многомодальных условных распределений гелиоцентрических скоростей [11]. Эта мультимодальность обусловлена сложной структурой комплекса СМТ, которая, в свою очередь, определяется распределением вероятных родительских тел: комет и

астероидов. Данный недостаток может быть преодолен с помощью разделения на основе некоторых предположений всего комплекса СМТ на группы, и затем применения изложенного выше алгоритма анализа к каждой такой группе в отдельности и далее объединения моделей с соответствующими весовыми коэффициентами. Решалась еще одна интересная задача по нахождению зависимости между усредненными распределениями гелиоцентрических скоростей и углом элонгации. Поскольку значение $f(v)$ по определению является обратной величиной большой полуоси Земли, анализ распределения этой функции для комет и астероидов может предоставлять определенную информацию как для решения описанной выше проблемы, так и для нахождения новых зависимостей распределения СМТ от гелиоцентрического расстояния, что очень важно для построения модели СМТ для всей Солнечной системы и изучения процесса крупномасштабного смещения газопылевого вещества на ранних этапах формирования Солнечной системы [12]. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант 18-32-00895 мол_а.

Список литературы

1. Ohsawa R., Sako S., Sarugaku Y., et al., Luminosity function of faint sporadic meteors measured with a wide-field CMOS mosaic camera Tomo-e PM// *Planetary and Space Science*, Vol. 165, pp. 281–292, (2019).
2. Lukianova R., Kozlovsky A., & Lester M., Signatures of meteor showers and sporadics inferred from the height distribution of meteor echoes// *Planetary and Space Science*, Vol. 189, N 104981, (2020)
3. Usanin V. S., Nefedev Y. A., & Sokolova M. G., Characteristic Features of the Colors of Shower Meteors and Sporadic Meteors from Observations with the Mini-Mega-TORTORA System// *Astronomy Reports*, 63(8), pp. 666–686, (2019).
4. Moorhead A. V., Blaauw R. C., Moser D. E., Campbell-Brown M. D., Brown P. G., & Cooke W. J., A two-population sporadic meteoroid bulk density distribution and its implications for environment models// *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 472(4), pp. 3833–3841, (2017).
5. Janches D., Brunini C., & Hormaechea J. L., A Decade of Sporadic Meteoroid Mass Distribution Indices in the Southern Hemisphere Derived from SAAMER's Meteor Observations// *The Astronomical Journal*, 157:240, (2019).
6. Lukianova R., Kozlovsky A., & Lester M., Recognition of Meteor Showers from the Heights of Ionization Trails// *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol.123, Issue8, pp. 7067–707, (2018).
7. Jenniskens P., Meteor showers in review// *Planetary and Space Science*, 143, pp. 116–124, (2017).
8. Schult C., Stober G., Janches D., & Chau J. L., Results of the first continuous meteor head echo survey at polar latitudes// *Icarus*, 297, pp. 1–13, (2017).
9. Kozak P. M., & Watanabe J., Meteors with extreme beginning heights from observations with high-sensitivity super-isocon TV systems// *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 497(4), pp. 5550–5559, (2020).
10. Vojáček V., Borovička, J., Koten P., Spurný P., & Štork R., Properties of small meteoroids studied by meteor video observations// *Astronomy & Astrophysics*, 621, A68, (2019).
11. Bottke W. F., Moorhead A., Connolly H. C., et al., Meteoroid Impacts as a Source of Bennu's Particle Ejection Events// *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol.125, Issue8, pp. 006282 (2020).

12. Schult C., Brown P., Pokorn, P., Stober G., & Chau J. L., A meteoroid stream survey using meteor head echo observations from the Middle Atmosphere ALOMAR Radar System (MAARSY)// Icarus, 309, pp. 177–186, (2018).

Влияние негравитационных эффектов на вернувшийся к Земле разгонный блок «Центавр» космического аппарата «Сервейер-2»

Мартюшева А. А.¹

¹ГАО РАН

e-mail: alex.mart13@gmail.com

17 сентября 2020 года с помощью системы телескопов панорамного обзора и быстрого реагирования (Pan-STARRS) в обсерватории Халеакала на Гавайях был обнаружен небольшой околоземный астероид 2020 SO, который оказался частью разгонного блока «Центавр» космического аппарата «Сервейер-2», запущенного НАСА 20 сентября 1966 года и потерпевшего крушение. Данный объект двигался по гелиоцентрической орбите, пока не попал под влияние гравитации Земли, в результате чего 1 декабря 2020 года состоялось тесное сближение на расстоянии около 50 тыс. км. Несмотря на то, что сейчас «Центавр» удаляется от Земли, он представляет особый интерес для исследования, в частности, для учета воздействия негравитационных эффектов на его орбитальные характеристики. Так, было вычислено, что максимальное смещение траектории данного объекта вследствие влияния сил светового давления за 15 лет (следующее тесное сближение состоится в 2036 году) может составить около 10.3 км. Расчеты эффекта Ярковского показали, что величины ожидаемого изменения большой полуоси орбиты «Центавра» в зависимости от угла его вращения составляют от $-8.0747 \cdot 10^{-13}$ до $1.6466 \cdot 10^{-13}$.

Разработка детекторных пикселей на основе кремниевых фотоумножителей для черенковского гамма-телескопа TAIGA-IACST

Богданов А. А.¹, Тубольцев Ю.В.¹, Чичагов Ю.В.¹, Красильщиков А.М.¹, Хилькевич Е.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: Alexander.A.Bogdanov@mail.ioffe.ru

Для черенковского гамма-телескопа TAIGA-IACST разработаны новые детекторные пиксели на базе кремниевых фотоумножителей OnSemi MicroFJ-60035, чувствительных к излучению как в видимом (250-600 nm), так и в ультрафиолетовом (250-300 nm) диапазонах. Разработано несколько схмотехнических и конструкторских решений построения пикселей. Проведён их сравнительный анализ.

По результатам этих разработок созданы детектирующие пиксели, конструкции которых содержат две разъемные перпендикулярно расположенные платы с четырьмя сенсорами и четырьмя предусилителями с полосой пропускания не менее 200 МГц. Для

минимизации паразитных параметров входные транзисторные каскады повторителей тока расположены непосредственно на платах сенсоров. Платы предусилителей отличаются схемотехническим построением и элементной базой. На испытательном стенде проведена проверка работы различных вариантов построения пикселей в ультрафиолетовом и видимом диапазоне. Проанализированы амплитудные распределения выходных сигналов. В результате испытаний определены схемотехнические решения пикселей с чётким выделением одно- и двухфотонные пиков, а также решения обеспечивающие меньшее энергопотребление.

Анализ физической поверхности Титана с использованием методов мультифрактальной геометрии

De La Morena C. ¹, Ахмедшина Е.Н.¹, Андреев А.О.¹

¹КФУ

e-mail: star1955@yandex.ru

Титану принадлежит 95% массы всех 82-х спутников Сатурна. Диаметр Титана равен 5152 км, из чего следует, что он превосходит Луну на 50%, а также он значительно больше, чем Меркурий. На спутнике возможен подповерхностный океан, теорию о наличии которого уже выдвигали ранее некоторые ученые. Находится он под толщей льда и состоит на 10% из аммиака, который является для него природным антифризом и не дает оледенеть. С одной стороны, океан содержит огромное количество солей, что делает вероятность жизни в нем вряд ли возможным. Но с другой, так как на Титане постоянно происходят химические процессы, образующие молекулы сложных углеводородных веществ, это может привести к зарождению простейших форм жизни. На основе данных, собранных зондом НАСА «Кассини», была построена глобальная база топографических данных поверхности Титана [1]. Чтобы составить данную базу зонд «Кассини» за период с 2004 по 2017 год совершил 120 облетов Титана [2]. В настоящее время основными методами анализа процессов в сложных системах являются статистические [3]. У них есть ограничения вероятностного и статистического подходов, поскольку не каждый процесс и не каждый результат (форма и структура системы) носит вероятностный характер. В отличие от этого фрактальный анализ позволяет изучать структуру сложных объектов с учетом их качественной специфики, например, связь между структурой и процессами ее формирования. Такие многопараметрические системы должны изучаться методами физики сложных систем, и фрактальный анализ является одним из них [4]. Существенные различия между фрактальной размерностью модели поверхности Титана и ее реальными физическими параметрами показывают, что существует некоторое сложное распределение структуры модели Титана в пространстве. С одной стороны, сложные физические системы не могут быть описаны как единый фрактал и представляют собой мультифракталы, состоящие из набора взаимосвязанных фракталов с их собственными измерениями [5]. С другой стороны, во фрактальной модели каждая ее часть повторяет всю модель по структуре и не изменяется при изменении масштаба, т.е. является рекурсивной [6]. Использование мультифрактального анализа позволяет изучать систему как спектр отдельных фрактальных размерностей. Такой метод обеспечивает высокую точность при описании сложных фрактальных структур путем исследования локальных областей. В данной работе для определения и анализа фрактальных параметров

использовался авторский математический алгоритм, который обеспечил высокую надежность и точность [7]. При построении гармонической модели Титана применялся метод разложения топографической информации по сферическим функциям. В итоге на основе гармонического анализа данных миссии «Кассини», была создана топографическая модель Титана. В конечном виде, модель описывающая поверхность Титана включает разложение параметра высоты в зависимости от сферических координат в медленно сходящийся ряд сферических гармоник в форме регрессии. Необходимо отметить, для описания деталей поверхности в масштабе 1 градус, требуется порядок разложения около 180, что приводит к необходимости анализа $(180 + 1)$ 2 гармонических коэффициентов разложения. Для соответствия условиям регрессионного моделирования была решена переопределенная система топографической информации. При этом был использован ряд качественных стохастических данных, таких как внешние меры, совместно со штатным постулированием гармонической системы модели Титана. В результате выборки самоподобных областей (с близкими значениями коэффициентов самоподобия) на поверхности Титана совпадающих с параметром SRGB (характеризует цветовую фрактальную размерность) были определены элементы поверхности спутника, которые с большой долей вероятности были эволюционно сформированы при действии одинаковых селенохимических процессов. Авторы выражают благодарность за поддержку исследований проектом РФФИ 19-32-90024.

Список литературы

1. Liu Z. Y.-C., Radebaugh J., Harris R. A., Christiansen E. H., Neish C. D., Kirk R. L., & Lorenz R. D., The tectonics of Titan: Global structural mapping from Cassini RADAR// *Icarus*, 270, pp. 14–29, (2016).
2. Lopes R. M. C., Malaska M. J., Schoenfeld A. M., et al., A global geomorphologic map of Saturn's moon Titan// *Nature Astronomy* Vol. 4, pp. 228–233, (2020).
3. Nowel K., Kaminski W., Robust estimation of deformation from observations' differences (REDOD) for free monitoring networks// *Journal of Geodesy*, Vol. 88(8), pp. 749–764, (2018).
4. Turcotte D.L. 1987 A fractal interpretation of topography and geoid spectra on the earth, moon, Venus, and Mars// *Journal of Geophysical Research* 92/B4 597-601.
5. Kempkes S.N., Slot M.R., Freeney S.E. et al., Design and characterization of electrons in a fractal geometry// *Nature Phys.*, 15, pp. 127–131 (2019).
6. Andreev A.O., Demina N.Y., Nefedyev Y.A., Demin S.A., Zagidullin A.A., Modeling of the physical selenocentric surface using modern satellite observations and harmonic analysis methods// *Journal of Physics: Conference Series*, 1038(1), Article number 012003, (2018).
7. Carlos De La Morena, Andreev A.O., Nefedyev Y.A., Akhmedshina E.N., Nefediev L.A., The analysis of Venus' physical surface using methods of fractal geometry// *Journal of Physics: Conference IOP Publishing*, Vol. 1697, Article number 012019, (2020).

Влияние температуры фотосферы и более глубоких слоев Солнца на спектр гамма-квантов с энергиями более 511 кэВ во время солнечных вспышек.

Васильев Г. И.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: gennadyivas@gmail.com

Часть ускоренных во время солнечных вспышек ядер (главным образом протонов) возвращается в направлении на Солнце и взаимодействует с окружающей средой. В результате ядерных взаимодействий образуются гамма-кванты. В представляемой работе рассматриваются гамма-кванты с энергиями более 511 кэВ. Это позволяет исключить из рассмотрения температурной зависимости и плотности вероятности образования орто- и парaposитрония и вероятности распада ортопозитрония на 2 гамма-кванта в результате аннигиляции позитрона позитрония со связанным электроном атома окружающей среды (511 кэВ), или 3 гамма-кванта. При этом остается зависимой от температуры время и вероятность реакции $p + p \rightarrow d$ с образованием гамма-кванта с энергией 2.223 МэВ.

О возможном влиянии 11-летнего цикла солнечной активности на климат южной Фенноскандии.

Огурцов М. Г.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: maxim.ogurtsov@mail.ioffe.ru

Исследованы три реконструкции климата южной Фенноскандии. Показано, что десятилетняя (10-13 лет) вариация температуры этого региона коррелирует значимо ($r=0.961-0.993$) с одиннадцатилетним циклом солнечной активности в течение 1706-1990 гг. Однако два температурных ряда коррелируют значимо и с индексом летней Северо-Атлантической Осцилляции (ЛСАО). С учётом того, что десятилетняя периодичность в индексе ЛСАО также коррелирует с солнечным циклом, обнаруженные связи могут быть результатом воздействия солнечной активности на климат региона, осуществляемого солнечно-обусловленными изменениями атмосферной циркуляции. Обсуждены возможные физические механизмы подобного влияния.

Магнитная турбулентность в остатках сверхновых: перспективы поляриметра IXPE

Уваров Ю. А.¹, Быков А.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: uv@astro.ioffe.ru

Остатки сверхновых звезд (ОСН) являются яркими источниками нетеплового излучения в широком диапазоне энергий от радио до гамма-лучей. Это излучение генерируется заряженными частицами, ускоренными на фронте ударной волны (УВ), сформировавшейся при расширении оболочки остатка в межзвездную среду. Ускоряются частицы за счет диффузионного механизма ускорения. В результате его работы в окрестности фронта УВ формируется популяция ускоренных нетепловых частиц, распределение которых по энергиям хорошо описывается степенным спектром. Излучение этих частиц, вместе с излучением тепловой плазмы оболочки и эжекты, и формирует излучение ОСН. Важным механизмом излучения в ОСН является синхротронное излучение электронов в магнитном поле. Во многих остатках этот механизм генерирует значительную часть наблюдаемого излучения в диапазоне частот от радио до рентгена, а в некоторых он доминирует над излучением тепловой плазмы.

Согласно данным наблюдений, величина магнитного поля в ОСН оказывается больше, чем можно ожидать на основе оценки, учитывающей усиление межзвездного поля при гидродинамическом сжатии на фронте УВ. Кроме того, для работы диффузионного механизма ускорения, в окрестности УВ также должно существовать достаточно сильное турбулентное магнитное поле. Генерация и эволюция этого поля в окрестности фронта УВ может происходить в результате различных процессов: усиление поля на гидродинамическом скачке плотности, нелинейные коллективные плазменные неустойчивости с учетом влияния ускоренных на УВ космических лучей, каскадные плазменные процессы. Если эффект усиления поля на фронте УВ описывается достаточно просто, то полное описание остальных процессов является сложной задачей. Однако, различные процессы генерации и эволюции приводят к различным конфигурациям турбулентного поля, характеризующимся различной степенью пространственной анизотропии случайного поля и различными его преимущественными направлениями. Подобная турбулентная структура, выглядящая похоже на картах интенсивности синхротронного излучения, будет существенно различаться на картах поляризации. Для наблюдений лучше всего подходит рентгеновский диапазон энергий, поскольку частицы, излучающие в нём, сконцентрированы в узкой области вблизи УВ, что позволяет наблюдать магнитное поле непосредственно около её фронта. Деполаризующий эффект Фарадея также отсутствует в рентгеновском диапазоне энергий. Таким образом, ожидаемое новое поколение рентгеновских поляриметров, обладающих хорошей чувствительностью и угловым разрешением, первым из которых должен стать IXPE (NASA), может стать незаменимым инструментом для изучения турбулентных магнитных полей в ОСН.

В работе [1] мы построили модельные карты интенсивности излучения и поляризации ОСН Тихо с помощью пакета XIMPOL, при различных предположениях о механизмах формирования турбулентного магнитного поля и показали, что при времени наблюдения IXPE ~ 1 Мс некоторые механизмы генерации поля приведут к появлению на картах поляризации синхротронного излучения характерных только для них наблюдаемых особенностей. В данной работе мы дополнительно учли зависимость степени поляризации синхротронного излучения в турбулентном поле от энергии, связанную как с тем, что от энергии

частиц зависит занимаемый ими пространственный объём, а значит и конфигурация магнитного поля в которой они излучают, так и с отличием спектра частиц от степенного на энергиях близких к энергии завала спектра. В рамках нашего исследования мы провели симуляции карт поляризации остатка Тихо с помощью пакета XIMPOL, используя различные фильтры по энергии, с целью определить наиболее подходящий энергетический диапазон для изучения турбулентного магнитного поля ОЧН с помощью поляриметра IXPE.

Часть вычислений проводилась на компьютерах МСЦ РАН.

Список литературы

1. Bykov, A. M., Uvarov, Y. A., Slane, P., and Ellison, D. C., «Uncovering Magnetic Turbulence in Young Supernova Remnants with Polarized X-Ray Imaging», *The Astrophysical Journal*, vol. 899, no. 2, 2020. doi:10.3847/1538-4357/aba960.

Analytic approximations to photoabsorption cross sections of once-ionized helium in magnetar atmospheres

Demidov I. V.¹, Potekhin A. Yu.²

¹ИПМаш РАН

²ФТИ им. Иоффе

e-mail: dvsmlville@gmail.com

Magnetars are neutron stars with superstrong magnetic fields, which may exceed ten billion Tesla. In addition, magnetars have relatively high effective temperatures (several million Kelvin). It is expected that hydrogen in a magnetar atmosphere can be depleted due to diffusive nuclear burning, which produces an atmosphere composed of helium. At typical expected conditions in magnetar atmospheres, the helium atoms can be to a large extent once-ionized. On the other hand, the high temperatures cause center-of-mass motion of the helium ions across the magnetic field, which produces nontrivial quantum-mechanical effects.

A charged particle in a magnetic field possesses discrete energy levels associated with particle rotation around the field lines. A bound complex of particles with a nonzero net charge possesses an analogous levels associated with its center-of-mass motion and, in addition, the levels associated with internal degrees of freedom, that is with relative motions of its constituent particles. The center-of-mass and internal motions are mutually dependent, which complicates theoretical studies of the binding energies, radiative transitions and other properties of the complex ions moving in quantizing magnetic fields.

We present practical expressions for the numerical treatment of the helium ion and other hydrogenlike ions moving in strong quantizing magnetic fields, which extend and supplement the previously known results. Furthermore, we derive analytic approximations for the binding energies, oscillator strengths, geometric sizes, and photoionization cross sections of such ions in the limit of an ultra-strong magnetic field. The results can be useful for modelling and interpretation of X-ray spectra formed in the magnetar atmospheres.

Оптимизированная галактическая модель: следствия для астрономии, астрофизики и космогонии

Баренбаум А. А.¹, Титоренко А.С.

¹ИПНГ РАН

e-mail: azary@mail.ru

Оптимизированы параметры последней версии [1] галактической модели геологической цикличности [2], устанавливающей тесную связь главных событий в истории Земли [3] с движением Солнца по галактической орбите и спиральной конструкцией Галактики. Цель работы: 1) оптимизировать параметры орбиты Солнца и галактических рукавов, обеспечивающих наилучшее согласие расчетов с данными Международной стратиграфической шкалы (МСШ) и Общей стратиграфической шкалы (ОСШ) и 2) решить ряд вопросов астрономии, астрофизики и космогонии, ответить на которые невозможно иным способом.

Согласно [1], границы систем ОСШ и МСШ совпадают с временами бомбардировок Земли кометами струйных потоков Галактики, когда Солнце находилось в галактических рукавах. Для таких границ определялись отклонения (x_i) расчетных положений Солнца на орбите от его положений в момент времени данной границы шкалы. На основании (x_i) находилась их среднеквадратичная величина X , служившая критерием точности модели. Оптимальной считалась модель с минимумом X . Удвоенное значение X определяло среднюю ширину рукавов. Для ограничения числа оптимизируемых параметров все параметры, входящие в формулы расчета орбиты Солнца и моментов пересечения им струйных потоков и галактических рукавов, были подразделены на «установленные» и «уточняемые». Установленными считались: 4-х рукавная модель Галактики с параметром закрученности логарифмических рукавов $\kappa = \text{ctg } \mu$, где μ – угол закрутки, вращающаяся с периодом 200 млн лет. Два закрученных в спирали Архимеда струйных потока, истекающих из вращающегося с периодом 50 млн лет ядерного диска. Аномалистический 250 млн лет и сидерический 222.223 млн лет орбитальные периоды Солнца. А также положения Солнца в момент времени нахождения в струйном потоке Orion-Cygnus и в момент пересечения им рукава Scut-Scutum на расстоянии радиуса коротации Галактики $R^* = \rho/\kappa$. Уточняемыми являлись: расстояние Солнца от центра Галактики R_0 , угол закрутки рукавов μ , а также большая полуось a и эксцентриситет e орбиты Солнца, связанные условием $a(1+e) = \rho/\kappa$.

Разработана программа, позволявшая с высокой точностью вычислять времена попадания Солнца в струйные потоки и галактические рукава при указанных условиях задачи. Поиск оптимальных параметров, минимизирующих величину X , автоматизирован. Расчеты проводились при вариации параметров: $7.8 \leq R_0 \leq 9.0$ Кпк с шагом 0.05 Кпк, $70^\circ \leq \mu \leq 90^\circ$ с шагом 0.05° и $0.34 \leq e \leq 0.42$ с шагом 0.05. Большая полуось орбиты и начальный угол поворота линии апсид, а также углы точек выхода рукавов из центрального кольца и струйных потоков из ядерного диска Галактики находились автоматически. Вычислялись также скорость и ускорение движения Солнца по орбите. Выполнено более 100 тысяч расчетов. Оптимизация модели состояла в минимизации величины X по каждому из варьируемых параметров при переборе значений всех других. Получен набор значений параметров, обеспечивших минимум $X \approx 0.4$ Кпк [4]: $R_0 = 8.35 \pm 0.05$ Кпк, $\mu = 77.8 \pm 0.05^\circ$, $e = 0.37 \pm 0.005$ и $a = 8.373$ Кпк. Отметим, что точность определения R_0 и μ недоступна измерениям астрономов.

Показано: 1) орбитальное движение Солнца находится в резонансе с вращением рукавов и ядерного диска Галактики; 2) с момента образования Солнечной системы спиральное строение и период вращения Галактики, а также орбита Солнца не изменились; 3) основные геологические события в истории Земли происходили в рукавах Галактики на удалении R^* от ее центра; 4) рукава Галактики не идентичны – наиболее значимые события, связанные с образованием Солнца и планет, происходили в рукаве Scutum-Sagittarius, тогда как события с меньшей геологической значимостью в рукаве Perseus и рукаве Norma-Perseus+1. В результате решения обратной задачи орбиты Солнца получено аналитическое выражение гравитационного потенциала Галактики, которое свидетельствует, что адекватной физической моделью Галактики является модель звездной изотермической сферы.

Список литературы

1. Баренбаум А.А. Данные геологии и метеоритики как необходимый инструмент разработки адекватной спиральной модели Галактики // Труды ВЕСЭМПГ-2018. М.: ГЕОХИ РАН. 2018. С. 294-298.
2. Баренбаум А.А. Галактоцентрическая парадигма в геологии и астрономии. М.: ЛИБРОКОМ. 2010. 544 с.
3. Баренбаум А.А., Гладенков Ю.Б., Ясаманов Н.А. Геохронологические шкалы и астрономическое время (современное состояние проблемы) // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2002. Т.10. №2. С.3-14.
4. Баренбаум А.А., Титоренко А.С. Галактическая модель геологической цикличности: оптимизация параметров и тестирование по данным геологии и астрономии // Труды ВЕСЭМПГ-2020. М.: ГЕОХИ РАН. 2020. С. 210-215.

Изотопы бериллия в космических лучах из данных космического эксперимента PAMELA

Богомолов Э. А.¹, Васильев Г.И.¹, Менн. В.²,

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Университет Зиген

e-mail: Edward.Bogomolov@gmail.com

Анализ изотопного состава ядер в галактических космических лучах (ГКЛ) в орбитальном эксперименте коллаборации PAMELA позволяет исследовать проблемы происхождения и распространения космических лучей в Галактике. Данные магнитного спектрометра PAMELA, благодаря высокой статистической и методической точности, обеспечили значительный прогресс в исследовании изотопного состава лёгких ядер и впервые позволили оценить вклад в ГКЛ локальных источников от близких (~ 100 пс) недавних ($\sim$ млн. лет) взрывов сверхновых. Изотопный анализ ядер бериллия в ГКЛ до эксперимента PAMELA проведен для $^7\text{Be}/^9\text{Be}$ и $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ отношений только в энергетической области ~ 0.05 - 0.13 ГэВ/нуклон в космических экспериментах IMP 7,8, Voyager 1,2, Ulysses, ACE/CRIS, а для $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ отношения также был измерен с точностью ~ 30 - 40 % в баллонном эксперименте ISOMAX 98 при энергии 0.26 - 1.03 ГэВ/нуклон с использованием времяпролетного анализа и при 1.13 - 2.03 ГэВ/нуклон путем анализа данных черенковских детекторов прибора. Ядра ^{10}Be имеют период полураспада $1.5 \cdot 10^6$ лет, сравнимый с временем жизни ГКЛ, а ядра ^7Be распадаются путем захвата электронов и позволяют

определить концентрацию электронов на пути распространения ГКЛ. В настоящей работе с использованием полётных данных PAMELA 2006-2014 гг. о жёсткости регистрируемых ядер и их скорости (времяпролётный анализ и ионизационные потери в многослойном калориметре прибора) проведен новый анализ изотопного состава ядер бериллия в области энергий ~ 0.1 - 1.3 ГэВ/нуклон. Результаты изотопного анализа ядер бериллия в ГКЛ (спектры ^7Be , ^9Be , ^{10}Be , $^7\text{Be}/^9\text{Be}$ и $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ отношения в зависимости от жёсткости и энергии ядер) в сравнении с существующими данными измерений и расчётами будут представлены.

Список литературы

1. Hams T., Barbier L.M., Bremerich M. et al., Measurement of the abundance of radioactive ^{10}Be and other light isotopes in cosmic radiation up to 2 GeV/nucleon with the balloon-borne instrument ISOMAX, *Astrophys. J.*, V. 611, P. 892-905, 2004;
2. Богомолов Э.А., Васильев Г.И. от коллаборации PAMELA, Изотопы Li и Be в эксперименте PAMELA из полётных данных 2006-2014 гг., *Изв. РАН, сер. физ.*, Т.83, №8, С.1068-1071, 2019;
3. Moskalenko I.V., Strong A.W., Mashnik S.G., Jones F.C., Propagation of Light Elements in the Galaxy, *astro-ph/0306349*.

Структура и вещественный состав Луны на основе построения моделей лунных сейсмических процессов

Кронрод Е. В.¹, Андреев А.О.²

¹ГЕОХИ РАН

²КФУ

e-mail: e_kronrod@mail.ru

Проблема существования лунного ядра возникла после анализа данных сейсмометров космической миссии "Apollo" [1]. Так как колебания, вызванные лунотрясениями, с одной стороны оказались более редкими, чем на Земле, а с другой, сами сейсмограммы лунотрясений искажались действием космических ударников, построить модель структуры Луны для достаточно большой глубины оказалось невозможно [2]. Поэтому не удалось не только подтвердить существование лунного ядра, но даже определить агрегатное состояние вещества и состав Луны. Поэтому для изучения внутренней структуры Луны стали использовать лазерную локацию Луны (ЛЛЛ), данные электромагнитной индукции и теорию физической либрации [3]. Однако использование методов построения моделей лунных сейсмических процессов изменил данную ситуацию. В работах Гарсиа [4] и Вебера [5] на основе анализа отраженных и трансформированных сейсмических волн было обнаружено, что Луна имеет горячее металлическое ядро с диаметром 330-360 км, вокруг которого расположено жидкое ядро с радиусом 240 км. В настоящей работе проведены исследования по подтверждению версии по существованию трехслойной модели Луны. Также с целью исследования внутренней структуры были построены термохимические модели лунной мантии с использованием интегральной взаимной трансформации петрологических, гравитационных и сейсмических параметров [6]. Это требовалось для того, чтобы дополнить геофизические данные для определения термохимического состояния [7]. Моделирование включало интегрирование распределения термохимических градиентов по глубине согласно геофизическим кластерам [8]. Все это позволило

проанализировать термические характеристики и вещественную плотность и построить трехслойную термохимическую модель мантии, а также определить параметры тепловых потоков по поверхности Луны. Работа выполнена в соответствии с грантом Российским фондом фундаментальных исследований №. 17-35-50099 мол_нр,

Список литературы

1. Williams J.G., Boggs D.H., Ratcliff J.T. Lunar fluid core moment // Abstr. 41st Lunar and Planetary Science Conference. – 2010, Abstract No 2336.
2. Taylor S. R. Planetary science: a lunar perspective // Houston: Lunar and Planetary Institute. –1982. – V. 3303.
3. Moons M. Physical libration of the Moon // Celestial mechanics. – 1982. – V. 26, No 2. – pp. 131-142.
4. Garcia R.F. et al. Very preliminary reference Moon model // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2011. – V. 188. – pp. 96-113.
5. Weber R. et al. Seismic Detection of the Lunar Core // Science. – 2011. – V. 331. – pp. 309-312.
6. Kuskov O. L., Kronrod V. A., and Kronrod E. V. Testing the Reference Moon Model in Respect of the Thermal Regime and Chemical Composition of the Mantle: Thermodynamics Versus Seismology // Izvestiya, Physics of the Solid Earth.- 2016. – V. 52, No. 3. – pp. 344–352.
7. Kronrod V. A., Kuskov O. L. Inversion of seismic and gravity data for the composition and core sizes of the Moon // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2011. – V. 47, No 8. – pp. 711-730.
8. Kuskov O. L., Kronrod V. A., Kronrod E. V. Thermo-chemical constraints on the interior structure and composition of the lunar mantle // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2014. – V. 235. – pp. 84-95.

The candidates for Class I methanol masers

Nesterenok A. V.¹

¹Ioffe Institute

e-mail: alex-n10@yandex.ru

The collisional excitation of methanol molecule in non-dissociative magnetohydrodynamic shock wave is considered. The detailed description of the shock wave model is given by [1,2]. All important processes governing the methanol concentration in the shock wave are included in the model. The large velocity gradient approximation is used in the calculations of energy level populations of methanol molecule. The optical depth along the gas flow in the shock is calculated for all methanol transitions that have population inversion and can be masers. We present the list of candidates for methanol masers that have collisional pumping mechanism - Class I methanol masers.

Rerferences

1. Nesterenok A. V., Astrophysics and Space Science, vol. 363, 151, 2018.
2. Nesterenok A. V., Bossion D., Scribano Y. and Lique F., MNRAS, vol. 489, 4520-4529, 2019.

Long-term evolution of coronal holes on the Sun and occurrence frequencies of magnetic storms with gradual commencements

Veretenenko S. V.¹, Ogurtsov M.G.¹, Obridko V.N.², Tlatov A.G.³

¹Ioffe Institute

²IZMIRAN, Troitsk

³Mountain Astronomical Station of the Pulkovo Observatory, Kislovodsk

e-mail: s.veretenenko@mail.ioffe.ru

Long-term evolution of coronal hole (CH) areas on the Sun reconstructed on the basis of H-alpha synoptic charts for the period 1887-2016 was studied, the correlation and wavelet analysis being used. It was found that yearly values of CH areas in the Northern and Southern hemispheres do not reveal a strong link, with the correlation coefficient amounting to ~ 0.54 . Correlations of CH areas with sunspot numbers (SSN) are negative, but increase up to $\sim 0.6-0.7$, if CH areas are taken with a time delay of 4-5 years relative to SSN. Temporal variations of CH areas in the Northern and Southern hemispheres are characterized by dominating ~ 11 -year periodicities; however, they differ significantly on the multidecadal time scale. The wavelet spectra of CH areas in the Southern hemisphere, unlike those in the Northern one, reveal persistent periodicities of $\sim 30-35$ years. Similar periodicities of $\sim 30-35$ years were detected in occurrence frequencies of magnetic storms with gradual commencements (GC). The results of cross-wavelet analysis confirmed a link between variations in occurrence frequencies of GC magnetic storms on the multidecadal time scale and similar variations of coronal hole areas in the Southern hemisphere.

Dark matter as a multi-scale gravity phenomenon: Testing superfluid vacuum theory using galactic rotation curves

Zloshchastiev K. G.¹

¹Institute of Systems Science, Durban University of Technology

e-mail: bozons@gmail.com

Using the logarithmic superfluid model, one can formulate quantum post-relativistic theory of superfluid vacuum, which contains special and general relativity in the “phononic” (low-momenta) limit, but differs at higher momenta [1-6]. According to the theory, an effective gravitational potential is induced by the quantum wavefunction of physical vacuum in a stationary state, while the vacuum itself is viewed as the superfluid described by the logarithmic quantum wave equation. On a galactic scale, the model explains the non-Keplerian behaviour of galactic rotation curves, as well as why their profiles can vary depending on the galaxy. It also makes a number of predictions about the behaviour of gravity at larger galactic and extragalactic scales, which are expected to be seen in the outer regions of large spiral galaxies [6]. We compare the non-flat asymptotics prediction with the furthest data points available for a number of galaxies. Using a two-parameter fit, we do a preliminary estimate; which disregards the combined effect of gas and stellar disc, but is relatively simple and uses minimal assumptions for galactic luminous matter. The data strongly points out at the existence of a crossover transition from flat to non-flat regimes at galactic outskirts and beyond.

References

1. K.G. Zloshchastiev, *Grav. Cosmol.* 16, 288 (2010).
2. K.G. Zloshchastiev, *Acta Phys. Polon. B* 42, 261 (2011).
3. K.G. Zloshchastiev, *Phys. Lett. A* 375, 2305 (2011).
4. T. C. Scott, X. Zhang, R. B. Mann, and G. J. Fee, *Phys. Rev. D* 93, 084017 (2016).
5. K.G. Zloshchastiev, *Int. J. Mod. Phys. A* 35, 2040032 (2020).
6. K.G. Zloshchastiev, *Universe* 6, 180 (2020)

Аномальное ускорение вращения Земли летом 2020-ого года: возможные причины и следствия

Трофимов Д. А.¹, Петров С.Д.¹, Желтова К.В.¹, Кияев В.И.¹

¹СПбГУ

e-mail: dm.trofimov@gmail.com

Мгновенная угловая скорость вращательного движения Земли измеряется как разность между астрономически определяемой продолжительностью суток и интервалом времени в 86400 секунд СИ. Данная разность традиционно называется просто продолжительностью суток или Length of Day (LOD). Известно, что скорость вращательного движения Земли или LOD меняется со временем. Временные изменения LOD включают медленное, почти линейное замедление вследствие приливного трения, строго периодические приливные вариации, полугодовые и годовые колебания метеорологической природы, а также большие колебания нерегулярной природы с характерными временными шкалами от нескольких суток до нескольких десятилетий [1,2]. Природа нерегулярных или аперiodических колебаний до сих пор не ясна. Считается, что их могут вызывать течения в жидком ядре Земли [3] или вариации Солнечного ветра [4].

Однако, в течение последних тридцати лет обозначилась тенденция аномального ускорения вращения Земли или уменьшения LOD. что привело, например, к тому, что с 1999-ого года по 2004-ый, в также с 2017-ого года по настоящее время к Всемирному координированному времени (UTC) не добавлялись секунды координации. Особенно резко вращение Земли ускорилось летом 2020-ого года. Фактически в летние месяцы 2020-ого года Земля вращалась быстрее, чем в середине XIX-ого столетия, то есть данный эффект превысил по своей величине влияние приливного торможения за прошедшие 150 лет.

В настоящей работе выполнен анализ возможных причин и следствий аномального ускорения вращательного движения Земли летом 2020-ого года. Оказалось, что данная аномалия хорошо коррелирует с аномалией зональных ветров, а также индекса геомагнитной активности Dst за тот же период времени. Все три величины, LOD, полярный угловой момент атмосферы и индекс Dst изменялись практически синхронно, с мая по сентябрь 2020-ого года. Это означает, что у всех трех явлений должна быть общая причина. В работе обсуждаются два возможных кандидата, жидкое ядро Земли и Солнечный ветер. Рассматриваются аргументы других авторов в пользу того или иного механизма аномального ускорения вращения Земли, а также выполняется сравнения временных рядов LOD, Dst, углового момента атмосферы и скорости Солнечного ветра. В результате анализа авторы приходят к выводу, что наиболее вероятной причиной рассматриваемой аномалии является временное изменение скорости Солнечного ветра в окрестности Земли. Также в

работе рассматриваются возможные механизмы влияния Солнечного ветра на твердую Землю и атмосферную циркуляцию.

Список литературы

1. Gross, R. 2007. Earth rotation variations - long period. In: Herring T.A., (Ed.), *Treatise on Geophysics*, 11. Elsevier, Oxford, U.K., 239–294, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00057-2>
2. McCarthy, D.D. and Seidelmann, P.K. 2018. *Time: From Earth Rotation to Atomic Physics*. Cambridge University Press, DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108178365>
3. Barlyaeva, T., Bard, E., and Abarca-del-Rio, R. 2014. Rotation of the Earth, solar activity and cosmic ray intensity. *Ann. Geophys.*, 32, 761–771, DOI: <https://doi.org/10.5194/angeo-32-761-2014>
4. Trofimov, D.A., Petrov, S.D. and Movsesyan, P.V. 2020. Signature of geomagnetic superstorm in Earth's rotation speed. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1697 012020, DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1697/1/012020>

Рукотворный астероид 2020 SO: исследования орбиты вернувшегося к Земле фрагмента разгонного блока американской ракеты «Centaur»

Петрова С. Н.¹, Горшанов Д.Л.¹, Девяткин А.В.¹, Русов С.А.¹, Львов В.Н.¹

¹ГАО РАН

e-mail: stalkered@yandex.ru

Объект 2020 SO был открыт в сентябре 2020 г. в обсерватории Халеакала (Гавайи, США) и сразу привлёк внимание астрономов элементами орбиты, близкими к земным, и необычными спектральными характеристиками. Дальнейшие наблюдения позволили сотрудникам NASA JPL отождествить данный объект с частью разгонного блока «Centaur» аппарата Surveyor 2, запущенного 20 сентября 1966 г. В рамках программы изучения сближающихся с Землёй астероидов в Пулковской обсерватории были осуществлены наблюдения 2020 SO во время его двух тесных сближений с планетой (в ноябре 2020г. и январе 2021г.), на основе полученных данных было выполнено уточнение орбиты, а также смоделирована её эволюция. Данное исследование позволяет выдвинуть предположение, что объект, побыв некоторое время квазиспутником Земли, опять будет двигаться по циркулирующей орбите, близко подойдя к Земле уже в 2036 г.

Список литературы

1. L'vov V N *et al* 2012 The use of the Epos software package for research of the Solar System objects *Solar System Research* **46** issue 2 pp 177–9
2. <https://www.nasa.gov/feature/new-data-confirm-2020-so-to-be-the-upper-centaur-rocket-booster-from-the-1960-s>
3. https://www.minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=2020+SO

Поиск переменности жесткого рентгеновского излучения пульсарной туманности в созвездии Парусов

Красильщиков А. М.¹, Быков А.М.¹, Пширков М.С.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²ГАИШ МГУ

e-mail: kra@astro.ioffe.ru

Пульсарные туманности являются эффективными источниками ускоренных частиц и жесткого излучения, в отдельных случаях наблюдаемого до энергий в десятки тераэлектронвольт. Несмотря на десятилетия наблюдений этих объектов во всех доступных диапазонах от радио- до гамма-излучения, многие аспекты их происхождения, строения и эволюции до сих пор остаются загадкой. В частности, вспышки субгигавольтного гамма-излучения Крабовидной туманности, открытые в 2011 году [1, 2], до сих пор не имеют однозначной физической интерпретации. В контексте исследований переменности гамма-излучения Крабовидной туманности, авторы [3] обнаружили, наряду со вспышечной активностью, длительные (на масштабе месяцев) периоды подавления потока излучения этой туманности в диапазоне 0.1-0.3 ГэВ, и короткие (на масштабе дней и недель) периоды, когда его интенсивность падала на порядок величины, а также предложили оригинальную интерпретацию этих явлений в модели синхротронного излучения распределения ускоренных электронов во флуктуирующих магнитных полях. В рамках данной работы выполнен анализ наблюдений жесткого рентгеновского излучения пульсарной туманности в созвездии Парусов с помощью орбитальной гамма-обсерватории INTEGRAL. Целью этого анализа был поиск переменности рентгеновского сигнала туманности, аналогичной переменности гамма-излучения Крабовидной туманности. В результате анализа значимой переменности излучения в диапазонах 20-50 кэВ, 50-100 кэВ и 100-200 кэВ на масштабах недель и месяцев не обнаружено, что может быть использовано для ограничения величины флуктуирующего магнитного поля в туманности и эффективности ускорения частиц в ней.

Список литературы

1. Tavani, M. et al., Discovery of Powerful Gamma-Ray Flares from the Crab Nebula, *Science*, vol. 331, no. 6018, pp. 736, 2011.
2. Abdo, A.A. et al., Gamma-Ray Flares from the Crab Nebula, *Science*, vol. 331, no. 6018, pp. 739, 2011.
3. Pshirkov M.S., Nizamov B.A., Bykov A.M., Uvarov Yu.A. , Gamma-ray flux depressions of the Crab Nebula in the high-energy range, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 496, pp. 5227-5232, 2020.

Piezostack deformable mirror with high technological effectiveness

V. V. Toporovsky^{1,2}, A.V. Kudryashov^{1,2}, V.V. Samarkin¹, A.L. Rukosuev¹, A.A. Panich³, A.I. Sokallo³, A. Yu. Malykhin³

¹Institute of Geosphere Dynamics RAS, Moscow, Russia

²Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

³Institute of High Technologies and Piezotechnics, Southern Federal University, Russia

e-mail: topor@activeoptics.ru

During the propagation of the high-power laser beam along optical trace wavefront aberrations are increasing. Main reason of this effect is atmospheric turbulence, which is originated from non-uniformity of the refractive index, that is caused by heating of air masses and ground surface. To compensate for wavefront distortions adaptive optics methods and devices are used [1]. The main element of any adaptive optical system is deformable mirror (wavefront corrector). Depending on the application, a number of factors should be taken into account in the development of wavefront correctors: the size of the reflecting area of the mirror, the principle of operation of the control elements of the wavefront corrector, the distance between the control elements, the number of control elements (the number of which depends on the desired accuracy of the distorted wavefront correction), the presence of cooling, maximum amplitude of mirror surface displacement under the action of a control element, accuracy of wavefront reproduction by a deformable mirror, operating speed of the mirror, dimensions and weight of the device, structural reliability[2].

Alongside with bimorph deformable mirrors [3,4], MEMS-mirrors [5] and voice-coil actuators deformable mirrors [6], stacked-array or piezostack deformable mirrors (PDM) are effective tool for compensation of aberrations of incident wavefront [7]. As a key element of the adaptive optical system this device defines performance of the system. PDMs are distinguished for their high reliability, operational speed and stroke [8]. Conventional PDM consists of a thick basement substrate with the glued piezostack columns composed of the set of thin monolayer piezoceramic disks sintered with each other. A thin mirror substrate is glued to other end of the piezo actuators. The outer surface of this substrate is deposited with a multilayer dielectric or metal reflecting coating. Actuators are either simply multilayer piezoceramic stacks, or these stacks in a metal housing, to which springs are mounted for preliminary mechanical loading. Local deformation of the substrate surface occurs due to an increase (or decrease) of the actuator length due to the inverse piezoelectric effect when applying voltage.

To reduce the diameter of the mirror and thereby increase the spatial resolution of the deformable mirror we propose to use so-called piezoceramic combs with size 24*15*4 mm for assembling PDMs. The upper part of the comb contains high number of piezoplates sintered to each other, the lower part serves as a thick base to support the matrix of piezoceramic stacks. Then each comb was sawn on individual actuators with size 4*4 mm. By combining piezoceramic combs on the special rigid base made of piezoceramic material we can assemble PDM with desirable configuration of control elements. We chose the net of actuators with 10*10 pcs.

We developed PDM with 10*10 control elements with rectangular grid of actuators. By applying voltages with value 100 V per one actuator the maximal local deformation (stroke) of such a wavefront corrector can be calculated. The deflection of the mirror at 100 V was equal 1.35 μ , so stroke of the mirror is close to 5 microns. which allows to correct for aberrations up to 5 microns.

Also, the first resonant frequency of the mirror was measured. The procedure of the measuring is considered in previous work [9]. It was equal to 7.6 kHz. It means that such mirror can operate in closed-loop regime of the adaptive optical system with speed about 800 Hz.

Such wavefront correctors could be used in different scientific realms, mainly in transferring laser energy through distance due to rigid design and simplicity of construction.

References

1. Babcock, H. W., "The possibility of compensating astronomical seeing," Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 65, No. 386 (1953).
2. Madec, P.-Y., "Overview of deformable mirror technologies for adaptive optics and astronomy," Proc. SPIE 8447, 844705 (2012).
3. Kudryashov, A., Alexandrov, A., Rukosuev, A., Samarkin, V., Galarneau, P., Turbide, S., Châteauneuf, F., "Extremely high-power CO₂ laser beam correction," Applied Optics Vol. 54, No. 14 (2015).
4. Toporovskiy, V., Kudryashov, A., Samarkin, V., Sheldakova, J., Rukosuev, A., Skvortsov, A., Pshonkin, D., «Bimorph deformable mirror with a high density of electrodes to correct for atmospheric distortions», Appl. Opt. 58(22), 6019-6026 (2019).
5. Aguayo, E.J., Lyon, R., Helmbrecht, M., Khomusi, S., "FEM correlation and shock analysis of a VNC MEMS mirror segment," Proc. SPIE 9143, 91435C (2014)
6. Enrique J. Fernández, Laurent Vabre, Boris Hermann, Angelika Unterhuber, Boris Povazay, and Wolfgang Drexler, «Adaptive optics with a magnetic deformable mirror: applications in the human eye», Opt. Express 14, 8900-8917 (2006)
7. Toporovsky, V., Kudryashov, A., Samarkin, V., Sheldakova, J., Rukosuev, A., «Wide aperture high resolution stacked-actuator deformable mirror for high power laser beam correction», Proc. SPIE 10898, 1089809 (2019).
8. Toporovskiy, V., Kudryashov, A., Samarkin, V., Sheldakova, J., Rukosuev, A., «Water-cooled stacked-actuator deformable mirror for atmospheric applications», Proc. SPIE 11135, 111350A (2019).
9. Toporovsky, V.V., Kudryashov, A.V., Samarkin, V.V., Rukosuev A. L., Nikitin A. N., Sheldakova Yu. V., Otrubyannikova O. V., "Cooled Stacked-Actuator Deformable Mirror for Compensation for Phase Fluctuations in a Turbulent Atmosphere," Atmospheric and Oceanic Optics 33, 584–590 (2020).

Структура МГД течений в приосевой подветренной зоне двухторовой туманности пульсара

Пономарёв Г. А.^{1,2}, Левенфиш К. П.¹, Петров А. Е.¹

¹ФТИ

²СПбПУ

e-mail: georgy.ponomaryov@gmail.com

В рамках численной релятивистской МГД модели двухторовой пульсарной туманности исследованы структура, скорость и замагниченность течений в области формирования джетов - релятивистских струйных выбросов вдоль оси туманности. Показано, что при движении туманности с транзвуковой скоростью, структура течений в этой зоне существенно различна в наветренной и подветренной полусферах туманности. Это различие позволяет с хорошей достоверностью объяснить особенности в морфологии и динамике двух джетов, видимых на рентгеновских изображениях двухторовой туманности в созвездии Парусов (туманности Вела). Обнаружено формирование мелкомасштабных замагниченных вихрей вблизи подветренной воронки ударной волны остановки

пульсарного ветра. Исследовано воздействие этих вихрей на основание подветренного джета и на приосевой участок фронта ударной волны. Показано, что период циркуляции этих вихрей в МГД модели туманности Вела сопоставим с периодом вариаций яркости, формы и положения яркого основания джета, а также ближайших к нему мелких структур туманности.

Большой мержинг галактик в многокомпонентных численных моделях: перемешивание и потери газа

Хоперсков А. В.¹, Титов А.В.¹, Храпов С.С.¹

¹ВолГУ

e-mail: khoperskov@volsu.ru

Детально рассматривается процесс столкновения двух многокомпонентных галактик, основываясь на численном моделировании динамики гравитирующих газа, звезд и темной массы. Для решения уравнений движения газовой компоненты мы используем метод сглаженных частиц. Описание бесстолкновительных компонент основывается на модели N-тел [1,2]. Вычисление гравитационных сил производится как с использованием приближенного иерархического алгоритма Treecode, так и прямого метода суммирования гравитационного вклада от всех частиц, который обеспечивает точное решение. Такой подход позволяет тестировать различные модели и оценивать возникающие погрешности, связанные с вычислением гравитационных сил и конечным числом частиц в каждой из компонент. Оба метода расчета гравитации программно реализованы в виде параллельных кодов для графических ускорителей Nvidia Tesla, что позволяет строить численные модели вплоть до 50 млн частиц.

Проведены расчеты для серий вычислительных экспериментов с различными наборами физических характеристик. К числу варьируемых параметров относятся относительные массы компонент, размеры галактик, относительные скорости, радиальные профили плотности вещества, прицельные параметры. Первоначально равновесные сфероидальные модели галактик находятся на балансе гравитационной и сил “давления”. Моделирование столкновений с различным прицельным параметром показало, что происходят сложные процессы, включающие формирование ударных волн, рассеяние газа, связанное с выходом из гравитационных ям галактик. Определены характеристики систем и окружающей среды после взаимодействия. Представляют интерес также количественные оценки взаимного обмена газом между галактиками, что удастся проследить благодаря использованию метода частиц при моделировании динамики газовых компонент. Эти оценки сильно зависят от параметров сталкивающихся объектов.

Список литературы

1. Khrapov S.S., Khoperskov A.V., Korchagin V.I. Numerical Modelling of the Dynamics of the Galactic Halos in the Colliding Galaxies // Bulletin of the South Ural State University Series-Mathematical Modelling Programming & Computer Software, 2019, vol. 12, no. 2, pp. 123-135.
2. Khrapov S.S., Khoperskov S.A., Khoperskov A.V. New features of parallel implementation of N-body problems on GPU // Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software, 2018, v.11, no.1, p.124-136.

Изменение солнечной активности на основе радиоуглеродных данных и вариации климата в интервале 8000–1000 лет до нашей эры

Дергачев В. А.¹, Кудрявцев И.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: v.dergachev@mail.ioffe.ru

Космогенные изотопы, как хорошо известно, образуются в атмосфере Земли под воздействием космических лучей, модулируемых в солнечной системе межпланетным магнитным полем. Это поле изменяется вместе с изменением во времени активности Солнца. Поэтому на основе измерений содержания этих изотопов в природных архивах можно изучать солнечную активность в прошлые столетия и тысячелетия. Традиционно такое изучение производилось только для Голоцена, при этом в большинстве работ не учитываются изменения в углеродной обменной системе, связанные с изменением земного климата. Необходимость учета таких изменений была отмечена в работе [1], так как они приводят к перераспределению углерода между природными резервуарами (атмосферой, биосферой, океаном). В работах [2,3] было продемонстрировано, что изменение климата во время Малого Ледникового Периода необходимо учитывать при реконструкции скорости генерации изотопа ^{14}C в атмосфере. В работе [4] была построена модель, позволяющая изучать изменение активности Солнца на временном интервале 17000-5000 лет до нашей эры с учетом изменения земного климата. Этот временной промежуток характеризовался переходом от последнего ледникового периода к Голоцену. Во время Голоцена также происходили климатические изменения, в частности, менялась глобальная температура, изменялось содержание углекислого газа в атмосфере Земли. В данном докладе рассматриваются изменение активности Солнца, реконструкция скорости генерации изотопа ^{14}C на временном интервале 8000 – 1000 лет до нашей эры с учетом влияния изменений земного климата. Проводится сопоставление вариаций активности Солнца и климата Земли.

Список литературы

1. Дергачев В.А., Остряков В.М. // Труды 6 всесоюзного совещания по проблеме «Астрофизические явления и радиоуглерод». Тбилиси 13-15 октября 1976г. Тбилиси, 1978. С.177
2. Kudryavtsev I.V. et al. // *Geochronometria*, 2014, V. 41, No.3, P. 216
3. Kuleshova A.I. et al. // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015, V. 55, No.8, P. 1071
4. Kudryavtsev I.V. et al. // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2018, V. 58, No.7, P. 925

Моделирование орбитального движения пылевых частиц в процессе сублимации около белого карлика G29-38

Кенжебекова А. ¹, Шестакова Л.И. ²

¹Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби

²Астрофизический институт имени В.Г. Фесенкова

e-mail: *akm_74_08@mail.ru*

Проведены расчеты температурного баланса и орбитальной эволюции силикатных и графитовых пылевых частиц в области сублимации около белого карлика G29-38 с температурой поверхности около 11600K [1]. Все практически важные параметры, характеризующие взаимодействие сферических пылевых частиц с излучением, рассчитаны по теории Ми [2] на основе комплексных индексов рефракции ($n + ik$). Для исследования выбраны два распространенных в межзвёздной среде материала силикатного и графитового состава. Темп сублимации (испарения) задается температурой нагрева пылевых частиц в зависимости от расстояния до звезды, параметров материала и радиусов пылинок в пределах от 0.01 мкм до 100 мкм. Учитывалось влияние давления радиации и также эффекта торможения Пойнтинга-Робертсона на динамику пыли. В расчётах предполагается, что частицы срываются с родительских тел, движущихся по круговым орбитам. Расчёты выполнены по теории, изложенной в [3].

Согласно нашим расчетам, границы зон сублимации около белого карлика G29-38 для силикатных частиц субмикронных размеров $r_{\text{dust}} \leq 0.2$ мкм расположены на больших расстояниях, превышающих 200 радиусов звезды. Более крупные частицы радиусами от 0.25 мкм до 100 мкм испаряются на расстояниях от 198 до 42 радиусов звезды. Значительно ближе могут приблизиться частицы графита до момента полного испарения: до 12.5 звёздных радиусов. Особенность поведения графитовых частиц состоит в том, что граница зоны сублимации для них выражена более чётко: частицы радиусами от 0.4 до 100 мкм испаряются в зоне 12-13 радиусов звезды, что близко к величине внутренней границы зоны сублимации $0.18R_{\text{Sun}} = 13.8R_{\text{star}}$, приведённой в работе [1]. Можно сделать вывод, что во внутренней зоне пылевого диска около звезды G29-38 преобладают частицы со свойствами графита.

Список литературы

1. T. von Hippel, M. J. Kuchner, M. Kilic, F. Mullally, W. T. Reach and D. E. Winget. The new class of dusty DAZ white dwarfs, *The Astrophysical Journal*. 662:544-551, 2007
2. C. F. Bohren, D. R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, Wiley, New York, 1983
3. L. I. Shestakova, B. I. Demchenko, A.V. Serebryanskiy, On the orbital evolution of dust grains in the sublimation region around WD1145+017, *MNRAS* Vol.487, 3935–3945, 2019

Динамика ленгмюровских волн при индуцированном рассеянии на тепловых электронах солнечной плазмы

Кудрявцев И. В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: igor.koudriavtsev@mail.ioffe.ru

В докладе рассматривается эволюция спектров и угловых распределений ленгмюровских волн при их индуцированном рассеянии на тепловых электронах солнечной плазмы. Известно, что ленгмюровские волны могут возбуждаться в солнечной плазме быстрыми электронами, которые ускоряемыми во время солнечных вспышек. Эти плазменные волны порождают в солнечной плазме радиоизлучение, регистрируемое на Земле радиотелескопами в виде радиовсплесков. Такое радиоизлучение несет информацию о происходящих на Солнце физических процессах, происходящих при преобразовании энергии магнитных полей в тепловую энергию плазмы, энергию ускоренных частиц и электромагнитного излучения. Спектры и угловые распределения ленгмюровских волн оказывают существенное влияние на взаимодействие быстрых электронов с этими волнами при распространении электронов в солнечной плазме, что будет находить отражение в характеристиках жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек. Спектры и угловые распределения ленгмюровских волн также влияют и на характеристики генерируемого этими волнами радиоизлучения. Однако в большинстве работ рассматривается приближения одномерного или изотропного распределения ленгмюровских волн. Поэтому встает необходимость изучения динамики плазменной волн с учетом их углового распределения, которое может меняться во времени, в том числе при индуцированном рассеянии тепловых электронах плазмы.

Подробное исследование спектральных задержек в гамма-всплеске GRB 190114C в диапазоне энергий 5 кэВ – 2 МэВ.

Драниевич В. А.¹, Дмитриев П.Б.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: v.dranevich@mail.ioffe.ru

«Спектральные задержки» кривых блеска γ -всплесков определяются как разность во времени прихода фотонов одного и того же импульса излучения в разных энергетических каналах регистрирующего прибора. Этот параметр может характеризовать как механизм генерации излучения источником, так и физические условия распространения излучения от источника до наблюдателя.

В настоящей работе по данным прибора Gamma-ray Burst Monitor (детекторы NaI) космической обсерватории Fermi Gamma-ray Space Telescope получена зависимость времени прихода фотонов от их энергии для γ -всплеска GRB190114C. Показано, что эта зависимость обусловлена, в основном, «задними» фронтами импульсов световых кривых. «Спектральные задержки» «передних» фронтов импульсов малы и сопоставимы по величине с ошибками измерений. В области энергий от 6 до 20 кэВ наблюдается аномалия, связанная, по-видимому, с квазитепловым излучением источника.

Влияние темпа фотоионизации позитрониев на нагрев полярной шапки радиопульсара J0250+5854

Барсуков Д. П.¹, Воронцов М.В.², Морозов И.К.¹, Попов А.Н.¹, Матевосян А.А.²

¹ФТИ им А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

e-mail: bars.astro@mail.ioffe.ru

Пульсар J0250+5854 имеет период вращения $P = 23.5$ сек и является наиболее медленно вращающимся среди одиночных радиопульсаров. Мы рассматриваем влияние темпа фотоионизации позитрониев и величины мелкомасштабного магнитного поля в модели смещенного диполя на обратный ток позитронов во внутреннем зазоре и связанный с ним нагрев полярной шапки пульсара. Пульсар рассматривается в модели "внутреннего зазора" со свободным истечением частиц с поверхности нейтронной звезды. Учитывается только рождение электрон-позитронных пар при поглощении квантов изгибающего излучения в магнитном поле. При этом предполагается, что часть пар может рождаться в связанном состоянии -- в виде позитрониев, которые затем фотоионизируются тепловыми фотонами с поверхности звезды.

Вращение солнечной короны по данным мягкого рентгеновского излучения Солнца в течение 22, 23 и 24 циклов солнечной активности

Дмитриев П. Б.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: paul.d@mail.ioffe.ru

Дифференциальный характер вращения солнечной фотосферы в настоящее время не вызывает никакого сомнения. Еще в середине прошлого столетия по зонам солнечных пятен была выведена формула вращения горизонтальных слоев фотосферы в зависимости от гелиошироты. Что касается солнечной короны, то существует двоякое мнение: с одной стороны считается, что ее вращение постоянно и не зависит от гелиошироты, с другой – что ее вращение в начале роста солнечного цикла носит дифференциальный характер, а на стадии его спада она вращается как «твердое тело».

Мягкое рентгеновское излучение (МРИ) Солнца исходит от горячих петель магнитных активных областей, основы которых уходят под фотосферу, а вершины расположены в короне. Горячая плазма, заполняющая магнитные петли, является источником «квазитеплого» рентгеновского излучения, которое формирует медленно меняющуюся (десяtkи дней) «фоновую» составляющую МРИ Солнца, а происходящие в этих структурах скоротечные (минуты, часы) солнечные вспышки дают резкое увеличение потока МРИ, которое на несколько порядков превышает «фоновое». Поэтому вариации потока МРИ можно использовать в качестве индикатора вращения солнечной атмосферы, от уровня хромосферы до верхних слоев короны, где и генерируется, в основном, рентгеновское излучение Солнца в течение существования сложных магнитных структур активных областей с происходящими в них вспышками.

Данные спутников серии GOES (Geosynchronous Operational Environmental Satellites), которые осуществляют патрульное измерение МРИ Солнца на протяжении последних трех циклов солнечной активности в диапазонах длин волн 1-8 Å и 0.5-4 Å, дают возможность исследовать осцилляции потока этого излучения и судить по ним о возможном дифференциальном вращении солнечной короны.

Для решения выше сформулированной задачи на основе разработанного метода объединения многочисленных разрозненных во времени однотипных рядов измерений в единый средневзвешенный ряд по данным спутников серии GOES был синтезирован единый ряд посуточных данных МРИ Солнца на протяжении последних трех одиннадцатилетних солнечных циклов, а затем из него были выделены «вспышечная» и «фоновая» составляющие. Обе эти составляющие при помощи метода построения комбинированной спектральной периодограммы были исследованы на предмет наличия квазипериодических осцилляций на различных стадиях солнечных циклов. Часть значений выявленных квазипериодов может быть объяснена как синодическим, так и сидерическим вращением Солнца, а остальные отражают средние времена «жизни» активных образований солнечной атмосферы (групп солнечных пятен, факельных площадок, взаимодействующих корональных петель).

Анализ изменения значений параметров выявленных квазипериодических компонентов в зависимости от времени на протяжении солнечных циклов путем построения выборочной оценки нормированной спектральной плотности исследуемых данных в скользящем временном окне величиной до года позволил сделать вывод о возможном дифференциальном вращении солнечной короны на протяжении всех трех циклов солнечной активности.

Формулировка варианта теории вложения Фаддеева в виде ОТО с дополнительной материей

Купцов С. С.¹, Пастон С. А.¹

¹СПбГУ

e-mail: s1t2a3s4@yandex.ru

Исследуется основанный на идеях теории вложения [1] вариант описания гравитации, предложенный Л.Д. Фаддеевым в работе [2]. В этой теории независимой переменной является неквадратный репер - обобщение привычного репера тетрадного формализма ОТО, который имеет ясный геометрический смысл в рамках теории вложения. Теория Фаддеева, в отличие от ОТО и теории вложения, допускает наличие кручения. При этом часть уравнений движения сводится к равенству нулю действия некоторой квадратной матрицы на составленный из компонент кручения вектор, что в случае невырожденности матрицы приводит к отсутствию кручения [2]. Таким образом, возникает класс решений теории, соответствующий нулевому кручению. Известно, что в этом классе теория полностью эквивалентна ОТО, т.е. все оставшиеся уравнения сводятся к уравнениям Эйнштейна.

Однако теория допускает существование решений, соответствующих ненулевому кручению. В этом случае для чистой гравитации метрика (как функция репера) уже не будет удовлетворять вакуумным уравнениям Эйнштейна, но может считаться удовлетворяющей уравнениям Эйнштейна с некоторым тензором энергии-импульса $T_{\mu\nu}$ "дополнительной" фиктивной материи. Переход от ОТО к варианту теории вложения Фаддеева

может оказаться эффективным для решения загадки темной материи и энергии, если свойства этой дополнительной материи окажутся близкими к известным из наблюдений свойствам темной материи или энергии. Тогда их можно пытаться интерпретировать не как эффект наличия каких-то физических полей или частиц, а как результат отличного от ОТО геометрического описания теории. В рамках обычной теории вложения в этом направлении был достигнут некоторый прогресс [3], однако не исключено, что подход Фаддеева окажется более эффективным.

Для удобства анализа свойств дополнительной материи мы переформулируем теорию Фаддеева в классически эквивалентном виде как ОТО с дополнительными полями, которые и описывают эту материю. Такой подход ранее успешно применялся для миметической гравитации [4] и обычной формулировки теории вложения [5]. Мы обсуждаем различные эквивалентные варианты выбора действия теории и выводим соответствующие им уравнения движения. Для наиболее удобной формулировки мы анализируем свойства решений полученных уравнений движения в классе функций, соответствующих слабому гравитационному полю. Наиболее интересным является выделение решений в случае, когда дополнительная материя оказывается пылевидной и нерелятивистски движущейся (как это ранее было сделано для обычной теории вложения [3]), поскольку в этом случае её свойства согласуются с известными свойствами холодной темной материи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 20-01-00081

Список литературы

1. T. Regge, C. Teitelboim, “General relativity`a la string: a progress report”, in *Proceedings of the First Marcel Grossmann Meeting, Trieste, Italy, 1975*, edited by R. Ruffini, 77–88, North Holland, Amsterdam, 1977, arXiv:1612.05256.
2. Л. Д. Фаддеев, ТМФ, 166:3 (2011), 323–335, arXiv:0906.4639, arXiv:0911.0282, arXiv:1003.2311.
3. S. A. Paston, *Universe* 6:10 (2020), 163, arXiv:2009.06950.
4. A. V. Golovnev, *Physics Letters B*, 728 (2014), 39 – 40, arXiv:1310.2790.
5. S. A. Paston, A. A. Sheykin, *The European Physical Journal C*, 78:12 (2018), arXiv:1806.10902.

Processes of solar wind-magnetosphere-ionosphere interaction and geomagnetically induced currents in the high voltage transmission systems

P.A. Sedykh¹, N.P. Kononov¹

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет

e-mail: pvlsd@mail.ru

The global atmospheric electric circuit is connected through a high-altitude ionosphere, and magnetospheric disturbances can effect on the stationary and changes of an atmospheric electric field. Process of electric field penetration from the solar wind is complicated; this phenomenon is nonlinear. Plasma convection generation in the geomagnetosphere is associated with processes at the bow shock front[1]. A combined action of plasma convection and pitch-angle diffusion of electrons and protons lead to the formation of plasma pressure distribution in the geomagnetosphere. As it is known, bulk currents are associated to plasma pressure distribution in the magnetosphere. Divergent of these bulk currents gives a spatial distribution of FACs, i.e.

magnetospheric sources of ionospheric current systems. Field-aligned currents (FACs) connect the magnetosphere and the ionosphere into a uniform electric circuit[2].

Geomagnetically induced currents represent a significant challenge for society on a stable electricity supply. Space weather activates global electromagnetic and plasma processes in the near-Earth environment. Understanding the geomagnetic hazard to power systems requires the ability to model the geomagnetically induced currents produced in a power network. Accurate modeling of the geomagnetically induced current produced during real space weather events requires including the appropriate system characteristics, the global electric circuit of processes of solar wind-magnetosphere-ionosphere interaction, magnetic source fields, and Earth conductivity structure. The suggested equivalent electric circuit scheme of the interaction[1-4] may be analyzed for understanding of the mechanism of geomagnetic activity effect on complex high voltage transmission systems.

Список литературы

1. Sedykh P.A. Bow shock: Power aspects. Nova Science Publishers, Inc. In Horizons in World Physics ed. by Albert Reimer. NY 11788 USA. P.53-73. 2015.
2. Sedykh P.A. Global Electric Circuit: Solar Wind, Magnetosphere, Ionosphere, Atmosphere. // Sun and Geosphere, SG. v14. No1. -pp-61-69. ISSN 2367-8852. DOI: 10.31401/SunGeo.2019.01.09. 2019.
3. Sedykh, P.A. Space Weather. Lambert Academic Publishing. EU. 153 pages, ISBN 978-620-2-66709-8. 2020.
4. Sedykh P.A. Power aspects of processes at the piston shock region. // 33rd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio. URSI GASS, Rome, Italy, N9232026. DOI: 10.23919/URSIGASS49373.2020.9232026 . 2020.

Самосогласованная модель Монте-Карло ускорения частиц релятивистскими ударными волнами

Осипов С. М.¹, Быков А.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: osm2004@mail.ru

Актуальной проблемой в астрофизике является исследование процессов ускорения частиц и усиления магнитных полей ударными волнами, возникающими при столкновении мощного релятивистского течения с окружающей средой. Такие течения возникают, например, при распространении пульсарного ветра, при взрыве релятивистских сверхновых звезд, образовании гамма-всплесков. Данные объекты являются мощными источниками нетеплового излучения. Релятивистские ударные волны в астрофизических объектах часто являются бесстолкновительными. Частицы ускоряются до высоких энергий такими ударными волнами по механизму Ферми первого порядка, при их рассеянии магнитными флуктуациями. Функция распределения ускоренных частиц обладает значительной анизотропией в предфронте релятивистской бесстолкновительной ударной волны. Данная анизотропия приводит к развитию плазменных неустойчивостей, усиливающих магнитные поля. Так же давление ускоренных частиц модифицирует предфронт ударной волны. Таким образом, задача об ускорении частиц релятивистской бесстолкновительной ударной волной является существенно нелинейной, так как распространение частиц определяется магнитными полями, а усиление полей функцией распределения ускоренных

частиц. Мы развиваем стационарную самосогласованную модель Монте-Карло ускорения частиц релятивистскими ударными волнами, учитывающую усиление магнитных полей плазменными неустойчивостями. Модель позволяет выполнить построение функции распределения частиц, профилей течения плазмы и спектров магнитных флуктуаций в итерационной схеме, реализующей выполнение законов сохранения импульса и энергии вблизи фронта ударной волны. PIC расчеты, опирающиеся на первые принципы, позволяют решать данную задачу более точно. Расчеты методом PIC имеют очень существенные ограничения по размеру расчетного пространства из-за ограниченности вычислительных мощностей. Мы сравниваем результаты PIC расчетов и результаты нашего моделирования Монте-Карло, что позволяет установить параметры неустойчивостей необходимые для использования в модели Монте-Карло. После калибровки модели Монте-Карло с результатами PIC, расчетные пространственные области модели Монте Карло могут быть расширены на реальные масштабы течений исследуемых астрофизических объектов, недоступные для PIC-моделирования.

Численное моделирование поглощений в линии метастабильного гелия: случай транзита HD-189733b

Руменских М. С.¹, Шайхисламов И. Ф., Березуцкий А. Г.

¹ИЛФ СО РАН

e-mail: marina_rumenskikh@mail.ru

Немалая часть известных на данный момент экзопланет вращается очень близко к родительской звезде, на расстоянии порядка 0,05 астрономических единиц. Из-за столь близкого расположения верхняя планетарная атмосфера ионизируется и нагревается, образуя высокоскоростное, встречное по отношению к звездному ветру течение, преодолевающее гравитацию планеты. Транзитная спектроскопия такой атмосферы позволяет получить уникальную информацию о химическом составе планеты, о параметрах звездного ветра, о магнитном поле и т.д. Кроме того, метод транзитной спектроскопии позволяет более подробно изучить эффекты, происходящие при взаимодействии звездного и планетарного ветров. Основные результаты в области транзитной спектроскопии были получены с использованием линии Ly α . Освоение новых спектральных диапазонов в транзитной спектроскопии позволяет получать данную информацию более эффективно и делает ее более детальной. Особенно, когда это касается не резонансных линий, не подверженных влиянию межзвездной среды и помехам со стороны геокорональной эмиссии, например, линия метастабильного гелия 2s(3S)-2p(3P) 1083 нм. Данные линии возможно наблюдать посредством наземных телескопов, что делает возможным их длительное и детальное измерение

Использование линии поглощения триплетного гелия He-I $\lambda=10830$ Å для исследования атмосферы экзопланет типа горячих Юпитеров методом транзитных измерений было предсказано в работе (Seager&Sasselov, 2000) для планеты HD-209458b. Основное преимущество использования данной линии состоит в том, что она не подвержена влиянию межзвездной среды и может наблюдаться с помощью наземных телескопов. Недавно, в статье (Oklopčić & Hirata 2018), была описана численная одномерная модель транзита в этой линии для наиболее изученных экзопланет GJ-436b и HD-209458b. Наблюдения в

линии метастабильного гелия было обнаружено для ряда экзопланет, например для HD-189733 (Salz, 2018; Guilluy, 2020).

В настоящей работе проводилось исследование влияния радиационного давления звезды, концентрации и скорости звездного ветра, доли ионизирующего коротковолнового излучения и относительной концентрации метастабильного гелия He/H на поглощение в спектральных линиях метастабильного гелия и $\text{Ly}-\alpha$ для системы экзопланеты HD-189733b и ее родительской звезды. Используемый метод – численное моделирование. Для этого был использован МГД 3Д код с учетом процессов фотоионизации, рекомбинации и плазмфотохимии водородных и гелиевых компонент, результатами работы которого, помимо профилей различных характерных параметров системы, являются транзитные кривые планет типа «горячих юпитеров» при различных параметрах модельной системы.

Исследование выполнено в рамках проекта "Исследование звезд с экзопланетами" по гранту Правительства РФ для проведения научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (соглашение N 075-15-2019-1875), а также в рамках проекта РНФ № 18-12-00080.

Список литературы

1. Seager S., Sasselov D. D. Theoretical transmission spectra during extrasolar giant planet transits //The Astrophysical Journal. – 2000. – Т. 537. – №. 2. – С. 916.
2. Oklopčić A., Hirata C. M. A new window into escaping exoplanet atmospheres: 10830 Å line of helium //The Astrophysical Journal Letters. – 2018. – Т. 855. – №. 1. – С. L11.
3. Salz M. et al. Detection of He I $\lambda 10830$ Å absorption on HD 189733 b with CARMENES high-resolution transmission spectroscopy //Astronomy & Astrophysics. – 2018. – Т. 620. – С. A97.
4. Guilluy G. et al. The GAPS programme at TNG XXII. The GIARPS view of the extended helium atmosphere of HD189733 b accounting for stellar activity //arXiv preprint arXiv:2005.05676. – 2020

Эффект поглощения гамма-квантов от далеких источников тормозным излучением горячего газа в скоплениях галактик

Попов А. Н.¹, Бобашёв С. В.¹, Иванчик А. В.¹, Барсуков Д. П.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: alexander.popov@mail.ioffe.ru

В работе рассматривается поглощение высокоэнергичных фотонов при взаимодействии с фотонами теплового тормозного излучения водородно-гелиевой плазмы в скоплениях галактик с образованием электрон-позитронных пар и его возможное влияние на искажение спектра далеких источников.

Данным эффектом можно пренебречь в области энергий $E > 100$ ГэВ, где доминирует взаимодействие с фотонами внегалактического оптического излучения и реликтового излучения. Однако данный процесс может доминировать в диапазоне 100 МэВ - 100 ГэВ.

Рассматриваются только модели со сферически симметричным распределением концентрации и температуры газа в скоплениях. Показано, что для небольших скоплений оптическая толща составляет 10^{-8} - 10^{-5} . Проводится сравнение результатов с оптической толщиной за счет рассеяния на свободных электронах из [1].

Список литературы

1. С. А. Гребенев, Р. А. Сюняев, Письма в астроном. журн., том. 45, 835-908, 2019 г.

Восстановление параметров солнечной активности по глубинному профилю изотопа ^{14}C и других космогенных радионуклидов в лунном грунте.

Фролов Д. А.¹, Павлов А.К.², Остряков В.М.¹, Васильев Г.И.², Кудрявцев И.В.², Константинов А.Н.¹, Дергачев В.А.²

¹СПбПУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: frolov2.da@edu.spbstu.ru

Галактические космические лучи (ГКЛ) вызывают ядерные реакции в лунных породах и атмосфере Земли и приводят к образованию и накоплению долгоживущих радиоактивных изотопов в лунных породах и реголите. Глубинный профиль ^{14}C ($T_{1/2} = 5700$ лет) и других радионуклидов был измерен в керне Apollo 15 с хорошей точностью. Накопление космогенных радионуклидов в пробе происходит в течение длительного времени, при этом порядка 90% измеренной активности радионуклида определяется облучением в течение 3 периодов полураспада, что для радиоуглерода превышает 15000 лет. Поток и спектр ГКЛ в Солнечной системе модулируются солнечной активностью. Стандартный метод фитирования экспериментальных данных использует подход [1], где в качестве свободного параметра принимается средний постоянный модулирующий потенциал Φ в течение всего периода накопления радионуклидов до достижения равновесного состояния. Однако, большие вариации потока и спектра ГКЛ имеют место и в долгосрочном масштабе, поэтому в данной работе мы попытались использовать реконструкцию $\Phi(t)$ на шкале времени более 15000 лет, которая основана на существующих данных о концентрации ^{14}C в годовых кольцах деревьев [2]. Проведен расчёт генерации радионуклидов с помощью пакета моделирования взаимодействия частиц высокой энергии с веществом GEANT4 [2]. Между нашими прямыми расчетами с использованием GEANT и экспериментальными данными наблюдается существенная разница: хотя форма смоделированного профиля глубины ^{14}C аналогична профилю, смоделированный уровень активности ^{14}C почти в два раза больше по сравнению с измеренным. Наиболее вероятное объяснение такого результата - неверный расчет каскада вторичных частиц в GEANT. На такую же проблему указывают и другие работы - в статье [4] модифицируются сечения GEANT а в работе [5] астры проводят калибровку относительно одного фиксированного значения модуляционного потенциала Φ . Наши результаты не противоречат успешным расчетам образования ^{14}C в атмосфере Земли с использованием того же инструментария GEANT, поскольку несколько экспериментов показали, что разница модельных потоков вторичных частиц GEANT и реальных измеренных может достигать более 2 раз [6]. Обсуждается результат также для ^{26}Al и других долгоживущих радионуклидов космогенных радионуклидов с целью восстановления параметров потока ГКЛ на больших временных шкалах (миллионы лет).

Список литературы

1. Jull, AJ Timothy, et al. « ^{14}C depth profiles in Apollo 15 and 17 cores and lunar rock 68815.» *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62.17 (1998): 3025-3036.

2. Agostinelli, S., et al. «GEANT4—a simulation toolkit.» *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 506.3 (2003): 250-303.
3. Kudryavtsev, I. V., and V. A. Dergachev. «Reconstruction of Heliospheric Modulation Potential Based on Radiocarbon Data in the Time Interval 17 000–5000 Years BC.» *Geomagnetism and Aeronomy* 59.8 (2019): 1099-1102.
4. Mesick, K. E., Feldman, W. C., Coupland, D. D. S., & Stonehill, L. C. (2018). Benchmarking Geant4 for simulating galactic cosmic ray interactions within planetary bodies. *Earth and Space Science*, 5(7), 324-338.
5. Li, Y., Zhang, X., Dong, W., Ren, Z., Dong, T., & Xu, A. (2017). Simulation of the production rates of cosmogenic nuclides on the Moon based on Geant4. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(2), 1473-1486.
6. Howard, Alexander, et al. «Validation of Neutrons in Geant4 Using TARC Data-production, interaction and transportation.» *2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*. IEEE, 2008.

Кинетическое PIC-моделирование неустойчивостей в релятивистских ударных волнах сверхновых звезд

Романский В. И.¹, Быков А.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: romanskyvadim@gmail.com

Современные наблюдения показывают существование релятивистских сверхновых – объектов, промежуточных между обычными сверхновыми и ультра-релятивистскими гамма-всплесками [1]. Характерные лоренц-факторы течений в таких объектах – порядка 1.5. Ускорение космических лучей в них значительно отличается как от нерелятивистского случая, так и от ультра-релятивистского, поэтому требует отдельного детального изучения [2]. В работе выполнено моделирование транс-релятивистских ударных волн в бесстолкновительной плазме методом particle-in-cell. Исследовано влияние развития магнито-гидродинамических неустойчивостей в предфронте ударной волны на спектры нетепловых ускоренных частиц. Показано, что развитие белловской неустойчивости [3] на временах порядка 1500 обратных плазменных ионных частот оказывает значительное влияние на спектр ускоренных частиц и структуру фронта релятивистской ударной волны в электрон протонной плазме. Учет эффектов модификации спектров частиц белловской неустойчивостью необходим для корректного моделирования наблюдаемого нетеплового излучения сверхновых.

Список литературы

1. Soderberg A M et al. *A relativistic type Ibc supernova without a detected γ -ray burst* Nature 463 513 5 2010
2. Bykov, A. M.; Ellison, D. C.; Marcowith, A.; Osipov, S. M. *Cosmic Ray Production in Supernovae*, Space Science Reviews, Volume 214, id. 41 2018
3. A.R. Bell, *Turbulent amplification of magnetic field and diffusive shock acceleration of cosmic rays*. MNRAS. **353**, 550–558 2004

Моделирование сцинтилляционной установки Tunka-Grande через инструментарий Geant4

Монхоев Р. Д.¹, Терновой М.Ю., от коллаборации TAIGA

¹НИИПФ ИГУ

e-mail: makaay08@rambler.ru

Сцинтилляционная установка Tunka-Grande [1] входит в состав единого экспериментального комплекса TAIGA, расположенного в Тункинской долине (республика Бурятия, Россия), в 50 км от озера Байкал [2]. Данный комплекс нацелен на изучение энергетического спектра и массового состава заряженных космических лучей в диапазоне энергий 100 ТэВ - 1000 ПэВ, поиск диффузного гамма-излучения свыше 100 ТэВ и исследование локальных источников гамма-квантов с энергиями более 30 ТэВ. Кроме установки Tunka-Grande в его состав входят сцинтилляционная установка TAIGA-Muon [3], широкоугольные черенковские установки Тунка-133 [4] и TAIGA-HiSCORE [5] и сеть атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT [6].

Цель моделирования работы установки Tunka-Grande – решение задачи по поиску астрофизических диффузных гамма-квантов с энергией свыше 10 ПэВ. В качестве инструмента для имитации отклика сцинтилляционных счетчиков был выбран программный пакет Geant4 [7]. При этом основное внимание было уделено максимально точному описанию установки, приближенному к реальности. Благодаря Geant4 была описана полная пространственная геометрия установки и смоделировано взаимодействие счетчиков с различными типами элементарных частиц вторичного космического излучения.

Список литературы

1. Monkhoev R. D. [et al.]. The Tunka-Grande experiment: Status and prospects // *Bull. Russ. Acad. Sci.* 2017. V. 81. P. 468-470.
2. Budnev N. [et al.]. TAIGA—an advanced hybrid detector complex for astroparticle physics and high energy gamma-ray astronomy in the Tunka valley // *JINST* 15. 2020. C09031.
3. Astapov I. [et al.]. Scintillation detectors for the TAIGA experiment // *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2019. V. 936. P. 254-256.
4. Berezhnev S.F. [et al.]. The Tunka-133 EAS Cherenkov light array: status of 2011 // *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2012. V. 692. P. 98-105.
5. Gress O. [et al.]. The wide-aperture gamma-ray telescope TAIGA-HiSCORE in the Tunka Valley: Design, composition and commissioning // *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2017. V. 845. P. 367-372.
6. Lubsandorzhiev N. [et al.]. The hybrid installation TAIGA: design, status and preliminary results // *PoS ICRC2019.* 2020. 729.
7. Agostinelli S. [et al.]. Geant4 – a simulation toolkit // *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2003. V. 506(3). P. 250-303.

Структура МГД течений в области остановки пульсарного ветра в туманностях типа Крабовидной

Петров А. Е.¹, Быков А.М.^{1,2}, Левенфиш К.П.¹, Пономарёв Г.А.^{1,2}

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

e-mail: a.e.petrov@mail.ioffe.ru

В рамках численной МГД модели одноторовой пульсарной туманности проведены расчеты структуры течения в области остановки релятивистского ветра пульсара. Выявлены особенности временной переменности магнитных полей вблизи воронки и внешнего края ударной волны ветра. Результаты сопоставлены с данными наблюдений переменности излучения пульсара Краб, полученными гамма-телескопом Fermi. Проанализировано влияние дозвукового движения пульсара относительно внешней среды на структуру течений и магнитных полей близ оснований джетов и внешнего края ударной волны у туманностей, схожих по морфологии с рентгеновской туманностью пульсара Краб.

Несферические нуклонные кластеры в мантии нейтронной звезды: капельная модель, основанная на потенциалах типа Скирма

Земляков Н. А.¹, Чугунов А.И.², Щечилин Н.Н.²

¹СПбПУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: zemnic5@gmail.com

Нейтронные звезды представляют собой сверхплотные компактные объекты, у которых между корой и ядром звезды может существовать область с нуклонными кластерами несферической формы (такая область называется мантией). Кластеры погружены в море вырожденных нейтронов и в вырожденный релятивистский электронный газ, обеспечивающий квазинейтральность [1]. Впервые существование мантии рассмотрено в работе [2], где предсказано, что с увеличением плотности форма нуклонных кластеров будет меняться в последовательности: сферические ядра – ядра цилиндрической формы (так называемые “спагетти”) – плоскопараллельные слои (“лазанья”) – ядерное вещество с вкрапленными нейтронными цилиндрами (“трубчатая” фаза) – ядерное вещество с вкрапленными нейтронными сферами (“швейцарский сыр”) – однородное ядерное вещество (ядро звезды). Другие исследования в этой области можно найти, например, в [1, 3] и в приведенных там ссылках.

В рамках данной работы исследовалась возможность существования несферических ядер для нескольких видов эффективного ядерного потенциала типа Скирма: SLy4 [4] и BSk24, BSk25, BSk26 [5]. Расчет проведен в рамках капельной модели [6], где поверхностная энергия была вычислена в рамках расширенного приближения Томаса-Ферми [7]. Рассмотрен диапазон плотностей, характерный для мантии нейтронных звезд, и вычислена плотность энергии для пяти различных форм кластеров (сферы, “спагетти”, “лазанья”,

“трубчатая” фаза, “швейцарский сыр”) и однородного вещества. Найдена зависимость наиболее энергетически выгодной конфигурации от плотности.

Расчеты для SLy4 выявили отсутствие мантии, то есть до перехода к однородной материи остаются сферические ядра, что согласуется с [3] (см., однако, [8], где обнаружено существование фаз “спагетти” и “лазаньи”). Для более современных потенциалов семейства BSk наша модель предсказывает существование несферических кластеров: для BSk24 и BSk26 в виде “спагетти”, для BSk25 в виде “спагетти” и “лазаньи”. Такое поведение качественно согласуется с расчетами в работе [9], проведенными в рамках расширенного метода Томаса-Ферми для потенциала BSk24. Важно отметить, что для всех рассмотренных потенциалов “трубчатая” фаза и фаза “швейцарский сыр” оказываются энергетически невыгодными. Однако отличия в плотности энергии для различных конфигураций материи очень малы, и надежное описание структуры мантии нейтронной звезды остается открытой задачей.

Список литературы

1. P. Haensel, A. Potekhin, D. Yakovlev, Neutron Stars 1: Equation of State and Structure. – New York: Springer, 2007.
2. D.G. Ravenhall, C.J. Pethick, J.R. Wilson, 1983, Phys. Rev. Lett., 50, 26.
3. F. Douchin, P. Haensel, 2000, Physics Letters B, 485, 1-3.
4. E. Chabanat, P. Bonche, P. Haensel, J. Meyer, R. Schaeffer, 1998, Nucl. Phys. A, 635, 1-2.
5. S. Goriely, N. Chamel, J. M. Pearson, 2013, Phys. Rev. C, 88, 024308.
6. M.E. Gusakov, A.I. Chugunov, 2020, Phys. Rev. Lett., 124, 191101.
7. N.N. Shchepochin, A.I. Chugunov, 2020, J. Phys.: Conf. Ser., 1697, 012025.
8. N. Martin, M. Urban, 2015, Phys. Rev. C, 92, 015803.
9. J. M. Pearson, N. Chamel, A. Y. Potekhin, 2020, Phys. Rev. C, 101, 015802.

Структура ветра молодой массивной звезды, сталкивающегося с оболочкой остатка сверхновой

Бадмаев Д. В.¹, Быков А. М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: danir1996@mail.ru

Быстрые и плотные звёздные ветры массивных звёзд, наряду со сверхновыми, определяют динамику внутри активных областей звездообразования. В рамках компактного сверхскопления встречные сверхзвуковые ударные МГД потоки, связанные с ветрами и остатками сверхновых, могут обеспечить благоприятные условия для эффективного ускорения частиц механизмом Ферми I рода до энергий > 10 ПэВ на коротком временном интервале в несколько сотен лет [1]. Для расчёта нетепловых спектров подобных систем необходимо знать сложную структуру сталкивающихся сверхзвуковых потоков и флуктуирующих магнитных полей. В данной работе с помощью кода PLUTO [5] рассчитана 2D МГД модель столкновения остатка коллапсировавшей сверхновой с ветром горячей вращающейся О-звезды в области с размером 1 пк. Реалистичные параметры ветров О-звезды и звезды типа Вольфа-Райе – предшественника сверхновой получены на основе анализа модельных данных о звёздной эволюции, полученных в работе [3]. Для инициализации остатка сверхновой применён двухступенчатый алгоритм, позволяющий

просчитать его раннюю эволюцию, со времени ~ 0.1 года после коллапса ядра, в соответствии с автомодельным решением Шевалье [2]. На рассматриваемом масштабе ветры можно считать изотермическими, а магнитное поле в них – полностью азимутальным. В уравнении баланса энергии кроме радиационного охлаждения включён подогрев от фотоионизации [4]. В результате получены карты плотности, магнитного поля, а также поля скоростей с разрешением $\sim 10^{-4}$ пк.

Список литературы

1. A. M. Bykov et al. «High-Energy Particles and Radiation in Star-Forming Regions» // Space Science Reviews, Volume 216, Issue 3, article id.42 (2020).
2. R. A. Chevalier «Self-similar solutions for the interaction of stellar ejecta with an external medium» // Astrophysical Journal, Vol. 258, p. 790-797 (1982).
3. S. Ekstrom et al. «Grids of stellar models with rotation. I. Models from 0.8 to 120 $M_{\odot}$ at solar metallicity ($Z = 0.014$)» // Astronomy & Astrophysics, Volume 537, id. A146, 18 pp. (2012).
4. D. M.-A. Meyer et al. «Wind nebulae and supernova remnants of very massive stars» // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 493, Issue 3, pp. 3548-3564 (2020).
5. A. Mignone et al. «The PLUTO Code for Adaptive Mesh Computations in Astrophysical Fluid Dynamics» // The Astrophysical Journal Supplement, Volume 198, Issue 1, article id. 7, 31 pp. (2012).

Штормовая активность в северной Атлантике и вариации геомагнитного поля за последние 10 тыс. лет. Исследование причинно-следственных связей.

Васильев С. С.¹, Дергачев В. А

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: sergey.vasiliev@mail.ioffe.ru

В настоящее время ряд природных явлений в астрофизике и климатологии демонстрируют некоторое подобие, указывающее на существование причинно-следственных связей. Ранее (Vasiliev S.S. and Dergachev V.A., 2020) была выполнена работа, в которой была продемонстрирована высокая корреляция штормовой активности в северной Атлантике и вариаций геомагнитного поля. Однако использование простых статистических инструментов, таких как корреляционный анализ, не дают ответ на вопрос о причинно-следственных связях таких явлений. В настоящее время в мире разработано несколько способов исследования причинно-следственных связей между природными явлениями. К наиболее известным методам следует отнести разработки Грейнджера (Granger, 1969), а также конвергентное перекрестное картирование, разработанное Sugihara et al., (2012) (convergent cross mapping), и метод условной дисперсии (Verbitsky, 2019). В настоящей работе проводится изучение причинно-следственных связей вариаций геомагнитного поля и штормовой активности в северной Атлантике за последние 10 тыс. лет.

Список литературы

1. Granger, C. W. J. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. Econometrica, 37, 424–438 (1969).

2. Sugihara, G. et al. Detecting causality in complex ecosystems, Science, 338, 496–500 (2012).
3. Vasiliev S.S. and Dergachev V.A. The nature of the storm activity in the northwest Atlantic during the Holocene and its possible connection with variations in the Earth's magnetic field. Journal of Physics: Conference Series, v. 1697, # 012010 (2020)
4. Verbitsky, M.Y. et al. Detecting causality signal in instrumental measurements and climate model simulations: global warming case study. Geosci. Model Dev., 12, 4053 (2019)

О проблеме непрерывного спектра г-мод

Краав К. Ю.¹, Гусаков М. Е.¹, Кантор Е. М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kirill-kraav@yandex.ru

В то время как теория г-мод хорошо изучена в рамках ньютоновского подхода к гравитации, расчет г-мод в Общей Теории Относительности (ОТО) приводит к противоречивым результатам: стандартная теория предсказывает существование непрерывного спектра колебаний, однако численное решение задачи приводит к дискретному спектру. В данной работе мы показываем, что стандартный подход, заимствованный из нерелятивистской теории, неприменим для описания релятивистских г-мод, что и является причиной возникновения непрерывного спектра. Мы разрабатываем новый подход к расчету г-мод, в рамках которого мы получаем корректные уравнения, с помощью которых возможно определение дискретного спектра колебаний.

Модели обогащения космических лучей ^{22}Ne в компактных скоплениях массивных звезд

Каляшова М. Е.^{1,2}, Быков А.М.¹, Бадмаев Д.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

e-mail: filter-happiness@yandex.ru

В работе рассматривается предположение о том, что избыток ^{22}Ne в космических лучах (изотопное отношение $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ в КЛ выше, чем в солнечном ветре, более чем в 5 раз) формируется при ускорении КЛ в молодых массивных звездных скоплениях, содержащих популяцию звезд Вольфа-Райе. Отношение $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ в ветрах таких звезд может во много раз превышать стандартное значение. Предполагается, что эти частицы ускоряются на совокупности ударных волн от ветров массивных звезд. Обсуждается модель обогащения космических лучей ^{22}Ne и детально рассматривается, какое вещество вступает в процесс ускорения на разных этапах жизни скопления. Рассмотрено влияние параметров: начальной функции масс в скоплении, скорости вращения звезд и др. Обсуждается влияние на результат различного выбора модели звездного нуклеосинтеза (Geneva, Frascati). Приводится расчет энергетики предлагаемых источников и показано, что доступные мощности источников разумно согласуются с наблюдаемым потоком КЛ.

Список литературы

1. Binns W. R., Wiedenbeck M. E., Arnould M., et al. // *The Astrophysical Journal*. 2005. V. 634. P. 351.
2. Casse, M., and Paul, J. A. // *The Astrophysical Journal*. 1982. V.258. P. 860–863
3. Ekström S., Georgy C., Eggenberger P., Meynet G., Mowlavi N., Wyttenbach A., Granada A., Decressin T., Hirschi R., Frischknecht U., Charbonnel C., and Maeder A. // *Astronomy&Astrophysics*. 2012. V. 537. A146
4. Limongi M., Chieffi A. // *The Astrophysical Journal Supplements*. 2018. V. 237(1). P.13

Определение эффективности пофотонной регистрации кремниевых фотоумножителей для нового детекторного кластера черенковского гамма-телескопа TAIGA-IACT с применением УФ фильтров

Кулешов Д. О.¹, Симонян В.А.¹, Богданов А.А.¹, Тубольцев Ю.В.¹, Чичагов Ю.В.¹, Холупенко Е.Е.¹, Красильщиков А.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: hellchemist@mail.ru

В настоящее время продолжает активно развиваться обсерватория TAIGA [1], представляющая собой комплекс для исследования космических лучей и космических источников гамма-излучения. В состав этой обсерватории входит черенковский гамма-телескоп TAIGA-IACT [2], детектирующая камера которого основана на вакуумных фотоумножителях [3]. Однако, развитие кремниевых фотоумножителей позволяет создавать детектирующие системы, по ряду важных параметров превосходящие нынешнее поколение черенковских детекторов, основанных на вакуумных фотоумножителях, таких как более низкие напряжения питания, компактность, устойчивость к засветке и др. В частности, в ФТИ им. А.Ф. Иоффе ведутся разработки детекторного кластера для камеры черенковского гамма-телескопа TAIGA-IACT на базе кремниевых фотоумножителей (SiPM) [4], чувствительных к излучению как в видимом (300 – 600 nm), так и в ультрафиолетовом (250 – 300 nm) диапазонах.

Для исследований характеристик используемых SiPM был изготовлен детектирующий блок на базе OnSemi MicroFJ-60035, представляющий собой металлическую коробку с чернением внутренних поверхностей и фланцем для присоединения резиновой гофры. Печатная плата блока с SiPM размещена на крышке корпуса для удобства доступа к элементам. На ней же с внешней стороны размещены разъёмы питания и вывода сигнала. Каждая печатная плата имеет предусилитель, температурный датчик и термоэлектрический охладитель.

Целью настоящей работы являлось определение эффективности пофотонной регистрации (PDE) используемых SiPM в УФ-диапазоне с применением УФ фильтров, и уточнение коэффициента трансмиссии данных фильтров на длине волны 277 nm для определения целесообразности их применения в новой детекторном кластере телескопа TAIGA-ICAT. Для достижения цели исследования были изготовлен исследовательский стенд, состоящий из источника УФ-излучения PicoQuant PLS-270 [5], испускающего импульсы длительностью 600 ps на длине волны 277 nm, и резиновой гофры, соединяющей источник

УФ-излучения с детектирующим устройством и обеспечивающей светоизоляцию. На первом этапе была проведена калибровка УФ-источника. Для этого были получены зависимости мощности излучения от расстояния между источником излучения и эталонным детектором. Было проведено четыре серии измерений: без использования фильтров, а также с использованием трёх полосовых фильтров "Фотооптик" с пропусканием в областях 240 – 300 nm, 280 – 390 nm, 290 – 590 nm. В качестве эталонного детектора был выбран измеритель мощности излучения от Gentec Electro-Optics с чувствительной фотодетекторной головкой PH100-SiUV. На следующем этапе были получены зависимости количества детектируемых фотонов от расстояния между источником излучения и детектирующим блоком на базе SiPM OnSemi MicroFJ-60035. Использовались те же расстояния между источником излучения и детектором, что и на первом этапе. Импульсы от детекторов, после усиления на предусилительной электронике блоков, фиксировались осциллографом LeCroy WaveRunner 620Zi с полосой пропускания 2 GHz в режиме связи по постоянному току с нагрузкой 50 Ω . По полученным значениям мощности излучения и количества детектируемых фотонов были рассчитаны значения PDE исследуемых SiPM и получена зависимость PDE от расстояния между источником излучения и детектирующим блоком на базе MicroFJ-60035. Уточнены коэффициенты трансмиссии фильтров и сделаны выводы о применимости данных фильтров в новом кластере для телескопа TAIGA-IACT. Полученные результаты оформлены в виде графиков.

Список литературы

1. Kuzmichev L.A., Astapov I.I., Bezyazeev P.A. et al., TAIGA Gamma Observatory: Status and Prospects, Physics of Atomic Nuclei, v. 81, pp. 497 - 507, 2018
2. Sagan Y., Astapov I., Bezyazeev P. et al., TAIGA observatory: IACT fabrication and tests, Proceedings of 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019), v. 36, p. 776, 2019
3. Budnev, N.M., Astapov, I.I., Bezyazeev, P.A. et al., TAIGA: A Complex of Hybrid Systems of Cooperating Detectors for Gamma Astronomy and Cosmic Ray Physics in the Tunka Valley, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., 83, 951–954, 2019
4. Bogdanov A.A., Kholupenko E.E., Tuboltsev Yu.V., Chichagov Yu.V., Modelling of SiPM Performance for Detection of Cherenkov Radiation from Extensive Air Showers in UV and Visible Ranges for Application at The TAIGA-IACT Telescope, Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 57(1-2), 13-21, 2020
5. PLS Series Datasheet https://www.picoquant.com/images/uploads/downloads/pls_series.pdf

Ограничения на параметры эффективного уравнения состояния с учётом пространственной структуры облаков межгалактической среды

Теликова К. Н.¹, Балашев С.А.¹, Штернин П.С.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: ks.telikova@mail.ru

Изучение эволюции эффективного уравнения состояния (зависимости температуры от плотности) межгалактической среды (МГС) $T = T_0(\rho / \bar{\rho})^{\gamma-1}$ где $\bar{\rho}$ – средняя

плотность и $T_0 = T(\bar{\rho})$, в ранней Вселенной позволяет ограничивать возможные сценарии реионизации МГС, которая происходила на красных смещениях $z > 3$. Анализ абсорбционных линий Лайман-альфа леса в спектрах квазаров предоставляет такую возможность. При описании линий Лайман-альфа леса профилем Фойгта для каждой абсорбционной системы определяется её лучевая концентрация N и параметр Доплера b , характеризующий распределение проекции скорости поглощающих атомов на луч зрения. Известно, что у распределения систем на плоскости параметров (N, b) наблюдается явно выраженная нижняя граница $b_{\min}(N)$, определяемая минимально возможным уширением абсорбционных линий МГС [1].

Классический подход заключается в том, что минимально возможное уширение абсорбционных линий МГС связывается исключительно с тепловым движением поглощающих атомов [2]. В таком формализме, соответствующем пределу малого пространственного размера облаков МГС, уравнение состояния МГС определяется положением нижней границы распределения (N, b) . Однако неучёт конечного пространственного размера облаков МГС может приводить к дополнительным систематическим неопределенностям [3]. Оказывается, что наличие протяжённой пространственной структуры приводит к увеличению минимально возможного уширения абсорбционных линий МГС вследствие космологического расширения филаментов МГС. Проведённое нами ранее исследование эффекта дополнительного уширения абсорбционных линий МГС на реальной выборке из 50 спектров квазаров (~1500 абсорбционных систем Лайман-альфа леса) демонстрирует драматичность зависимости результатов по оценке параметров МГС от количества систем с большими значениями лучевых концентраций нейтрального водорода [4].

Описанное выше дополнительное уширение абсорбционных линий МГС ослабевает с увеличением плотности, т.е. с уменьшением пространственного размера облаков МГС. Таким образом, тепловой вклад в нижнюю границу распределения систем Лайман-альфа леса по параметрам (N, b) определяется преимущественно областью больших N . Известно, что количество систем Лайман-альфа леса в спектрах квазаров падает степенным образом с ростом лучевой концентрации, следовательно для получения надёжных оценок на уравнение состояния МГС необходимо увеличить объём выборки абсорбционных систем. Наличие большого количества архивных спектров, полученных при помощи спектрографа высокого разрешения UVES/VLT, позволяет намкратно увеличить уже имеющуюся выборку из 50 квазаров, снятых на HIRES/Keck, и установить более надёжные ограничения на параметры МГС.

Список литературы

1. Schaye J, Theuns T, Leonard A, Efstathiou G, MNRAS, 310, 57 (1999)
2. Telikova K N, Shternin P S, Balashev S A, ApJ, 887, 205 (2019)
3. Garzilli A, Theuns T and Schaye J, MNRAS 450 1465–76 (2015)
4. Telikova K N, Balashev S A and Shternin P S, J. Phys.: Conf. Ser., V. 1400, article id. 022024 (2019)

Modeling of excitation of auroral kilometeric radiation in a mirror-confined laboratory plasma

Викторов М. Е.¹, Чернышев А.А.², Чугунин Д.В.², Мансфельд Д.А.¹, Могилевский М.М.²

¹ИПФ РАН

²ИКИ РАН

e-mail: mikhail.viktorov@ipfran.ru

Auroral kilometer radiation (AKR) is a powerful radio emission of the Earth in the frequency range from 30 to 700 kHz. AKR is generated as a result of cyclotron maser instability development in regions with a reduced plasma density, where the plasma frequency is lower than the electron gyrofrequency. The AKR propagates in the direction from the Earth inside the radiation cone, the angle of which is determined by the conditions in the source. Once generated AKR could be detected onboard a spacecraft. We used the electromagnetic field measurements on the INTERBOLL-2 satellite by the POLRAD instrument with an observation time of up to several hours. Due to the low plasma density in the source region, the AKR is the excitation of oblique fast X-mode waves which could be also excited under similar conditions in the laboratory. Experimental studies were carried out in a nonequilibrium plasma of a pulsed electron cyclotron resonance (ECR) discharge created and supported by pulsed radiation of a gyrotron (frequency 37.5 GHz, power up to 80 kW) confined in a table-top mirror magnetic trap. The conditions of a laboratory experiment were formulated corresponding to the generation parameters of AKR based on satellite observations and theoretical concepts. None-thermal plasma microwave emission was experimentally recorded in the frequency range of 4–20 GHz, which occurs at the initial stage of ECR breakdown and lasts from 50 to 300 us. The radiation is broadband, the radiation frequency from below is limited by the electron gyrofrequency in the center of the magnetic trap, and the spectrum width reaches 5 GHz. We show that the observed emission is the excitations of the fast X-mode wave. A joint analysis of laboratory measurements and satellite data showed that in both cases the temporal evolution of the emission spectrum is very similar. We propose a method of spectral data analysis with which we can study the spatio-temporal characteristics of physical processes occurring in the auroral electron acceleration region. We also discuss the application of this method to the laboratory data and analyze the common features of the instabilities.

The work has been supported by RFBR (grant No. 18-29-21037).

Сравнение различных источников гамма-излучения, доступных в лабораторных условиях

Рачков К. И.^{1,2}, Попов А. Н.², Бобашёв С. В.², Безверхний Н. О.², Сорокин А. А.^{2,3}

¹СПбПУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

³DESY, Гамбург, Германия

e-mail: tata23-23@mail.ru

Исследование спектра излучения в гамма-диапазоне занимает ключевое место в наработке знаний о физических условиях и составе вещества во Вселенной на различных этапах ее эволюции. Источниками высокоэнергетических электромагнитных волн являются

ядра активных галактик, например, блазаров, а также гамма-всплески, которые порождаются в результате ярчайших событий во Вселенной – вспышек сверхновых.

Исследование далёких объектов в спектре гамма-излучения приводит к необходимости учитывать искажение спектральной структуры излучения, вызванное его взаимодействием с межгалактическим пространством. Значительный вклад в искажение вносит процесс Брейта-Уиллера, который имеет решающее значение в понимании природы динамики во Вселенной, управляет выделением энергии: в гамма-всплесках, активных ядрах галактик, черных дырах. Следующие по порядку малости искажения вносит процесс взаимодействия потока гамма-квантов с рентгеновскими фотонами тормозного излучения в скоплениях галактик [1].

В работе был проведён краткий анализ доступных способов получения излучения гамма-квантов с необходимыми параметрами, а также выбран самый перспективный способ, для которого была создана программа моделирования. Полученные результаты были сопоставлены со схожими моделированиями других работ.

Список литературы

1. А. Н. Попов, Д. П. Барсуков, А. В. Иванчик, Письма в астрон. журн., том. 44, 633, 2018 г.

Физические условия в диффузной фазе межзвездной среды

Косенко Д. Н.¹, Балашев С.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kosenkodn@yandex.ru

В работе произведена оценка физических параметров (а именно, скорости ионизации космическими лучами, интенсивности ультрафиолетового фона и объемной концентрации) в молекулярных облаках в диффузной фазе (то есть при температуре $T \sim 100$ К и $n = 30-100$ см⁻³) по относительной распространенности молекул HD/H₂. Физические условия оценены для 16 систем на больших красных смещениях и 40 систем в нашей Галактике. В полученной выборке найдена сильная корреляция между скоростью ионизации космическими лучами и интенсивностью УФ фона. Обсуждается возможность объяснения полученной корреляции связью источников космических лучей с областями звездообразования. Также в работе обсуждаются корреляции скорости ионизации космическими лучами с объемной концентрацией и металличностью и сравниваются выборки, полученные для далеких галактик и вдоль различных лучей зрения в Млечном Пути.

Список литературы

1. Balashev S.A., Kosenko D.N., HD/H₂ ratio in the diffuse interstellar medium, MNRAS, 492, L45-L49, 2020
2. Kosenko D.N., Balashev S.A., Constraining of physical conditions in the cold neutral medium using HD/H₂ relative abundance, Journal of Physics: Conference Series, 1697, 012031, 2020

Моделирование горячего Юпитера HD-209458b и интерпретация наблюдательных проявлений

Шайхисламов И. Ф.¹, Ходаченко¹ М.Л., Мирошниченко¹ И.Б., Руменских¹ М.С.,
Березуцкий¹ А.Г.

¹Институт Лазерной Физики СО РАН

e-mail: ildars@ngs.ru

Первые наблюдательные свидетельства расширения и истечения экзопланетной атмосферы были получены в результате обнаружения транзитного поглощения для горячего Юпитера HD-209458b. С 2004 г. для него были сделаны спектральные измерения телескопом Хаббл в ВУФ диапазоне в линиях Ly α , резонансных линиях CI, OII, SiIII. Совокупность данных и численное моделирование показывают, что верхняя атмосфера HD-209458b раздута в результате нагрева ионизирующим излучением звезды за пределы полости Роша и испытывает гидродинамическое сверхзвуковое истечение. Недавно появились измерения в линии метастабильного гелия, которые значительно расширяют возможности изучения горячих экзопланет.

Влияние планетарного магнитного поля на истечение верхней атмосферы горячих экзопланет остается актуальной проблемой. Самосогласованное моделирование планетарного ветра в присутствии собственного магнитного поля планеты в 2D геометрии было впервые реализовано авторами в работе [1]. Для HD-209458b 2D расчеты показали, что критическая величина магнитного поля, при которой потеря массы значительно уменьшается, составляет примерно 0.3-1 Гс на экваторе. Полученные результаты по структуре магнитосферы были применены для анализа другой очень важной задачи физики горячих экзопланет, которая активно рассматривается в последние годы – возможное радиоизлучение магнитных горячих юпитеров и его регистрация на Земле [2].

До настоящего времени глобальное 3D МГД моделирование в рамках которого рассматривается взаимодействие планетарного течения с замагниченным звездным ветром с учетом магнитного поля планеты развивалось на основе уже имеющихся астрофизических кодов. В нашей работе применяется код, впервые разработанный специально для моделирования горячих экзопланет. Это потребовало интегрирования магнитной газодинамики взаимодействующих сверхзвуковых потоков с многокомпонентной аэрономией и расчетом поглощения в спектральных линиях в 3D геометрии звездной системы. Мы применяем схему расчета уравнения индукции в трехмерной сферической системе координат. Это гораздо сложнее, чем обычно используемая декартова система координат, но позволяет максимально точно учесть естественную геометрию задачи, а также оптимально разбить на ячейки рассматриваемую область.

Мы рассчитали картину планетарного течения горячего Юпитера HD-209458b при параметрах, которые обычно предполагают для рассматриваемой системы и брались нами ранее при расчетах 3D газодинамическим кодом без учета магнитного поля [3]. Для обнаружения наблюдательных проявлений было рассчитано при различных величинах дипольного магнитного поля планеты поглощение в линиях Ly α , CI, OII, а также впервые для этой планеты в линии метастабильного гелия 1083 нм.

Работа выполнена в рамках проекта Минобрнауки 075-15-2020-780, проектов РНФ-18-12-00080, РФФИ-20-02-00520.

Список литературы

1. Khodachenko M.L. et al. *The Astrophysical Journal*, 813:50, 2015
2. Weber C. et al. *MNRAS*, 469, p.3505-3517, 2017
3. Shaikhislamov I.F. et al. *MNRAS*, 491(3), 3435-3447 2020

Исследование фрактальной структуры МЭГ сигналов человека при воздействии световых стимулов разных цветовых комбинаций

Демин С.А.¹, Русанова И.А.¹, Юнусов В.А.¹, Минкин А.В.¹

¹КФУ, г. Казань, Россия

e-mail: serge_demin@mail.ru

Ранее в рамках формализма функций памяти и фликкер-шумовой спектроскопии – теоретических подходов, основанных на положениях неравновесной статистической физики, был проведен анализ сигналов магнитоэнцефалограмм (МЭГ) здоровых испытуемых и пациента с фоточувствительной эпилепсией (ФЧЭ) [1–3]. В ходе анализа авто- и кросскорреляций, а также выделения низкочастотных (резонансных) и высокочастотных компонентов МЭГ были установлены диагностические критерии данного неврологического заболевания. В работе [4] авторами изучены изменения самоподобных свойств магнитной активности коры головного мозга пациента с ФЧЭ в ответ на мерцающие световые стимулы. Фрактальные и мультифрактальные закономерности проявляются в эволюции и структуре большинства природных объектов на разных временных и пространственных масштабах [5]. Для описания фрактальных поверхностей и временных рядов, геометрии природных объектов, самоподобия физических процессов и явлений используются размерность Хаусдорфа-Безиковича, в дальнейшем обобщенная Реньи, Хигучи, мультифрактальные спектры, степенные показатели и другие [6].

В настоящей работе представлены результаты анализа пространственно-временного скейлинга (масштабной инвариантности) в динамике магнитоэнцефалограмм здоровых испытуемых «до» и «после» подачи световых мерцающих стимулов разных цветовых комбинаций. Регистрация сигналов 9 волонтеров (в возрасте от 22 до 27 лет) осуществлялась при помощи 61-го СКВИДа (сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик) установки *Neuromag-122* компании «Neuromag Ltd.», Финляндия. Такие приборы позволяют фиксировать очень слабые магнитные поля порядка 100 фТл, которые возникают в результате биоэлектрической активности головного мозга человека. Цветовые комбинации: красно-голубой, красно-зеленый, голубой-зеленый генерировались при помощи двух проекторов. Сопоставительный анализ усредненных значений фрактальной размерности D проводился как для разных областей коры головного мозга, так и каждого светового стимула. Фрактальная размерность позволяет количественно оценить проявление самоподобных свойств в динамике временного сигнала. Покрывание плоскости обеспечивается флуктуациями временного сигнала, которые в случае биомедицинских записей проявляются с высокой степенью индивидуальности. Чем выше показатель фрактальной размерности D , тем в большей мере проявляется масштабная инвариантность. Для удобства результаты были представлены в виде гистограмм и топографических карт.

Полученные результаты позволяют установить, каким образом меняется фрактальная структура МЭГ-сигналов в ответ на разные световые стимулы, а также коллективная динамика ансамблей нейронов, определяющая случайное распределение фаз и кластеризацию биоэлектрической активности. В частности, подача мерцающего стимула, т.е.

переход от спонтанных к индуцированным или вызванным нейромагнитным откликам, приводит к изменению пространственно-временного скейлинга сигналов в большинстве областей коры головного мозга здоровых испытуемых. Настоящая работа будет интересна с точки зрения биофизики восприятия визуальной информации и развития когнитивных возможностей человека. Кроме того, может быть проведена оценка возможной опасности интенсивного воздействия внешних раздражителей на центральную нервную систему человека.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-12-00105).

Список литературы

1. Panishev O.Y., Demin S.A., Bhattacharya J., Cross-correlation markers in stochastic dynamics of complex systems, *Physica A*, V. 389, No. 21, 4958-4969, 2010.
2. Timashev S.F., Polyakov Y.S., Yulmetyev R.M., Demin S.A., Panishev O.Y., Shimojo S., Bhattacharya J., Analysis of biomedical signals by flicker-noise spectroscopy: Identification of photosensitive epilepsy using magnetoencephalograms, *Laser Physics*, V. 19, No. 4, 836-854, 2009.
3. Timashev S.F., Polyakov Y.S., Yulmetyev R.M., Demin S.A., Panishev O.Y., Shimojo S., Bhattacharya J., Frequency and phase synchronization in neuromagnetic cortical responses to flickering-color stimuli, *Laser Physics*, V. 20, No. 3, 604-617, 2010.
4. Panishev O.Y., Demin S.A., Rusanova I.A., Studying Properties of Abnormal Human Brain Activity in Photosensitive Epilepsy Caused by Light Stimulation, *Biomedical Engineering*, V. 49, No. 4, 236-239, 2015.
5. Божокин С.В., Паршин Д.А., Фракталы и мультифракталы, Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 128 с.
6. Терехов С.В., Фракталы и физика подобия, Донецк: Цифровая типография, 2011, 255 с.

Поиск статистических паттернов патологической активности на ЭЭГ-сигналах человека при фокальной эпилепсии

Юнусов В.А.¹, Демин С.А.¹, Панищев О.Ю.¹

¹КФУ

e-mail: valentin.yunusov@gmail.com

Определение диагностических критериев неврологических заболеваний является важной задачей современных наук о данных и биофизики. Одним из самых распространенных неврологических заболеваний выступает эпилепсия, характеризующаяся приступами судорог, связанных с нарушениями работы головного мозга [1]. С развитием регистрирующего оборудования и накопления значительных массивов экспериментальных данных (например, записей электроэнцефалограмм, ЭЭГ) в диагностике все чаще используются методы статистической физики [2–4]. Кроме того, широко применяется комбинация методов статистического анализа и машинного обучения, что позволяет в большей мере увеличить точность исследований эпилепсии [5].

В настоящей работе в рамках формализма функций памяти и расчета показателя Херста осуществляется поиск статистических паттернов патологической биоэлектрической активности человека при ночной лобной эпилепсии (НЛЭ). Ночная лобная эпилепсия – генетическая фокальная эпилепсия, характеризующаяся кластерными (сменяющимися друг друга) короткими приступами, исходящими из лобной доли коры головного мозга в фазу медленного сна. Были исследованы сигналы ЭЭГ для двух групп испытуемых: 8 здоровых испытуемых, без каких-либо неврологических заболеваний (контрольная группа), и 19 пациентов с НЛЭ. Записи проводились во время сна, в среднем в течение 8 часов. Регистрация мозговой активности велась в соответствии с международной схемой размещения электродов «10-20%» по электродам A_1 , P_4 , F_4 с использованием электрода C_4 в качестве опорного.

Статистический анализ ЭЭГ-записей проводился в три этапа. На первом этапе были определены участки нелинейности сигналов. Такая предобработка данных обусловлена значительной продолжительностью записей исследуемых сигналов, вследствие которой возникает большое количество периодических накладываются артефактов, затрудняющих проведение анализа.

На втором этапе проводился автокорреляционный анализ записей ЭЭГ для двух групп испытуемых. Были рассчитаны значения параметров немарковости и показателя Херста. В результате установлен информационно значимый электрод, для которого значения параметров отличались наибольшим образом для контрольной группы и пациентов с НЛЭ. Определение такого электрода позволяет сузить диапазон поиска диагностических критериев, рассматривая локализованную область коры головного мозга, в которой патологическая активность ансамблей нейронов проявляется наиболее существенно. Для дальнейшего исследования из контрольной группы и группы пациентов были выбраны по одному испытуемому со значениями параметров наиболее близкими к средним значениям по группе.

На заключительном этапе были изучены динамические характеристики и спектральные особенности ЭЭГ-сигналов для двух групп испытуемых. Установлены различия в поведении динамических параметров исследуемых сигналов при НЛЭ. Кроме того, в группе пациентов, наряду с характерной для состояния сна θ -активностью, в активности коры головного мозга были обнаружены проявления высокочастотного γ -ритма и возникновение перекрывающихся периодических процессов в виде высокоамплитудных всплесков мозговой активности.

Полученные результаты позволяют методами анализа статистической физики определять проявления патологической активности при неврологическом заболевании – ночной лобной эпилепсии. После дополнительной верификации методология формализма функций памяти, в сочетании с другими методами анализа, позволит диагностировать НЛЭ с большей точностью. Отметим, что это достаточно сложная задача, если речь идет об анализе интериктальных сигналов (т.е. записей ЭЭГ, фиксируемых между эпилептическими приступами).

Благодарности. Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-12-00105).

Список литературы

1. Chang B.S., Lowenstein D.H., Epilepsy, N. Engl. J. Med., V. 349, No. 13, 1257-1266, 2003.

2. Panishev O.Y., Demin S.A., Zinatullin E.M., Using of the interictal EEGs for epilepsy diagnosis, J. Phys.: Conf. Ser., V. 661, Art. No. 012021, 2015.
3. Lahmiri S., Generalized Hurst exponent estimates differentiate EEG signals of healthy and epileptic patients, Physica A, V. 490, 378-385, 2018.
4. Panishev O.Y., Demin S.A., Panisheva S.N., Bhattacharya J. How analyzing the interictal EEG can identify the epilepsy, Nonlin. Phenom. Complex Syst., V. 18, No. 2, 230-235, 2015.
5. Abiyev R., Arslan M., Idoko J.B., Sekeroglu B., Ilhan A., Identification of epileptic EEG signals using convolutional neural networks, Appl. Sci., V. 10, No. 12, 4089-4103, 2020.

ФШС-параметризация магнитоэнцефалограмм человека для диагностики светочувствительной эпилепсии

Хайруллина Р.Р.¹, Демин С.А.¹, Юнусов В.А.¹, Панищев О.Ю.¹

¹КФУ

e-mail: raniya-art@mail.ru

Высокий уровень индивидуальности внешних и поведенческих черт каждого человека проявляется в пространственно-временной структуре биомедицинских сигналов – электрокардиограмм, электроэнцефалограмм, магнитоэнцефалограмм (ЭКГ, ЭЭГ, МЭГ), измеряемых при процедурах медицинского обследования. Каждый из сигналов $V(t)$, где t – время, фиксируемых на некотором временном интервале T с частотой дискретизации f_d , является проявлением сложной совокупности физиологических процессов, что приводит к накоплению информации о состоянии как отдельного органа, так и организма в целом [1]. В настоящее время проводится активная разработка методов анализа физиологических сигналов – оцифрованных временных рядов, позволяющих выявлять искомую индивидуальность, свойственную каждому организму в норме и при нарушениях в его функционировании.

Для решения указанных задач мы предлагаем воспользоваться возможностями фликер-шумовой спектроскопии (ФШС) [2, 3]. В рамках ФШС вводятся информационные параметры для описания исследуемых сигналов в разных диапазонах частот. Индивидуальные особенности эволюции сложных систем проявляются в низкочастотных и высокочастотных (хаотических) составляющих продуцируемых сигналов. При этом в последовательностях указанных хаотических составляющих практически всегда выявляются высоко индивидуальные для каждой системы, информационно значимые корреляционные взаимосвязи. В качестве таких сигналов рассматриваются сигналы магнитоэнцефалограмм (МЭГ). Нейромагнитные сигналы-отклики коры головного мозга на воздействия мерцающего красно-голубого стимула регистрировались у группы здоровых испытуемых и пациента со светочувствительной эпилепсией (СЧЭ). СЧЭ – заболевание, при котором наблюдается чрезмерная нейронная активность, возникающая при мерцающих световых воздействиях, особенно у детей, и сопровождающаяся различными клиническими и параклиническими признаками. Сигналы-отклики с частотой дискретизации 500 Гц на воздействия цветковых стимулов фиксировались 61 СКВИДом (сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик) [4].

Ранее в работах авторов [5, 6] было показано, что отдельные области коры головного мозга человека, например в окрестности 10, 18, 43 59 датчиков, являются зонами локализации, активирующими патологические механизмы СЧЭ. Прежде всего, это проявлялось в появлении характерных резонансных процессов на определенных частотах (50 Гц и/или 100 Гц). Однако такие высокочастотные составляющие не выявлялись в сигналах-откликах многих других сенсоров пациента, что позволяло полагать, что соответствующие участки коры головного мозга не подвержены патологическим изменениям.

В настоящей работе мы представляем результаты дальнейших исследований, демонстрируя, что в индивидуальных особенностях сигналов, фиксируемых с других датчиков (25, 30, 37), также можно установить диагностические критерии СЧЭ. Для анализа резонансных и хаотических составляющих были предложены алгоритмы разделения исследуемых сигналов. Представлены экспериментальные зависимости спектров мощности, структурных переходных функций – разностных моментов второго порядка, а также рассчитаны параметры для построения их интерполяционных представлений.

Проведенные исследования позволили установить дополнительные диагностические критерии, соответствующие распространению аномального коллективного возбуждения нейронов коры и подкорковых структур, приводящего к эпилептическому приступу при воздействии мерцающими цветовыми стимулами. Благодаря более широкому диапазону информационно значимых датчиков возможной оказалась не только диагностика СЧЭ, но и количественная оценка эффективности терапевтических воздействий.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-12-00105).

Список литературы

1. Рангайян Р.М., Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007, 440 с.
2. Тимашев С.Ф., Фликкер-шумовая спектроскопия: информация в хаотических сигналах, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007, 248 с.
3. Timashev S.F., Polyakov Y.S., Review of flicker noise spectroscopy in electrochemistry, Fluctuation and Noise Letters, V. 7, No. 2, R15-R47, 2007.
4. Watanabe K., Imada T., Nihei K., Shimojo S., Neuromagnetic responses to chromatic flicker: Implications for photosensitivity, Neuroreport, V. 13, 2161-2165, 2002.
5. Timashev S.F., Polyakov Yu.S., Yulmetyev R.M., Demin S.A., Panishev O.Yu., Shimojo S., Bhattacharya J., Analysis of biomedical signals by flicker-noise spectroscopy: identification of photosensitive epilepsy using magnetoencephalograms, Laser Physics, V. 19, No. 4, 836-854, 2009.
6. Timashev S.F., Polyakov Yu.S., Yulmetyev R.M., Demin S.A., Panishev O.Yu., Shimojo S., Bhattacharya J., Frequency and Phase Synchronization in Neuromagnetic Cortical Responses to Flickering-Color Stimuli, Laser Physics, V. 20, No. 3, 604-617, 2010.

Влияние эффекта лазерно-индуцированной термокоагуляции на оптические спектры тканей головного мозга

Исрапов Э. Х.¹, Гиравев К.М.^{1,2}, Ашурбеков Н.А.², Магомедов М.А.^{1,2}

¹Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН

²ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет»

e-mail: ed-gar1993@yandex.ru

Успешное проведение процедур лазерной термотерапии, предполагает предварительную модельную их апробацию. В такой ситуации первостепенную важность приобретают точные сведения об особенностях распространения света в исследуемых биообъектах, что во многом определяется оптическими свойствами последних [1]. В этой связи целью данной работы явилось исследование динамики спектрально-оптических свойств и особенности пространственного распределения интенсивности лазерного излучения в биологических тканях в условиях развития лазерной термокоагуляции.

Процедура лазерной гипертермии проводилась на образцах тканей серого вещества головного мозга, полученных в процессе плановых операций по поводу удаления опухолевых образований в ГБУ Республики Дагестан «Республиканская клиническая больница» в количестве 15 образцов.

Для осуществления лазерной гипертермии в работе использовался твердотельный Nd:YAG лазера LQ529 (Солар Лазер Систем, Белоруссия) с длиной волны излучения 1064 нм, частотой следования 100 Гц и средней мощностью 2.0 ± 0.1 Вт. Нагрев биоткани проводился по достижении температуры 70.0 ± 1.0 °С, что соответствовало длительности экспозиции 5 минут. Температура контролировалась при помощи термодатчиков, расположенных на глубине 1 и 5 мм от поверхности объекта.

Измерение спектров коэффициента диффузного отражения – $R_d(\lambda)$ проводилось на спектрометрическом комплексе с использованием стандартного Y-образного волоконно-оптического зонда. Возбуждение фотосигналов осуществлялось посредством дейтериевой/галогенной лампы AvaLight-DH-S-BAL (Avantes, Нидерланды), а регистрация – при помощи спектрометра MS3504i (SOL-Instruments, Белоруссия) в интервале длин волн 250–2000 нм. Анализ коэффициента диффузного отражения и определение коэффициентов оптического поглощения $\mu_a(\lambda)$ и транспортного рассеяния $\mu'_s(\lambda)$ биотканей проводилась по методике, подробно описанной в работе [2].

Систематизация результатов, полученных в ходе выполнения исследований, позволили сделать следующие выводы:

1. Спектральный контур коэффициента диффузного отражения тканей головного мозга образована, преимущественно, спектральными полосами поглощения гемоглобина (350 ± 10 , 418 ± 5 , 545 ± 5 и 577 ± 5 нм), молекул воды (975 ± 5 , 1455 ± 5 и 1930 ± 5 нм) и липидов (1215 ± 5 , 1725 ± 5 и 1780 ± 5 нм), на длинах волн которых, коэффициент поглощения $\mu_a(\lambda)$ приобретает характерные максимумы [3].
2. Типичные значения $R_d(\lambda)$ лежат в пределах от 0.03 ± 0.01 в УФ- и БИК-областях до 0.35 ± 0.1 в видимой области спектра. При этом эффект термокоагуляции приводит к росту диффузного отражения до 1.5 раз, что вызвано, как увеличением поглощения до 1.5 раз, так и 2-кратным ростом коэффициента транспортного рассеяния $\mu'_s(\lambda)$.
3. Аппроксимация коэффициента рассеяния 2-х степенной функцией – $\mu'_s(\lambda) = 5,482 \cdot 10^9 \cdot \lambda^{-4} + 68,508 \cdot \lambda^{-0.172}$ указывает на его формирование,

преимущественно, рассеянием Релея (элементы цитоплазмы и стромы, надмолекулярных комплексов и др.), хотя вклады рассеяния Ми (ядра клеток, жгуты волокон соединительной ткани) также могут быть различимы.

4. По мере развития процессов термокоагуляции коэффициент транспортного рассеяния биотканей принимает вид – $\mu'_s(\lambda) = 3,883 \cdot 10^{11} \cdot \lambda^{-4} + 33,513 \cdot \lambda^{-0.73}$, что указывает на незначительное изменение относительных размеров и концентрации рассеивателей Ми, в то время как размер релеевских частиц уменьшается, а их концентрация растет.
5. Обнаруженные морфофункциональные изменения свидетельствуют в пользу нарушения гистоструктуры и архитектоники паренхимы биоткани и развития коагуляционных эффектов в процессе лазерного нагрева тканей серого вещества головного мозга [4].

Список литературы

1. Optical-Thermal Response of Laser Irradiation Tissues. Ed., A.J. Welch and M.J.C. Van Gemert: © Springer Science+Business Media B.V. 2011. 958 p.
2. Jacques S.L. Optical properties of biological tissues: a review// Phys. Med. Biol. 2013, V. 58, R37-R61.
3. Prahl S.A. (2018) Доступно: <http://omlc.ogi.edu/spectra/PhotochemCAD/html/index.html>
4. Лазерная инженерия хрящей/ под ред. В. Н. Баграташвили, Э.Н. Соболя, А.Б. Шехтера. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006 – 488 с.

Исследование низкотемпературного воздействия на биоткани животного происхождения с использованием протяженного криоаппликатора

Пушкарев А.В.¹, Андреев Н.А.¹

¹МГТУ им. Н. Э. Баумана

e-mail: al-nikoly@yandex.ru

На текущий момент разработано несколько типов хирургических операций для устранения фибрилляции предсердий [1]: изоляция левого предсердия (криобаллонная абляция, радиочастотная абляция); процедура «Коридор»; операция «Лабиринт», в том числе ее криомодификация.

Настоящая работа посвящена исследованию низкотемпературного воздействия с помощью криоаппликатора разрабатываемого перспективного аппарата для лечения фибрилляции предсердий. Приведены результаты экспериментального исследования *in vitro* низкотемпературного воздействия на целевую область биоткани при ее начальной температуре 37 гр. С. Получено распределение температуры по толщине ткани и произведена оценка возможности достижения трансмуральности непроводящих областей, требуемых при криомодификации операции «Лабиринт».

Исследуемые образцы представляли собой свиные сердца средних размеров, закрепляемые на дополнительной подставке в прозрачной емкости из пластика. Для поддержания начальной температуры сердца 37 гр. С. через емкость циркулировал

физиологический раствор, нагреваемый в термостате. Во избежание контакта сердечной ткани и физиологического раствора сердце помещалось в гибкую полиэтиленовую емкость.

В ходе процедуры, к части миокарда прикладывался протяженный криоаппликатор, в составе криохирургического аппарата, охлаждаемый жидким азотом. Криовоздействие на все образцы проводилось в течение равных промежутков времени. В ходе каждого криовоздействия с помощью датчиков температуры снималось распределение температуры по длине образующейся непроводящей области.

В качестве датчиков температуры использовалось 5 игольчатых термодатчиков, закрепляемых с помощью координатной решетки в биологической ткани на одинаковой глубине друг от друга и на расстояниях от 10 до 20 мм между датчиками по длине области криовоздействия. Для более точного позиционирования игольчатых термодатчиков по аналогии с решеткой мишенью для картирования предстательной железы [2] (при криоабляции рака предстательной железы) на 3D принтере была изготовлена решетка прямоугольной формы с отверстиями диаметром 1,5 мм, 5х5 штук.

В работе получено распределение температуры в целевой области биоткани при воздействии на нее криоаппликатором, охлаждаемым жидким азотом. Определено время достижения крионекроза по толщине биоткани. Выработаны практические рекомендации по выполнению низкотемпературного воздействия для лечения фибрилляции предсердий. Установлено, что использование жидкого азота в качестве вещества охлаждающего криоаппликатор при лечении фибрилляции предсердий более эффективно, чем использование дросселирования аргона высокого давления или диоксида азота.

Исследование выполняется при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-824.2020.2).

Список литературы

1. Киселев А.В., Яжборовская А.С. Операция «Лабиринт-3» как итог 30-летней истории хирургического лечения фибрилляции предсердий. XIX Ежегодная сессия Научного Центра сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева с Всероссийской конференцией молодых ученых.
2. Криоабляция - высокотехнологичный метод лечения пациентов с раком предстательной железы. А.В. Васильев, А.В. Говоров, А.В. Пушкарев, Д.И. Цыганов, Д.Ю. Пушкарь. Высокотехнологическая медицина. 2016. Т. 3. № 3. С. 5-15.

Physical model for effects of microwaves on nucleoids in living cells: role of carrier frequency, modulation and DC and AC magnetic field

Matronchik A.Y.¹, Belyaev I.Y.²

¹NRNU MEPHI, ²Cancer Research Institute, BMC, SAS, Bratislava, Slovakia

e-mail: matronchik2004@mail.ru

It has previously been shown that microwaves (MWs) and extremely low frequency (ELF) magnetic fields (MF) at low intensities affect conformation of nucleoids in cells of different types. Recent data have shown that MWs from mobile phone affect nucleoids in human lymphocytes [1,2]. Effects of ELF MF depended significantly on collinear static MF. Experimental

evidence has indicated that the MW effects have also been dependent on static MF. The physical model has been developed to describe effects of weak static and alternating magnetic fields. Recently, we presented the model of slow nonuniform rotation of the charged DNA domain for combined effects of microwaves, static and alternating magnetic fields [3-5].

The oscillation of the center of mass x, y, z of the charged nucleoid (DNA domain) in static MF $B = 60 \mu T$, and high frequency electric modulated fields $E(t) = E_0 \cos(\omega t) \sin(\omega t)$:

$$m(t)\ddot{x} + kx = Q(t)[B\dot{y} + E(t)], m(t)\ddot{y} + ky = -Q(t)B\dot{x}, m(t)\ddot{z} + kz = 0,$$

where k is elasticity coefficient, $Q(t)$ - a charge of nucleoid, $m(t)$ - its mass, E_0 - amplitude, ω - high frequency of an electric field and $\tilde{\omega}$ - low frequency of an electric field. The axis z is directed along a vector of a magnetic field and passes through a place of fastening of nucleoid, the axis x is directed along an electric field. The mass and a charge of nucleoid slowly and periodically change in due course as a result of interaction with proteins and ions. In the received solution there is a low-frequency resonance at $\tilde{\omega} = \Omega_0 / 2 + m\omega_q$, where $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. In this case the radius of the center of mass increases in time under the law:

$$r_0(t) = (q_0 E_0 / 4\omega_0) J_m(\Omega_1 / 2\omega_q) t \cos(\omega t).$$

Such resonant growth of radius of the center of mass may affect binding of DNA with structural proteins and enzymes resulting in the experimentally observed effects. The predictions of this model are:

1. Amplitude of the electric field should be large enough to induce oscillations of nucleoids.
2. MW effects should be observed only at specific carrier frequencies.
3. Effects of MWs should depend on modulation.
4. Effect should be observed at specific intensity flux densities of static MF.

Acknowledgments

This study was supported by the VEGA grant 2/0089/18.

References

1. Sarimov R., Malmgren L. O. G., Markova E., Persson B. R. R., and Belyaev I. Y., «Non-thermal GSM microwaves affect chromatin conformation in human lymphocytes similar to heat shock,» IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 32, pp. 1600-1608, 2004.
2. Belyaev I. Y., Hillert L., Protopopova M., Tamm C., Malmgren L. O., Persson B. R. R., Selivanova G., and Harms-Ringdahl M., «915 MHz microwaves and 50 Hz magnetic field affect chromatin conformation and 53BP1 foci in human lymphocytes from hypersensitive and healthy persons,» Bioelectromagnetics, vol. 26, pp. 173-184, 2005.
3. Matronchik A.Y., Belyaev I.Y., «Model of slow nonuniform rotation of the charged DNA domain for effects of microwaves, static and alternating magnetic fields on conformation of nucleoid in living cells», Frohlich Centenary International Symposium "Coherence and Electromagnetic Fields in Biological Systems", Prague, 2005.
4. Matronchik A.Y., Belyaev I.Y. Mechanism for combined action of microwaves and static magnetic field: Slow non uniform rotation of charged nucleoid. *Electromagn Biol Med* 27(4):340–354, 2008.
5. Belyaev I.Y. Biophysical Mechanisms for Nonthermal Microwave Effects. *Electromagnetic Fields in Biology and Medicine*. Boca Raton, London, New York: CRC Press:49-67, 2015.

Исследование применимости Silastic T-4, PlatSet 30 и Lasil-C для микрофлюидных устройств

Гермаш Н. Н.¹, Есикова Н.А.¹, Афоничева П.К.¹, Евстапов А.А.¹

¹ИАП РАН

e-mail: yilatan_nata@mail.ru

Благодаря своим свойствам (оптическая прозрачность, термическая и химическая устойчивость, биосовместимость) эластомерные материалы нашли широкое применение в микрофлюидике. Наиболее часто для создания микрофлюидных устройств используется полидиметилсилоксан (ПДМС) Sylgard-184 (Dow Corning, США). Его свойства хорошо изучены, что подтверждается множеством публикаций с примерами его применения для решения различных задач. Простота формования микроструктур методом мягкой литографии и способы герметизации. Хорошая газопроницаемость и эластичность ПДМС позволяет использовать этот материал для изготовления устройств «орган-на-чипе» [1]. Наиболее существенными недостатками Sylgard-184 являются поглощение материалом малых молекул и нестабильность свойств во времени при модификации поверхности. Для создания систем «орган-на-чипе» в некоторых случаях могут потребоваться материалы с меньшей жесткостью, чем у ПДМС [2].

Поэтому поиск и исследование новых материалов, обладающих необходимыми свойствами для прототипирования микрофлюидных устройств, ориентированных на решение определенных задач, является актуальным и востребованным.

В работе рассмотрены эластомерные материалы: Silastic T-4, PlatSet 30 и Lasil-C. Стойкость в РФ эластомеров Silastic T4 и Lasil-C в два, а PlatSet 30 в 4 раза ниже, чем Sylgard-184. Удлинение при разрыве этих эластомеров в разы превосходит Sylgard-184 (в 4,5 и более) [3]. Материалы с такими свойствами подходят для создания элементов управления потоками, в частности, клапанов, диафрагм и т.д.

К преимуществам изучаемых материалов относится быстрое отверждение (при 70 °C 30 мин вместо 4ч для ПДМС). Однако, следует отметить, что Silastic T4 и PlatSet 30 обладают меньшим светопропусканием, чем Sylgard-184, а Lasil-C – непрозрачный материал зеленого цвета.

Оценка упругих свойств материалов показала, что у всех материалов модуль Юнга меньше, чем у Sylgard-184 ($2,71 \pm 0,21$) МПа: ($1,09 \pm 0,04$) МПа для PlatSet 30; ($1,61 \pm 0,09$) МПа для Lasil-C; ($1,93 \pm 0,03$) МПа для Silastic T-4. Для различных тканей организма модуль Юнга оценивается: эластин – 0,1-0,6 МПа, сонная артерия – 0,7-1,1 МПа, бедренная артерия – 0,9-1,2 МПа, мышцы в покое – 0,9 МПа. Таким образом, применение данных эластомеров позволяет создавать системы «орган-на-чипе» с параметрами, более близкими к живым тканям.

К недостаткам Lasil-C и PlatSet 30 можно отнести их неприменимость при работе с традиционными мастер формами из Si/SU-8. Однако, данный вопрос решается путем создания вторичных мастер форм, например, из пластика, или использованием металлических мастер-форм.

Формование микроструктур в эластомерах производилось методом мягкой литографии с применением мастер формы из латунного сплава, представляющей собой массив выпуклых структур (линейных каналов, цилиндров) с размером от 1 мм до 60 мкм, высотой ~60 мкм. Оценка размеров структур в эластомерных репликах осуществлялась по их изображениям, полученным на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе TCS SL (Leica).

При репликации размер структур уменьшился. Наиболее близкие к оригиналу размеры структур получились для материала с минимальным модулем Юнга - PlatSet 30, уменьшение составило до 2%. Для Lasil-C оно составило до 3,7 %, за исключением канала шириной 60 мкм (отклонение до 16,7 %). Качество репликации для Silastic T4 сравнимо с Sylgard-184 для структур размером 1мм (изменение структур составило до 3 %). Для цилиндров диаметром 300 мкм при репликации в ПДМС отклонение размера для верхней части и основания - до 4 %. Для Silastic T4 наблюдается отклонение для основания - 2%, для верха - 5,4 %. У каналов шириной 60 мкм при репликации в Sylgard-184 и Silastic T4 произошло сужение верхней части (на 24 и 27% соответственно) и расширение основания (на 2,2 и 7,7 %).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что все изученные материалы могут быть применены для изготовления микрофлюидных устройств или функциональных элементов этих устройств.

Список литературы

1. Tsao P.W. Polymer microfluidics: Simple, low-cost fabrication process bridging academic lab research to commercialized production// *Micromachines*, 2016, vol. 7, no. 12, pp. 225–236.
2. Афоничева П.К., Буляница А.Л., Евстапов А.А. «Орган-на-чипе» — материалы и методы изготовления (обзор) // *НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ*, 2019, том 29, № 4, с. 3–18.
3. Лассо СПб: сайт – URL: <https://lassospb.ru/products/category/silikon-jidkyi-rezina-dlya-form> (дата обращения 08.02.2021). – Текст: электронный.

Конформационные переходы филамента RecA на однострессовой ДНК в присутствии белка RecX

Сердаков М. Д.¹, Алексеев А.А.¹, Побегалов Г.Е.¹, Якимов А.П.¹, Байтин Д.М.², Ходорковский М.А.¹

¹ СПбПУ

² НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ

e-mail: maks.serdakov@bk.ru

Гомологичная рекомбинация является процессом, наиболее часто используемым бактериями для устранения разрывов в молекулах ДНК. Белок RecA у прокариот играет ключевую роль в осуществлении процесса гомологичной рекомбинации. RecA осуществляет свои функции, формируя спиральные филаменты на однострессовых участках поврежденной молекулы ДНК [1]. Структура филамента важна для поиска гомологии и последующего обмена гомологичных участков. Внутри клетки активность RecA регулируется рядом белков кофакторов. Одним из таких белков-регуляторов является RecX, который, судя по литературным данным, способствует разборке филамента RecA [2].

В настоящей работе исследовалось изменение длины филамента RecA (*E. coli*) на однострессовой ДНК (онДНК) при переходах между растворами содержащими соответственно 1 мМ АТФ, и 1 мМ АТФ с добавлением 1 мкМ RecX. Для исследования использовалась комбинация метода оптической ловушки с пятиканальной микрофлюидной системой (Lumicks). Сборка филамента RecA на онДНК проводилась после фиксации онДНК между двумя оптическими ловушками согласно ранее разработанному

экспериментальному протоколу[3]. После формирования филамента, о чем можно было судить по увеличению длины в 1.5 раза относительно контурной длины В-формы ДНК, к филаменту прикладывалась сила в 2 пН для дальнейшей регистрации влияния RecX на динамику изменения длины филамента.

Сформированный филамент переносили из раствора с RecA и АТФ в среду с АТФ без свободного RecA. При этом регистрируемая длина филамента практически не изменялась. Дальнейший перенос филамента в среду, содержащую RecX и АТФ, приводил к значительному уменьшению длины ДНК-белкового комплекса: за время инкубирования 30 секунд длина уменьшалась на $12.1 \pm 1.8\%$ от исходной. Возвращение филамента в среду, содержащую АТФ без RecX приводило к увеличению длины, при этом восстановление длины происходило не до начального уровня, а до значения на $5.9 \pm 1.2\%$ меньше исходного. Паттерны сокращения и восстановления длины филамента при переходах между растворами, содержащими и не содержащими RecX, воспроизводились многократно на одной и той же молекуле ДНК.

Уменьшение длины филамента при переходе в среду с RecX может быть отнесено к ускорению диссоциации RecA с ДНК в присутствии RecX. Однако подобная интерпретация не может объяснить дальнейшее частичное восстановление длины филамента, наблюдаемое в отсутствии свободных RecA и RecX. Наблюдаемые циклы укорочения и увеличения длины филамента RecA качественно схожи с ранее показанными для филамента RecA переходами между двумя конформационными состояниями, индуцируемыми сменной нуклеотидного кофактора [3, 4, 5]. Участки неактивной конформации могут возникать локально в среде, содержащей АТФ, вследствие АТФазной активности филамента RecA. Полученные в данной работе результаты дают основание полагать, что RecX, взаимодействуя с филаментом RecA приводит к увеличению доли неактивных состояний в структуре филамента, что приводит к уменьшению регистрируемой длины. При этом данный эффект является обратимым: при изъятии RecX из среды число неактивных состояний уменьшается, что приводит к увеличению наблюдаемой длины филамента.

Результаты данного исследования расширяют представления о механизмах регуляции RecA. В связи с этим они представляют как фундаментальный, так и практический интерес, ввиду того, что RecA является активатором бактериального SOS-ответа, одного из основных механизмов распространения устойчивости к антибиотикам [6]. Соответственно, понимание влияния RecX на процессы ингибирования RecA представляет ценность для разработки медицинских препаратов, сопутствующих антибиотикотерапии.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №19-74-10049.

Список литературы

1. Chen Z., Yang H., Pavletich N.P. Mechanism of homologous recombination from the RecA-ssDNA/dsDNA structures // *Nature*. - 2008. - Vol. 453. - P. 489-484.
2. Cox M. M. Regulation of bacterial RecA protein function // *Crit Rev Biochem Mol Biol* Jan-Feb 2007;42(1):41-63.
3. Alekseev A., Serdakov M., Pobegalov G., Yakimov A., Bakhlanova I., Baitin D., and Khodorkovskii M. (2020) Single-molecule analysis reveals two distinct states of the compressed RecA filament on single-stranded DNA // *FEBS Lett*. doi:10.1002/1873-3468.13922
4. Nishinaka T., Doi Y., Hara R., and Yashima E. (2007) Elastic behavior of RecA-DNA helical filaments. *Journal of molecular biology*, 370, 837-845.
5. Marijn T. J. van Loenhout, Thijn van der Heijden, Roland Kanaar, Claire Wyman, and Cees Dekker Dynamics of RecA filaments on single-stranded DNA // *Nucleic Acids Research*, 2009, Vol. 37, No. 12 4089–4099 doi:10.1093/nar/gkp326

6. Yakimov A., Pobegalov G., Bakhlanova I., Khodorkovskii M., Petukhov M., Baitin D. Blocking the RecA activity and SOS-response in bacteria with a short α -helical peptide // *Nucleic Acids Research*, Volume 45, Issue 16, 19 September 2017, Pages 9788–9796

Разработка и исследование линейки миниатюрных электрохимических сенсоров обучаемой медико-биологической диагностической системы

Созинова О. Ю.¹, Зайцева А.Ю.

¹ИАП РАН

e-mail: shopping.spb@gmail.com

В последние годы значительно возрос интерес к системам поддержки принятия врачебных решений в части диагностики функционального состояния здоровья человека, способным представлять результат в удобном для интерпретации цифровом виде. Разработан и исследован модуль пробоподготовки и сенсорный блок диагностической системы, представляющий собой набор миниатюрных электрохимических сенсоров с так называемой перекрестной чувствительностью. Модуль пробоподготовки обеспечивает отбор пробы конденсата выдыхаемого воздуха и устройство для установки сенсоров в исследуемую среду. Сенсорный модуль состоит из нескольких миниатюрных потенциометрических электродов с основной чувствительностью к ионам Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- , Ca^{2+} , F^- и pH и воспроизводимой перекрестной чувствительностью к другим ионам и органическим компонентам конденсата выдыхаемого воздуха человека. Сенсорный модуль формирует «образ» исследуемой среды в виде композиции электродных потенциалов и pH. Получаемая совокупность многомерных данных требует современной математической обработки методами обучения и распознавания образов, такими как метод главных компонент, метод искусственных нейронных сетей и другие [1].

Для исследования миниатюрного сенсорного электрохимического модуля были проведены экспериментальные исследования влияния физической нагрузки на «цифровой образ» функционального состояния испытуемых. Были выполнены исследования конденсата выдыхаемого воздуха у 10 испытуемых до и после нагрузки, которые интерпретировались с помощью проекционного метода анализа коррелированных данных. Результаты проведенных исследований показывают, что испытуемые разделяются на группы различной адаптированности и чувствительности к физической нагрузке.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о работоспособности сенсорного блока диагностической системы и перспективе исследований биохимических показателей конденсата выдыхаемого воздуха с применением методов обучаемых систем с целью оценки функционального состояния здоровья человека.

Список литературы

1. Зайцева А.Ю., Кисляков Ю.Я., Мазинг М.С., Давыдов В.В. Применение неинвазивной оптической обучаемой диагностической системы и математических методов анализа многомерных данных для оценки кислородного статуса тканей человека. // *Научное приобщение*. 2020. Т. 30. № 4, с. 113–118

Использование самообучающихся нейронных сетей и метода главных компонент для автоматизации оптического анализа кислородного статуса тканей человека

Мазинг М. С.^{1,2}, Зайцева А.Ю.¹

¹ИАП РАН

²СПБПУ

e-mail: mazmari@mail.ru

Разработана и исследована обучаемая система анализа кислородного статуса тканей человека, состоящая из двух модулей: оптико-электронного и вычислительно-информационного. Оптико-электронный модуль представлен шестиканальным интегральным оптическим анализатором спектров видимого диапазона и внешним источником широкополосного излучения, которым является светодиод белого света, интегрированный в микросхему оптического анализатора [1]. Информационно – вычислительный модуль оптической системы осуществляет общее управление, отображение полученных измерений и обработку полученного массива данных, которая представляет собой математическое моделирование с использованием нейронных сетей и статистических алгоритмов анализа многомерных данных, а также визуализацию образов.

Произведен кластерный анализ многомерных данных с применением методов искусственных нейронных сетей с обучением без учителя (самоорганизующаяся карта Кохонена) и метода главных компонент. Многомерные данные представляли собой численные показания диагностической системы шести оптических сенсоров до и после функциональной нагрузки для 31 испытуемого. Был произведен сравнительный анализ результатов вычислений в ходе обработки данных различными методами.

В результате анализа испытуемые были разделены на 3 группы: с высокой устойчивостью организма к гипоксии, с достаточной устойчивостью и с низкой устойчивостью [2]. Результаты кластеризации испытуемых разными методами подтвердили тенденцию испытуемых к группированию и позволили произвести оценку устойчивости и качества созданного кластерного решения. При анализе комплексной физиологической реакции испытуемых на функциональную нагрузку приоритетным для использования в информационном модуле диагностической системы был выбран метод главных компонент.

Результаты проведенных исследований демонстрируют актуальность использования методов машинного обучения и визуализации многомерных данных для решения задач неинвазивного автоматизированного контроля кислородного статуса тканей человека.

Список литературы

1. Зайцева А. Ю., Мазинг М. С., Кисляков Ю. Я., Мультисенсорная оптическая система неинвазивного контроля кислородного обеспечения тканей человека при функциональной нагрузке, Научное приборостроение, том. 30, №4, 113-118, 2020
2. Mazing, M. S., Zaitceva, A. Y., Kislyakov, Y. Y., Davydov, V. V., Kondakov, N. S., Avdyushenko, S. A., Analytical complex for study of the oxygen status of tissues of the human organism, Journal of Physics: Conference Series, T. 1695, №. 1., C. 012065, 2020

Protein secondary structure analysis of serum from patients with oncohematological diseases

Mikhailets E.S.¹, Chernyshev D.A.¹, Telnaya E.A.¹, Plotnikova L.V.¹, Garifullin A.D.², Kuvshinov A.Yu.², Voloshin S.V.^{2,3,4}, Polyanchko A.M.^{1,5}

¹St. Petersburg State University

²Russian Research Institute of Hematology and Transfusiology

³Kirov Military Medical Academy

⁴Mechnikov Northwestern State Medical University

⁵Institute of Cytology of the Russian Academy of Sciences

e-mail: st061577@student.spbu.ru

Today one of the most important tasks of medicine is the development of effective approaches for the diagnostics and treatment of oncological diseases. Multiple myeloma (MM) is a blood cancer, which is characterized by the accumulation of malignant plasma cells in the bone marrow producing a monoclonal immunoglobulin (M-protein). Overproduction of the M-protein leads to a change in the average parameters of protein secondary structure in serum. Therefore, the analysis of the secondary structure of blood serum proteins gives us the opportunity to reveal the disproportion in the protein composition in the serum. Previously, we demonstrated a basic ability to distinguish the blood serum samples of patients with MM and healthy donors according to their IR spectra [1]. Infrared spectroscopy is one of the most sensitive methods for studying secondary structure of proteins.

In this study we analyzed FTIR spectra of serum samples from patients with multiple myeloma provided by the hematology clinic of the Russian Research Institute of Hematology and Transfusiology (St. Petersburg, Russia), where blood serum samples from MM patients and healthy donors were collected and characterized. The samples were studied in D₂O solutions using Tenor27 FTIR spectrometer (Bruker) in demountable CaF₂ cells with an optical path length of 50 μ m. The primary processing and analysis of the spectra was carried out using the software supplied with the instrument.

In the obtained absorption spectra, we analyzed Amide I (1700–1600 cm⁻¹) band, which is a superposition of vibrations corresponding to different conformations of the polypeptide chains. These vibrations provide information about α -helices, β -structures of various types, and disordered regions in the protein. To decompose the Amide I band into components, the spectrum of the second derivative was analyzed as described earlier [2, 3]. The contribution of each type of the secondary structure was estimated as the area under the corresponding contour in ratioed to the total area of the Amide I band. Based on the obtained results differences in the secondary structures of proteins in serum samples from healthy donors and from the patients with MM were revealed. The most characteristic difference is a decrease in the proportion of α -helical regions by 10-12% and an increase in the content of β -structures by 5-8% in patients with MM compared to healthy donors. The results of this study confirm the potential applicability of this approach for the diagnosis of MM.

The work was carried out using the equipment of the resource centers of the Research Park of St. Petersburg State University ("Centre for Optical and Laser Materials Research", "Centre for Diagnostics of Functional Materials for Medicine, Pharmacology and Nanoelectronics", "Cryogenic Department").

References

1. Plotnikova L.V., Kobeleva M.O., Borisov E.V., Garifullin A.D., Povolotskaya A.V., Voloshin S.V., Polyanchko A.M. (2019) Infrared Spectroscopy of Blood Serum from Patients with Multiple Myeloma. *Cell and Tissue Biology*, 13(2), P. 130-135
2. Polyanchko A.M., Romanov N.M., Starkova T.Yu., Kostyleva E.I., Chikhirzhina E.V. (2014) Analysis of the secondary structure of the linker histone H1 by infrared absorption spectra. *Cytology*, 56 (4), 316-322.
3. Telnaya E.A., Plotnikova L.V., Garifullin A.D., Kuvshinov A.Yu., Voloshin S.V., Polyanchko A.M. (2020) Infrared spectroscopy of blood serum of patients with oncohematological diseases. *Biophysics*, 65 (6), 1154-1160.

Численное исследование тепловой динамики в многокомпонентных биологических тканях

Поляков М. В.¹, Хоперсков А.В.¹

¹ВолГУ

e-mail: m.v.polyakov@volsu.ru

Злокачественные опухоли на ранней стадии своей эволюции обладают повышенным удельным тепловыделением [1]. Данная зависимость лежит в основе принципа медицинской диагностики онкологических заболеваний на ранней стадии методом радиомикроволновой термометрии. Этот метод основан на измерении интенсивности собственного электромагнитного излучения внутренних тканей пациента в диапазоне сверхвысоких частот [2]. Существенным преимуществом данного метода является его полная безопасность и безвредность по принципу воздействия на пациентов, за счет этого имеется возможность отслеживать состояние пациента в динамике с абсолютно произвольным временным шагом. В настоящее время активно развиваются методы диагностики онкологических заболеваний молочных желез на основе метода радиомикроволновой термометрии [3, 4].

В данной работе были исследованы особенности механизма теплового взаимодействия раковых опухолей со здоровыми тканями человека. В основе работы лежат методы математического и компьютерного моделирования биотепловых процессов. Для проведения экспериментов нами был построен набор трехмерных моделей молочных желез с многокомпонентной мелкомасштабной внутренней структурой. Данные модели задают начальную геометрию задачи [5]. Важной особенностью построенных нами моделей является сильная пространственная неоднородность физических параметров биологических тканей (коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, плотность, электрическая проводимость, диэлектрическая проницаемость). Анализ проведенных вычислительных экспериментов указывает на сильное влияние фактора неоднородности биологического объекта на распределение температуры в объеме молочной железы. Температуры моделей с одинаковым процентным составом биологических тканей, но с вариативным строением отличаются на 10-20%. Важную роль в процессе формирования температуры играет кровеносная система. Температура крови, протекающей по артериям составляет около 37 °С. Для вычисления яркостной температуры по методике обследования мы также определяли напряженность электрического поля для характеристик антенны (частота $f = 3.8$ ГГц, диаметр рабочей поверхности $d = 32$ мм). Мы провели серию численных

экспериментов, в ходе которых получили глубинные и кожные температуры для 300 моделей молочных желез, отличающихся пространственным положением биоконфигуранта, а также значениями исходного вектора физических параметров. По оценкам минимальный размер опухоли, диагностируемой с различной степенью эффективности лежит в пределах $3 \text{ мм} \leq R \leq 4 \text{ мм}$, где R – радиус раковой опухоли. В рамках проведенного исследования была показана возможность детектирования злокачественных образований на ранних стадиях методом радиомикроволновой термометрии, поэтому использование указанного метода может повысить качество клинической диагностики онкологических заболеваний молочных желез.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (гос.задание № 0633-2020-0003).

Список литературы

1. Gautherie, M. Temperature and blood flow patterns in breast cancer during natural evolution and following radiotherapy / M. Gautherie // Prog. Clin. Biol. Res., 1982. – № 107. – P. 21–64.
2. Седанкин М.К., Леушин В.Ю., Гудков А.Г., Веснин С.Г., Сидоров И.А., Агасиева С.В., Овичников Л.М., Ветрова Н.А. Антенны-аппликаторы для медицинских микроволновых радиотермографов // Медицинская техника, 2018, – №4(310), с. 13–15.
3. Замечник Т.В., Лосев А.Г., Петренко А.Ю. Управляемый классификатор в диагностике рака молочной железы по данным микроволновой радиотермометрии // Математическая физика и компьютерное моделирование, Том 22, – № 3, 2019, с. 52–66.
4. Figueiredo A.A.A., do Nascimento J.G., Malheiros F.C., da Silva Ignacio L.H., Fernandes H.C., Guimaraes G. Breast tumor localization using skin surface temperatures from a 2D anatomic model without knowledge of the thermophysical properties // Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2019, vol. 172, pp. 65–77.
5. Поляков М.В., Хоперсков А.В. Математическое моделирование пространственного распределения радиационного поля в биоткани: определение яркостной температуры для диагностики // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. – №5 (36) 2016, с. 73-84.

Создание микро- и наноканалов на поверхности кремниевых чипов методами литографии и исследование ионного транспорта в каналах.

Афоничева П. К.¹, Лебедев Д.В.^{1,2,3}, Букатин А.С.³, Мухин И.С.³, Евстапов А.А.¹

¹ИАП РАН, ²СПбГУ, ³СПбАУ

e-mail: polina.afonicheva@gmail.com

Благодаря развитию методов и технологий создания микро- и наноструктур стало возможным изучение различных процессов на микро-и наноуровне [1]. Микрофлюидные чипы с интегрированными микро- и наноразмерными структурами в настоящее время нашли широкое применение при решении важных биологических и медицинских задач,

таких как анализ и селективное обнаружение нуклеиновых кислот и белков, секвенирование ДНК и т. д. Современные технологии позволяют интегрировать наноразмерные структуры (например, наноканалы, нановисеры) в конструкцию микрофлюидного устройства [2]. Такой подход позволяет изучать биофизические и биохимические процессы на качественно новом уровне.

В настоящее время большой интерес представляет изучение молекулярного и ионного транспорта в микрофлюидных системах, содержащих нанопоры и наноканалы [3]. Эти исследования востребованы для разработок высокочувствительных химических и биохимических сенсоров, а также для устройств секвенирования нуклеиновых кислот [4]. Перспективным является создание искусственных (биомиметических) аналогов живых нанофлюидных систем [5], в которых важным является изучение механизмов переноса в наноканалах.

Целью данного исследования была разработка комплексного подхода к созданию и исследованию кремний-стеклянного микрофлюидного чипа, содержащего систему наноканалов.

Для формирования чипа была использована комбинация методов оптической и ионной литографии. На первом этапе формировалась система микроканалов, а затем к этой системе с помощью ионного травления добавлялись наноканалы. Важным этапом при создании такого чипа является процесс инкапсуляции (герметизации). В рамках работы для этой цели была использована техника анодного сваривания. Разработанная методика позволила создать чип с двумя микроканальными системами разделенными наноканалами. Глубина микроканалов составляла от 5 до 10 мкм. Геометрические параметры (глубина) наноканалов варьировались от 20 до 100 нм.

В работе исследовались транспортные свойства наноканалов методом измерения ионной проводимости.

Ионная проводимость наноканала определялась путем измерения вольтамперной кривой в потенциостатическом режиме. Было показано, что при низких концентрациях рабочего раствора двойные электрические слои перекрываются внутри наноканалов, поэтому с увеличением концентрации проводимость изменяется незначительно. Однако при высоких концентрациях размер двойных слоев уменьшается, и перекрытие исчезает, а проводимость соответственно увеличивается. Моделирование экспериментальных данных показало, что значения проводимости соответствуют каналам диаметром 20 нм и поверхностной плотностью заряда $1,5 \text{ мКл} / \text{м}^2$.

Предлагаемый метод позволяет создавать ансамбли наноканалов заданной ширины и глубины. Такие устройства могут найти широкое применение при исследовании транспорта как ионов, так и различных молекул, в том числе и биологических, через наноканалы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00823. Букатин А.С. и Мухин И.С. выражают благодарность за поддержку Российскому Научному Фонду (проект № 20-74-10117).

Список литературы

1. Ramsden J. Nanotechnology: an introduction. – William Andrew, 2016.
2. Evstropov A. A. et al. Ion and electron beam assisted fabrication of nanostructures integrated in microfluidic chips //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2012. – V. 282. – P. 145-148.

3. Zhu Z. et al. Ion/molecule transportation in nanopores and nanochannels: From critical principles to diverse functions //Journal of the American Chemical Society. – 2019. – V. 141. – №. 22. – P. 8658-8669.
4. Wang Y., Yang Q., Wang Z. The evolution of nanopore sequencing //Frontiers in genetics. – 2015. – V. 5. – P. 449.
5. Kowalczyk S. W., Blosser T. R., Dekker C. Biomimetic nanopores: learning from and about nature //Trends in biotechnology. – 2011. – V. 29. – №. 12. – P. 607-614.

Спектральная оценка тканей зубов при пародонтите до и после открытого кюретажа

А.Ю. Ионов¹, П.Е. Тимченко¹, Е.В. Тимченко¹, О.О. Фролов¹, И.В. Бажутова², Л.Т. Волова²,
М.А. Зыбин³

¹Самарский университет

²Самарский государственный медицинский университет

³Стоматологическая клиника «ДИАМАНТ»

e-mail: artem.ionov.95@mail.ru

Пародонтит – одно из самых коварных и часто встречающихся стоматологических заболеваний. Развиваясь постепенно, на начальных этапах он не вызывает ни боли, ни сильного дискомфорта. По данным ВОЗ (2002), около 95% взрослого населения планеты и 80% детского населения имеют те или иные признаки пародонтита. Высокий уровень заболеваний пародонта, по докладу научной группы ВОЗ, выпадает на возраст 20 – 44 года (от 65 – 95%) и 15 – 19 лет (от 55 – 89%). Несвоевременное лечение может привести к тяжелым формам пародонтита, а в последствии и к потере зубов [1]. Для лечения пародонтита часто применяются операцию открытого кюретажа. Однако, не известно какое влияние оказывает данная операция на структуру тканей зубов.

В качестве метода оценки влияния кюретажа на структуру зубов может быть использован метод спектроскопии комбинационного рассеяния, который получил широкое распространение в медицине [2]. Данный метод был реализован с помощью экспериментального стенда, состоящего из рамановского пробника RPB-785, совмещенного с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.0RB-04 (мощность до 500 мВт, длина волны $784,7 \pm 0,05$ нм) и высокоразрешающего цифрового спектрометра Shamrock sr-303i, обеспечивающего спектральное разрешение 0,15 нм, со встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE.

В качестве объектов исследований были использованы зубы, удаленные в связи с хроническими пародонтитами. Диагноз пародонтит ставился клинически и при анализе компьютерной конусно-лучевой томографии (КТ) (код заболевания по МКБ-10 (1997 г.) - K05.3). Выделены 2 группы образцов: 1 группа – удаленные зубы пациентов до операции кюретажа; 2 группа – удаленные зубы тех же пациентов после проведения операции кюретажа.

В результате исследований проведен хеометрический анализ спектров комбинационного рассеяния твердых тканей зубов до и после кюретажа. Были выявлены спектральные изменения твердых тканей зубов. Установлено, что после проведения операции открытого кюретажа, в тканях зубов происходят спектральные изменения, связанные с изменением относительной интенсивности линий 957 см^{-1} (ν_1 P–O symmetric stretch (PO_4^{3-})) и 1070 см^{-1} (C–O in plane stretch (CO_2^{3-} ν_1)). Данные линии связаны с изменением минерального состава. Также наблюдаются изменения интенсивности линий на 1449 см^{-1}

(Lipids and proteins), 1036 cm^{-1} (phenylalanine (collagen assignment)), 854 cm^{-1} (Hydroxyproline $\nu(\text{C}-\text{C})$ stretch), связанные с образованием органического матрикса.

Список литературы

1. Янушевич О.О., Кузьмина Э.М., Максимовский Ю.М., Малый А.Ю., Дмитриева Л.А., Ревазова З.Э., Почтаренко В.А., Эктова А.И., Вагнер В.Д., Грудянов А.И., Смирнова Л.Е. // Клинические рекомендации (протоколы лечения) при диагнозе пародонтит: Москва, 2014. 124 с;
2. Timchenko E., Timchenko P., Volova L. etc. Raman Spectroscopy of Changes in the Tissues of Teeth with Periodontitis // DIAGNOSTICS 2020. — Vol. 10. Issue 11. № 11;

Использование формализма комплексного электрического модуля для мониторинга онкологических заболеваний

Сальникова Ж. А., Кастро Р.А.

РГПУ им. А.И. Герцена

e-mail: jannete90@mail.ru

В последние годы метод диэлектрической спектроскопии широко используется для исследования крови [1,2] При онкологических заболеваниях изменяются конформации молекул, образующих сыворотку крови [3-5], что изменяет их диэлектрический спектр. Следовательно, исследуя диэлектрический спектр сыворотки крови можно получить информацию о развитии онкологического заболевания. Целью данной работы является установление связи течения онкологического заболевания с диэлектрическими параметрами (α , β , τ , E_a) сыворотки крови.

Релаксационные явления в общем виде описываются уравнением Гаврильяка-Негами (Г-Н) [6] для комплексной диэлектрической проницаемости, в которое входят релаксационные параметры: α – ширина спектра времен релаксации, β – асимметрия этого спектра, τ – наиболее вероятное время релаксации молекул образца. Поскольку сыворотка крови обладает повышенной электропроводностью, скрывающей релаксационные явления, для их обнаружения мы использовали понятие комплексного электрического модуля M^* – величины, обратной к комплексной диэлектрической проницаемости. Для его вещественной и мнимой компонент $M'(\omega)$, $M''(\omega)$ из уравнения Г-Н можно получить соответствующие уравнения [7].

Экспериментально измеряют $M'(\omega)$, $M''(\omega)$, для сыворотки крови онкологических больных, которые аппроксимируют кривыми по формулам [7]. Релаксационные параметры: α , β , τ определяют эмпирически из принципа наилучшей аппроксимации одновременно $M'(\omega)$ и $M''(\omega)$. Для здоровых людей, вероятно $\alpha = 0$, $\beta = 1$, $\tau = \tau_1$ (Дебаевский спектр с каким-то одним временем релаксации τ_1); для больных $\alpha > 0$, $\beta < 1$, τ_2 (недебаевский спектр, описываемый уравнением Г-Н с каким-то средним временем релаксации τ_2), причём, чем выше степень заболевания, тем сильнее должно меняться значение данных параметров, особенно τ_2 , который может изменяться в несколько раз по отношению к τ_1 . График $M''(M')$ (Диаграмма Коула – Коула для электрического модуля) может наглядно демонстрировать отличие в спектрах здоровых людей от больных; чем тяжелее заболевание, тем, вероятно будет больше максимальное значение M'' и тем сильнее оно сместится в сторону увеличения M' .

Проведя измерения при различных температурах T_i и рассчитав для них времена релаксации τ_i можно, построив зависимость $\ln(\tau_i)$ от $1/T_i$ (Аррениусовская зависимость) определить энергию активации макромолекул E_a . Поскольку данный параметр зависит от конформации макромолекул, он также может быть параметром, по изменению которого можно осуществлять мониторинг онкологических заболеваний.

Список литературы

1. Wolf M., Gulich R., Lunkenheimer P., Loidl A. Broadband Dielectric Spectroscopy on Human Blood. // *Biochimia et Biophysica Acta (BBA)*. 2011, 1810(8), p.727 – 740.
2. Chelidze T. Dielectric spectroscopy of blood. // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2002, 305, p.285-294.
3. Романов А.Н., Винокурова Е.Ю., Ковригин А.О. и др. Диэлектрические характеристики биологических жидкостей человека при развитии онкологических заболеваний. – Барнаул; 2008, 72 с.
4. Петрусеви́ч Ю.М., Петрова Г.П., Берловская Е.Е., Макуренков А.М., Сергеева И.А., Федорова К.В. Диагностика онкологических заболеваний методами ЯМР, ЭПР и светорассеяния. // *Медицинская физика*. 2009, № 4 (44), с. 73-79.
5. Гибизова В.В., Аненкова К.А., Масленникова А.Д., Федорова К.В., Сергеева И.А., Петрова Г.П. Определение фундаментальных физических параметров белков сыворотки крови для развития методов диагностики злокачественных новообразований. // *Альманах клинической медицины*. 2016, февраль; 44 (2), с.158-164.
6. Havriliak S., Negami S. A complex plane analysis of α – dispersion in some polymer systems. // *J. of Polymer Science Part C*. 1966. v. 14, p.99-117.
7. Salnikova Zh.A., Kononov A.A. Derivation of the Havriliak – Negami equation for the complex electrical modulus. // *AIP Proceedings Conference №2308* <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0034028>

Параметрическая модель плавления ДНК оптимального порядка

Белов Д. А.¹, Белов Ю.В.¹, Буляница А.Л.¹

¹ИАП РАН

e-mail: onoff_10@mail.ru

Анализ ДНК методом плавления с высоким разрешением (High Resolution Melting, HRM-анализ) является относительно новым методом анализа и широко применяется в задачах выявления новых вариантов генов, скрининга образцов ДНК на однонуклеотидные полиморфизмы (SNP), выявления неизвестных мутаций, определения процента метилированной ДНК в образцах и подтверждения достоверности проведения полимеразной цепной реакции (ПЦР). Графики плавления ДНК (ГП), полученные в результате анализа, представляют собой S-образную зависимость измеренной величины флуоресцентного отклика от температуры образца. Нетривиальной задачей является определение характерных параметров ГП: температуры T_m и интервала плавления ΔT [1]. Ранее в работах [2, 3] были предложены методики определения параметров T_m и ΔT на основе различных моделей, в том числе, полиномиальной модели регрессии. Однако известные методики требуют ручных операций при нормализации ГП и определении базовой линии [2 - 4], а в случае полиномиальной модели не имеют критериев выбора ее оптимального порядка.

В настоящей работе предложена методика, включающая выбор оптимального порядка аппроксимирующего полинома и определение параметров T_m и ΔT на основе впервые выведенных аналитических выражений. В работе выполнено сравнение показателей, минимальное значение которых является критерием оптимального порядка аппроксимирующего полинома: несмещенной и состоятельной оценки дисперсии, финальной ошибки прогнозирования, информационных критериев Акаике и Шварца. В качестве предпочтительного показателя выбран информационный критерий Акаике. Выявлено несоответствие оптимальной по критерию Акаике параметрической модели физической природе описываемых процессов, заключающееся в завышенном порядке полинома. Это объясняется наличием ложных максимумов и минимумов за счет случайных составляющих. Предложен алгоритм приведения ГП к аппроксимации полиномом 4-ого порядка в соответствии с физическим аспектом процесса плавления ДНК. Выполнена проверка значимости различий дисперсий модели, оптимальной по критерию Акаике, и модели, согласованной с физическим аспектом плавления ДНК, на основе F-критерия Фишера.

Предложены ориентированные на полином 4-го порядка аналитические выражения для определения значения температуры плавления T_m и диапазона плавления ΔT в расчетном диапазоне температур:

$$T_m = -\frac{f_3}{4 \cdot f_4},$$

$$\Delta T = \frac{\sqrt{9 \cdot f_3^2 - 24 \cdot f_3 \cdot f_4}}{12 \cdot f_4},$$

где f_2 , f_3 и f_4 – коэффициенты аппроксимирующего полинома.

На анализаторе нуклеиновых кислот АНК-32 проведен анализ образца ампликона цитокератина (СК-19) при четырехкратном повторении по методике плавления при изменении температуры образца T в диапазоне от $T_1 = 70^\circ\text{C}$ до $T_2 = 95^\circ\text{C}$ с шагом 0.5°C и длительностью выдержки каждого значения температуры 30 секунд. Выполнено сравнение результатов применения предложенной и известной методики на основе полученных экспериментальных данных. Выявлены преимущества предложенной параметрической модели плавления ДНК оптимального порядка. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о высокой эффективности нового методического подхода к определению двух основных параметров HRM-анализа.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-01073-20-00 Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. Lando D.Y., Fridman A.S., Chang C.-L., Grigoryan I.E., Galyuk E.N., Murashko O.N., Chen C.-C., Hu C.-K. *Analyt. Biochem.*, 479, 28-36 (2015).
2. Belov D.A., Belov Yu.V., Kiselev I.G. *IEEE 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 1-3 (2020).
3. Белов Д.А., Белов Ю.В., Широкопад А.Л., *Научное приборостроение*, 28(2), 11–19 (2018).
4. Palais R., Wittwer C.T., *Methods Enzymol*, 454, 323-43 (2009).

Модификация поверхности полиимидной пленки в барьерном разряде для клеточных технологий

Целуйко К. С.¹, Камалов А.М.¹, Диденко А.Л.², Борисова М.Э.¹, Бондаренко П.Н.¹, Колбе К.А.¹, Смирнова Н.В.¹, Юдин В.Е.

¹СПбПУ

e-mail: celujkokosta@gmail.com

Полиимидные материалы широко известны своими превосходными механическими и диэлектрическими свойствами, которые они проявляют в широком диапазоне температур, вследствие чего активно используются в современных технологиях. Однако использование полиимидов в качестве перспективной подложки для культивирования клеток затруднено, из-за их низкой поверхностной энергии. Эффективная адгезия является основным требованием для выживания клеток, прикрепленных к субстрату. Доказано, что топография поверхности субстрата в значительной степени влияет на адгезию, выживаемость, пролиферацию и дифференцировку клеток [1-2]. Ткани в организме имеют множество морфологических особенностей поверхности, таких как волокнистость, пористость, выступы, углубления и др. Различные микроморфологические особенности оказывают специфическое влияние на поведение клеток, которое мы называем «контактным наведением» [3]. Связанные исследования показали, что микроморфология субстрата в основном влияет на морфологию и поведение целых клеток, в то время как наноморфология в основном регулирует механизм субклеточного восприятия [4].

Целью данной работы было создание активной поверхности полиимидной пленки Р-ОДФО и получение равномерно распределенных однородных углублений на поверхности пленки за счет воздействия диэлектрического барьерного разряда в воздушной среде. Известно, что оптимальный диаметр неоднородностей должен составлять порядка 1 мкм, что обеспечит оптимальную клеточную адгезию.

В ходе работы были синтезированы полиимидные пленки Р-ОДФО, создана установка для обработки пленок в высокочастотном барьерном разряде. Основные элементы установки - высокочастотный трансформатор, ZVS-драйвер и источник питания постоянного тока. Выходной сигнал составлял 2.6 – 2.8 кВ с частотой 2.5кГц. Такой режим работы обеспечивал появление устойчивых частичных разрядов. Обрабатываемая пленка помещалась между двух керамических пластин с воздушным зазором 1мм, где и возникал частичный разряд. Для равномерности распределения разрядов по поверхности пленки использовались две керамические пластины с алюминиевыми фольговыми электродами. В процессе испытаний время обработки варьировалось от 1 до 10 минут. Рельеф поверхности образцов оценивали на оптическом микроскопе, который показал, что при данном режиме воздействия оптимальное время обработки составляло от 2 до 5 минут. По изменению угла смачивания установлено, что поверхность пленок становится сильно гидрофильной, угол смачивания изменяется от 60° до 20°. Эти результаты хорошо согласуются с работой [5].

Список литературы

1. Zhou J, Zhang X, Sun J, Dang Z, Li J, Li X, et al. The effects of surface topography of nanostructure arrays on cell adhesion. *Phys Chem Chem Phys*. 2018;20:22946–51
2. Karine Anselme , Lydie Ploux & Arnaud Ponche (2010) Cell/Material Interfaces: Influence of Surface Chemistry and Surface Topography on Cell Adhesion, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24:5, 831-852, DOI: 10.1163/016942409X12598231568186

3. Karine Anselme , Lydie Ploux & Arnaud Ponche (2010) Cell/Material Interfaces: Influence of Surface Chemistry and Surface Topography on Cell Adhesion, Journal of Adhesion Science and Technology, 24:5, 831-852, DOI: 10.1163/016942409X12598231568186
4. Anh Tuan Nguyen et al 2016 J. Phys.: Condens. Matter 28 183001
5. PENG Shi, LI Lingjun, LI Wei, WANG Chaoliang, GUO Ying, SHI Jianjun. Surface Modification of Polyimide Film by Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric Pressure. Plasma Science and Technology, Vol.18, No.4, Apr. 2016

Изучение эффективности оптического просветления кожи *in vivo* и *ex vivo* биосовместимыми оптическими просветляющими агентами в сочетании с физическими усилителями проницаемости

Зайцев С. М.^{1,2}, Генина Э. А.^{1,3}, Тучин В. В.^{1,3,4}

¹СГУ им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия

²Университет Лотарингии, Нанси, Франция

³Томский государственный университет, Томск, Россия

⁴Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов, Россия

e-mail: sergey.zaycev.1995@bk.ru

В последние годы оптические методы диагностики активно используются для анализа патологических новообразований кожи. Среди них можно выделить методы флуоресцентной спектроскопии [1,2,3,4], спектроскопии диффузного отражения [5,6,7], оптической когерентной томографии (ОКТ) [8,9], и др. Хотя каждый из перечисленных методов обладает преимуществами, они также имеют ряд недостатков или ограничений применимости [10]. Например, ОКТ может быть эффективно использована для визуализации глубоко расположенных границ опухолей кожи, но, в то же время, дифференциация между предраковыми и раковыми клетками с помощью этого метода менее эффективна.

Также была доказана эффективность использования комбинации приведённых выше методов, объединяющей преимущества каждого из них, для улучшенного анализа оптических свойств морфологически изменённых участков кожи [11].

Основными причинами, ограничивающими эффективность оптических методов при анализе оптических свойств патологически изменённых тканей, являются неоднородность морфологического строения кожи и рассогласование показателей преломления внутриклеточной и межклеточной жидкостей, и, как следствие, сильное рассеяние света кожей. Решению данной проблемы с помощью технологии оптического просветления посвящено значительное количество публикаций, число которых растёт год от года [12-15]. Применение оптических просветляющих агентов позволило значительно увеличить контраст, глубину и разрешение оптических методов диагностики. В частности, ОКТ позволил визуализировать микроциркуляторное русло пигментированной ткани меланомы с хорошим пространственным разрешением до глубины ~ 300 мкм; оптическое просветление увеличивает эту глубину до ~750 мкм [15].

Однако, использование оптических просветляющих агентов для диагностики и анализа патологических изменений кожи требует систематического изучения и дальнейшего развития, поскольку в процессе оптического просветления ткани структура, оптические

параметры и биологические характеристики исследуемой патологии могут изменяться. Кроме того, технология оптического просветления, оптимизированная для исследования образцов ткани, может не подходить для использования в клинических условиях *in vivo* из-за ограничения допустимых концентраций, разрешённых к применению на людях, например, FDA [16].

Таким образом, целью данной работы являлось мультимодальное изучение методами ОКТ и отражательной спектроскопии эффективности оптического просветления биосовместимыми оптическими просветляющими агентами, в сочетании с физическими усилителями проницаемости, здоровой кожи мышей *ex vivo* и *in vivo*, а также оптимизация данного метода для дальнейшего применения на патологически изменённых участках кожи. Бедренные участки кожи 14 лабораторных мышей были исследованы *in vivo*, а затем *ex vivo*. Оптическое просветление осуществлялось смесями различных гидрофильных и липофильных веществ, таких как сахароза, ДМСО, олеиновая кислота, ПЭГ-400, пропиленгликоль и гиалуроновая кислота. Используемые концентрации данных веществ не превышали максимально допустимые FDA пороговые концентрации для применения в клинических условиях. Физические усилители проницаемости эпидермиса в процессе оптического просветления были представлены методами сонофореза и дермабразии. ОКТ-мониторинг контраста визуализации исследуемых участков кожи осуществлялся до и после просветления, а также в течение 30 минут после оптического просветления. Также, до и после ОКТ-мониторинга оптического просветления были проведены измерения спектров отражения исследуемых участков. Проведена оценка эффективности мультимодального подхода к оптическому просветлению кожи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90043.

Список литературы

1. H. J. C. M. Sterenborg, M. Motamedi, R. F. Wagner, M. Duvic, S. Thomsen, and S. L. Jacques, "In vivo fluorescence spectroscopy and imaging of human skin tumours," *Laser Med Sci*, vol. 9, no. 3, pp. 191–201, Sep. 1994, doi: 10.1007/BF02590223.
2. N. Kollias, G. Zonios, and G. Stamatas, "Fluorescence spectroscopy of skin," *Vib. Spectrosc.* 28, 17–23 (2002).
3. E. Borisova, L. Angelova, and E. Pavlova, "Endogenous and exogenous fluorescence skin cancer diagnostics for clinical applications," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 20, 1–12 (2014).
4. I. Bratchenko, D. Artemyev, O. Myakinin, M. Vrakova, K. Shpunkenko, A. Moryatov, S. Kozlov, and V. Zakharov, "Malignant melanoma and basal cell carcinoma detection with 457 nm laser-induced fluorescence," *J. Biomed. Photonics & Eng.* 1, 180–185 (2015).
5. Zhang Y, Moy AJ, Feng X, et al. Physiological model using diffuse reflectance spectroscopy for nonmelanoma skin cancer diagnosis. *J Biophotonics*. 2019;12(12):e201900154. doi:10.1002/jbio.201900154
6. Dahlstrand U, Sheikh R, Nguyen CD, Hult J, Reistad N, Malmsjö M. Identification of tumor margins using diffuse reflectance spectroscopy with an extended-wavelength spectrum in a porcine model. *Skin Res Technol.* 2018;24(4):667-671. doi:10.1111/srt.12583
7. Garcia-Urbe A, Zou J, Duvic M, Cho-Vega JH, Prieto VG, Wang LV. In vivo diagnosis of melanoma and nonmelanoma skin cancer using oblique incidence diffuse reflectance spectrometry. *Cancer Res.* 2012;72(11):2738-2745. doi:10.1158/0008-5472.CAN-11-4027

8. Jorgensen TM, Tycho A, Mogensen M, Bjerring P, Jemec GBE(2008) Machine-learning classification of non-melanoma skin cancers from image features obtained by optical coherence tomography. *Skin Res Technol* 14:364–369. doi:10.1111/j.1600-0846.2008.00304.x
9. Mogensen M, Joergensen TM, Nurnberg BM, Morsy HA, Thomsen JB, Thrane L, Jemec GB (2009) Assessment of optical coherence tomography imaging in the diagnosis of non-melanoma skin cancer and benign lesions versus normal skin: observer-blinded evaluation by dermatologists and pathologists. *Dermatol Surg* 35:965–972
10. M. Calin, S. Parasca, R. Savastru, R. Calin, and S. Dontu, “Optical techniques for the noninvasive diagnosis of skin cancer,” *J. Cancer Res. Clin. Oncol.* 139, 1083 (2013).
11. Marine Amouroux, Gilberto Diaz Ayil, Walter W. Blondel, Genevieve Bourg-Heckly, Agnes Leroux, and François H. Guillemin M.D. «Classification of ultraviolet irradiated mouse skin histological stages by bimodal spectroscopy: multiple excitation autofluorescence and diffuse reflectance,» *Journal of Biomedical Optics* 14(1), 014011 (1 January 2009). <https://doi.org/10.1117/1.3077194>
12. E. A. Genina, A. N. Bashkatov, E. A. Kolesnikova, M. V. Basko, G. S. Terentyuk, and V. V. Tuchin, “Optical coherence tomography monitoring of enhanced skin optical clearing in rats in vivo,” *JBO*, vol. 19, no. 2, p. 021109, Oct. 2013, doi: 10.1117/1.JBO.19.2.021109.
13. A. Yu. Sdobnov, M. E. Darvin, E. A. Genina, A. N. Bashkatov, J. Lademann, and V. V. Tuchin, “Recent progress in tissue optical clearing for spectroscopic application,” *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 197, pp. 216–229, May 2018, doi: 10.1016/j.saa.2018.01.085.
14. J. Jiang and R. K. Wang, “How different molarities of oleic acid as enhancer exert its effect on optical clearing of skin tissue in vitro,” *Journal of X-Ray Science and Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 149–159, Jan. 2005.
15. Layla Pires, Valentin Demidov, I. Alex Vitkin, Vanderlei Salvador Bagnato, Cristina Kurachi, and Brian C. Wilson «Optical clearing of melanoma in vivo: characterization by diffuse reflectance spectroscopy and optical coherence tomography,» *Journal of Biomedical Optics* 21(8), 081210 (14 June 2016). <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.8.081210>
16. fda.gov [страница в интернете]. U. S. Food and Drug Administration, federalagency; Inactive Ingredient Search for Approved Drug Products. Доступ по ссылке: <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cder/iig/index.cfm>.

Наносекундная динамика и особенности разрушения компактной костной ткани

Махмудов А. Х.¹, Махмудов Х. Ф.², Файзуллаева Ш. Х.³

¹ВМедА

²ФТИ им А. Ф. Иоффе

³СПБ ГБУЗ Городская поликлиника №104

e-mail: uplay1234@mail.ru

Механика разрушения различных конструкционных материалов за последние 20 лет стала одним из наиболее быстро развивающихся разделов механики деформируемого твердого тела. Особенно интенсивно и с большой практической, отдачей идет ее развитие

при изучении и описании процессов разрушения различных синтетических композитных материалов. Однако кроме этих, созданных руками человека материалов существует ряд естественных биополимерных материалов - костная ткань, сухожилия, и др., вопросы разрушения которых изучены недостаточно. В настоящей работе более подробно рассмотрим аспекты разрушения одного из этих материалов - компактной костной ткани, которая является одной из основных составляющих скелета человека и животного. данная ткань образует диафизарные отделы длинных трубчатых костей, воспринимающие большие механические нагрузки и наиболее часто подвергающиеся воздействию внешних травмирующих факторов. Высокие удельные прочности, т. е. отношение разрушающих напряжений к плотности материала, характерные для компактной костной ткани, уже в течение ряда лет привлекают внимание специалистов по механике материалов. Это объясняется тем, что высокоэффективные природные биосистемы оптимальны по своей конструкции в отношении не только физиологических условий функционирования, но и целого ряда аспектов механического поведения.

Характер зарождения и дальнейшего распространения трещин в компактном костной ткани (образцы не более 70% влажностей) определяли исходя от своеобразности, строением и зависимости от ряда факторов [1]. При этом особенно важно было выбора вида нагрузки, ориентация нагрузки относительно направления осей упругой симметрии среды, скорость нагружения или деформирования, а также внешняя конфигурация испытываемых образцов.

При растяжении образцов, нагруженных вдоль продольной оси кости, т. е. вдоль преимущественной ориентации остеонов, поверхность излома наклонена к этой оси под углом от 45^0 до 90^0 . В условиях медленного нагружения наблюдали так называемое «вытягивание» отдельных остеонов из межостеонного (межфибриллярного) вещества и образование неронной поверхности излома. В условиях динамического нагружения эта же поверхность становилась более ровной. Линия разрушения в поперечном сечении в основном проходили по наружной поверхности остеонов или даже между ламеллами, а весьма редко - через гаверсовы каналы.

При поперечном изгибе разрушение наступил из-за комбинированного действия как растягивающих, так и сжимающих напряжений - вытягивания остеонов в растянутой зоне образца и потери устойчивости наружного слоя в сжатой зоне. Однако практически начало разрушения наблюдали всегда в зоне действия растягивающих напряжений.

Образцы, а также фрагменты кости с поперечным подрезом в растянутой зоне разрушались со значительно меньшей затратой удельной энергии деформации, чем сплошные. Это объяснено о том, что значительная часть удельной энергии деформации уходит на создание трещины с критической длиной. При этом значения коэффициента интенсивности напряжений, необходимые для начала распространения трещин, для образцов с продольной и трансверсальной ориентациями различны. При этом усредненное значение коэффициента интенсивности напряжений для костной ткани вдоль продольной оси кости оказалось $56-60 \text{ кгс/см}^2 \sqrt{x}$.

При кручении образцов с прямоугольным поперечным сечением макроразрушения наступают в момент, когда касательное напряжение в середине большей стороны достигает своего предельного значения. Кроме метода акустической эмиссии был использован также метод фотонной эмиссии [2], (люминесценции) связанный с регистрацией рекомбинаций свободных радикалов, появляющихся при разрыве внутренних связей, а также при возникновении газового разряда в условиях образования новых поверхностей, т. е. микротрещин. Выраженный эффект фотонной эмиссии в костной ткани был установлен лишь на заключительном этапе деформирования.

Список литературы

1. Махмудов Х.Ф., Файзуллаева Ю.Х., Файзуллаева Ш. Х. Природа релаксации заряда в трубчатых костях. 2013. Статья в сборнике., ISBN 978-966-8736-05-6 ., s.r.o Materialy IX mezinarodni vedecko - prakticka konference «Moderni vymozenosti vedy - 2013» - Dil 55.
2. Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Махмудов Х.Ф. Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 8. С. 1182-1184.

Рентгеноспектральная диагностика локального окружения ионов цинка в липидных слоях арахидоновой кислоты

Кременная М. А.¹, Пронина Е.В.¹, Недоедкова О.В.¹, Лысенко В.Ю.¹, Новикова Н.Н.², Якунин С.Н.², Рогачев А.В.², Яловега Г.Э.¹

¹Южный федеральный университет

²НИИЦ «Курчатовский институт»

e-mail: kremennayamariya@gmail.com

Интерес к исследованию упорядоченных липидных слоев связан с тем, что по своему составу и морфологии эти системы представляют собой модели биологических мембран [1, 2]. Биологические мембраны выполняют не только барьерную функцию, но и транспортную, для взаимодействия клетки с внешней средой, а также являются средой протекания множества биохимических процессов. Взаимодействие металлов с клеточной мембраной имеет важное значение для многих процессов, протекающих в организме человека. Ионы во внутриклеточной/внеклеточной жидкости могут диффундировать через клеточную мембрану и регулировать важные функции клетки. Например, ионы натрия и калия могут регулировать сокращение мышц и определять передачу нервных импульсов в мозге, а также от мозга к другим частям тела.

Долгое время считалось, что наиболее значимые биохимические функции в организме выполняют натрий, калий, магний и кальций. Однако в последнее время все большее внимание исследователей привлекают, так называемые, микроэлементы (железо, молибден, кобальт, медь и цинк), которые содержатся в организме в следовых количествах, однако играют важную роль в биологических системах. Цинк является одним из важных микроэлементов в организме. Он участвует практически во всех процессах организма, таких как рост и деление клеток, синтез нуклеиновых кислот, обеспечивают нормальную работу белков и ферментов, участвуют в детоксикации и регенерации. Поэтому изучение механизмов транспорта микроэлементов через клеточные мембраны имеет как фундаментальное, так и прикладное значение. Например, при разработке стратегии селективной доставки в клетку различных веществ, в частности лекарств. Более того, исследования процессов проницаемости модельных клеточных мембран на молекулярном уровне могут быть использованы для решения широкого круга задач, связанных с биомедицинской диагностикой и биофизическими исследованиями.

Представленные исследования посвящены изучению взаимодействия ионов цинка с молекулами арахидоновой (эйкозановой) кислоты, организованными в виде монослоя на поверхности водной субфазы в лентгмюровской ванне. Арахидоновая кислота обнаружена во многих биологических жидкостях (кровь и моча). Внутри клетки арахидоновая кислота в основном находится в цитоплазме и мембране.

Монослой арахидоновой кислоты формировали на поверхности водного раствора ZnCl_2 в ленгмюровской ванне. Монослой поджимали до давления 20 мН/м. Далее были получены спектры рентгеновского поглощения для К-краев цинка в пленках арахидоновой кислоты в водной субфазе во флуоресцентной моде в условиях полного внешнего отражения (ПВО) [3] на источнике синхротронного излучения НИЦ «Курчатовский институт». Измерения проводились в течение 20 часов. При этом наблюдалось изменение формы спектров XANES, которое объясняется взаимодействием ионов цинка с полярными группами молекул арахидоновой кислоты. Радиационное повреждение образца сводилось к минимуму, так как измерения проводились на поверхности жидкости. В результате интерпретации рентгеновских спектров поглощения возможно получение информации об изменении локального окружения ионов цинка, что позволяет изучать механизмы взаимодействия липидного слоя с ионами металлов. Изменения формы спектров XANES, наблюдаемые в процессе измерений, свидетельствуют об изменении локального окружения ионов цинка от близкого к окружению в ZnCl_2 до окружения близкого к ZnO , что может быть результатом взаимодействия ионов цинка со слоями арахидоновой кислоты.

Проведено теоретическое моделирование взаимодействия ионов цинка и слоев арахидоновой кислоты.

Авторы выражают благодарность Гранту Президента МК-2767.2021.1.2 за финансовую поддержку исследования.

Список литературы

1. Singer S.J., Nicolson G.L. The fluid mosaic model of the structure of cell membranes // *Science*. 1972. 175:720–31.
2. Qassime M.M., Venig S.B., Glukhovskoy E.G. // *Dusunen Adam*. 2019. 10. 826-833.
3. Konovalov O.V., Novikova N.N., Kovalchuk M.V. et.al. XANES measurements for studies of adsorbed protein layers at liquid interfaces // *Materials*. 2020. 13. 4635

Роль механических напряжений в дорсальной аорте Данио-рерио в процессе производства стволовых клеток

Голушко И. Ю.¹, Чалин Д.В.¹

¹ДГТУ

e-mail: vaniagolushko@yandex.ru

Все кровяные клетки происходят от гемопоэтических стволовых клеток (ГСК). Пересадка ГСК ежедневно спасает множество жизней, но их массовое производство остается нерешенной проблемой современной медицины. Сегодня ГСК производятся *in vitro* методами, основанными на генетическом перепрограммировании клеток, однако процесс далек от статуса технологического. Более того, наличие трансгенов в геноме перепрограммированных ГСК представляет существенный клинический риск¹. Во взрослом организме большинство ГСК образуются из эпителиальных клеток дорсальной аорты (ДА) в ходе эндотелио-гемопоэтического перехода (ЭГП). Этот процесс был открыт в 2010 году в ходе исследования эмбрионов рыбы Данио-рерио – популярного модельного организма, и протекает у всех позвоночных лишь с незначительными различиями².

Эмбриональная аорта Данио-рерио представляет собой трубку несколько десятков микрометров в диаметре, состоящую из одного слоя плоских эпителиальных клеток. Несмотря на свои компактные размеры, система демонстрирует сложное поведение. Во

время производства ГСК менее чем за 50 часов площадь ее сечения изменяется практически вдвое, а вдоль оси возникает гофрировка с отчетливо выраженным волновым вектором. Часть составляющих стенки ДА клеток превращается в гемопоэтические стволовые в ходе ЭГП и покидает аорту, не нарушая ее целостности².

В работе мы исследуем роль механических напряжений в процессе производства ГСК в дорсальной аорте Данио-рерио, используя данные 4D конфокальной микроскопии и разработанную континуальную модель аорты. Модель рассматривает аорту как цилиндрическую двумерную оболочку из изотропного материала, которая находится под действием гидростатического давления крови. Важная особенность системы, которую модель также учитывает – дополнительные механические напряжения, появляющиеся из-за различий в скорости роста аорты и окружающих ее тканей³. Механические напряжения, возникающие в тканях – неотъемлемая часть любого морфологического процесса⁴. С одной стороны, отдельные клетки могут реагировать на механические воздействия, изменяя экспрессию различных генов, с другой – они способны генерировать механические напряжения благодаря актомиозину входящему в их состав. Способности прилагать и «чувствовать» силу являются одними из основополагающих для формирования тканей и морфогенеза. Опираясь на проведенный в работе анализ механической устойчивости системы, мы предпринимаем попытку разделить процессы, управляемые на генетическом уровне, и процессы, являющиеся результатом спонтанного нарушения симметрии из-за потери устойчивости под действием механических напряжений.

Используя полученные аналитические результаты, мы интерпретируем данные микроскопии о развитии мутантных эмбрионов Данио-рерио и эмбрионов дикого типа. Мы показываем, что производство ГСК сопровождается двумя типами неустойчивостей формы, вызываемых механическими напряжениями в стенках аорты. Первый тип ведет к появлению гофрировки с периодом порядка радиуса трубки, второй – к выгибанию отдельных эндотелиальных клеток, претерпевающих ЭГП. Таким образом, механические силы, возникающие в системе, не просто служат в качестве сигналов, контролирующих экспрессию генов клеток, но и напрямую управляют процессом, активируя неустойчивости, приводящие к необходимым морфологическим изменениям.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-72-00164 «Роль механических напряжений в процессе превращения эндотелиальных клеток в стволовые на примере эмбриона Данио-рерио»

Список литературы

1. Ivanovs, A. *et al.* Human haematopoietic stem cell development: From the embryo to the dish. *Dev.* **144**, 2323–2337 (2017).
2. Kissa, K. & Herbomel, P. Blood stem cells emerge from aortic endothelium by a novel type of cell transition. *Nature* **464**, 112–115 (2010).
3. Pouillet, N. *et al.* Mechanical instabilities of aorta drive blood stem cell production: a live study. *Cell. Mol. Life Sci.* (2019). doi:10.1007/s00018-019-03372-2
4. Heisenberg, C. P. & Bellaïche, Y. XForces in tissue morphogenesis and patterning. *Cell* **153**, 948 (2013).

Адаптация технологии ECIS для исследования суспензионных клеток

Ступин Д. Д.¹, Абелит А.А.¹

¹СПБАУ РАН

e-mail: stu87@yandex.ru

На сегодняшний день электрическая импедансная спектроскопия широко используется для решения актуальных задач медицины и биологии [1,2]. В частности, для изучения клеточных популяций *in vitro* широкую популярность приобрела технология ECIS (electrical cell substrate impedance sensing), которая была предложена в 1992 году Ivar Giaever и Charles Keese [3]. Данная методика состоит в исследовании импедансного спектра покрытого клетками электрода, т.н. контакта металл/электролит/клетка (МЭК), по временной эволюции которого можно определять число клеток на электроде [4], оценивать их жизнеспособность [5,6], изучать взаимодействие между различными типами клеток [7] и т.д. Однако, несмотря на значительный успех использования классической технологии ECIS в цитологии, область ее применения ограничивается исследованием адгезионных клеток, например, эпителиальных клеток HeLa или фибробластов. В то же время приложение принципа ECIS для исследования суспензионных клеток и клеток со слабой адгезией позволит создавать не только новые платформы для их исследования, но и принципиально новые биоэлектронные цитосенсоры. Таким образом, в данной работе мы задались целью адаптировать технологию ECIS для исследования суспензионных клеток.

Для решения поставленной задачи мы разработали специальный протокол модификации электродов с помощью адгезионных покрытий, который без ущерба для электрических свойств электродов улучшает адгезию суспензионных клеточных популяций на их поверхности и позволяет таким образом усилить импедансный отклик от самих клеток. В результате апробации данного подхода на примере исследования влияния УФ излучения на клетки K562 мы установили, что покрытие электродов поли-DL-лизинном позволяет по уровню импеданса контакта МЭК достоверно отличать живые суспензионные клетки от мертвых, несмотря на то что вклад живых клеток в импеданс контакта МЭК отличается всего на 1% от вклада мертвых клеток. Также разработанный протокол оказался совместим с техникой клеточной lift-off литографии, что позволяет использовать его для создания различных структур из суспензионных клеток на поверхности электродов, например, для создания пар "пустой электрод – электрод с клеткой" [8].

Таким образом, в результате выполнения настоящей работы мы адаптировали технологию ECIS для исследования суспензионных клеток, а также провели ее успешную апробацию и продемонстрировали ее достоинства. Мы надеемся, предложенная нами модификация метода ECIS позволит открыть новую нишу в практической цитологии и позволит значительно расширить область применения биоэлектронных цитосенсоров.

Работа поддержана Министерством Образования и Науки Российской Федерации (FSRM-2020-0006).

Список литературы

1. Grimnes, Sverre, and Orjan G. Martinsen. *Bioimpedance and bioelectricity basics*. Academic press, 2011.
2. Stupin, D. D., Kuzina, E. A., Abelit, A. A., Koniakhin, S. V., Emelyanov, A. E., Nikolaev, D. M., ... & Dubina, M. V. (2020). Bio-Impedance Spectroscopy: Basics and Applications. *arXiv preprint arXiv:2005.03275*.

3. Jiang, Wen G., ed. *Electric cell-substrate impedance sensing and cancer metastasis*. Vol. 17. Springer Science & Business Media, 2012.
4. Szulcek, Robert, Harm Jan Bogaard, and Geerten P. van Nieuw Amerongen. «Electric cell-substrate impedance sensing for the quantification of endothelial proliferation, barrier function, and motility.» *Journal of visualized experiments: JoVE* 85 (2014).
5. Stupin, D. D. «The single cells and cell populations viability estimation in vitro by the time-domain impedance spectroscopy.» *Technical Physics* 63.9 (2018): 1384-1389.
6. Ke, Ning, et al. «The xCELLigence system for real-time and label-free monitoring of cell viability.» *Mammalian cell viability*. Humana Press, 2011. 33-43.
7. Parviz, Maryam, et al. «Real-time bioimpedance sensing of antifibrotic drug action in primary human cells.» *ACS sensors* 2.10 (2017): 1482-1490.
8. Stupin, D. D., et al. «Cell-substrate lift-off lithography: Proof of concept.» *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1135. No. 1. IOP Publishing, 2018.

Влияние копияности компонент системы рестрикции-модификации II типа на бактериальную защиту

Кириллов А. А.¹, Морозова Н. Е., Ходорковский М.А., Северинов К.В.

¹СПбПУ

e-mail: sashakirillo@yandex.ru

В будущем бактериофаги могут являться потенциальными агентами в борьбе с устойчивостью бактерий к антибиотикам. Для широкого использования бактериофагов в медицине необходимо детально разобраться в защитных системах бактерий, которые препятствуют этому. Системы рестрикции –модификации являются наиболее распространенными системами защиты бактериальных клеток от бактериофагов. В основе данных систем защиты лежат активности двух ферментов: метилтрансферазы, которая защищает ДНК клетки-хозяина, и эндонуклеазы рестрикции, которая расщепляет инвазивную бактериальную ДНК. Однако данные системы не идеальны и защита, в некоторых случаях, может быть преодолена вирусами. Наша работа направлена на понимание факторов, влияющих на преодоление данных защитных систем.

Флуоресценция широко используется в различных биологических и биомедицинских исследованиях. Методы флуоресцентной микроскопии широко используются в современной молекулярной биологии и биофизике. С их помощью представляется уникальная возможность визуализировать процесс вирусной инфекции на уровне одиночных бактериальных клеток. Используя данные методы появляется возможность визуализировать процесс развития бактериофага внутри бактериальной клетки и оценить концентрации белков, влияющие жизнеспособность клетки при вирусной инфекции.

Как уже было сказано ранее основным методом нашей работы является флуоресцентная микроскопия. В качестве флуорофоров использовались флуоресцентные белки mCherry (максимум возбуждения 587 нм и максимум испускания 610 нм), Venus (максимум возбуждения 515 нм и максимум испускания 528 нм) и mKO2 (максимум возбуждения 551 нм и максимум испускания 565 нм). В ходе этой работы были созданы белки слипания, позволяющие *in vivo* наблюдать динамику компонент защитной системы рестрикции-модификации, а также скорость деградации ДНК бактериофага.

В этой работе мы продемонстрировали, что клетки с более высоким уровнем метилтрансферазы и более высоким соотношением между метилтрансферазой и эндонуклеазой рестрикции сильнее предрасположены к эффективному преодолению защиты бактериофагом. Кроме того, впервые в реальном времени наблюдалась деградация ДНК бактериофага в инфицированных клетках с системой Р-М или без нее.

Полученные данные дают понимание о работе бактериальных систем защиты и приводят к следующему интересному этапу, а именно искусственной регуляции данных систем с помощью методов молекулярной генетики для дальнейшего использования в молекулярной биологии и медицине.

Список литературы

1. Enikeeva, F.N., K.V. Severinov, and M.S. Gelfand, *Restriction-modification systems and bacteriophage invasion: who wins?* J Theor Biol, 2010. **266**(4): p. 550-9.
2. Bogdanova, E., et al., *Transcription regulation of restriction-modification system Esp1396I*. Nucleic Acids Res, 2009. **37**(10): p. 3354-66.
3. Cesnaviciene, E., et al., *Esp1396I restriction-modification system: structural organization and mode of regulation*. Nucleic Acids Res, 2003. **31**(2): p. 743-9.
4. Morozova, N., et al., *Temporal dynamics of methyltransferase and restriction endonuclease accumulation in individual cells after introducing a restriction-modification system*. Nucleic Acids Res, 2016. **44**(2): p. 790-800.
5. Shao Q, Hawkins A, Zeng L, *Phage DNA dynamics in cells with different fates*. Biophys. J. 2015;108:2048–2060. doi: 10.1016/j.bpj.2015.03.027

Инактивация бактерий с возбуждением высоких электронных состояний молекул-красителей в растворах

Ишемгулов А. Т.¹, Летута С.Н.¹, Раздобреев Д.А.¹

¹Оренбургский государственный университет

e-mail: azamat.ischemgulov@yandex.ru

Обсуждаются механизмы инактивации бактерий при их облучении наносекундными лазерными импульсами в растворах с органическими красителями. В качестве сенситизаторов использовались ксантеновые красители (эритрозин и эозин), а также родамин С, концентрация в растворе 0.25 – 0.50 мМ. Объектом исследования служили штаммы грамотрицательных бактерий *Escherichia coli* и *Salmonella typhimurium* концентрации 10^7 мл⁻¹. Для фотоинактивации растворы с бактериями помещались в кварцевую кювету сечением 10х20 мм², возбуждение осуществлялось импульсами YAG:Nd лазера ($\lambda=532$ нм, 15 нс) через торцевую стенку кюветы. С помощью цилиндрической линзы внутри кюветы около торцевой стенки формировалась сфокусированная область возбуждения. Инактивирующее действие оценивалось подсчётом колониеобразующих единиц (КОЕ). Забор микроорганизмов после возбуждения производился микродозатором как в зоне возбуждения, так и на произвольном расстоянии от неё.

При плотности мощности возбуждающего излучения ниже 10 МВт/см² заметное снижение жизнеспособности бактерий наблюдалось только в зоне возбуждения. При плотности мощности свыше 10 МВт/см² выживаемость бактерий уменьшалась как в зоне возбуждения, так и на значительном расстоянии от неё – вплоть до 15 мм, где возбуждение

сенсibilизаторов полностью отсутствовало. Известно, что при большой интенсивности возбуждения происходит заселение высоких электронных состояний (ВЭС) молекул-красителей [1, 2], релаксация которых происходит с быстрым (характерное время 10^{-11} с) выделением тепла. Авторами предложено несколько механизмов инактивации бактерий в таких условиях: (1) фотодинамические реакции с активными формами кислорода (синглетным кислородом); (2) выделение большого количества тепла рядом со стенками бактерий, приводящее к их разрушению (гипертермия); (3) повреждение клеток ударными волнами, возникающими в результате быстрого выделения тепла термосенсibilизаторами (ТС), (4) перенос энергии с ВЭС молекул сенсibilизаторов на органеллы клеток.

Фотодинамические реакции имеют место при использовании ксантовых красителей и их эффективность снижается по мере удаления от зоны возбуждения. Поскольку родамин С (квантовый выход в триплетное состояние около 0.01) при выбранных условиях возбуждения оказался не менее активен, чем ксантовые красители, сделан вывод о том, что и тепловые механизмы дают значительный вклад в инактивацию. Тепловыделение сопровождается генерацией ударных волн, образующихся в зоне возбуждения при быстром локальном нагреве в ходе релаксации ВЭС красителей. Распространение волн аксиальной симметрии по объёму кюветы фиксировалось по рассеянию зондирующего луча невозмущающего He-Ne лазера сечением менее 1 мм. Зондирующий луч пересекал кювету на регулируемом расстоянии от зоны возбуждения, во время прохождения фронта ударной волны через луч наблюдалось кратковременное изменение его интенсивности. Аналогичные волны были обнаружены в растворах с наночастицами серебра (50 нм), которые также оказались эффективными ТС. Таким образом, инактивация бактерий возможна при воздействии на них ударных волн, образующихся в ходе релаксации ВЭС красителей или возбужденных наночастиц в растворах.

Работа поддержана Минобрнауки России, проект № FSGU-2020-0003.

Список литературы

1. Летута, С.Н. и др. Фототермическая инактивация микроорганизмов при релаксации высоковозбуждённых состояний сенсibilизаторов / С.Н. Летута, С.Н. Пашкевич, А.Т. Ишемгулов, А.Н. Никиян // Биофизика, 2020. – Т. 65. - № 4. – С. 705-712.
2. Летута С.Н., Лантух Ю.Д., Пашкевич С.Н. Релаксация высоких электронно-возбуждённых состояний многоатомных молекул. Оренбург: ОГУ, 2016. – 164 с.

Молекулярное моделирование постдиффузионной стадии процесса оптического просветления биотканей под действием водного раствора йогексола

Шагаутдинова И. Т.¹, Березин К. В.², Дворецкий К. Н.³, Нечаев В.В.⁴, Лихтер А.М.¹,
Тучин В.В.^{2,5,6}

¹Астраханский государственный университет

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

³Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского

⁴Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

⁵Институт проблем точной механики и управления РАН⁶Национальный исследовательский томский государственный университетe-mail: ilmira178s@mail.ru

Иммерсионное оптическое просветление биотканей является актуальной задачей современной биомедицинской оптики и фотомедицины, так как позволит уменьшить рассеяние света на коже, что в свою очередь расширит возможности диагностики и терапии различных заболеваний.

В данной работе методами классической молекулярной динамики проведены молекулярное моделирование процессов обратимого растворения фибриллярного белка коллагена при его взаимодействии с водным раствором йогексола (Omnipaque) и многоатомным спиртом глицерина.

В качестве молекулярной модели коллагена был использован миметический пептид коллагена (GPH)₃, составляющего основу большей части регулярных доменов коллагена человека. В качестве иммерсионных просветляющих агентов нами были рассмотрены пять молекул йогексола и глицерина.

Молекулярное моделирование взаимодействия просветляющих агентов с коллагеном проводилось в несколько этапов. На первом этапе, методом DFT/B3LYP/6-311+G(d,p) с использованием программы GAUSSIAN были определены и рассчитаны все самые низкоэнергетические конформеры рассматриваемых просветляющих агентов в изолированном состоянии. Далее, методами классической молекулярной динамики, анализировалось образование водородных связей между пептидом коллагена ((GPH)₃)₉ и выбранными иммерсионными агентами. Молекулярное моделирование взаимодействия этих агентов с коллагеном проводилось с помощью пакета классической молекулярной динамики GROMACS с силовым полем AMBER-03. В рамках этого этапа моделирования было оценено среднее число водородных связей, образовавшихся между низкомолекулярными агентами и коллагеном в единицу времени. На третьем этапе моделирования, исследовалось влияние водных растворов (40%) иммерсионных агентов на геометрические параметры α -цепей фрагмента микрофибриллы коллагена, представляющий из себя ансамбль из пяти миметических пептидов ((GPH)₁₂)₃.

Проведенное теоретическое исследование позволило предположить существование взаимосвязи между эффективностью оптического просветления и временем нахождения иммерсионных агентов в водородосвязанном состоянии с белком коллагеном. Из сравнительного анализа структур рассматриваемых иммерсионных агентов легко заметить, что молекула йогексола содержит значительно больше атомов, которые способны образовывать водородные связи с молекулой пептидов коллагена, чем глицерин. Полученное в ходе молекулярного моделирования среднее число водородных связей в единицу времени для молекул йогексола более чем в два раза больше аналогичного значения для глицерина. Однако на этом этапе молекулярное моделирование велось без учета водного окружения молекул коллагена. На следующем этапе проводилось молекулярное моделирование взаимодействия водных растворов (40%) иммерсионных агентов с фрагментом микрофибриллы коллагена ((GPH)₁₂)₃.

Приведенные в литературе экспериментальные исследования воздействия *ex vivo* исследуемых иммерсионных просветляющих агентов на кожу и различные ее составляющие, такие как коллаген и вода показали, что в большинстве случаев эффективность оптического просветления глицерина на 20% выше, чем у йогексола. Также в этих работах проводились исследования методами спектроскопии КР влияния иммерсионных агентов на гидратацию коллагена в глубоких слоях дермы. Для оценки гидратации коллагена при применении иммерсионных агентов было рассчитано отношение между пиками КР на 938

см⁻¹ и 922 см⁻¹. Данное соотношение широко используется в качестве маркера гидратации коллагена. Было показано, что 60-ти минутное воздействие глицерином привело к сильной дегидратации вплоть до глубины 120 мкм. В тоже время, аналогичное воздействие йогексола на тех же глубинах оказывало значительно меньший эффект. Таким образом, не смотря на меньшую эффективность оптического просветления в сравнении с глицерином, йогексол является перспективным иммерсионным агентом, обеспечивающим значительное оптическое просветление кожного покрова в отсутствии заметного воздействия на структуру ткани.

Список литературы

1. Hirshburg J.M., Ravikumar K.M., Hwang W., Yeh A. Molecular basis for optical clearing of collagenous tissues // *Journal of Biomedical Optics*. – 2010. – Т. 15. – № 5. – С. 055002.
2. Berezin K.V. et al. Molecular modeling of immersion optical clearing of biological tissues // *J. Mol. Modeling*. – 2018. – Т. 24. – № 2. – С. 45.
3. Sdobnov A. et al. A comparative study of ex vivo skin optical clearing using two-photon microscopy // *Journal of Biophotonics*. – 2017. – Т. 10. – № 9. – С. 1115.
4. Sdobnov A. Y. et al. Confocal Raman microscopy supported by optical clearing treatment of the skin—influence on collagen hydration // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2017. – Т. 50. – № 28. – С. 285401.
5. Sdobnov A. Y. et al. Recent progress in tissue optical clearing for spectroscopic application // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. – 2018. – Т. 197. – С.216.
6. Sdobnov A. Y. et al. Hydrogen bound water profiles in the skin influenced by optical clearing molecular agents – Quantitative analysis using confocal Raman microscopy // *Journal of Biophotonics*. – 2019. – Т. 12. – № 5. – С. e201800283.
7. Сдобнов А.Ю., Ладеманн Ю., Дарвин, М.Е., Тучин В.В. Методы молекулярной оптической визуализации в дерматологии при оптическом просветлении кожи // *Успехи биологической химии*. – 2019. – Т.59, С. 295.

Сравнительный анализ вторичной структуры негистоновых белков хроматина HMGB1 и HMGB2

Осинникова Д. Н.¹, Чихиржина Е.В.², Поляничко А.М.²

¹СПбГУ

² Институт цитологии РАН, Санкт-Петербург

e-mail: d.osinnikova@spbu.ru

Белок HMGB1 и очень близкий к нему HMGB2 относятся к группе негистоновых хромосомных белков с высокой электрофоретической подвижностью (High Mobility Group). Белки этой группы являются самой распространенной группой негистоновых белков хроматина и обнаружены в клетках всех исследованных эукариот, однако, их роль в хроматине до сих пор до конца не ясна. Представители этого семейства принимают активное участие в структурной организации хроматина и играют важную роль в регуляции различных клеточных процессов [1]. Все HMGB-белки имеют в своем составе, как минимум, один ДНК-связывающий структурно консервативный домен, известный как HMGB-домен, наличие которого и является основным критерием принадлежности белков к этому

семейству. Исследование этих белков на разных этапах развития тимуса теленка показывает, что по мере инволюции содержание HMGB1 увеличивается, в HMGB2 – падает вплоть до его исчезновения.

Первичные структуры белков HMGB1 и HMGB2 очень близки: из 250 аминокислотных остатков различны только 37 (при этом в 18 случаях это консервативная замена). Одним из установленных отличий в первичной структуре белков HMGB1/2 является размер их С-концевых фрагментов, состоящих из непрерывной последовательности дикарбоновых аминокислот. Эти участки не имеют упорядоченной пространственной организации и, как считается, способны взаимодействовать с различными гистонами, регулируя их комплексообразование с ДНК. Одновременное наличие в клетке двух столь близких по аминокислотному составу белков предполагает и некоторое различие в их функциях. Ранее было показано, что белок HMGB1 может быть отнесен к частично неупорядоченным белкам в нативном состоянии (natively unfolded) [2]. Вместе с тем, на сегодняшний день нет информации о различиях в пространственной структуре ДНК-связывающих доменов двух белков, играющих ключевую роль в их функционировании.

Функции белков тесно связаны с их конформационным состоянием. Для исследования конформационных особенностей белков HMGB1 и HMGB2 мы использовали метод кругового дихроизма, который позволяет обнаружить различия во вторичной структуре гомологичных белков. Мы проанализировали спектры КД белков HMGB1 и HMGB2 в области дальнего ультрафиолета в различных условиях, влияющих на их вторичную структуру. Анализ спектров КД белков показал, что физиологических условиях белок HMGB1 характеризуется более упорядоченной вторичной структурой, чем HMGB2. Вместе с тем, в присутствии спирализующих агентов HMGB2 образует больше α -спиральных участков, чем HMGB1, что указывает на большую конформационную подвижность белка HMGB2. Мы полагаем, что такая подвижность способствует структурной адаптации белка HMGB2 в значительно большей степени, чем для белка HMGB1.

Список литературы

1. Чихиржина Е.В., Поляничко А.М., Старкова Т.Ю. Внеядерные функции негистонового белка HMGB1, Цитология, Т 62, 716-725, 2020.
2. Поляничко А.М., Родионова Т.Ю., Воробьев, В.И., Чихиржина Е.В. Конформационные особенности ядерного белка HMGB1 и специфика его взаимодействия с ДНК, Цитология, Т 53, 55-60, 2011.

Влияние концентрации дезоксирибонуклеотидтрифосфатов на кинетику флуоресцентного сигнала полимеразной цепной реакции: теоретическая оценка

Федоров А. А.¹

¹ИАП РАН

e-mail: f_aa@mail.ru

Полимеразная цепная реакция в реальном времени (ПЦР-РВ) является методом количественного анализа ДНК, прочно вошедшим в повседневную практику как клинических, так и исследовательских лабораторий во всем мире. Особенностью, выделяющей ПЦР-РВ на фоне прочих аналитических методов, является предельно высокая чувствительность и специфичность, позволяющая обнаруживать и анализировать в пробах даже единичные

молекулы ДНК. Несмотря на то, что общие физико-химические основы метода давно описаны в литературе, детальные модели ПЦР-РВ, способные количественно характеризовать данный процесс в настоящее время фактически отсутствуют [1,2]. Это обстоятельство обусловлено тем, что ПЦР-РВ является многостадийной реакцией, в которой участвуют около десяти основных молекул, поэтому анализ ее кинетики представляет собой весьма нетривиальную задачу.

Дезоксирибонуклеотидтрифосфаты (дНТФ), являются «строительным» материалом» для новых копий ДНК, нарабатываемых ферментом полимеразой в ходе реакции. Немногочисленные модели ПЦР-РВ, представленные в литературе, не учитывали в явном виде концентрацию дНТФ, вероятно вследствие того, что для практических приложений эмпирически была подобрана оптимальная концентрация дНТФ. В то же время, для построения полноценного теоретического описания ПЦР-РВ этот вопрос является актуальным, поскольку в ходе реакции количество дНТФ уменьшается, и, соответственно, их начальное количество в реакционной смеси напрямую влияет на характеристики кинетической кривой ПЦР-РВ. В наибольшей степени этот фактор проявляется в случае так называемой мультиплексной ПЦР-РВ, когда в одной пробирке нарабатываются копии не одного, а сразу нескольких фрагментов ДНК. В этом случае, очевидно, расход «стройматериала» увеличивается кратно количеству «мишеней».

В данной работе предлагается модель процесса ПЦР, учитывающая в явном виде участие дНТФ. Модель учитывает количество дНТФ, как субстрата ферментативной реакции, и позволяет отследить изменение его концентрации в ходе ПЦР. Модель построена на основе разработанных нами ранее моделей, экспериментально подтвердивших свою адекватность [3,4]. Реализация предложенной модели, как и предыдущих, была выполнена в виде программы на языке на C++. Программа позволяла повторять численные модельные вычисления заданное количество раз, имитируя необходимое количество последовательных циклов реакции, что позволяло получить модельные дискретные кривые ПЦР-РВ. Сопоставление экспериментальных и модельных данных продемонстрировало адекватность предложенной модели. С помощью модели определен оптимальный диапазон концентрации дНТФ – диапазон, изменение концентрации в котором не приводит к заметным вариациям характеристик результирующих кривых ПЦР-РВ. Также модель продемонстрировала существенное различие кинетики флуоресцентного сигнала ПЦР-РВ для случаев одной, двух и трех мишеней в реакции.

Работа выполнена в ИАП РАН в рамках Государственного задания № 075-01073-20-00 по теме № 0074-2019-0013 Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. Marimuthu K., Jing C., Chakrabarti R., Sequence-Dependent Biophysical Modeling of DNA Amplification, *Biophys. J.*, vol. 107, 1731-1743, 2014.
2. Mehra, S., and W. S. Hu., A kinetic model of quantitative real time polymerase chain reaction, *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 91, 848–860, 2005.
3. Федоров А.А., Сочивко Д.Г., Варламов Д.А. Модель генерации флуоресцентного сигнала интеркаляционного красителя в ходе полимеразной цепной реакции, *ЖТФ*, 2020, том 90, 1581-1585, 2020.
4. Федоров А.А., Сочивко Д.Г., Варламов Д.А., Курочкин В.Е., Моделирование кинетических кривых полимеразной цепной реакции, полученных с помощью флуоресцентных олигонуклеотидных зондов —, *ЖТФ*, 2018, том 88, 1477-1481, 2018.

Multi factor analysis of infrared spectra of blood serum of patients with multiple myeloma

Chernyshev D.A.¹, Mikhailiets E.S.¹, Telnaya E.A.¹, Plotnikova L.V.¹, Garifullin A.D.², Kuvshinov A.Y.², Voloshin S.V.^{2,3,4}, Polyanichko A.M.^{1,5}

¹St. Petersburg State University

²Russian Research Institute of Hematology and Transfusiology

³Kirov Military Medical Academy

⁴Mechnikov Northwestern State Medical University

⁵Institute of Cytology of the Russian Academy of Sciences

e-mail: st063380@student.spbu.ru

Nowadays, oncological diseases are one of the biggest unsolved problems for modern medicine. Multiple myeloma represents 1% of all oncological diseases and its diagnosis is quite expensive and not always effective. Currently available methods allow us to make an accurate diagnosis in 90% of cases. MM is characterized by the formation in the bone marrow of clusters of malignant plasma cells that produce and secrete monoclonal immunoglobulins (M-proteins) or their fragments. Due to increased formation of immunoglobulins in the blood by malignant cells the ratio of the content of immunoglobulins to other protein structures changes [1]. With the accumulation in the blood of monoclonal immunoglobulin the ratio of immunoglobulins to other proteins significantly changes. These changes can be registered with infrared spectroscopy, which is proved to be a very promising approach for the cancer diagnostic [2].

In this study we analyzed FTIR spectra of serum samples from patients with multiple myeloma under the supervision of the hematology clinic of the Russian Research Institute of Hematology and Transfusiology (St. Petersburg, Russia), where blood serum samples from MM patients and healthy donors were obtained, as well as their primary analysis was performed. The samples were studied in D₂O solutions using Tenor27 FTIR spectrometer (Bruker) in demountable BaF₂ cells with an optical pathlength of 50 μ m. The primary processing and analysis of the spectra was carried out using the software supplied with the device.

The obtained spectra of blood serum from patients with multiple myeloma and healthy donors clearly demonstrate some difference in the Amide I (1700-1600 cm^{-1}) and Amide II (1500-1400 cm^{-1}) regions [1,3]. The FTIR spectra of serum from healthy donors and patients with MM were compared in terms of position and the intensity of the Amide bands, and the spectral minimum around 1589-1594 cm^{-1} . Analysis of spectra by these parameters was revealed that each patient with MM has at least 2-3 noticeable differences from donors. Also, it was possible to split healthy donors and patients with MM using the principal component analysis. The result of the analysis of the Amid I band by this method was the division of healthy donors and patients with MM into two different sets of points. Although further studies are required, the results obtained in this work indicate, that the suggested approach is rather promising in studying MM development.

The work was carried out using the equipment of the resource centers of the Research Park of St. Petersburg State University ("Centre for Optical and Laser Materials Research", "Centre for Diagnostics of Functional Materials for Medicine, Pharmacology and Nanoelectronics", "Cryogenic Department").

References

1. Telnaya E.A., Plotnikova L.V., Garifullin A.D., Kuvshinov A.Yu., Voloshin S.V., Polyanichko A.M. (2020) Infrared spectroscopy of blood serum of patients with oncohematological diseases. *Biofizika*, 65 (6), 1154-1160.

2. Polyanichko A.M., Romanov N.M., Starkova T.Y., Kostyleva E.I., Chikhirzhina E.V. (2014) Analysis of the secondary structure of linker histone H1 based on IR absorption spectra. *Cell and Tissue Biology*, 8(4), 352-358.
3. Chikhirzhina E.V., Garifullin A.D., Kuvshinov A.Yu., Plotnikova L.V., Polyanichko A.M., Telnaya E.A., Voloshin S.V. (2019) The analysis of the secondary structure of the proteins in blood serum of patients with multiple myeloma. *Vestnik of Saint Petersburg University. Medicine*, 14(4), 394–398.

Коллективные эффекты в электрической активности коры головного мозга человека при когнитивной деятельности

Панищева С. Н.¹, Панищев О.Ю.¹, Дёмин С.А.¹, Исаева А.Г.¹, Латыпов Р.Р.

¹КФУ

e-mail: opanischev@gmail.com

Одной из характерных черт современного этапа развития науки является интеграция различных отраслей, позволяющая использовать новейшие методы и достижения для получения ранее недоступной информации. Результатом подобного взаимодействия является, в частности, появление междисциплинарных исследований. В данной работе представлены результаты использования современных методов анализа временных серий (Time Series Analysis) в изучении когнитивной деятельности человека. Несмотря на значительные успехи в области исследования деятельности человеческого мозга [1], данный объект, а также протекающие в нем процессы, по-прежнему остаются одними из самых сложных для понимания. Это в полной мере относится и к вопросам обработки и восприятия информации от органов чувств, а также различные особенности этих процессов, обусловленные развитием тех или иных когнитивных навыков. В частности, здесь мы изучаем и обсуждаем коллективные эффекты в динамике электромагнитной активности коры головного мозга двух групп людей с разным уровнем развития музыкальных способностей и навыков при выполнении двух когнитивных задач, а также в спокойном состоянии [2]. Мы используем такие параметры как, коэффициент фазовой синхронизации (mean phase coherence) [3] и параметр немарковости [4], с помощью которых проводим количественное описание различных типов синхронизации исследуемых сигналов. Далее, для более детального анализа рассматривались динамические и спектральные характеристики взаимодействия сигналов, полученные на основе Формализма функций памяти (ФФП). На первом этапе, на основе значений коэффициента фазовой синхронизации были определены области, взаимодействие которых (в среднем по группе) для разных задач различалось сильнее всего. Для второго этапа были выбраны испытуемые с наиболее типичными (по своим характеристикам) сигналами для каждой задачи. Далее для них проводился анализ фазовых портретов динамических ортогональных переменных, спектров мощности кросскорреляционной функции, а также частотных зависимостей параметра немарковости. Полученные результаты позволяют построить статистику по степени проявления различных типов синхронизации электрической активности коры головного мозга для разных групп людей, при выполнении описанных выше когнитивных задач, а также – по динамическим, спектральным и стохастическим характеристикам.

Список литературы

1. Panishev O.Y., How analyzing the interictal EEG can identify the epilepsy, *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, Vol. 18, 230-235, 2015
2. Bhattacharya J., Long-range synchrony in the band: role in music perception, *The Journal of Neuroscience*, Vol. 21, 6329–6337, 2001
3. Mormann F., Mean phase coherence as a measure for phase synchronization and its application to the EEG of epilepsy patients, *Physica D*, Vol. 144, 358-369, 2000
4. Demin S.A. Statistical quantifiers of memory for an analysis of human brain and neuro-system diseases, *Physica A*, Vol. 387, 2100-2110, 2008

Коллективные возбуждения в активных жидкостях: нарушение спектрального равнораспределения кинетической энергии из-за микропотоков

Крючков Н. П.¹, Юрченко С.О.

¹МГТУ им. Н. Э. Баумана

e-mail: kruchkov_nkt@mail.ru

Самодвижущиеся частицы (активные системы и активная мягкая материя) и их коллективная динамика привлекают все больше внимания исследователей из-за широкой распространенности в природе, например: бактерии [1], движущиеся клетки [2], индивидуальное или коллективное поведение животных [1]. Кроме того, ведутся активные исследования, направленные на использование активных (искусственно созданных) самодвижущиеся частицы при решении ряда важных с практической точки зрения задач, включая: медицинские приложения [3], управляемая самоорганизация материалов [4], очистка окружающей среды [5] и создание микророботов [6]. Активные системы являются существенно неравновесными и могут демонстрировать широкий класс явлений, недоступных для неактивных систем. Например, активные системы могут демонстрировать фазовое расслоение в отсутствии межчастичного притяжения, или формировать устойчивые мезомасштабные вихри (мезомасштабная турбулентность) [7]. В настоящее время, значительные усилия исследователей направлены на обобщения существующих термодинамических и статистических подходов на случай активных систем. Одной из центральных концепций физики конденсированного состояния являются элементарные возбуждения (фононы в случае кристаллов), однако, они до сих пор практически не исследовались в активных системах.

В настоящей работе изучаются спектры элементарных возбуждений на примере двумерной активной жидкости в условиях динамики Ланжевена с использованием моделирования методом Молекулярной Динамики. Установлено, что в активных жидкостях возникают короткодействующие корреляции скорость-скорость, которые строго равны нулю в равновесных неактивных жидкостях. Существование таких корреляций приводит к нарушению равнораспределения кинетической энергии в обратном пространстве и между различными поляризациями. Важно отметить, что при этом функции распределения по скоростям сохраняют Максвелловский вид. Обнаруженное явление похоже на мезомасштабная турбулентность [7] (наблюдается, например, в бактериальных системах), для которой также характерно нарушение равнораспределения кинетической энергии в области длинных волн. В случае мезомасштабной турбулентности нарушение равнораспределения

обусловлено формированием метастабильных вихрей с характерными размерами в несколько межчастичных расстояний. Однако в случае активных жидкостей, исследуемых в настоящей работе, таких вихрей не наблюдалось, а основные отклонения равнораспределения энергии наблюдаются в области умеренных длин волн.

Полученные результаты раскрывают ранее неизвестные особенности микроскопической динамики в активных жидкостях и открывают путь для будущих исследований взаимосвязи между явлениями на разных масштабах.

Исследование активных жидкостей выполнено при поддержке гранта РФФ 20-72-10161, сравнение результатов с равновесными неактивными жидкостями выполнено в рамках госзадания МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Список литературы

1. T. Vicsek and A. Zafeiris, *Physics Reports* **517**, 71, **2012**
2. R. Mayor and S. Etienne-Manneville, *Nature Reviews Molecular Cell Biology* **17**, 97, **2016**
3. B. Wang et. al, *Advanced Materials* **33**, 2002047, **2020**
4. A. K. Omar et al., *ACS Nano* **13**, 560, **2018**
5. D. Vilela et al., *ACS Applied Materials & Interfaces* **9**, 22093, **2017**
6. M. Z. Miskin et al., *Nature* **584**, 557, **2020**
7. H. H. Wensink et al., *Proceedings of the National Academy of Sciences* **109**, 14308, **2012**

Study of hydrodynamic interaction in tunable chiral colloids in rotating electric fields

Яковлев Е. В.¹, Либет П.А.^{1,2}, Юрченко С.О.¹

¹МГТУ им. Н. Э. Баумана

²ИФВД РАН

e-mail: yakov.egor@gmail.com

The phenomena of self-assembly and nonequilibrium dynamic self-organization in colloidal systems and emulsions play an important role in the physics of soft matter. The creation of systems with tunable interactions and the study of the mechanisms of non-equilibrium self-assembly far from thermodynamic equilibrium are important problems not only from a fundamental point of view but also for applications in new materials technologies, microfluidics and new generation biotechnologies. This work aims to establish the role of hydrodynamic interactions in the self-assembly of soft colloidal materials with controlled interparticle interactions. In the current work, we present a theoretical, numerical and experimental study of the rotation of chiral colloids of silicon dioxide particles in water.

Self-assembly of soft materials in a hydrodynamic environment attracts attention in the active [1], [2], [3] and living [4] matter. The study of active chiral processes in colloidal liquids [5], thin films [6] and external magnetic fields [7] show that the presence of rotation in dynamical systems plays a decisive role. Works on the interaction of point vortices [8], [9] and vortex patches [10] made it possible to better understand the self-assembly mechanism. Multi-vortex flow systems [11] can find application in materials with a photonic bandgap or tunable diffraction gratings and can become a good test bench for obtaining new materials and structures.

Systems in which a set of spheres rotates around a wall or substrate [12] are a basic model for understanding many colloidal and microbial flows. Recent works show that new instabilities are found where the role of hydrodynamics is considered separately from all interactions [13]. In experiments with tunable colloids [14], the rotation of a particle occurs due to a time shift between the polarization vector of a particle and the vector of the electric field, which can be controlled by changing the field parameters. The systems studied in this work can find promising applications in physics, materials science and biomedicine.

As a result of solving the Navier-Stokes equation by the finite element method distributions of the determining physical quantities depending on the relative position of chiral clusters were obtained. The numerical model corresponded to the real system, and as a result of processing the experimental data and comparison with the numerical ones, the results were found to be consistent, which indicates their reliability.

The results of this work can find application in colloidal systems with tunable interaction. The established dependencies and distributions contribute to the description of self-assembly and self-organization processes. Advanced theoretical studies, experiments and simulations can be carried out using the information provided in this work.

Список литературы

1. Goto, Yusuke, and Hajime Tanaka. «Purely hydrodynamic ordering of rotating disks at a finite Reynolds number.» *Nature communications* 6.1 (2015): 1-10. DOI:10.1038/ncomms6994.
2. Zöttl, Andreas, and Holger Stark. «Hydrodynamics determines collective motion and phase behavior of active colloids in quasi-two-dimensional confinement.» *Physical review letters* 112.11 (2014): 118101. DOI:10.1103/physrevlett.112.118101.
3. Marchetti, M. Cristina, et al. «Hydrodynamics of soft active matter.» *Reviews of Modern Physics* 85.3 (2013): 1143. DOI:10.1103/revmodphys.85.1143.
4. Lauga, Eric, and Thomas R. Powers. «The hydrodynamics of swimming microorganisms.» *Reports on Progress in Physics* 72.9 (2009): 096601. DOI:10.1088/0034-4885/72/9/096601.
5. Soni, Vishal, et al. «The odd free surface flows of a colloidal chiral fluid.» *Nature Physics* 15.11 (2019): 1188-1194. DOI:10.1038/s41567-019-0603-8.
6. Fürthauer, Sebastian, et al. «Active chiral processes in thin films.» *Physical review letters* 110.4 (2013): 048103. DOI:10.1103/physrevlett.110.048103.
7. Han, Koohee, and Alexey Snezhko. «Programmable chiral states in flocks of active magnetic rollers.» *Lab on a Chip* 21.1 (2021): 215-222. DOI:10.1039/d0lc00892c.
8. van Zuiden, Benjamin C., et al. «Spatiotemporal order and emergent edge currents in active spinner materials.» *Proceedings of the national academy of sciences* 113.46 (2016): 12919-12924. DOI:10.1073/pnas.1609572113.
9. Aref, Hassan, and Dmitri L. Vainchtein. «Point vortices exhibit asymmetric equilibria.» *Nature* 392.6678 (1998): 769-770. DOI:10.1038/33827.
10. Dritschel, David G. «The stability and energetics of corotating uniform vortices.» *Journal of Fluid Mechanics* 157 (1985): 95-134. DOI:10.1017/S00222112085002324.
11. Grzybowski, Bartosz A., Howard A. Stone, and George M. Whitesides. «Dynamic self-assembly of magnetized, millimetre-sized objects rotating at a liquid-air interface.» *Nature* 405.6790 (2000): 1033-1036. DOI:10.1038/35016528.
12. Wang, Qianqian, et al. «Collective behavior of reconfigurable magnetic droplets via dynamic self-assembly.» *ACS applied materials & interfaces* 11.1 (2018): 1630-1637. DOI:10.1021/acsami.8b17402.

13. Driscoll, Michelle, et al. «Unstable fronts and motile structures formed by microrollers.» *Nature Physics* 13.4 (2017): 375-379. DOI:10.1038/nphys3970.
14. Yakovlev, Egor V., et al. «Tunable two-dimensional assembly of colloidal particles in rotating electric fields.» *Scientific reports* 7.1 (2017): 1-10. DOI:10.1038/s41598-017-14001-y.

Модель микро-/наномотора с магнитным приводом

Мартынов С. И.¹, Ткач Л.Ю.¹

¹СурГУ

e-mail: martynovsi@mail.ru

Современные технологии основаны на использовании новейших достижений в управлении физическими процессами на микро и наноуровне. Имеющиеся научные достижения в области молекулярной биологии и нанотехнологий уже в настоящее время обеспечивают потенциал для инженерной разработки наномеханических систем с различными функциональными возможностями. Биологические и синтетические наномоторы активно изучаются [1] в качестве управляемых транспортных средств для доставки груза (терапевтическая нагрузка к больной клетке, элементы самосборных микроустройств к месту назначения и т. д.) как в лабораторных, так и в естественных условиях. Большое количество самодвижущихся частиц обладают способностью к самоорганизации [2], что позволяет контролировать образование определенных структур из них. Различные синтетические наномоторы создаются в форме янусоподобных частиц, которые движутся в результате химических реакций [3] в жидкостях, которые являются топливом для таких двигателей. Специально разработанные наноразмерные частицы обладают способностью перемещаться во внешних переменных полях - электрическом, магнитном, ультразвуковом, химическом, световом. Во всех случаях движение наномотора происходит в вязкой жидкости, что требует корректного учета гидродинамической силы, действующей на него со стороны окружающей жидкости. Как показано в работах [4,5], для механизмов перемещения наномотора, связанных с каталитическими реакциями на его поверхности или действием переменного однородного магнитного (электрического) поля, именно формируемое в окружающей жидкости течение и создает гидродинамическую силу, перемещающую наномотор в заданном направлении

В настоящей работе предложена модель микро-/наномотора, представляющего собой цепочку из трех заряженных сферических частиц разного размера и обладающую следующей структурой. Центральная частица имеет электрический заряд, который по величине равен сумме зарядов крайних частиц, но имеет другой знак. Суммарный заряд системы в целом равен нулю и считается, что она находится в состоянии устойчивого равновесия в результате действия сил взаимодействия между частицами. Одна или две частицы, расположенные относительно центральной частицы, имеют магнитный момент. Вращающееся внешнее однородное магнитное поле заставляет магнитные частицы вращаться, что создает течение окружающей цепочки вязкой жидкости и гидродинамические силы и моменты, действующие на каждую частицу и смещающих их из положения равновесия. Циклическим изменением направления вращения магнитного поля, формируется такое течение окружающей жидкости, которое создает гидродинамическую силу, действующую на цепочку и перемещающую ее в определенном направлении. Варьируя величину и период циклического действия магнитного поля, можно управлять движением такой цепочки частиц в жидкости. При расчетах динамики такой цепочки решались уравнения гидродинамики в приближении малых чисел Рейнольдса с соответствующими граничными условиями и уравнения поступательного и вращательного движения для каждой

частицы с учетом сил взаимодействия между ними. Компьютерное моделирование выполнялось с использованием специального программного комплекса [4, 5], позволяющего визуализировать результаты расчетов. Численное моделирование динамики проведено для 6 модельных цепочек с одной вращающейся частицей и одной модели цепочки с двумя вращающимися частицами. Результаты расчетов позволяют определить размеры частиц и частоту вращения магнитного поля, при которых цепочка частиц перемещается в жидкости с наибольшей скоростью, что может быть использовано при конструировании микро-/наномотора с магнитным приводом. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 18-41-860002 р-а.

Список литературы

1. Gao W., Wang J., Synthetic micro/nanomotors in drug delivery, *Nanoscale*, No 6, 10486–10494, 2014.
2. Lin Z., Gao C., Chen M., Lin X., He Q., Collective motion and dynamic self-assembly of colloid motors, *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, V.35, 51–58, 2018.
3. Paxton W.F., Sen A., Mallouk T.E., Motility of catalytic nanoparticles through self-generated forces, *Chemistry*, V.11, No 22, 6462–6470, 2005.
4. Martynov S. I., Tkach L. Yu., Mechanism of moving particle aggregates in a viscous fluid, *Comput. Math. Math. Phys.*, V.59, No. 3, 475–483, 2019.
5. Martynov S. I., Tkach L. Yu., Mechanism of Locomotion of Synthetic Nanomotors in a Viscous Fluid, *Comput. Math. Math. Phys.*, V. 60, No. 11, 1913-1922, 2020.

Физическое моделирование масштабно-структурного усталостного разрушения материалов лопаток газотурбинных двигателей при осевом многоцикловом нагружении с несимметричным циклом

Завойчинская Э. Б.¹

¹МГУ им. М. В. Ломоносова

e-mail: elen@velesgroup.com

Охлаждаемые лопатки компрессора или турбины в эксплуатации подвергаются растяжению при вращении вала двигателя, изгибающим и крутящим моментам от центробежных и аэродинамических сил, и находятся в условиях сложного нагружения, представляющего собой случайный набор циклов с различными частотами, амплитудами и постоянными составляющими напряжения. Анализ отказов промышленных турбоагрегатов показывает, что в 80% случаев аварии происходят из-за усталостных повреждений. Экспериментально обнаруживается, что усталостные микро- и макротрещины возникают перпендикулярно оси лопатки в корневом сечении в зоне концентрации напряжений, в основном, от изгибных форм вынужденных резонансных колебаний. Здесь рассматривается осевое одночастотное напряжение с резонансной частотой.

Усталость лопаток в большей степени определяется состоянием поверхностного слоя. При этом много- и, в особенности, гигацикловая усталость могут быть связаны с вероятным возникновением очагов микроразрушения в объеме тела от технологических дефектов, геометрических концентраторов структуры материала, включений и др., представляющих собой шероховатую мелкозернистую область, называемую "рыбий глаз" [1-4].

Макроразрушение имеет место, в основном, по коротким трещинам мезоуровня зерна или группы зерен, при упругом макродеформировании.

Предложен метод оценки ресурса по теории усталостного масштабно-структурного разрушения [5-7]. Выделяются шесть уровней дефектов, записываются определяющие соотношения для функций распределения вероятности достижения предельных состояний каждого уровня. Для симметричного нагружения никелевого сплава ЖС6К строятся области развития дефектов и кривые усталости по четырем уровням дефектности. Для лопатки из ЖС6К турбокомпрессора двигателей М-601 [8] определяются: постоянная составляющая напряжения из известных соотношений для упругой консольной балки как максимальное значение в корневом сечении суммы растягивающих напряжений от центробежных сил и изгиба от аэродинамических сил, и амплитуда напряжения в зависимости от прогибов из известного решения задачи изгиба консольной балки, жестко закрепленной в обод диска, в зависимости от прогибов; строятся области развития дефектов и кривые усталости по уровням поврежденности при соответствующих асимметриях цикла. При достаточно больших прогибах лопатки нагружение можно считать симметричным. Расчет по модели показывает, что в разрушенных лопатках при эксплуатации около 370-1670 часов [8] возможно возникла концентрация напряжений вследствие возможных резонансных вынужденных колебаний с эффективным коэффициентом концентрации, равным 3.3. Для алюминиевого сплава ВД17 лопатки турбины двигателя Д30 [8] (нагружение можно рассматривать симметричным [5]) получено, что в разрушенных лопатках первой и второй ступени после эксплуатации около 18 000 часов возникла концентрация напряжений с эффективными коэффициентами концентрации, равными 4.7 и 9.7 соответственно.

Для 9-12 % мартенситной хромистой стали [3,4] построены области развития дефектов и кривые усталости шести уровней при симметричном нагружении и с отношением постоянной составляющей к амплитуде $\alpha = 1.22$, и получено удовлетворительное соответствие опытным данным [3,4] при $N_f \in (6 \cdot 10^4, 4 \cdot 10^9)$ циклов. Изучено влияние асимметрии цикла в областях $1.22 \leq \alpha \leq 3$. При ультразвуковых колебаниях с $\alpha = 3$ и $\alpha = 5.7$ предельное максимальное напряжение цикла σ_{max} мало меняется с ростом числа циклов и практически равно пределу статической прочности стали σ_{st} . В этих случаях определяющим является процесс вязкого разрушения в условиях установившейся циклической ползучести и при неупругом макродеформировании. Построены кривые длительной прочности при этих асимметриях, которые ложатся на кривую длительной прочности материала. Полученные результаты представляются в виде предельных поверхностей разрушения по микро- и коротким трещинам в координатах $(\sigma_{max}/\sigma_{st}, \alpha, N)$. Линии уровня $\alpha = const$ при $|\alpha| \geq 3$ определяют кривые усталости по уровню дефектности, при $|\alpha| \geq 3$ – кривую длительной прочности. Линии уровня $N = const$ представляют расчетные диаграммы Хей.

Список литературы

1. Jeddi D., Palin-Luc T. A review about the effects of structural and operational factors on the gigacycle fatigue of steels, *Fatigue Fract Eng Mater Struct.*, 41, 969–990, 2018
2. Sakai T., Nakagawa A., Oguma N., Nakamura Y., Ueno A., Kikuchi S., Sakaida A. A review on fatigue fracture modes of structural metallic materials in very high cycle regime, *Int. J. of Fatigue*, 93, 2, 339-351, 2016
3. Kovacs S., Beck T., Singheiser L. Influence of mean stresses on fatigue life and damage of a turbine blade steel in the VHCF-regime, *Int. J. of Fatigue*, N 49, 90–99, 2013

4. Fatigue of Materials at Very High Numbers of Loading Cycles / Christ H. J.(Ed.), Springer, 627 pp., 2018
5. Завойчинская Э.Б. О методе оценки ресурса лопаточного аппарата газотурбинного двигателя при асимметричном циклическом нагружении центробежными и аэродинамическими силами, Математическое моделирование и численные методы, 1 (25), 45-63, 2020
6. Zavoychinskaya E., A Stochastic Theory of Scale-Structural Fatigue and Structure Durability at Operational Loading, Understanding complex systems, Springer Nature Switzerland AG, 71-89, 2021
7. Zavoychinskaya E.B. On the Theory of Scale Structural Fatigue of Metals at the Proportional Loading, Journal of Physics, 1431, 012024-012032, 2020
8. Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации, Уфа: Изд-во н.-т. лит-ры «Монография», 500 с., 2007

Regular electrically charged objects in Nonlinear Electrodynamics coupled to Gravity

Dymnikova I. ¹, Galaktionov E. ¹

¹Ioffe Institute

e-mail: evgalakt@mail.ru

We outline the basic properties of regular electrically charged black holes (RCBH) and electromagnetic solitons replacing naked singularities, which are predicted by the analysis of the dynamical equations of the Nonlinear Electrodynamics coupled to Gravity (NED-GR).

Electrically charged regular objects are governed by the source-free NED-GR equations in such a way that their electromagnetic fields are described by general source-free nonlinear Maxwell equations while their gravitational fields are described by the Einstein equations with the stress-energy tensors of their own nonlinear electromagnetic fields.

The algebraic structure of stress-energy tensors for electromagnetic fields is determined by $T_t^t = T_r^r$ ($p_r = -\rho$) and the metrics belong to the Kerr-Schild class [1]. For the stress-energy tensors satisfying the weak energy condition which guarantees the non-negativity of density and mass, dynamical equations contain the class of regular spherically symmetric solutions which describe RCBHs and electromagnetic solitons with the de Sitter vacuum centers [2].

Regular spherical solutions with the metrics of the Kerr-Schild class are transformed by the G•urses-G•ursey algorithm [3] in the regular axially symmetric solutions which describe the rotating RCBHs and spinning electromagnetic solitons. The NED-GR regular objects have positive masses of electromagnetic origin [2] generically related to breaking of spacetime symmetry from the de Sitter group which is the fundamental property of all regular objects described by the metrics of the Kerr-Schild class [4]. The internal structure of rotating NED-GR objects contains the de Sitter vacuum disk which has the properties of a perfect conductor and ideal diamagnetic [5,6]. It is confined by the ring with a superconducting current which replaces the Kerr ring singularity, serves as a nondissipative source of electromagnetic and gravitational fields [7] and provides the origin of the intrinsic magnetic momenta of NED-GR regular objects [8]. These fundamental general properties of all regular NED-GR objects are predicted by the behavior of the asymptotic solutions ([9] and references therein) and verified by the detailed analysis of dynamics of electromagnetic fields [10].

The basic properties of a spinning electromagnetic soliton have been applied for interpretation of the observed in experiments appearance of a minimal length, $l_e = 1,57 \times 10^{-17}$ cm in the annihilation reaction $e^+ + e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)$. This length scale, revealed with the 5\sigma significance, can be understood as the characteristic scale at which the electromagnetic attraction of annihilating particles is balanced by the gravitational repulsion of the interior de Sitter vacuum [11].

References

1. R.P. Kerr and A. Schild, Proc. of Symp. in Applied Mathematics 17 (1965) 199.
2. I. Dymnikova, Classical and Quantum Gravity 21 (2004) 4417.
3. M. G•urses and F. G•ursey, Journal of Mathematical Physics 16 (1975) 2385.
4. I. Dymnikova, Classical and Quantum Gravity 19 (2002) 725.
5. I. Dymnikova, Physics Letters B 639 (2006) 368.
6. I. Dymnikova and E. Galaktionov, Classical and Quantum Gravity 32 (2015) 165015.
7. I. Dymnikova, International Journal of Modern Physics D 24 (2015) 1550094.
8. I. Dymnikova, International Journal of Modern Physics D 28 (2019) 1950011.
9. I. Dymnikova, Journal of Gravity 2015 (2015) 904171.
10. I. Dymnikova and E. Galaktionov, Universe 5 (2019) 205.
11. I. Dymnikova, A. Sakharov, J. Ulbricht, Advances in High Energy Physics 14 (2014) 707812.

Моделирование распространения пульсовой волны с использованием одномерных моделей гемодинамики

Кривовичев Г. В.¹, Егоров Н. В.¹

¹СПбГУ

e-mail: g.krivovichev@spbu.ru

Математические модели течения крови в настоящее время широко применяются для прогнозирования последствий сердечно-сосудистых заболеваний и хирургических операций [1]. При моделировании процессов в сердечно-сосудистой системе в целом или в системах кровоснабжения отдельных органов принято использовать одномерные модели, полученные посредством осреднения уравнений гидродинамики по поперечному сечению сосуда [2]. Такая модель представляет собой нелинейную гиперболическую систему уравнений в частных производных первого порядка. С позиций гидродинамики кровь рассматривается как вязкая несжимаемая жидкость. В экспериментах установлено, что кровь проявляет неньютоновские свойства, что обусловлено наличием внутренней структуры, которую составляют различные кровяные клетки. При этом при моделировании течения в крупных артериях свойство вязкости часто игнорируется.

Настоящая работа посвящена моделированию распространения пульсовой волны с использованием различных моделей одномерной гемодинамики. Рассматриваются модели, в которых учитывается вязкость крови - ньютоновская и одномерные аналоги известных неньютоновских моделей (Карро, Карро-Иосиды, Кросса, Пауэлла-Эйринга). Такие модели, помимо реологического соотношения, определяются еще видом функции, задающей безразмерный профиль скорости. Отдельно рассматривается модель, в которой игнорируются вязкие свойства крови.

В случае модели крови как идеальной жидкости удалось получить аналитическое решение нелинейной начально-краевой задачи с помощью метода возмущений. Несмотря на громоздкие формулы, решение относительно легко получить в современных системах символьных вычислений. В случае вязких моделей решение получено численно с использованием WENO-схемы третьего порядка в сочетании с методом Рунге-Кутты.

В результате сравнения решений, полученных для различных моделей, показано влияние вязкости на затухание распространяющегося возмущения. При этом исследовано и влияние профиля скорости на амплитуду. Показано, что уплощение профиля приводит к более сильному затуханию волны. Решения, полученные для всех рассмотренных неньютоновских моделей оказались близки друг другу, что позволяет рассматривать их как аналогии.

Список литературы

1. Marchandise E., Willemet M., Lacroix V., A numerical hemodynamic tool for predictive vascular surgery, Medical Engineering and Physics, vol. 31, 131-144, 2009.
2. Буничева А. Я., Мухин С. И., Соснин Н. В., Хруленко А. Б. Математическое моделирование квазиодномерной гемодинамики, Журнал вычислительной математики и математической физики, том 55, 1417–1428, 2015.

Устойчивость волн супратрансмиссии в кристалле стехиометрии A_3B при взаимодействии с одиночными дислокациями

Захаров П. В.¹, Луценко И.С.², Старостенков М.Д.²

¹СПбПУ

²АлтГТУ

e-mail: zakharovpvl@rambler.ru

Особенности распространение волн в конденсированных средах зависит от многих факторов, в том числе наличия дефектных структур. Понимание характера взаимодействия волн и дефектов способствует построению моделей и последующему их применению к трактовке новых экспериментальных данных. Компьютерное моделирование, и в частности метод молекулярной динамики, позволяют рассматривать разные виды этих объектов. Большой интерес в данном аспекте представляет изучение закономерностей распространения уединенных волн различной природы в твёрдом теле с дислокациями. При наличии взаимосвязей между характеристиками волны и параметрами дислокационной структуры появляется возможность использования волн в качестве неразрушающих методов изучения материала. Математически подобные зависимости были продемонстрированы в работах [1, 2].

В работе [3] была продемонстрирована возможность возбуждения волн солитонного типа в кристаллах Pt_3Al с помощью внешнего гармонического воздействия. Данная волна способна распространяться вглубь бездефектного кристалла на десятки микрон без искажений, что делает её интересной в качестве средства диагностики. В данной работе методом молекулярной динамики было произведено моделирование взаимодействия таких волн с одиночными дислокациями. Модель представляла собой прямоугольный блок, содержащий $6 \cdot 10^5$ частиц. Такого массива атомов достаточно для формирования волны и ее восстановления после взаимодействия с дислокацией. Взаимодействие частиц

описывалось потенциалом полученным методом погруженного атома, что позволило учесть поверхностные эффекты. Был рассмотрен широкий спектр начальных условий задачи, получены численные характеристики взаимодействующих объектов. Показано, что волна способна преодолевать дефектную структуру в виде одиночных дислокаций. Оценены потери энергии уединенной волны, а также изменение скорости распространения и ее формы. Полученные результаты могут быть полезны при изучении уединенных волн в кристаллах, эффекта супратрансмиссии и динамики дислокаций.

Список литературы

1. Popov S.P., Scattering of solitons by dislocations in the modified korteweg de vries–sine-gordon equation. Computational Mathematics and Mathematical Physics. vol. 55, № 12, 2014-2024, 2015
2. Ерофеев В.И., Мальханов А.О., Влияние упругой нелинейности на волновые процессы в средах с дислокациями. Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках, № 3, 2020
3. Захаров П. В., Старостенков М. Д., Корзникова Е. А. и др., Возбуждение волн солитонного типа в кристаллах стехиометрии АЗВ, ФТТ, том. 61, 2183-2189, 2019

Торможение малых заряженных тел в разреженной плазме

Гулько Н. А.¹, Гулько Ю.Ф.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбГУ

e-mail: nataliagunko@gmail.com

Особенности взаимодействия искусственных и естественных небесных тел а также мелкодисперсных частиц космического “мусора” с набегающим потоком плотной и разреженной плазмы рассматривались в работах [1-5]. В указанных работах, прежде всего, изучалось влияние собственных и внешних электрических и магнитных полей на аэродинамические характеристики тел, движущихся в плазме.

Надо отметить, что силы и моменты, действующие на тела, движущиеся в плазме качественно отличаются от их аналогов в обычных нейтральных газах. При этом задача обтекания разбивается на группы, определяемые как особенностями геометрии и физическими свойствами поверхностей тел, так и параметрами характеризующими набегающую плазму. Примером такого деления является деление тел на «малые» ($R \leq D$), «средние» ($R \approx D$) и «большие» ($R \geq D$) тела (R – характерный размер тела; D – дебаевский радиус).

В данной работе проводится определение силы торможения, действующей на малые тела, движущиеся в разреженной плазме. В этом случае основными параметрами, влияющими на силу торможения, являются скорость тела относительно потока набегающей плазмы и тепловые скорости ионов в потоке.

Ввиду отсутствия аналитического решения поставленная задача решалась численно с использованием метода Монте-Карло.

Результаты проведенных вычислений можно использовать для оценки времени существования на орбите искусственных спутников Земли, изучении эволюции облаков мелкодисперсных частиц техногенного происхождения (космического мусора) в верхних

слоях атмосферы, а также магнитосферы Земли и проведении натурных исследований плазмы в лабораторных условиях.

Список литературы

1. Альперт Я.Л., Гуревич А.В., Питаевский А.П. Искусственные спутники в разреженной плазме. М., 384 стр., 1964.
2. Филиппов Б.В. Аэродинамика тел в верхних слоях атмосферы. Л.: Изд. ЛГУ, 1973, 128 с.
3. Фортов Е.В., А.Г.Храпак, С.А. Храпак и др. Пылевая плазма. «Успехи физических наук». Т. 174, 495 – 544, 2004.
4. Котельников В.А., Гидаспов В.Ю., Котельников М.В. Математическое моделирование обтекания тел потоками бесстолкновительной и столкновительной плазмы. Изд. Физматлит, 2010, 288 с.
5. Гунько Н.А., Гунько.Ю.Ф. Общие теоремы динамики и вычисление аэродинамических характеристик тел, движущихся в разреженной плазме. В сб.: Вопросы математической физики и прикладной математики. Материалы семинара, посвященного 100-летию со дня рождения профессора Н.Н.Лебедева. 15 июня 2011 г., С. 44-63. СПб. 2011 г. ISBN 978-5-9363-4041-3.

О квантовом аналоге неустойчивых осциллирующих состояний перевернутого осциллятора в полигармоническом внешнем поле

Чистяков В. В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: v.chistyakov@itmo.ru

Как известно, классический перевернутый осциллятор обладает набором неустойчивых траекторий во внешнем однородном синусоидальном поле в том случае, если безразмерные амплитуда f_0 , частота Ω , фаза ϕ и начальные условия (Н.У.) по координате q_0 и импульсу p_0 последнего связаны стабилизирующим соотношением, исключающем наличие в решении неограниченно возрастающего слагаемого.

Фактически, такая орбита является *сепаратрисой* между множествами траекторий с уходом частицы на плюс и минус бесконечность. Такой же эффект т.н. *динамической стабилизации* имеет место, если внешнее воздействие есть сумма/интеграл подобных стабилизирующих сил.

В классической механике динамическая стабилизация частицы полигармоническим полем имеет место лишь при идеальном выполнении для каждой из гармоник Ω этого поля стабилизирующего соотношения. И чем изначально меньше от него отклонения, тем большее время τ частица удержится вблизи положения неустойчивого равновесия, прежде чем необратимо уйдёт влево либо вправо,

Представляет интерес квантовый аналог подобного эффекта, рассчитываемый путем решения нестационарного уравнения Шрёдингера с квантовым же аналогом Н.У. В простейшем случае — для простого гармонического внешнего воздействия $-f_0 q \sin(\Omega t - \arctg \Omega)$ и аналога классических Н.У. $p_0 + q_0 = 0$ на стартовую волновую функцию: $(-i\hbar/dq + q)\Psi(q, 0) = 0$.

Т.к. отсутствуют интегрируемые решения уравнения-аналога, то в качестве такой функции брали [1,2] гауссовский пакет, асимптотически удовлетворяющий таким Н.У. при неограниченном росте полуширины пакета σ_0 .

Интегрирование нестационарного уравнения при помощи Maple 17 свидетельствовало о

а) немонотонном поведении полуширины пакета $\sigma(t)$, заключающемся в его коллапсе до фундаментального размера за время $t \sim \ln \sigma_0$ с последующим необратимым расширением;

б) удержании центра волнового пакета вблизи вершины потенциала в течении времени $t \sim 4\pi$;

в) его (центра) бифуркационное поведение, отличное от порогового классического;

г) невыполнении в привычном виде фундаментального *принципа соответствия*, т.к. классическому случаю соответствовал предельный переход $\sigma_0 \rightarrow \infty$, а не $\sigma_0 \rightarrow 0$.

В реальности такой эффект может иметь место, например, при возбуждении лазерным излучением электрона на разрыхляющую орбиталь молекулы, и заключаться в задержке её распада и, следовательно, сдвиге его константы равновесия. Также, подобная стабилизация имеет место для атома в переменном электрическом поле, когда вероятность ионизации начинает уменьшаться с ростом амплитуды поля [3].

Список литературы

1. Чистяков В.В., О квантовом аналоге неустойчивых предельных циклов периодически возмущаемого перевернутого осциллятора. Теоретическая и математическая физика, 2019, 198,1, сс. 19-31
2. Chistyakov V.V., On quantum analogue of dynamical stabilisation of inverted harmonic oscillator by time periodical uniform field. Pramana - Journal of Physics, 2018, 90, 4, pp. 57-61
3. Делоне Н.П., Крайнов В.П., Стабилизация атома в поле лазерного излучения. Успехи физических наук, 1995, 165, 11, сс.1295 - 1321

Применение теории жидких мостов для нахождения формы менисков расплава при выращивании цилиндрических кристаллов

Галактионов Е.В.¹, Бахолдин С.И.¹, Галактионова Н.Е.², Тропп Э.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

e-mail: tropp@mail.ioffe.ru

В последние десятилетия теория жидких мостов между различными поверхностями привлекает внимание исследователей. Одним из возможных практических применений этой теории является изучение профильных кривых менисков монокристаллов цилиндрической формы, выращиваемых из расплава методами, при которых мениск находится между двумя поверхностями: зонная плавка, выращивание с пьедестала при использовании различных методов нагрева [1], способ Степанова [2]. Фронт кристаллизации в этих случаях обычно не является плоским и его форму можно аппроксимировать сферической поверхностью, кроме того, как показано в [3], использование конструкции не плоского, а конического формообразователя в способе Степанова повышает устойчивость процесса

выращивания кристаллов сапфира. В [4] предложен алгоритм решения задачи о форме вертикального жидкого моста между произвольными твердыми выпуклыми поверхностями в предположении малости числа Бонда.

В настоящей работе рассмотрен частный случай жидкого моста - вертикальный жидкий мост малого объема между коническим формообразователем и выпуклым сферическим фронтом кристаллизации. В качестве граничных условий используются условие зацепления на кромке формообразователя и заданный угол роста на фронте кристаллизации. Предполагается, что число Бонда есть малая величина, и применение асимптотического подхода оправдано. Рассмотрен осесимметричный случай. Дана вариационная постановка исходной задачи. Построен итерационный процесс ее решения.

В качестве примера проведены расчеты для цилиндрических кристаллов сапфира малого диаметра, выращиваемых из расплава по способу Степанова. В докладе представлены результаты расчетов профильных кривых менисков. Исследована зависимость радиуса растущего монокристалла от высоты жидкого моста (расстояния между фронтом кристаллизации и формообразователем) для различных значений угла раствора конического формообразователя. Найдены значения высоты, соответствующие изменению знака кривизны профильной кривой мениска.

Список литературы

1. Crystal Growth Processes Based on Capillarity: Czochralski, Floating Zone, Shaping and Crucible Techniques. Ed. Th. Duffar, John Wiley & Sons, 2010. 533 p.
2. Антонов П.И., Затуловский Л.М., Костыгов А.С. и др. Получение профилированных монокристаллов и изделий способом Степанова. Л.: Наука, 1981. 280 с.
3. Васильев М.Г., Бахолдин С.И., Крымов В.М. Исследование объемного радиационного переноса тепла в кристалле и расплаве с помощью численного моделирования при выращивании кристаллов сапфира методом Степанова. ЖТФ, **90**, 8, 1231-1238, 2020
4. Галактионов Е.В., Галактионова Н.Е., Тропп Э.А. Решение задачи о форме вертикального жидкого моста между выпуклыми поверхностями с учетом силы тяжести. ЖТФ, **91**, 3, 381-387, 2021

Математическая оптимизация технологии уменьшения шероховатости металлических поверхностей

Константинова А. А.¹, Якупов З.Я.¹, Галимова Р. К.¹

¹КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева

e-mail: nastya.98.ru.2014@yandex.ru

Как известно, учёные постоянно занимаются оптимизацией уже существующих технологий с целью выявить наилучшее решение той или иной проблемы. Одной из таких технологий является обработка поверхностей металлических деталей парогазовым разрядом. Суть технологии заключается в зажигании парогазового разряда между жидким и твердым электродами. В нашем исследовании электролитом является водный раствор салициловой кислоты.

Процессы, возникающие на границе раздела твердый электрод-электролит и в разрядном промежутке во время обработки поверхностей парогазовым разрядом, представляют

собой набор различных взаимосвязанных явлений, например, таких как физические, химические и электрохимические. Основными физико-химическими явлениями, которые определяют процесс обработки металлических поверхностей, можно назвать электрическое поле, режимы тепло- и массопереноса между обрабатываемой металлической поверхностью и жидкой средой (электролитом) [1, 4-10]. При проведении эксперимента необходимо контролировать параметры парогазового разряда (напряжение разряда, силу тока в разрядном промежутке, температуру электролита и т. д.), а также следить за их постоянством.

Из-за большого количества физических параметров, существенно влияющих на процесс обработки детали, возникают трудности при планировании и проведении экспериментов с целью оптимизации технологии обработки металлических поверхностей. Поэтому на реализацию экспериментов уходит много времени и ресурсов, следовательно, требуется больше денежных затрат [2-4]. Данную проблему можно решить с помощью математического моделирования, которое позволяет исследовать различные процессы и явления без дополнительных затрат. Математическая модель будет полезна и на стадии обработки результатов измерений, и при подготовке проведения эксперимента [5].

Большинство исследователей используют простые методы обработки экспериментальных данных. Одним из таких способов является нахождение эмпирических уравнений графическим путем [6,11]. Таким образом, по измеренным данным или по результатам алгебраического преобразования уравнений строится некоторая линия (кривая).

Исследуется по отдельности каждый наиболее весомый фактор, влияющий на изменение шероховатости поверхности металлической детали. Для этого воспользуемся полиномом первой степени для построения графика функции.

В работе были построены графики изменения шероховатости металлической поверхности (δR_a) в зависимости от каждого из факторов, существенно влияющих на исследуемую технологию и результаты изменения шероховатости металла (сила разрядного тока, температура электролита, напряжение разряда).

Поиск математического описания рассматриваемого процесса осуществлен в виде линейной модели для таких факторов, как сила тока, напряжение и температура:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$$

В большинстве случаев в практических исследованиях экспериментальная информация не позволяет получать линейные графики. Тогда необходимо подбирать некий общий многочлен степени n :

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3$$

Зависимость улучшения поверхности металла (в %) от времени обработки детали в электролите имеет вид:

$$\delta R_a = -0,0008t + 0,298t^2 - 0,1578t^3$$

Графическое представление результатов обработки поверхностей парогазовым разрядом позволяет наглядно оценивать оптимальные режимы технологического процесса. Необходимо правильно выбирать диапазон времени обработки материала. При продолжительном эксперименте состояние поверхности начинает ухудшаться. Математическая модель позволяет исследователю задать оптимальные значения параметров и контролировать сам технологический процесс обработки поверхностей. С помощью такой модели можно рационализировать режимы обработки деталей, поскольку возможно исследовать множество случаев без потери времени и ресурсов.

Проверка выполнимости основных постулатов и гипотез об адекватности модели и значимости коэффициентов позволила получить математическую модель для расчета

оптимальных режимов обработки деталей с помощью парогазового разряда между твердым металлическим и жидким электродами при атмосферном давлении.

Список литературы

1. Галимова Р. К., Якупов З. Я. Исследование технологического процесса обработки поверхностей изделий парогазовым разрядом между твердым металлическим и жидким неметаллическим электродами//Fundamental and applied sciences today: Proceedings of the Conference. North Charleston, 25 – 26.07.2013, Vol. 2 CreateSpace. 4900 LaCross Road., SC, USA 29406. Moscow: spc Academic, 2013. P. 147 – 149.
2. Царева А.М., Макаева Р. Х., Сафина Д.М., Галимова Р. К. Диагностика разрушения крыльчатки обдува генератора газотурбинного двигателя методом голографической интерферометрии//Журнал «Известия вузов. Авиационная техника». 2020. № 2. С.172 – 175.
3. Yakupov, Z. Ya., Abdulaziz Abraham, H., Bogomolov, V. A., Plokhonnikov, S. P. Algorithm for constructing a modified relative phase permeability for an averaged model of three-phase filtration in a multilayer layer// IOP conference series: materials Science and engineering 765 (1), 012003, 2020.
4. Takseitov R. R., Galimova R. K., Yakupov Z. Ya. Calculation of portable properties of some real gas mixtures at high temperatures// Journal of physics: series of conferences 1588 (1), 012065, 2020.
5. Галимова Р.К., Юсупова А.Р. Проблема планирования в технологическом эксперименте//Fundamental science and technology – promising developments VI: Proceedings of the Conference/ North Charleston, 1-2.12.2015, Vol.2. North Charleston, SC, USA: CreatSpace, 2015. 297 p.
6. Галимова Р.К., Зайннеев А.А. Экспериментально-статистическое моделирование технологического процесса// Fundamental science and technology – promising developments VI: Proceedings of the Conference/ North Charleston, 1-2.12.2015, Vol. 2. North Charleston, SC, USA: CreatSpace, 2015. 297 p.
7. Павлова А.А., Шакиров А.Ш., Галимова Р.К. Оценивание кислотности раствора в процессе получения золей методом наименьших модулей // Материалы VIII Международной научной молодежной школы-семинара «Математическое моделирование, численные методы и комплексы». 16-20 июля 2018 г. Отв. редактор В.Ф. Тишкин. – Саранск: СМВО, 2018. –С. 82-85.
8. Павлова А.А., Иутин Р.В., Якупов З.Я. Усреднение показателя шероховатости поверхности за время обработки детали методом наименьших квадратов // Материалы VIII Международной научной молодежной школы-семинара «Математическое моделирование, численные методы и комплексы». 16-20 июля 2018 г. Отв. редактор В.Ф. Тишкин. – Саранск: СМВО, 2018. –С. 79-81.
9. Иутин Р.В., Галимова Р.К., Якупов З.Я. Трехфакторная модель процесса уменьшения шероховатости металлических поверхностей // Материалы VIII Международной научной молодежной школы-семинара «Математическое моделирование, численные методы и комплексы». 16-20 июля 2018 г. Отв. редактор В.Ф. Тишкин. – Саранск: СМВО, 2018. –С. 61-65.
10. Галимова Р.К., Якупов З.Я. Исследование решений уравнения Лапласа в технологических процессах с использованием парогазовых разрядов с жидкостными электродами//Журнал Средневолжского Математического Общества. 2015. Т. 17. № 1. С.135 – 139.
11. Якупов З.Я., Галимова Р. К. Методы наименьших квадратов и наименьших модулей в инженерно-технических расчетах. Казань: КНИТУ-КАИ, 2017. 140 с.

Моделирование процессов теплообмена при выращивании кристаллов сплава FeNiGaCo

Васильев М.Г.¹, Крымов В.М.,¹ Носов Ю.Г.¹, Бахолдин С.И.¹,

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: v.krymov@mail.ioffe.ru

В последние десятилетия кристаллы сплавов с эффектом памяти формы и, в частности, FeNiGaCo интенсивно изучаются многими исследователями [1-2]. Кроме эффекта памяти формы эти кристаллы интересны возможностью получения больших обратимых магнитоиндуцированных деформаций, сверхэластичностью, и эффектом высокоскоростного восстановления деформации памяти формы.

В данной работе кристаллы FeNiGaCo выращивались методом Чохральского со свободной поверхности расплава и методом Степанова с помощью формообразователя, плавающего на поверхности расплава. Были выращены кристаллы длиной до 250 mm и диаметром 5-8 mm. Кристаллы после роста демонстрирует наличие в них эффекта памяти формы, то есть восстанавливают свою первоначальную форму после деформации сжатием и последующего нагрева. Однако в ряде случаев обнаружилась неоднородность кристаллической структуры по длине кристалла. Исследование под микроскопом шлифов поперечного сечения, после избирательного химического травления, показало наличие характерных дефектов (дендритов), которые тормозят развитие фазового превращения, т.е. переход кристалла из аустенита в мартенсит при охлаждении. Найдено, что максимальная концентрация дендритов наблюдалась в начальной части выращенных кристаллов, далее постепенно снижалась и после примерно 100 mm длины дендриты полностью отсутствовали. Такая неоднородность структуры скорее всего связана с изменением тепловых условий у фронта кристаллизации при выращивании.

В работе для исследования этого эффекта, а также оптимизации тепловой зоны было проведено моделирование процесса выращивания кристалла данного сплава.

Моделирование было выполнено с помощью пакета программ BasicCGSim для реальной тепловой зоны с индукционным нагревом. Расчеты сделаны для случая выращивания кристалла диаметром 5 mm методом Чохральского. Скорость роста составляла 60 mm/h, скорость вращения 30 г/мин. Температура кристаллизации бралась равной 1600K. Были рассчитаны распределения температур в расплаве, кристалле, а также гидродинамика течения расплава в тигле для последовательных стадий роста при длине кристалла 10, 50, 100 и 160mm. Расчеты показали, что градиент температуры в расплаве у фронта кристаллизации увеличивается с длиной кристалла от 6,9 K/mm до 9,7K/mm.

Таким образом, наблюдается явная корреляция между увеличением градиента температуры в расплаве у фронта и исчезновением образования дендритов. Это соответствует классическим представлениям образования дендритной структуры при концентрационном переохлаждении расплава. Согласно [3] критерием перехода от ячеистого и дендритного роста к нормальному (планарному) является увеличение параметра G_L/V , где G_L - градиент температуры в расплаве у фронта кристаллизации и V - скорость выращивания.

Список литературы

- 1 Nikolaev V.I., Stepanov S.I., Yakushev P.N., Krymov V.M., Kustov S.B.// Intermetallics, 2020, 119, 106709, pp.1-4
- 2 Panchenko E.Yu., Timofeeva E.E., Larchenkova N.G., Chumlyakov Yu.I., Tagiltsev A.I., Maier H.J., Gerstein G.// Materials Science & Engineering, 2017, A 706. pp. 95–103.

Алгоритм расчета плотности состояний трехмерной модели Изинга

Егоров В. И.^{1,2}, Крыжановский Б.В.²

¹Череповецкий государственный университет

²НИИ системных исследований РАН

e-mail: viegorov@chsu.ru

Спиновые решеточные модели, такие как модели Изинга, имеют огромное количество применений в статистической физике. Свободная энергия таких моделей может быть рассчитана через плотность состояний, то есть через распределение энергии по 2^N возможным конфигурациям системы, где N – общее количество спинов в решетке. Одним из наиболее эффективных методов численного получения плотности состояний является алгоритм Ванга-Ландау [1]. Однако, алгоритм требует огромных вычислительных затрат для получения достаточного точных результатов в больших системах. Производительность алгоритма можно значительно увеличить, если задать хорошее начальное приближение и при этом уменьшить значение начального модификационного множителя [2].

В работе [3] был предложен метод p -окрестностей для расчета свободной энергии в модели Изинга. В данном методе 2^N возможных конфигураций разделяются на N частей (окрестностей), каждая из которых отличается от основного состояния системы на $n \in [0, N]$ перевернутых спинов. В пределах данной окрестности среднее значение распределения энергии по состояниям E_n и ее дисперсия σ_n^2 могут быть рассчитаны точно [4]. Суть метода заключается в замене истинной плотности состояний на гауссовое распределение со средним E_n и дисперсией σ_n^2 . Цель данной работы – определить можно ли добиться значительного увеличения производительности алгоритма Ванга-Ландау, если в качестве начального приближения взять выражение из метода p -окрестностей.

Используя стандартный алгоритм Ванга-Ландау, был проведен расчет плотности состояний в трехмерной модели Изинга для решеток различных размеров. Из результатов данных расчетов было выявлено, что максимальная ошибка выражения, получаемого из метода p -окрестностей, составляет около 1,5 %. Затем, используя данное выражение в качестве начального приближения для алгоритма Ванга-Ландау, был проведен повторный расчет плотности состояний при различных значениях начального модификационного множителя. Получено, что при определенных значениях множителя вычисления выполняются быстрее более чем в 2 раза. При этом отклонение от результатов обычного алгоритма Ванга-Ландау составляет менее 0.01 %.

Список литературы

1. Wang F., Landau D. P. Efficient, multiple-range random walk algorithm to calculate the density of states //Physical review letters. – 2001. – V. 86. – №. 10. – P. 2050.
2. Egorov V. I., Maksimova O. G., Baidganov A. R. The parallel Wang-Landau algorithm for joint density of states calculation //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – V. 1141. – №. 1. – P. 012068.

3. Kryzhanovsky B., Litinskii L. Applicability of n-vicinity method for calculation of free energy of Ising model //Physica A: Statistical mechanics and its applications. – 2017. – V. 468. – P. 493-507.
4. Kryzhanovsky B., Litinskii L. Generalized approach to description of energy distribution of spin system //Optical Memory and Neural Networks. – 2015. – Vol. 24. – №. 3. – P. 165-185.

Вязкоупругая релаксация волн деформации в полимерных телах

Гарбузов Ф. Е.¹, Бельтюков Я. М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: fedor.garbuzov@gmail.com

Исследование формирования и распространения волн деформации в полимерных и наноструктурированных полимерных материалах является актуальной научной задачей. Понимание этого процесса необходимо, в частности, для изучения уединённых волн деформации (солитонов) в этих материалах. Во время экспериментов по возбуждению таких волн по торцу полимерного стержня наносят удар, в результате которого возникает короткая продольная волна сжатия. Настоящая работа посвящена математическому моделированию движения и вязкоупругой релаксации короткой волны, приводящей к возникновению длинной уединённой волны, которая может быть зарегистрирована голографическими методами [1].

В полимерных материалах, таких как, например, полиметилметакрилат (ПММА), существенную роль играют релаксационные вязкоупругие процессы, ответственные за диссипацию механической энергии волны деформации. В полимерах тангенс угла механических потерь слабо зависит от частоты упругих волн, и в диапазоне от долей герца до сотен килогерц он практически постоянен [2].

Физические эксперименты показывают, что возникающая в результате удара по торцу стержня короткая продольная волна быстро затухает, а позади неё образуется длинная уединённая волна. Эта новая волна имеет в два-три раза большую длину, чем поперечный размер стержня, обладает гораздо большей длиной пробега и может преодолевать большие расстояния практически без рассеяния [3].

На основе многодоменного псевдоспектрального метода авторами настоящей работы реализован численный метод решения полных трёхмерных уравнений, описывающих деформацию вязкоупругого стержня. Этот метод показал хорошую сходимость при решении задач как вязкой упругости, так и нелинейной упругости [4]. Учёт широкого диапазона времён релаксации при моделировании позволил согласовать результаты численных расчётов с экспериментальными данными, что говорит об определяющей роли вязкоупругих процессов при формировании длинной уединённой волны.

Помимо численного исследования авторы построили упрощённую одномерную модель движения продольных волн. Для этого был численно рассчитан полный закон дисперсии волн упругости в стержне, по которому построен закон дисперсии для преимущественно продольных волн. Оказалось, что закон для продольных волн состоит из двух антипересекающихся ветвей, одна из которых соответствует коротким волнам, а другая – длинным. Этот закон качественно совпадает с законом дисперсии одного из

линеаризованных уравнений типа Буссинеска (u - величина деформации, а c_0 , c_1 , c_2 - характерные скорости волн):

$$u_{tt} - c_0^2 u_{xx} + u_{ttt} - (c_1^2 + c_2^2) u_{xxt} + c_1^2 c_2^2 u_{xxxx} = 0.$$

Добавление в это уравнение вязкоупругих слагаемых позволяет получить качественное описание релаксации продольных волн деформации в полимерных телах.

Список литературы

1. A. V. Belashov, Y. M. Beltukov, N. V. Petrov, A. M. Samsonov, I. V. Semenova, Indirect assessment of bulk strain soliton velocity in opaque solids. Appl. Phys. Lett., 2018, vol. 112, p. 121903.
2. T. Lee, R. S. Lakes, A. Lal, Resonant ultrasound spectroscopy for measurement of mechanical damping: Comparison with broadband viscoelastic spectroscopy. Review of Scientific Instruments, 2000, vol. 71, pp. 2855-2861.
3. Дрейден Г.В., Самсонов А.М., Семенова И.В., Эволюция объемных солитонов деформации в полимерных волноводах на больших расстояниях. ЖТФ, 2008, том 78, вып. 5, стр. 8.
4. Гарбузов Ф.Е., Бельтюков Я.М., Хуснутдинова К.Р., Продольные объемные солитоны деформации в гиперупругом стержне с квадратичной и кубической нелинейностями. ТМФ, 2020, том 202, номер 3, стр. 364-381.

Обобщение задачи Фурье о колебаниях температуры земной коры

Бахрачева Ю. С.¹, Афанасьев А.А.¹

¹ВолГУ

e-mail: bakhracheva@yandex.ru

В работе рассматривается классическая проблема о нахождении колебаний температурного поля в верхнем слое земной коры при условии, что температура поверхности Земли испытывает суточные или сезонные колебания. Частное решение этой проблемы, полученное еще Фурье, можно найти в [1]. Приведенные в этой работе *формулы Фурье*, а также основанные на них *законы Фурье*, принадлежат к числу основополагающих теоретических фактов в *мерзлотоведении (геокриологии)* и представляют собой важный инструмент при решении проблем метеорологии, климатологии и охраны окружающей среды, а также при строительстве зданий и развитии сельского хозяйства в области распространения мерзлых пород [2, 3]. Существенным недостатком формул Фурье, ограничивающих их применение для исследования проблем геокриологии, является то, что они не учитывают наличия в почве *влаги*, ее перемещения под действием градиентов температуры и влагосодержания и испарения в толще материала и с его поверхности. Исправление этого недостатка и является целью предлагаемой работы.

В рамках теории тепломассопереноса А.В. Лыкова сформулирована краевая задача для расчета полей температуры и влагосодержания в однородном, содержащем влагу полупространстве, граница которого обдувается воздушным потоком. Теплообмен полупространства с воздушной средой происходит по закону Ньютона, а массообмен – по закону Дальтона.

Методом комплексных амплитуд решена задача об асимптотических распределениях температуры и влагосодержания в условиях, когда температура воздуха изменяется во

времени по гармоническому закону. Построенное решение и следующие из него выводы являются обобщениями известных в литературе формул Фурье и законов Фурье, которые относятся к ситуации, когда материал, наполняющий полупространство, не содержит влаги, а по гармоническому закону изменяется не температура воздуха, а температура на границе. В рамках полученного общего решения построено частное решение для математической модели тепломассопереноса, в которой не учитываются термодиффузия и внутреннее парообразование.

Результаты работы могут быть использованы в геокриологии в качестве теоретического инструмента при моделировании сезонных колебаний теплофизического состояния почвы, что является важной задачей при планировании хозяйственной деятельности в области распространения мерзлых пород.

Список литературы

1. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966. – 724 с.
2. Мерзлотоведение (краткий курс). Под ред. В.А. Кудрявцева. М.: Изд-во МГУ, 1981. – 240 с.
3. Чеварев В.Г. Общее мерзлотоведение. Влагодпроводные свойства грунтов. Под ред. В.А. Кудрявцева. М.: Изд-во МГУ, 1978. – 464 с.

Особенности подавления широкополосных помех в нейросетевой адаптивной антенной решётке с калмановской фильтрацией

Забелин А. Н.¹, Литвинов О.С.¹

¹МГТУ им. Н. Э. Баумана

e-mail: z307s@yandex.ru

Для решения проблемы оптимального приёма полезных сигналов в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки в современных радиоэлектронных системах возможно применение адаптивных антенных решёток (ААР). Использование алгоритмов адаптации и пространственно-временной обработки сигналов позволяет улучшить качество принимаемого полезного сигнала в системах радиолокации, радионавигации и связи [1,2].

Применение нейронных сетей (НС) в качестве адаптивного процессора позволяет значительно расширить класс решаемых задач с помощью ААР, обеспечить высокую степень универсальности применения антенны для различных сценариев сигнально-помеховой обстановки (робастность), повысить скорость адаптации, снизить вычислительные затраты и повысить отказоустойчивость адаптивного процессора [3-5].

В работах [6,7] были продемонстрированы преимущества использования НС для подавления помех в полосе частот. Действие широкополосной помехи на ААР, при математическом описании сводится к действию множества эквивалентных пространственно-разнесённых помех на частоте f_0 , отстоящих от направления на помеху и друг от друга на угол $2N/\beta$, равном полуширине ДН решётки по нулям.

Введение в антенную систему калмановской фильтрации для вектора входных сигналов позволяет получить дополнительный выигрыш в глубине подавления широкополосных помех путём прогнозирования наиболее вероятного изменения параметров помех. В

частности, фильтр Калмана целесообразно использовать для подавления «мерцающих» во времени помех.

В данной работе было проведено обучение и оптимизация НС прямого распространения для задачи подавления помех в ААР с использованием фильтра Калмана. Обучающая выборка составлялась на основе традиционного алгоритма адаптации методом прямого обращения матрицы по критерию максимума отношения сигнал/(шум+помеха) (ОСШП). При обучении НС использовались методы оптимизации, описанные в работе [8]. Численное моделирование проводилось в среде программирования Matlab 2015 с использованием пакета расширения Neural Network Toolbox.

В работе проведено сравнение усреднённых характеристик подавления помех нейросетевым алгоритмом амплитудно-фазового управления ААР и традиционным алгоритмом адаптации, как при использовании фильтра Калмана, так и без него. Показано, что нейросетевой алгоритм с использованием калмановской фильтрации в ААР обеспечивает лучшее среднее подавление «мерцающей» во времени помехи в полосе частот до 10%, по сравнению с прочими исследуемыми алгоритмами. Проведённое численное моделирование показывает целесообразность совместного использования НС и калмановской фильтрации для задачи подавления помех в ААР.

Список литературы

1. Пистолькорс А.А., Литвинов О.С. Введение в теорию адаптивных антенн. М.: Наука, 1991. С. 5, 12-40, 48-50, 61-70.
2. Ганзий Д.Д., Русаков П.В., Трошин Г.И. Адаптивные антенные системы: Монография. – М.: Радиотехника, 2019. 272 с.
3. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines: Third Edition. NJ: Prentice Hall, 2009. P. 936.
4. Rawat A., Yadav R.N., Shrivastava S.C. Neural network applications in smart antenna arrays: A review // International Journal of Electronics and Communications. 2012. Vol. 66. №11. P. 903-912.
5. Erricolo D., Chen P.-Y., Rozhkova A., Torabi E., Bagci H., Shamim A., Zhang X., Machine learning in electromagnetics: a review and some perspectives for future research, International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). 2019. pp. 1377–1380.
6. Литвинов О.С., Муродьянц Д.В. Исследование спектральных характеристик подавления помех в адаптивных антенных решётках на нейросетевом управлении. В кн.: Нейроинформатика-2018, тез. докл. XX междунар. науч.-техн. конф., Москва, 2018.
7. Литвинов О.С., Забелин А.Н. Особенности подавления широкополосных помех в адаптивных антенных решётках на нейросетевом управлении // XXII Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2020»: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. С. 250-258.
8. Shrestha A., Mahmood A., Review of Deep Learning Algorithms and Architectures. IEEE Access. Vol. 7, 2019. pp. 53040–53065.

Многофотонные межподзонные переходы в кресельной ленте графена в поле сильной электромагнитной волны

Монозон Б. С.¹, Федорова Т. А.¹, Шмельхер П.²

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

²Центр оптических квантовых технологий, университет Гамбурга

e-mail: borismonozon@mail.ru

Рассматривается лента графена кресельного типа шириной d в электрическом поле сильной электромагнитной волны $F(t) = F_0 \cos(\omega t)$ с амплитудой F_0 и частотой ω , поляризованной параллельно оси ленты. Лента характеризуется полупроводниковым, т.е. содержащим запрещенную зону, релятивистским законом дисперсии, в котором скорость света заменена скоростью Ферми $v_F = 10^6$ м/с. В отсутствии поля энергетический спектр электрона представляет собой последовательность одномерных подзон, ответвляющихся от уровней размерного квантования $\varepsilon_{N_j} = |N_j - \frac{1}{3}| \frac{\pi \hbar v_F}{d}$; $N_j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ в электронной $j = e$ и дырочной $j = h$ зонах [1]. Для данной поляризации оптический переход разрешен между подзонами с одинаковыми номерами $N_e = N_h = N$ [2]. Предметом расчета является вероятность межподзонного перехода $w_N^{(l)}(t)$ с участием $l = 1, 2, \dots$ фотонов.

Основу математического аппарата составляет нестационарное уравнение Дирака для электрона, движущегося со скоростью Ферми в поле волны в двух подрешетках графена и в двух долинах вблизи двух неэквивалентных точек Дирака в импульсном пространстве [3]. Решение этого уравнения ищется в виде суммы двух стационарных размерно квантованных подрешеточных состояний с зависящими от времени коэффициентами. С помощью преобразования Фолди-Вутхойзена гамильтониан уравнения для этих коэффициентов приводится к виду, в котором диагональные компоненты описывают внутриволновые электронные и дырочные квазиэнергетические состояния, а недиагональные ответственны за переходы между ними. Решения для преобразованного гамильтониана находятся в резонансном приближении, когда энергия фотонов $\hbar \omega$, сопровождающих переход, совпадает с расстоянием между квазиэнергиями электрона в электронной и дырочной подзонах $\varepsilon_N(k)$ (k – продольный импульс электрона). В этом случае вычисления сводятся к решению хорошо известной двухуровневой задачи, согласно которой вероятность межподзонного перехода $w_N^{(l)}(k, t)$ оказывается гармонической функцией времени, осциллирующей с частотой Раби $\Omega_{NI}^{(R)}(k)$ [4]. Для большого числа фотонов l эта частота вычисляется в аналитическом виде и выражается через полные эллиптические интегралы первого и второго рода, аргументы которых содержат параметр Келдыша $\gamma_N = \frac{\omega \Delta_N}{2eF_0 v_F}$,

в котором $\Delta_N = 2\varepsilon_N$ - запрещенный промежуток между N -ми подзонами. Приведем предельные выражения для максимальной частоты Раби при $k = 0$ в случаях больших значений параметра Келдыша, при которых резонансный переход ($\hbar\omega = \varepsilon_N(k) \approx \Delta_N$) носит многофотонный характер, и малых, когда переход представляет собой межподзонное туннелирование в практически постоянном электрическом поле

$$\Omega_{NI}^{(R)}(0) = \frac{2}{3}\omega \begin{cases} \frac{1}{3} \exp\left(-\frac{\pi\Delta_N^2}{8\hbar v_F e F_0}\right); & \gamma_N \ll 1 \\ \exp(l)(4\gamma_N)^{-1} \sin^2 \frac{l\pi}{2}; & \gamma_N \gg 1 \end{cases}$$

В последнем случае вероятность перехода с рождением электрона и дырки оказывается такой же, как вероятность распада электродинамического вакуума в пока недостижимом постоянном электрическом поле $F_0 10^{13}$ кВ/см, сопровождающегося появлением электрон-позитронной пары [5]. Этот результат позволяет рассматривать ленту графена, как кристаллический аналог электродинамического вакуума, в котором предсказанные эффекты доступны для электрических полей на много порядков более слабых по сравнению с вакуумными полями.

Явные выражения для частоты Раби позволяют сделать следующие выводы. Многофотонные переходы между экстремумами подзон возможны лишь при участии нечетного числа фотонов l . Частота Раби $\Omega_{NI}^{(R)}$ растет с частотой световой волны ω , но всегда оказывается значительно меньше последней при любом механизме перехода. С ростом амплитуды электрического поля F_0 и ширины ленты d частота Раби также возрастает, причем зависимость от ширины оказывается более сильной, чем от напряженности поля. Оценки, сделанные для основного межподзонального перехода $N = 0$ в ленте шириной $d = 2$ н/м под влиянием излучения микроволнового диапазона с полем $F_0 = 360$ кВ/см и частотой $\omega = 3.3 \cdot 10^{14} \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$, ($\lambda = 5.7$ мкм, $l = \gamma_0 = 3$, $I = 3.42 \cdot 10^5$ кВт/см² — интенсивность излучения) дают для частоты Раби $\Omega_{03}^{(R)} = 2.54 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$, а для соотношения частот $\Omega_{03}^{(R)} / \omega = 7.7 \cdot 10^{-3}$. Заметное туннелирование в стационарном поле начинается со значений $F_0 2.65 \cdot 10^3$ кВ/см. Из приведенных оценок следует, что осцилляции Раби в кресельной ленте графена вполне наблюдаемы в лабораторных условиях с использованием распространенных источников сильного электромагнитного излучения.

Список литературы

1. L. Brey and H. A. Fertig, Phys. Rev. B **73**, 235411 (2006)
2. Ken-ichi Sasaki, K. Kato, Y. Tokura, K. Oguri and T. Sogawa, Phys. Rev. B **84**, 085458 (2011)
3. P.R.Wallace, Phys. Rev. **71**, 622, (1947)
4. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц “Квантовая механика” т. 3, Наука М, 1974
5. J. Schwinger, Phys. Rev. **82**, 664 (1951)

НЧ шумовая спектроскопия как метод диагностики солнечных элементов типа НИТ

Ермачихин А. В.¹, Воробьев Ю.В.¹, Трусков Е.П.¹, Литвинов В.Г.¹

¹РГРТУ

e-mail: al.erm@mail.ru

Солнечные элементы (СЭ) на основе гетеропереходов (heterojunction with intrinsic thin layer) [1] обладают хорошими характеристиками (КПД = 26,7% [2]). В качестве образца исследования использовался фрагмент готового СЭ, основанного на переходе a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-Si:H(i)/a-Si:H(p+). НИТ-структура выращена в НТИЦ "Тонкопленочные технологии в энергетике" Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург, Россия). В данной структуре были измерены характеристики спектральной дисперсии квантового выхода для лицевой и тыльной сторон, а так же температурные зависимости напряжения холостого хода и диффузионного потенциала [3].

Для исследования были выбраны пластины готового СЭ с нанесенными, но нежелательными токопроводящими дорожками. Целью работы было показать как отжиг токопроводящего материала влияет на общую характеристику СЭ. Для этого были использованы методы измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и низкочастотной (НЧ) шумовой спектроскопии [4]. Для имитации освещения использовался лазер с длиной волны 805 нм, подбирая значения тока, можно регулировать его мощность.

Сперва проводились измерения при комнатной температуре в темноте и при освещении образца. Затем происходил нагрев до температуры 100 °С и выдерживание в течении 3 часов, после – плавное охлаждение до комнатной температуры. Поддержание необходимой температуры происходило с помощью гелиевого криостата Janis CCS 400/204N и термоконтроллера LakeShore 335. После возвращение к исходной температуре, измерения проводились снова. На темновой ВАХ видно небольшое увеличение тока после отжига на прямой ветви ВАХ, и совсем незначительное уменьшение тока на обратной ветви ВАХ. При освещении ток везде стал чуть выше (т.е. отрицательный значения токов стали чуть ниже по абсолютному значению). В среднем ток вырос на 3,8%, но стоит учитывать, что этот рост взят на всём измеряемом диапазоне напряжений от -0,7 до 0,7 В, что перекрывает рабочий диапазон СЭ в разы.

Шумовые спектры при освещении не показали различий между исследованиями до и после отжига, что может быть связано с общим увеличением шума при облучении поверхности образца лазером. Это вполне логично, так как происходит генерация носителей заряда, а следовательно и рекомбинация части из них, что увеличивает общую флуктуацию числа носителей заряда.

Спектр НЧ шума без освещения после отжига стал меньше, а так же произошло смещение частоты излома. Уменьшение шума может быть связано непосредственно с изменением контактных свойств у токопроводящих дорожек. А изменение частоты излома связано с изменением времени жизни носителей заряда. До отжига частота была 147,8 Гц, после – 112,9 Гц. Если учесть, что произведение частоты излома на время постоянно [5]:

$$\omega \cdot \tau = 1,$$

где $\omega = 2\pi f$, то получится, что время релаксации увеличилось с 1,08 мс до 1,41 мс. Увеличение составило около 30%.

Таким образом показано, что отжиг СЭ, а конкретнее токопроводящих дорожек, улучшает характеристики СЭ. Особенно это заметно при использовании в исследованиях метода НЧ шумовой спектроскопии. Авторы выражают благодарность заместителю

генерального директора по научной работе НТИЦ "Тонкопленочные технологии в энергетике", доктору технических наук, профессору Е.И. Терику за предоставленные образцы солнечных элементов НТИ структур. Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-286.2021.1.2 на оборудовании Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) при Рязанском государственном радиотехническом университете им. В.Ф. Уткина в НОЦ неупорядоченных и наноструктурированных материалов и устройств на их основе (ННМУ).

Список литературы

1. M. Tanaka, M. Taguchi, T. Matsuyama, T. Sawada, S. Tsuda, S. Nakano, H. Hanafusa, Y. Kuwano. Jpn. J. Appl. Phys., 31, 3518 (1992).
2. M.A. Green, Y. Hishikawa, E.D. Dunlop, D.H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, A.W.Y. Ho-Baillie. Prog. Photovolt. Res. Appl., 27 (1), 3 (2019).
3. А.В. Ермачихин, Ю.В. Воробьев, А.Д. Маслов, Е.П. Трусков, В.Г. Литвинов. ФТП, 54 (10), 1066 (2020).
4. А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов, Е.П. Трусков, С.А. Кострюков. Радиотехника, 84 (11), 55 (2020).
5. Т.А. Холомина, С.А. Кострюков, А.С. Лактюшкин. Вестник РГРТУ, 39 (1), 74 (2012).

Исследование фотокаталитической активности наноструктурированного оксида цинка

Гриценко Л. В.¹, Палтушева Ж.У.¹, Кедрук Е.Ю.¹, Абдуллин Х.А.²

¹Satbayev University

²КазНУ им. аль-Фараби

e-mail: gritsenko_lv@mail.ru

Отходы текстильной промышленности, а также сельского хозяйства могут сохраняться во многих средах в течение длительного времени. Они представляют собой химические экологически опасные вещества, нарушающие баланс жизни водоёмов и их обитателей, токсичные для человека, домашних и диких животных [1, 2]. В связи с чем актуальной является задача разработки эффективных методов очистки от этих загрязняющих веществ. Оксид цинка (ZnO) является широкозонным полупроводником ($E_g \approx 3,37$ эВ) типа с высокой энергией связи экситона (60 мэВ), обладающий высокой термомеханической стабильностью, пьезоэлектрическими, оптоэлектронными и ферромагнитными свойствами. В последнее время большой интерес исследователей к наноструктурам ZnO вызван ввиду его высокой фотокаталитической активности [3, 4].

В данной работе была отработана низкотемпературная технология синтеза наночастиц ZnO (NPs) методом химического осаждения при перемешивании на магнитной мешалке водного раствора ацетата цинка и гидроксида натрия в течение 15 минут. Полученный осадок был промыт дистиллированной водой, отделён центрифугированием, а затем высушен в сушильном шкафу при 100°C в течение 12 часов.

Для полученных образцов ZnO NPs были исследованы морфология, структурные, оптические свойства и их фотокаталитическая активность. Измерение фотокаталитической активности полученных образцов ZnO проводилось в отношении деградации красителя Родамина - В (RhB), а также водного раствора Би-58 Нового, инсектицида широкого

спектра действия. Би-58 Новый относится к классу фосфорорганических соединений; основное действующее вещество – диметоат.

Для фотокаталитической деградации в 112,5 мл раствора RhB или Би-58 добавляли 9 мг синтезированного образца NPs с обработкой в ультразвуковой ванне в течение 30 мин с последующим перемешиванием на магнитной мешалке при комнатной температуре. Ультрафиолетовое освещение обеспечивала ртутная дуговая лампа, которая помещалась в колбу с приготовленным раствором.

Согласно результатам исследования электронной микроскопии ZnO растёт в виде тонких пластин толщиной 20-30 нм. Все исследуемые образцы ZnO демонстрируют гексагональную структуру вюрцита (карта JCPDS № 36-1451) с параметрами решётки $a = 3.246 \text{ \AA}$ и $c = 5.206 \text{ \AA}$.

Деградация красителя RhB была исследована на основании спектров оптического поглощения. С увеличением времени экспонирования относительная концентрация красителя RhB уменьшается, при этом для всех представленных образцов краситель RhB значительно деградирует на поверхности ZnO NPs под действием УФ освещения в первые 30 мин экспозиции. Деградация RhB под действием УФ-излучения в присутствии порошков ZnO, полученных из водных растворов с концентрацией NaOH (0.4-0.7)М, протекала быстрее, чем на заводском ZnO, что, по-видимому, обусловлено как большей удельной поверхностью, так и проявлением размерных эффектов.

Деградация водного раствора инсектицида Би-58 Нового в присутствии ZnO NPs была исследована методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Разделение диметоата проводилось на колонке Agilent Zorbax SB-C18 4,6x150 мм; диаметр частиц 3,5 мкм. Время анализа составляло 10 мин. Количественное определение диметоата проводили методом абсолютной калибровки. Рабочие стандартные растворы с концентрациями 5,0 25,0 и 50,0 мкг/л были приготовлены из основного стандартного раствора диметоата (концентрация исходного стандартного образца - 100 мкг/л) соответствующим последовательным разбавлением подвижной фазой для ВЭЖХ. При количественном определении диметоата было установлено, что концентрация диметоата в исходном растворе Би-58 Новом составляет 0,61 мкг/л, а в образцах, подвергнутых экспозиции в присутствии ZnO NPs, значительно уменьшается до 0,24 мкг/л уже за первые 30 минут экспозиции. Отмечено, что послеростовой финишный отжиг синтезированных ZnO NPs на воздухе способствует увеличению их фотокаталитической активности.

Данные исследования были профинансированы Комитетом науки МОН РК (ИРН проекта AP08856173).

Список литературы

1. Pathakoti K., Manubulum M., MinHwang H. Nanotechnology applications for environmental industry. In Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2018; Chapter 48; P. 894–907.
2. S. H. Douglas, B. Dixon and D. Griffin. Phys. Geogr., 2018, P. 1–19.
3. Qi K., Cheng B., Yu J., Ho W. Review on the improvement of the photocatalytic and antibacterial activities of ZnO. J. Alloys Compd. 2017, 727, P.792–820.
4. Chakrabarti S., Dutta B.K. Photocatalytic degradation of model textile dyes in wastewater using ZnO as semiconductor catalyst. J. Hazard. Mater. B 2004, 112, P. 269–278.

Влияние термической обработки на гальваномагнитные свойства объемных наноструктурированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$

Taghiyev M. M.^{1,2}, Abdinova G. C², Abdullayeva I. A².

¹Азербайджанский Государственный экономический университет.

²Институт Физики НАН Азербайджана

e-mail: mail_taghiyev@mail.ru

Высокопрочные экструдированные материалы на основе систем Bi-Sb являются наиболее эффективными материалами для создания низких температурных преобразователей энергии[1]. Исследования влияния размерных эффектов в объемных наноструктурированных материалах на гальваномагнитные свойства и выявления возможностей повышения термоэлектрической эффективности для применения в электронике актуально. Поэтому выявление закономерностей влияния термической обработки на гальваномагнитные свойства образцов $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ с различными размерами зерен в интервале температур $\sim 80\text{--}300\text{K}$ представляет определенный научный и практический интерес.

С этой целью, в данной работе получены объемные наноструктурированные экструдированные материалы на основе твердого раствора $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$, исследованы их электропроводность (σ), коэффициенты термоэдс (α), Холла (R_x) и теплопроводности (κ) в интервале $\sim 80\text{--}300\text{K}$ и напряженности магнитного поля до $\sim 74 \times 10^4$ А/м. Исследованы образцы, не прошедшие термообработки после экструзии и эти же образцы, прошедшие термические обработки при температуре ~ 503 К в течение 2 часов.

Объемные наноструктурированные образцы $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ были получены с использованием шаровой мельницы марки АГО-2. Размеры зерен (d) в порошке составляли 2×10^5 ; 950; 650; 380; 30 и 15 нм.

Выяснено, что с уменьшением размеров порошков в образцах наблюдается рост σ и уменьшение фоновой теплопроводности (κ_p), α и R_x т.е. зависимости этих параметров от d удовлетворительно коррелируются. С уменьшением размеров кристалликов растет концентрация границ, что приводит к росту концентрации электронов в образцах.

Текстура, образованная в образцах $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$, возникающая счет пластической деформации при экструзии, является важным фактором для изготовления пригодных термоэлектрических модулей. При экструзии одновременно возникают различные дефекты кристаллической решетки в отдельно взятых зернах. Степень текстуры будет зависеть от размера зерен и послеэкструзионной термообработки. При термообработке может возникнуть разориентация зерен за счет тепловой энергии, т.е. уменьшение степени текстуры, особенно в образцах с наименьшими d . С ростом d влияние термообработки на степень текстуры ослабляется. Из-за высокой дисперсности среди исследованных образцов, образцы с минимальными d обладают и высокой концентрацией носителей тока, так как, чем меньше зерно, тем больше доля случайных границ, т.е. тем больше структурных дефектов. Созданные дефекты, рассеивая носителей тока, уменьшают их подвижность. Термообработка приводит к уменьшению структурных дефектов, концентрации носителей заряда, и росту решеточной части теплопроводности.

По данным R_x и σ была рассчитана холловская подвижность $m = R_x \sigma$ носителей тока. Расчеты показали, что с ростом d и при термообработке значение m в зависимости $\mu \sim T^{-m}$ растет от $1,42 \div 1,57$ для образцов, не прошедших отжиг и до $1,81, 2,6$ для

отожженных образцов. Это свидетельствует о том, что при термообработке концентрация структурных дефектов уменьшается.

В образцах, не прошедших термообработки, при температуре $\sim 80\text{K}$ в рассеянии электронов превалирующим является рассеяние на дефектах. Малое изменение α с существенным изменением σ при термообработке дает основание предполагать, что и эти дефекты, в основном, неионизированные. Анализ гальваномагнитных свойств в образцах $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$, прошедших термообработку, показывает, что для рассеивания фононов, главную роль играет текстура, а электроны, в основном, рассеиваются на структурных дефектах при $\sim 80\text{K}$. С ростом d концентрация структурных дефектов и носителей заряда уменьшается. Уменьшение концентрации структурных дефектов и рост степени текстуры с ростом d сопровождается уменьшением электронной части и ростом фононной части теплопроводности. Таким образом, зависимости гальваномагнитных свойств образцов $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ от размеров зерен и термической обработки удовлетворительно объясняются изменениями, происходящими в структуре образцов при экстрезии и термообработке.

Список литературы

1.Tagiyev M.M., Abdinova G.D. Electrical and galvanomagnetic properties of extruded samples of $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ solid solutions with Pb and Te impurities Russian Physics Journal, 2019. V. 61. №. 11. p. 2135-2138

Особенности процесса формирования состояния памяти в тонких пленках халькогенидного полупроводника $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

Фефелов С. А.¹, Казакова Л.П.^{1,2}, Богословский Н.А.¹, Былев А.Б.², Якубов А.О.³

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПб ГЛТУ им. С.М. Кирова

³МИЭТ

e-mail: ljudakaz@yandex.ru

Халькогенидные стеклообразные полупроводники состава $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, привлекают к себе постоянный интерес исследователей, поскольку этот материал, обладая уникальными свойствами, является перспективным и уже используется для создания ячеек фазовой памяти, работающей на фазовом переходе стекло – кристалл, Особенно привлекательными для использования их в элементах энергонезависимой памяти с электрической записью информации [1] являются такие его свойства, как высокая скорость записи, значительное различие сопротивлений кристаллической и аморфной фаз, большое число циклов перезаписи - по разным данным от 10^5 до 10^{13} . Несмотря на значительные успехи в технологии, физика процессов, происходящих при электрической записи информации, еще недостаточно изучена, что затрудняет совершенствования технологии получения ячеек с улучшенными характеристиками.

В данной работе с целью изучения процессов, происходящих при формировании состояния памяти были проведены исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) на тонких пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ толщиной 130 нм. Образцы для измерений представляли собой тонкопленочные структуры типа “сэндвич”. Для измерений использовалась ранее предложенная нами методика измерения ВАХ в режиме заданного тока [2]. На образец последовательно подавались треугольные импульсы тока с возрастающей максимальной

величиной тока ($I_{\max}$) в диапазоне 6,5 - 8200 мкА. На образце регистрировалось падение напряжения V . Осциллограммы $V(t)$ использовались для построения ВАХ.

Полученные экспериментальные данные свидетельствовали о том, что при подаче на образец каждого последующего импульса тока с возросшим значением $I_{\max}$ прямая ветвь ВАХ, соответствующая высокоомному состоянию образца, идет по обратной ветви предыдущей ВАХ, соответствующей низкоомному его состоянию, до тех пор, пока ток в образце не превышает $I_{\max}$ предыдущего импульса. Каждый следующий переход в новое низкоомное состояние происходил при превышении текущим значением тока $I_{\max}$ предшествующего импульса. Из этого следует, что образец остается в состоянии с низким сопротивлением после окончания импульса, то есть образец запоминает низкоомное состояние. Причем при каждой последующей подаче на образец возросшего по величине импульса тока появляется новое состояние памяти.

Для объяснения полученных данных использовалась электронно-тепловая модель переключения, предполагающая возникновение в образце при переключении шнура тока с высокой температурой [3], в котором после перехода в низкоомное состояние, происходит кристаллизация, т.е., формируется канал памяти. В результате анализа экспериментальных данных была проведена оценка радиусов сформированных каналов памяти, которая показала, что их радиус возрастал от 0.1 до 0.4 мкм при изменении максимальной величины подаваемого на образец импульса тока от 200 до 8200 мкА.

Список литературы

1. Н.А. Богословский, К.Д. Цэндин. *ФТП*, 46(5), 577-608 (2012).
2. С.А. Фефелов, Л.П. Казакова, С.А. Козюхин, К.Д. Цэндин, Д. Арсова, В. Памукчиева. *ЖТФ*, 84, 80 (2014).
3. N. Bogoslovskiy, K. Tsendin. *Solid-State Electronics*, 129, pp.10-15 (2017).

Исследование нелинейных оптических явлений в кремниевых и оксидных сферических частицах

Масталиева В. А.¹, Николаева А. А.², Неплох В.В.^{1,4}, Еуров Д. А.³, Макаров С.В.², Курдюков Д.А.³, Стовягя Е.Ю.³, Голубев В.Г.³, Мухин И.С.^{1,2}

¹СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова

²ИТМО

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе

⁴СПбПУ

e-mail: strindberg76@mail.ru

Преобразователи ИК излучения в видимый диапазон востребованы для создания оптоэлектронных устройств [1,2], визуализаторов ИК излучения и других приборов нелинейной оптики. Коммерческие визуализаторы ИК создаются на основе керамики, обладающей высокой чувствительностью и не требует активации светом. [3,4] Однако керамические визуализаторы обладают ограниченной прозрачностью и гибкостью, а также люминесцируют на фиксированной длине волны, не позволяя различать различные длины волн падающего ИК излучения. Были представлены новые решения для визуализации ИК-излучения на основе генерации второй гармоники (ВГ) света в нитевидных нанокристаллах (ННК) GaP, перенесённых в прозрачный силикон [2]. Разработанные мембраны ННК GaP/силикон удваивают частоту падающего излучения, позволяя визуализировать

ИК излучение в диапазоне 800-1400 нм, но требуют дорогостоящей молекулярно-пучковой эпитаксии.

В данной работе созданы образцы силиконовых плёнок с инкапсулированными кремниевыми неорганическими сферами 3 видов: монодисперсные сферы SiO_2 , мезопористые сферы Si и Si/SiO_2 . Монодисперсные сферы SiO получают путем медленного гидролиза $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ в спирто-водно-аммиачной среде [5], при добавлении в реакционную смесь поверхностно-активного вещества формируются мезопористые частицы [6]. Диаметр сфер лежит в промежутке от 300 до 600 нм. Мезопористые сферы Si/SiO_2 представляют собой структуру SiO_2 с порами диаметра порядка нескольких нанометров, заполненные аморфным кремнием, соотношение $\text{Si} : \text{SiO}_2$ приблизительно 1 : 1. Сферы Si получены из сфер Si/SiO_2 жидкостным травлением SiO_2 [6]. Благодаря пористой структуре образцы обладают развитой поверхностью (до $300 \text{ m}^2/\text{g}$ [6]), что позволяет изучать оптические свойства поверхности кремния.

Объёмный кремний эффективно генерирует третью гармонику (ТГ) света, в то время как поверхность кремния из-за нарушения симметрии кристалла генерирует ВГ. Таким образом сферические частицы, инкапсулированные в прозрачный силикон, представляют собой интересный объект исследования нелинейных оптических явлений, позволяя за счёт своей структуры и состава изучать соотношение генерации сигнала ТГ и ВГ. Инкапсуляция сфер в силикон предотвращает окисление кристаллического кремния, при этом показатель преломления силикона примерно равен показателю преломления оксида кремния, что позволяет изучать прохождение плоской волны падающего излучения через среду с подавленным внутренним рассеянием.[7]

Измерения сигнала ВГ и ТГ производились на установке ИК фемтосекундного лазера и спектрометра видимого диапазона, мощность до объектива составляла 2 mW, после объектива 0,2 mW. Измеренные спектры продемонстрировали преобладание ТГ, видимой невооружённым глазом. Таким образом, продемонстрированы прозрачные и полупрозрачные структуры, визуализирующие ИК излучение и изучены нелинейные оптические свойства мезопористой поверхности кремния и оксида кремния.

Список литературы

1. Морозов, И.А. Физико- технологические основы процессов микро структурирования для создания вертикально - ориентированных фотопреобразовательных структур на основе кремния [Текст]: дис. канд. техн. Наук: 05.27.06/ Морозов Иван Александрович. - Санкт-Петербург, 2020. - 161 с.
2. weblink:<https://www.nap.edu/read/18812/chapter/4> , last accessed 16/02/2021
3. weblink:https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=296, last accessed 16/02/2021
4. weblink:https://www.alphalas.com/products/laser-diagnostic-tools/infrared-to-visible-converters-ir-laser-beam-visualizers-ir-detectors-ir-vis-series.html?gclid=Cj0KCQi-AgomBBhDXARIsAFNyUqPq76KpwEcZf99j8kRnwNFnr8VHRF3c-RL3YMIy_m36inblJXCKt0EaAsVpEALw_wcB, last accessed 16/02/2021
5. Eurov, D. A., Kurdyukov, D. A., Kirilenko, D. A., Kukushkina, J. A., Nashchekin, A. V., Smirnov, A. N., & Golubev, V. G. (2015). Core-shell monodisperse spherical mSiO₂/Gd₂O₃: Eu³⁺@ mSiO₂ particles as potential multifunctional theranostic agents. Journal of Nanoparticle Research, 17(2), 1-10
6. Губанова Л.А., Константинова Ю.А. Оптические технологии. Учебно-методическое пособие – СПб: Университет ИТМО, 2018. - 62 с
7. Диэлектрические и гибридные наноструктуры для биофотоники. Наноантенны для визуализации биообъектов: разработка фундаментальных основ / Кившар

Ю.С., Петров М.И., Макаров С.В., Иорш И.В., Пермяков К.С., Войтова Г.А.: Университет ИТМО, 2016. - 40 с

Исследование оптических свойств рекристаллизованных неорганических перовскитных наночастиц CsPbBr₃ в нетканых фторполимерных волокнах

Баева М. Г.^{1,2}, Неплох В.В.¹, Маркина Д.И.², Павлов А.М.³, Кириленко Д.А.⁴, Мухин И.С.¹,
Пушкарёв А.П.², Макаров С.В.², Сердобинцев А.А.⁴

¹СПБАУ РАН,

²Университет ИТМО,

³Саратовский Государственный Университет,

⁴ФТИ им. А. Ф. Иоффе

e-mail: maria.baeva111@gmail.com

На галогенидных перовскитах (структуры ABX₃, где A = Cs, MA, FA; B = Pb, Sn; X = Cl, Br, I) как на перспективных светопоглощающих и светоизлучающих материалах в настоящее время сфокусировано внимание и научного, и промышленного мирового сообщества ввиду их (перовскитов) выдающихся оптических и электрофизических свойств. Так, нанокристаллы (НК) неорганических галогенидных перовскитов CsPbBr₃ обеспечивают эффективное преобразование света и характеризуются высокими значениями квантового выхода фотолюминесценции более 95% с контролируемым размером НК спектральным диапазоном излучения. В области применения подобных НК могут входить солнечные батареи, светодиоды, лазеры, визуализаторы лазерного излучения и т.д. Инкапсулирование CsPbBr₃ НК в полимерные матрицы/мембраны для повышения стабильности НК - очень важный этап разработки гибких устройств для гражданских применений.

Авторами был проведен синтез нетканых фторполимерных образцов с инкапсулированными в их волокна CsPbBr₃ НК. При этом в процессе электроформования полимерных волокон происходит самоорганизованная рекристаллизация перовскитных галогенидных НК. Рекристаллизованные НК в волокнах нетканых матов демонстрируют более широкое распределение НК по размерам со смещением пика фотолюминесценции в длинноволновую область, при изменении среднего размера НК с 10,5 нм в коллоиде до 9,5 нм в нетканых волокнах. Было экспериментально показано, что нетканые образцы с перовскитными НК обладают детектируемой невооружённым глазом люминесценцией при двухфотонном поглощении, что актуально для визуализации ИК лазерного излучения. Также были проведены исследования водной стабильности рекристаллизованных НК; перовскитные НК в нетканых матах демонстрируют 40% падение интенсивности фотолюминесценции после 9 часового теста в воде, при этом исходные (коллоидные) точки полностью растворяются в воде за 10 минут.

Работа была выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 19-73-3002.

Nanostructuring of ultra-high-molecular-weight polyethylene in thermal and mechanical fields as revealed by DSC technique

Myasnikova L.¹, Egorov V¹., Borisov A¹., Boiko Yu¹., Ivan'kova E²., Marikhin V¹., Radovanova E.¹

¹ФТИ им. А. Ф. Иоффе

²ИВС РАН

e-mail: liu2000@mail.ru

Продукты синтеза сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), так называемые реакторные порошки (РП), обладают сложной иерархической надмолекулярной структурой, состоящей из разнообразных наноразмерных морфоз (кристаллических ламелей, фибрилл, глобул, шиш-кебабов) [1]. В последнее время активно разрабатывается безрастворный способ переработки СВМПЭ в сверхпрочные высокомолекулярные нити путем спекания порошка под давлением в механически целостную пленку, которая затем подвергается ориентационному упрочнению. Для нахождения оптимальных параметров технологического процесса важно знать, что происходит с наноструктурой РП на каждом этапе переработки. Одной из базовых морфологических единиц в РП являются ламели из складчатых кристаллов (десятки нм), по-разному уложенных и связанных между собой проходными молекулами различной степени свернутости [2]. Температура плавления ламелей зависит от их толщины (L).

Анализ формы кривых плавления ДСК полимера позволяет получить данные о распределении ламелей по толщине, поскольку тепловой поток dH/dT (где ΔH - энтальпия плавления, а T - температура образца) пропорционален массовой доле ламелей, плавящихся при определенной температуре. Такой анализ структуры СВМПЭ до сих пор не проводился. Для расчета распределения толщин ламелей использовали уравнение Гиббса-Томсона [3]:

$$T_m = T_0 (1 - 2\sigma_c / \Delta H \times L)$$
 (где T_m - наблюдаемая температура плавления ламели толщиной L ; T_0 - равновесная температура плавления ламели бесконечной толщины; σ_c - поверхностная энергия базальной поверхности ламели и ΔH - энтальпия плавления) и следующие параметры $T_0 = 415$ К; $\sigma_c = 87.4$ эрг/см²; $\Delta H = 2.79 \times 10^9$ эрг/см³.

Исследовали: 1. реакторный порошок СВМПЭ, синтезированный в ИВС РАН на металлоценовом катализаторе Ф-97, 2. компактированный порошок (Ткомн, $P = 95$ МПа, 15 мин), 3. спеченный компакт ($T = 130^\circ\text{C}$ ($T < T_0$ ПЭ), $P = 95$ МПа, 30 мин) и 3 спеченных компакта ($T = 145^\circ\text{C}$ ($T > T_0$ ПЭ), $P = 100$ МПа, 30 мин), но по-разному охлажденных. I - закалка, II - остывание в прессе без давления, III - остывание в прессе под давлением 100 МПа.

Найдено, что в реакторном порошке СВМПЭ сосуществуют ламели различной толщины: небольшое количество (5%) самых тонких ламелей $L = 7$ нм, которые плавятся при 405 К, 20% более толстых ламелей $L = 9$ нм, которые плавятся при 407 К. Основную массу составляют более крупные ламели: 34% $L = 12$ нм и 40% $L = 17,7$ нм, T_m которых равна 408,9 и 410,7 К, соответственно.

Обнаружено, что процентное содержание толстых и тонких ламелей в компактированном и спеченном при $T < T_m$ ПЭ образцах практически остается одним и тем же, однако, существенные изменения в содержании ламелей разной толщины наблюдаются в образцах, спеченных при 145°C . В образцах I не наблюдаются ламели с $L > 14,4$ нм, а в образцах II, наряду с преимущественным содержанием ламелей с $L = 11,8$ нм, появляется некоторое количество (5,4%) наиболее толстых ламелей с $L = 31,3$ нм.

В работе будет обсуждаться локализация этих элементов структуры, принадлежность их к определенным морфологическим образованиям, наблюдаемым на растровых электронно-микроскопических снимках (ламеллярные пачки, «прошитые» наномостиками, ламеллярные наросты в шиш-кебабах, индивидуальные ламели, глобулы) и возможное влияние на ориентационное упрочнение.

Номера проектов РФФИ: 19-03-00789, 18-29-17023-мк

Список литературы

1. Olga A. Serenko 1, Mikhail I. Buzin 1, Vladislav A. Tuskaev *Polymers* 2018, 10, 1281; doi:10.3390/polym10111281
2. A. N. Ozerin, S.S. Ivanchev, S.N. Chvalun. et al. *Polymer Science, Ser. A*, 2012, Vol. 54, pp. 950–954
3. Wunderlich, B., *Macromolecular Physics*, Vol. 3. *Academic Press, London*, 1980.

Адсорбционные сенсоры на основе нитевидных нанокристаллов кремния для детектирования угарного газа и аммиака

Кондратьев В. М.¹, И. А. Морозов^{1, 2}, Е. А. Вячеславова^{1, 2}, А. С. Гудовских^{1, 2}, С. С. Налимова², В. А. Мошников², Д. А. Кириленко³ и А. Д. Большаков^{1, 4, 5}

¹СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе

⁴Университет ИТМО

⁵МФТИ

e-mail: kvm_96@mail.ru

Угарный газ и аммиак - неорганические агенты, встречающиеся как в природе так и в организме человека, представляют огромный интерес для современной сенсорики. Во-первых, оба вещества в концентрациях порядка 1 млн⁻¹ вырабатываются человеком и являются биологическими маркерами развития и протекания патологических изменений в организме человека. Во-вторых, при концентрациях порядка 100 млн⁻¹ в воздухе, оба вещества токсичны и представляют опасность для человека. Данная работа направлена на исследование возможности получения точных, технологичных и относительно дешёвых сенсоров CO и NH₃, совместимых как с газовой, так и с жидкой средой. В ходе работы были созданы и исследованы прототипы сенсоров на основе нитевидных нанокристаллов кремния (ННК Si). Актуальность работы продиктована возможностью применения подобного типа адсорбционных сенсоров в медицинском и экологическом оборудовании, а также для биологических целей, например, для исследования внутриклеточного транспорта аммиака.

Вертикально ориентированные структуры на основе ННК Si длиной порядка 10 мкм были получены с использованием методов микросферной литографии и изотропного травления на поверхности пластины Si (001) и исследованы методами оптической и электронной микроскопии. Для исследования структурных особенностей синтезированных ННК, они также были перенесены на вспомогательную подложку и изучены методом спектроскопии комбинационного рассеяния.

Для создания сенсоров, ННК Si были отделены от ростовой подложки ультразвуком, диспергированы в изопропиловом спирте и перенесены на поверхность сенсорной платформы с золотыми встречно-штыревыми контактами (шаг контактов 5 мкм) с последующим отжигом и характеризацией типа сформированных контактов золото-ННК Si.

Сенсорные свойства ННК Si были исследованы с точки зрения изменения импеданса полученных сенсоров под действием целевого адсорбата в газообразной (СО) и жидкой (NH₃) форме относительно импеданса в присутствии сравнительной среды (N₂ и дистиллированная H₂O, соответственно). При этом детектирование СО (100млн⁻¹) проводилось как и в нормальных условиях, так и в условиях нагрева сенсора до 200°C и облучения светом УФ-диапазона (395нм). Изменение импеданса представлено в координатах Найквиста, что позволяет однозначно охарактеризовать изменение вещественной и мнимой части импеданса сенсора на основе ННК Si в диапазоне частот от 100 Гц до 500кГц в присутствии СО и NH₃.

Полученные результаты:

- Нагрев сенсора на основе ННК Si до 200°C позволяет повысить чувствительность к СО (100млн⁻¹), выражающуюся в изменении вещественной и мнимой частей импеданса сенсора на величину порядка 10% (от значения в присутствии сравнительного газа - N₂) в широком диапазоне частот, при этом в нормальных условиях и при облучении сенсора светом УФ-диапазона (395нм) чувствительности к СО не наблюдалось, что может быть связано с термодинамической природой адсорбционных процессов на поверхности ННК Si, протекающих для разных адсорбатов с поглощением или выделением тепла;
- Зарегистрировано изменение вещественной части импеданса полученных сенсоров на величину порядка 10-80% (от значения в присутствии сравнительной среды - H₂O) при воздействии целевого адсорбата - NH₃ (10 и 100млн⁻¹);
- Оптимальное время детектирования обоих типов адсорбатов: 30 с. (при этом дальнейшая экспозиция адсорбата приводит к слабому изменению импеданса), время восстановления: до 700 с. , что говорит об инерционности протекания процессов десорбции;
- Продemonстрированный протокол создания сенсоров является простым с технологической точки зрения и позволяет реализовывать прототипы, совместимые как с газовыми, так и с жидкостными средами. Они демонстрируют возможность быстрого восстановления исходных электрических характеристик, что открывает новые возможности для создания функциональных устройств на основе низкоразмерных кремниевых наноструктур.

Список литературы

1. X.T. Zhou et al. / Chemical Physics Letters. 369, 220–224, 2003.
2. I.Park et al / Nanotechnology. 21. 9, 2010, 015501.

Построение барьерных гетероструктур на основе углеродных и металлоорганических соединений

Мазинов А. С.¹, Гурченко В.С.¹, Тютюнник А.С.¹, Ильина В.Ю.¹, Дмитриев А.И.¹

¹КФУ им. В.И. Вернадского

e-mail: mazinovas@cfuv.ru

В работе представлены результаты применения гибридо-органического цинкового комплекса в качестве компонента для построения гетероструктур на основе фуллерена C₆₀. Органические молекулы и координационные соединения на их основе вызвали большой интерес за последние десятилетия, во многом благодаря их потенциальному применению при создании высокоэффективных органических светодиодов (OLED) [1-2], а также всевозможных оптических и фотоэлектрических устройств (лазеры, сенсоры и пр.) [3-4]. Среди широкого спектра различных классов люминесцентных материалов, гибридные металлоорганические соединения, содержащие функциональные эмиссионные лиганды, представляют собой новый класс люминесцентных материалов [5-6], которые вызывают особый интерес из-за их доступности, низкой стоимости изготовления и малой токсичности [7]. Гибридные органические комплексы Zn (II) на основании Шиффа зарекомендовали себя как материалы, обладающие сильными фотолюминесцентными свойствами с высокой яркостью ~1000 кд / м² [8]. С другой стороны, фуллерен показал себя как относительно сильный акцептор [9], использование которого в качестве переносного слоя позволяет улучшить электрические характеристики органических светодиодов (OLED) [10]. Тем не менее, информация об использовании цинковых комплексов на основе этилендиамина Шиффа для создания органо-углеродных гетероструктур в литературе встречается крайне редко, в связи с чем нами была предпринята попытка создания барьерной гетероструктуры на основе фуллерена C₆₀ и соединений цинка N,N'-ethyleniminebis[1-phenyl-3-methyl-4-formylimino-2-pyrazoline-5-ol] — PMFP (C₂₄H₂₄N₆O₃Zn).

В ходе исследований проведён анализ спектральных характеристик оптического диапазона, а также люминесцентные и проводящие свойства полученных образцов. В результате анализа поверхности углеродных плёнок, показано разнообразие морфологии образцов, образованных в результате самосборки под действием различной природы растворителей. Максимум поглощения в оптическом диапазоне для соединения PMFP наблюдается в диапазоне 300-320 нм. Полученное координационное соединение обладает люминесцентными свойствами и переизлучает в диапазоне 390-400 нм, в отличие от исходного органического лиганда. В результате расчёта оптической ширины запрещенной зоны, показано, что изменение молекулярной структуры исходного лиганда путём допирования молекулой цинка сопровождается уменьшением данного параметра на 0.18 эВ. Вид вольт-амперных характеристик позволяет говорить о том, что на границе раздела PMFP-C₆₀ возникает потенциальный барьер, обусловленный различной морфологией базовых молекулярных систем. На данный момент существует большое количество трактовок механизмов проводимости в органических структурах. Одним из наиболее приемлемых механизмов проводимости, на наш взгляд, является прыжковая природа переноса носителей заряда, однако данный вопрос требует дополнительных исследований.

Авторы выражают благодарность компании “МСТ-нано” за предоставление исходного материала C₆₀.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90038.

Список литературы

1. De Bettencourt-Dias, A. (2007). Lanthanide-based emitting materials in light-emitting diodes. *Dalton Transactions*, (22), 2229. doi:10.1039/b702341c.
2. Kim, S., Bae, H. J., Park, S., Kim, W., Kim, J., Kim, J. S., ... You, Y. (2018). Degradation of blue-phosphorescent organic light-emitting devices involves exciton-induced generation of polaron pair within emitting layers. *Nature Communications*, 9(1). doi:10.1038/s41467-018-03602-4.
3. Amgar, D., Aharon, S., & Etgar, L. (2016). Inorganic and Hybrid Organo-Metal Perovskite Nanostructures: Synthesis, Properties, and Applications. *Advanced Functional Materials*, 26(47), 8576–8593. doi:10.1002/adfm.201603752.
4. Pashaei, B., Karimi, S., Shahroosvand, H., Abbasi, P., Pilkington, M., Bartolotta, A., ... Bonaccorso, F. (2019). Polypyridyl ligands as a versatile platform for solid-state light-emitting devices. *Chemical Society Reviews*. doi:10.1039/c8cs00075a.
5. Wang, S. (2001). Luminescence and electroluminescence of Al(III), B(III), Be(II) and Zn(II) complexes with nitrogen donors. *Coordination Chemistry Reviews*, 215(1), 79–98. doi:10.1016/s0010-8545(00)00403-3.
6. Xu, H., Chen, R., Sun, Q., Lai, W., Su, Q., Huang, W., & Liu, X. (2014). Recent progress in metal–organic complexes for optoelectronic applications. *Chem. Soc. Rev.*, 43(10), 3259–3302. doi:10.1039/c3cs60449g.
7. Minei, P., Fanizza, E., Rodríguez, A. M., Muñoz-García, A. B., Cimino, P., Pavone, M., & Pucci, A. (2016). Cost-effective solar concentrators based on red fluorescent Zn(ii)–salicylaldehyde complex. *RSC Advances*, 6(21), 17474–17482. doi:10.1039/c5ra23049g.
8. Gusev, A. N., Kiskin, M. A., Braga, E. V., Chapran, M., Wiosna-Sałyga, G., Baryshnikov, G. V., ... Linert, W. (2019). A Novel Zinc Complex with Ethylenediamine Schiff Base for Highly Luminance Blue Fluorescent OLED Applications. *The Journal of Physical Chemistry C*. doi:10.1021/acs.jpcc.9b02171.
9. Gusev, A. N., Mazinov, A. S., Shevchenko, A. I., Tyutyunik, A. S., Gurchenko, V. S., & Braga, E. V. (2019). The Voltage–Current Characteristics and Photoelectric Effect of Fullerene C60–N-Isoamylisatin 4-Methylphenylhydrazone Heterostructures. *Technical Physics Letters*, 45(10), 997–1000. doi:10.1134/s1063785019100080.
10. Мазин А.С., Тютюник А.С., Гурченко В.С., Ильина В.Ю. Влияние масс активных слоев гетероструктур фуллерен C60- 4-метилфенилгидразона N-изоамилизатина на их выпрямляющие характеристики. *РЭНСИТ*, 2020, 12(3)361-368. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.361.

Теплопроводность РСМ-материалов на основе композита, состоящего из n-алкана и наноразмерных добавок

Борисов А. К.¹, Егоров В.М.¹, Марихин В.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: borisov.ak@bk.ru

Одним из наиболее актуальных и перспективных направлений развития зеленой энергетики является разработка РСМ-материалов (Phase Change Materials), способных поглощать, хранить и преобразовывать потоки тепловой энергии за счет собственных тепловых

эффектов, в том числе при фазовых переходах. Применение таких материалов возможно практически во всех сферах жизнедеятельности человека: от строительства до медицины. В качестве наиболее перспективных в этом отношении РСМ-материалов рассматриваются гомологические ряды алифатических углеводородов и их производных, в первую очередь нормальные *n*-алканы [1, 2]. Для создания рабочего диапазона температур протяженностью до нескольких десятков градусов необходимо использовать наборы *n*-алканов различной длины, т.е. смеси *n*-алканов [1]. При этом для большего понимания физики процессов необходимо их рассмотрение на наноуровне [3 - 5].

Помимо наиболее важной характеристики РСМ-материалов – их энергоемкости, важное значение имеет теплопроводность этих материалов, определяющая мощность поглощаемой или выделяемой в виде тепла энергии. В настоящей работе для выяснения эффективности теплопреобразования при фазовых переходах исследовались композиты на основе *n*-алкана (нонадекана) и наноразмерных добавок (алюминий (Al) с размером частиц 50-70 нм и 90-110 нм, серебро (Ag) с размером частиц 50-70 нм). Образцы композитов для равномерного распределения добавок по объему подвергались в расплавленном состоянии обработке на ультразвуковом диспергаторе УЗД1-0,1/22. Термодинамические параметры композитов, включая твердофазный переход первого рода и плавление, исследовались на калориметре ДСК-500 фирмы «Спецприбор».

Теплопроводность (обратная величине теплосопrotivления) образцов композита определялась по наклону переднего фронта эндотермического пика на кривых ДСК фазового перехода первого рода, предшествующего по температуре эндотерме плавления. Оказалось, что теплопроводность композитов в несколько раз превосходит теплопроводность исходного нонадекана, что намного превосходит «аддитивный» эффект увеличения теплопроводности композитов за счет добавки 5-10% более теплопроводящего материала.

Границы раздела элементарных объемов являются преобладающими дефектами в поликристаллах *n*-алканов. Поэтому увеличение *w* приведет к уменьшению объемной дефектности и, соответственно, к снижению рассеяния фононов, что будет способствовать увеличению теплопроводности кристаллов композитов [6].

Таким образом установлено, что значительное увеличение теплопроводности обусловлено не «аддитивной» добавкой более теплопроводящего материала, а перестройкой надмолекулярной структуры нонадекана вследствие наличия добавочных центров кристаллизации и формирования специфической надмолекулярной структуры в композите.

Список литературы

1. Егоров В.М., Борисов А.К., Марихин В.А., Энергоемкость РСМ-материалов на основе *n*-алканов, Письма в ЖТФ, т.45, 38-42, 2019.
2. Borisov A.K., Egorov V.M., Marikhin V.A., An investigation of the thermodynamic properties of molecular crystals by the differential scanning calorimetry, J. Phys.: Conf. Ser., v.1236, 012010, 2019.
3. Shchukina E.M., Graham M., Zheng Z., Shchukin D.G., Nanoencapsulation of phase change materials for advanced thermal energy storage systems, Chem. Soc. Rev., v.47, 4156-4175, 2018.
4. Егоров В.М., Борисов А.К., Марихин В.А., Анализ процесса образования нанозародышей при структурном фазовом переходе в молекулярных кристаллах нормальных алканов, ФТТ, т.63, 406-412, 2021.
5. Borisov A.K., Egorov V.M., Marikhin V.A., Investigation of the influence of the nano-nuclei habit on the specifics of phase transitions in long-chain molecular crystals and polymers, J. Phys.: Conf. Ser., v.1697, 012102, 2020.

6. Годовский Ю.К., Теплофизика полимеров, Издательство «Химия», Москва, 1982, 280 с.

Влияние конформационных дефектов на развитие структурных фазовых переходов в тетракозанае $C_{24}H_{50}$

Гурьева С. А.¹, Марихин В.А.¹, Волчек Б.З.², Медведева Д.А.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²ИВС РАН

e-mail: swet.gurjewa@gmail.com

Исследовались структурные трансформации длинноцепочечных молекулярных кристаллов *n*-алканов при температурных фазовых переходах методом ИК-Фурье спектроскопии, позволяющей выявлять специфические смещения в спектрах молекулярных колебаний при изменениях симметрии кристаллографических суб-ячеек.

В предыдущих наших работах [1,2] изучена кинетика развития твердофазного перехода I рода (ФП-I) в монодисперсных образцах чётных *n*-алканов на примере тетракозана $C_{24}H_{50}$. На основании температурных изменений колебательных мод метиленовых CH_2 транс-последовательностей в кристаллических сердечниках ламелей показано, что ФП-I развивается по гетерогенному механизму в температурном интервале $\Delta T \sim 2K$ в соответствии с теорией размытых фазовых переходов I рода. Выяснено, что переход обусловлен изменением исходной триклинной симметрии суб-ячеек на гексагональную. Кроме того, обнаружено, что эффект чётности *n*-алканов влияет на развитие ФП-I, в частности, для чётных *n*-алканов характерно возникновение начальных нанозародышей новой фазы именно в сердцевинах ламелей.

В настоящей работе особое внимание уделяется изучению влияния на протекание ФП-I в тетракозанае конформационных дефектов, включающих транс- и гош-конформеры, прямолинейные и дефектные участки цепи, соответственно. Каждой локальной конформационной структуре соответствует определенная полоса поглощения в ИК спектре [3], большинство из них располагается в спектральной области $\nu = 1200 - 1400 \text{ см}^{-1}$. Для тетракозана $C_{24}H_{50}$ при комнатных температурах обнаружены следующие типы нерегулярных конформационных дефектов: 1) кинки gtg^* (1308 и 1369 см^{-1}), 2) двойные гош-конформеры gg^* (1352 см^{-1}), 3) концевые гош-конформеры gt_m (1340 см^{-1}). В процессе нагревания кристаллов *n*-алканов количество различных поворотных изомеров возрастает, что приводит к всё большей разупорядоченности системы.

Получен большой массив ИК спектров образцов при ступенчатом повышении температуры с шагом $0,1K$ от 292 до $325K$ (Bruker IFS-88 FTIR spectrometer, Germany). Разделение налагающихся полос поглощения на отдельные составляющие проводилось с помощью программы Fit9k 0.9.8.

Известно [4,5], что переход от триклинной к гексагональной структуре сопровождается образованием ряда промежуточных ротационных фаз (для тетракозана реализуется последовательность: кристалл, RV, RI, RII $\equiv$ гексагональная фаза, жидкость). Анализ температурной зависимости интенсивности полос поглощения нерегулярных конформеров показал резкий скачок их концентрации при температуре около $47.0^\circ C$, при которой, как было установлено в [2], происходит переход RV–RI между двумя ротационными фазами, отличающимися наклоном цепей. При этом молекулы из наклонного положения в

триклинных суб-ячейках переходят в вертикальное с образованием различных конформационных дефектов.

Установлено, что происходят значительные изменения концентрации нерегулярных конформеров при температурах, соответствующих переходу RI–RII, т.е. к полностью гексагональной укладке молекул. Выяснено, что при переходе в гексагональную фазу число преимущественно концевых гош-конформеров и кинков возрастает в 2 – 4 раза. При ослаблении межмолекулярного взаимодействия энергетически выгодно образование кинков в некоторых молекулах в приповерхностных слоях ламелей, что увеличивает расстояние между соседними цепями. Как следствие, концы из 3 – 4 атомов углерода легче выскальзывают из сердечников ламелей. Далее этим участкам цепей выгодно повернуться вокруг гош-связи, чтобы расположиться параллельно базовой плоскости ламели в межламеллярном пространстве. При переходе в гексагональную фазу, помимо всего, увеличивается и межламеллярное пространство, что также способствует образованию конформационных дефектов.

Таким образом, продемонстрировано существование множества нерегулярных конформеров в твёрдых фазах тетракозана, концентрация которых достигает максимума при приближении к температуре плавления. Существование этих дефектных молекул способствует протеканию ротационных переходов между различными фазами в твёрдом состоянии.

Список литературы

1. Марихин В.А., Гурьева С.А., Мясникова Л.П., Волчек Б.З., Медведева Д.А., Исследование кинетики фазового перехода I рода в тетракозана C₂₄H₅₀ методом ИК-Фурье спектроскопии, ФТТ, т.61, вып.10, 1831-1835, 2019;
2. Gureva S.A., Marikhin V.A., Myasnikova L.P., Volchek B.Z., Medvedeva D.A., The effect of the n-alkane evenness on structural phase transitions, J. Phys.: Conf. Ser., 1697, 012093, 2020;
3. Snyder R.G., Maroncelli M., Qi S.P., Strauss H.L., Phase transitions and nonplanar conformers in crystalline n-alkanes, Science, 214, issue 4517, 188-190, 1981;
4. Sirota E. B., King H. E., Singer D. M., Shao H. H., Rotator phases of the normal alkanes: An x-ray scattering study, J. Chem. Phys. 98, No.7, 5809-5824, 1993;
5. Sirota E. B., Singer D. M., Phase transitions among the rotator phases of the normal alkanes, J. Chem. Phys. 101, No. 12, 10873-10882, 1994.

Новые сорбенты для электрохроматографии на основе полимерно-неорганических диэлектрических композиционных материалов

Шмыков А. Ю.¹, Мякин С.В., Бубис Н.А., Есикова Н.А., Кузнецов А.М., Федоров А.А., В.Е. Курочкин

¹ИАП РАН

e-mail: shmykov.alexey@gmail.com

Неподвижная фаза является одним из важнейших компонентов электрохроматографических устройств, обеспечивающая селективное разделение анализируемых компонентов и регулирующая скорость электроосмотического потока. Основными требованиями, предъявляемыми к электрохроматографическим сорбентам, являются возможность

управления дзета потенциалом, а также наличие высокоразвитой поверхности и устойчивости к буферным растворам. Перспективным классом материалов для получения электрохроматографических сорбентов нового типа являются композиты на полимерной основе с неорганическими наполнителями - наночастицами металлов или металлизированными наночастицами (МНЧ) со структурой «ядро из сегнетоэлектрического материала – металлосодержащая оболочка», обладающими электромагнитными (ферромагнитными) свойствами. В серии недавно выполненных теоретических исследований было проведено моделирование влияния МНЧ на скорость массопереноса в полый капиллярной колонке под действием суммарных электроосмотического и электрофоретического потоков [1], произведена оценка величины тепловой мощности и дзета-потенциала в капиллярной колонке с сорбентом, содержащим МНЧ [2], а также оценено влияние МНЧ на основные параметры пика аналита - время выхода и ширину на полувысоте [3].

Для экспериментальной проверки полученных результатов в данной работе в качестве модельных сорбентов синтезирован ряд композитов на основе олигомерного диизоцианата с различным содержанием сегнетоэлектрического наполнителя с высокой (более 4000) диэлектрической проницаемостью - субмикронных (500 ± 20 нм) частиц титаната бария (BaTiO_3). Исследование слоев полученных композитов на подложках из кварцевого стекла методом конфокальной микроскопии позволило определить критические концентрации наполнителя в реакционной смеси, соответствующие образованию единого бесконечного кластера (13-15 мг/мл) и структур матрично-островного и цепочечного типа (свыше 18 мг/мл) в получаемом композиционном материале, что обеспечивает возможность управления его диэлектрическими характеристиками.

Работа выполнена в ИАП РАН в рамках Государственного задания № 0074-2019-0013.

Список литературы

1. A.Y. Shmykov, A.L. Bulyanitsa, A.R. Timerbaev. Combination of electrophoresis, chromatography and magnetism in a single separation technique: a first theoretical evaluation // *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies*. 2018. V 41, 1, 43-48.
2. A. Y. Shmykov, A. L. Bulyanitsa, N. A. Esikova. Thermal effect in magnetic capillary columns// *J. Phys. Conf. Ser.* 2018. V 1038. 012051.
3. A. Y. Shmykov, A. L. Bulyanitsa, V. E. Kurochkin, A. R. Timerbaev. Separation technique based on electrophoresis, chromatography and magnetism phenomena: migration time and peak broadening// *Mend. Commun.* 29 (2019) 595-596

Влияние механизма зародышеобразования на кинетику кристаллизации тонких пленок материалов фазовой памяти в условиях линейного нагрева

Воробьев Ю. В.¹, Ермачихин А.В.¹, Лазаренко П.И.², Козюхин С.А.³

¹РГРТУ

²МИЭТ

³ИОНХ РАН

e-mail: vorobjov.y.v@rsreu.ru

Способность халькогенидных проводников, в частности, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ к быстрому и обратимому фазовому переходу между кристаллическим и некристаллическим состоянием является основой функционирования энергонезависимых запоминающих устройств фазовой памяти. Переход из одного фазового состояния в другое осуществляется под действием управляющих сигналов электрической или оптической природы. При этом именно переход из некристаллического состояния в кристаллическое во многом определяет важнейшие потребительские характеристики устройств фазовой памяти: их быстродействие, надежность и энергоэффективность. Кроме того, достижение частичной кристаллизации материала в ячейке памяти позволяет реализовывать многоуровневую запись информации.

Прогресс в технологии фазовой памяти связан с поиском новых материалов, обеспечивающих заданные параметры фазового перехода. Экспериментальные исследования кристаллизации традиционно описываются моделью КЖМА. В рамках этой модели, кристаллизация происходит за счет образования и роста центров кристаллизации в объеме исходного некристаллического материала. Этот подход хорошо зарекомендовал себя при исследовании объемных материалов, однако его применимость к низкоразмерным системам, которыми являются различные конструкции ячеек фазовой памяти, сильно ограничена. Во-первых, традиционная формулировка теории КЖМА не учитывает наличия границ области кристаллизации, считая последнюю эффективно бесконечной. На практике это ограничивает ее применимость к системам, размер которых много больше размеров отдельного кристаллического зерна. Во-вторых, наличие границ приводит к тому, что образование центров кристаллизации становится возможным не только в объеме материала, но и на границах области. В работе [1] мы демонстрируем, каким образом ограничение кристаллизующегося объема в одном направлении (пленочная геометрия) сказывается на течении кристаллизации в такой системе в изотермических условиях.

Целью настоящего исследования является разработка теории кристаллизации тонких пленок в нестационарных условиях, например, при нагревании с постоянной скоростью. Такие условия характерны для большинства экспериментальных методов изучения материалов фазовой памяти, что позволит использовать предложенный подход для определения параметров этих материалов, характеризующих их кристаллизацию. Одной из трудностей в реализации этой задачи является нестационарная природа рассматриваемого фазового перехода, проявляющаяся в инерционности процесса образования центров кристаллизации. В итоге, предлагаемый подход позволяет определять нестационарное распределение кристаллической фракции в объеме пленки при ее нагреве, что позволяет, зная физические свойства кристаллического и исходного материалов, определять сопровождающие кристаллизацию изменения свойств исследуемой пленки.

Исследования проводятся при поддержке Совета по грантам Президента РФ (МК-1155.2021.1.3) и Российского фонда фундаментальных исследований (20-07-01092).

Список литературы

1. Y. Vorobyov, P. Lazarenko, A. Sherchenkov, N. Vishnyakov, A. Ermachikhin, S. Kozyukhin, Kinetics of volume and surface driven crystallization in thin films, J. Phys. Condens. Matter., 32, 355401, 2020

Влияние химического травления в растворе КОН на морфологию GaN ННК выращенных пространственно-селективным методом МПЭ

Лендяшова В. В.¹, Котляр К.П.¹, Гридчин В.О.¹, Резник Р.Р.², Лихачев А.И.³, Сошников И.П.^{1,3}, Цырлин Г.Э.^{1,2}

¹СПБАУ РАН

²Университет ИТМО

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: erilerican@gmail.com

Пространственно-селективный рост нитевидных нанокристаллов (ННК) методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) является перспективным направлением синтеза упорядоченных наноструктур для опто- и наноэлектроники, пьезотроники [1]. Данный метод отличается от каталитического роста ННК нанесением на поверхность подложки ингибиторного слоя (например, SiO_x) с предварительно сформированными окнами роста, что позволяет синтезировать ННК с заданными плотностью, расположением и размерами. Однако подавление роста ННК на поверхности ингибитора может быть не полным, что создает проблемы для последующего применения структур. Поэтому развитие методов удаления «лишних» ННК является актуальной задачей. В представленной работе проводится исследование процессов роста GaN ННК и последующего селективного удаления их с поверхности ингибитора в результате травления в растворе КОН.

Рост массивов GaN ННК осуществлялся на подложках $\text{SiO}_x/\text{Si}(111)$, подготовленных с помощью фотолитографии через микросферические линзы [2], методом МПЭ на установке Riber Compact 12. Ранее было показано, что при температуре роста 815°C GaN ННК формируются как в окнах на Si, так и на ингибиторном слое SiO_x [3]. При этом высота и диаметр ННК, выращенных в отверстиях, в 1,3 и 5,3 раза больше, чем на SiO_x . Травление осуществлялось в растворе $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$ (1:5) при температуре 75°C со временем травления от 1 до 7 минут. Исследование морфологии образцов проводилось методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с помощью Zeiss Supra 25.

Обнаружено, что при травлении высота и диаметр ННК на масочном слое уменьшаются. Отметим, что вершины ННК вытравливаются в форме пирамид. Увеличение времени травления приводит к деградации GaN ННК на ингибиторном слое SiO_x вплоть до их полного стравливания. В то же время размеры и морфология ННК, выращенных в отверстиях масочного слоя, меняются слабо, в пределах погрешности измерения. Различия в скорости травления GaN ННК на поверхности ингибиторного слоя SiO_x и в окнах на поверхности кремния объясняется различием кристаллографической полярности [4-6], а именно: N-полярностью поддающихся травлению ННК на SiO_x и Ga-полярностью устойчивых к травлению в растворе КОН ННК на Si.

Таким образом, обработка в растворе КОН позволяет получать однородные массивы упорядоченных Ga-полярных GaN ННК, синтезированных пространственно-селективным

методом МПЭ, на подложках Si(111) с ингибиторным слоем SiO_x в широком диапазоне температур (750-825°C). Отметим, что развитие низкотемпературного роста способствует интеграции полупроводников III–N с кремниевой электроникой и расширяет возможности синтеза гетероструктурированных ННК.

Работа по выращиванию структур выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в части государственного задания № 0791-2020-0003. Исследования экспериментальных образцов проведены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90189.

Список литературы

1. Roshko, A., Brubaker, M., Blanchard, P., Harvey, T., & Bertness, K., 2018, Crystals, 8(9), 366
2. Dvoretckaya, L. N., Mozharov, A. M., Fedorov, V. V., Bolshakov, A. D., & Mukhin, I. S., 2018, Journal of Physics: Conference Series, 1124, 022042
3. Gridchin, V.O., Kotlyar, K.P., Reznik, R.R., Dvoretckaya, L.N., Parfen'eva, A.V., Mukhin, I.S., Cirlin, G.E., 2020, Technical Physics Letters, 46(11), 1080-1083
4. Hestroffer, K., Leclerc, C., Bougerol, C., Renevier, H., Hestroffer, K., Leclerc, C., Bougerol, C., Renevier, H., & Daudin, B., 2011, Physical Review B, 84(24)
5. Eftychis, S., Kruse, J., Koukoulas, T., Kehagias, T., Komninou, P., Adikimenakis, A., Georgakilas, A., 2016, Journal of Crystal Growth, 442, 8-13
6. Wu, C. H., Lee, P. Y., Chen, K. Y., Tseng, Y. T., Wang, Y. L., & Cheng, K. Y., 2016, Journal of Crystal Growth, 454, 71–81

Изучение влияния различных факторов на структуру и магнитные свойства сплавов $(\text{Sm}, \text{Er})_2\text{Fe}_{17}$

Терёшина И. С.¹, Веселова С.В.¹, Акимова О.В.¹, Карпенков Д.Ю.¹, Вербцкий В.Н.¹

¹МГУ им. М. В. Ломоносова, физический факультет

e-mail: irina_tereshina@mail.ru

Материалы на основе соединения $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ с азотом обладают огромным потенциалом для изготовления высокоэффективных постоянных магнитов благодаря их большой намагниченности насыщения, высокой температуры Кюри и высокого поля магнитокристаллической анизотропии. Методами рентгенофлуоресцентного, рентгенофазового анализов и сканирующей электронной микроскопии исследованы исходный, проазотированный и прогидрированный сплавы на основе интерметаллического соединения $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ с частичным замещением атомов самария на атомы эрбия (4.2 ат. %). Нитрид $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{N}_2$ был синтезирован с использованием технологии предварительного цикла гидрирования-дегидрирования. Азотирование проводили в атмосфере газа N_2 под давлением 40 атм и при температуре 450°C. Механоактивацию азотированных образцов осуществляли в инертной атмосфере аргона в планетарной шаровой мельнице в течение 15, 30, 45 и 60 мин. соответственно. Магнитные гистерезисные свойства всех порошковых образцов были изучены в широком интервале температур (4.2 - 300 К) в статических магнитных полях до 9 Тл, а также в импульсных магнитных полях до 60 Тл.

Установлено, что внедрение азота и водорода в сплав $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$ приводит к увеличению параметров структуры с сохранением структурного типа $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ подобно исходному образцу $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$. Измельчение азот-содержащих образцов $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{N}_2$ с

последующим ультразвуковым дроблением его агломерированных мелкодисперсных порошков приводит к уменьшению размера частиц в результате каждой серии помолов и соответственно вызывает последовательное увеличение значения коэрцитивной силы. В работе продемонстрировано влияние длительности проведения помола на такие магнитные характеристики как коэрцитивная сила и остаточная намагниченность. Впервые проведены исследования магнитных свойств сплава $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$, его нитрида $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{N}_2$ и гидрида $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.4}$ в области низких температурах в сильных магнитных полях, что позволило наблюдать спин-переориентационных фазовые переходы и оценить величину R - Fe межподрешеточного обменного взаимодействия [1, 2]. Функциональные характеристики, полученные для порошков Sm-Er-Fe-N до и после их измельчения, важны для разработки на их основе новых высококоэрцитивных магнитов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-13-00135).

Список литературы

1. Veselova S.V., Tereshina I.S., Verbetsky V.N., et.al., J. Magn.Magn.Mater, 502, 166549, 2020.
2. Veselova S.V., Paukov M.A., Tereshina I.S., Verbetsky V.N., Zakharov K.V., Gorbunov D.I., Vasil'ev A.N., Journal of Rare Earths, 2020. DOI: 10.1016/j.jre.2020.08.010

Исследование характеристик наночернил на водной основе для цифровой струйной печати на керамике

Климонтков К. А.¹, Ваганов В.В.¹, Круглов А.И.¹,

¹СПбПУ

e-mail: kirklimontov@yandex.ru

Наночернила на основе органических растворителей зарекомендовали себя на рынке печати по керамике, поскольку обеспечивается высокая дисперсионная стабильность гидрофобных нанопигментов, надлежащая вязкость и поверхностное натяжение. Однако, из-за наличия летучих органических соединений, содержащихся в органических растворителях, сокращается срок службы струйных головок [1]. Поэтому, в настоящее время растет интерес к наночернилам на водной основе.

Целью данного исследования является определение оптимальных характеристик наночернил на водной основе. В качестве наноразмерного пигмента используется CoAl_2O_4 . Наночернила должны обладать дисперсионной стабильностью для предотвращения засорения сопел в процессе струйной печати [2].

В качестве диспергаторов использовались Na-октаноат и Na-ПАА. При использовании Na-октаноата вязкость наночернил почти не уменьшалась по мере увеличения содержания добавляемого диспергатора. Это связано с тем, что анионное поверхностно-активное вещество слабо адсорбировалось на поверхности частиц пигмента [3]. Напротив, при использовании Na-ПАА в качестве диспергатора вязкость значительно изменялась. Поэтому Na-ПАА был выбран в качестве наиболее эффективного диспергатора для нанопигмента CoAl_2O_4 . По мере увеличения добавления диспергатора вязкость наночернил уменьшалась, что указывает на то, что Na-ПАА эффективно адсорбировался на поверхности пигмента CoAl_2O_4 .

При производстве наночернил на водной основе одним из важнейших факторов является высокое поверхностное натяжение, которое придает капиллярную силу соплу при струйном распылении чернил [4]. В тот момент, когда капля отделяется от сопла, площадь поверхности мгновенно уменьшается, хвост капли укорачивается. Следовательно, при струйной печати наночернилами на водной основе крайне важно контролировать поверхностное натяжение в соответствующем диапазоне от 20 до 45 мН/м [5]. Поверхностное натяжение чернил составляло 64 мН/м до добавления полисилоксана, который является модификатором поверхностного натяжения, и 26,3, 26,0 и 24,5 мН/м при увеличении содержания полисилоксана до 0,1%, 0,5% и 1,0% соответственно. По мере увеличения коэффициента смешивания полисилоксана поверхностное натяжение уменьшалось.

Нанопигмент CoAl_2O_4 , имеющий размер частиц в диапазоне от 200 до 300 нм, был получен с использованием Na-РАА, представляющего собой анионный полимерный электролит. Между частицами пигмента почти не было обнаружено коагуляции. Плотность и удельная площадь поверхности пигмента CoAl_2O_4 составили соответственно 4,44 г/см³ и 5,55 м²/г. Наилучшая дисперсность была обнаружена при содержании диспергатора 0,8 мг/м². С помощью полисилоксанового поверхностно-активного вещества оптимизировано поверхностное натяжение нано-чернил (26,2 мН/м при добавлении 0,1% от массовой доли), а с помощью полиэтиленоксида оптимизирована вязкость (12,9 мПа·с при добавлении 2% от массовой доли). Таким образом, был сведён к минимуму процесс образования сателлитных капель, что позволяет выполнять печать с более высоким разрешением.

Список литературы

1. В.В. Ваганов, Г.В. Ваганов, «Наноматериалы и нанотехнологии в полиграфии» 2-е изд., перераб. и доп. — СПб, ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. — 285с.
2. M. T. Cavalcante, M. Dondi, G. Guarrini, M. Raomondo and G. Baldi, “Colour Performance of Ceramic Nanopigments,” *Dyes Pigm.*, 266-68 (2006)
3. M. Dondi, M. Blosi, D. Gardini, and C. Zanelli, “Ceramic Pigments for Digital Decoration inks: An Overview,” *Ceram. Forum. Inter.*, 1-11 (2012)
4. W. J. Lee, H. J. Hwang, K. S. Han, W. S. Cho, and J. H. Kim, “Characterization and Synthesis of Aqueous Pinkred Ceramic Ink for Digital Inkjet Printing,” *J. Cryst. Growth.*, 20-2 (2015)
5. P. Calvert, “Inkjet Printing for Materials and Devices,” *J. Am. Ceram. Soc.*, 3299-301 (2001)

Диэлектрические и тепловые свойства органического сегнетоэлектрика (R)-3-хинуклидинола, внедренного в пористое стекло

Милинский А. Ю.¹, Барышников С.В.¹, Чарная Е.В.², Ускова Н.И.³

¹БГПУ

²СПбГУ

³СПбГУАП

e-mail: a.milinskiy@mail.ru

Сегнетоэлектрики являются multifunctional материалами с широким спектром применения. Их зависящая от температуры спонтанная поляризация и диэлектрическая проницаемость могут изменяться под действием электрического поля или

механических напряжений, что делает их привлекательными для создания различных электронных устройств. В настоящее время ведется активный поиск сегнетоэлектрических материалов с высокими функциональными параметрами, которые являются экологически безопасными, и в то же время дешевыми и легкими. В [1–3] было открыто несколько органических сегнетоэлектриков, принадлежащих семейству солей $C_6H_{16}NA$, где A обозначает Cl, Br и I. К таким сегнетоэлектрикам относится диизопропиламмония хлорид (DIPAC) $P_s \sim 8.2 \text{ мС/см}^2$, $T_c = 440 \text{ К}$; диизопропиламмония бромид (DIPAB) $P_s \sim 23 \text{ мС/см}^2$, $T_c = 426 \text{ К}$; диизопропиламмония иодид (DIPAI) $P_s \sim 5.17 \text{ мС/см}^2$, $T_c = 378 \text{ К}$.

В [4] сообщалось об открытии сегнетоэлектрических свойств в однокомпонентных гомохиральных органических кристаллах (R)-3 и (S)-3-хинуклидинола ($C_7H_{13}NO$). Эти кристаллы существуют в 2 зеркально-изомерных (энантиоморфных) формах. Гомохиральный (R)- и (S)-3-хинуклидиол при комнатной температуре кристаллизуются в энантиоморфно-полярном точечной группе 6(C6), показывающей зеркальное отображение в колебательных спектрах. Температура Кюри при нагреве $T_{cl} \approx 400 \text{ К}$ и при охлаждении $T_{c2} \approx 360 \text{ К}$. Диэлектрическая проницаемость при фазовом переходе имеет резкую ступенчатую аномалию, меняясь примерно от 5 до 17. Спонтанная поляризация при $T \approx 300 \text{ К}$ составляет $\sim 7 \text{ мС/см}^2$, коэрцитивное поле 15 кВ/см . Было также обнаружено, что их рацемическая смесь (Rac) -3-хинуклидиол, кристаллизуется в centrosymmetricной точечной группе 2/m (C2h), и не является сегнетоэлектриком. Это открытие показывает огромные роль гомохиральности при возникновении сегнетоэлектрического состояния в органических сегнетоэлектриках.

В связи с перспективами практического использования новых органических сегнетоэлектриков значительный интерес вызывают исследования влияния понижения размеров на их свойства. Фазовые переходы в нанокомпозитах на основе DIPAB в пористых пленках Al_2O_3 и DIPAC в опаловой матрице изучались в [5,6]. Сегнетоэлектрические свойства в кристаллах (R)-3 и (S)-3-хинуклидинола были открыты в 2016 году и эти вещества в нанокompозитном состоянии пока не исследовались.

В данной работе приводятся результаты исследований диэлектрических свойств и сигнала ДТА (R)-3-хинуклидинола, внедренного в пористое стекло, в сравнении со свойствами объемного (R)-3-хинуклидинола.

Для получения нанокompозитов использовался (R)-3-хинуклидиол и пористое стекло со средним размером пор 100 нм . Внедрение сегнетоэлектрика в поры производилось из нагретого насыщенного раствора (R)-3-хинуклидинола в метаноле. Для измерения комплексной диэлектрической проницаемости использовался цифровой измеритель иммитанса E7–25. Для регистрации сигнала ДТА применялся синхронный термоанализатор Linseis STA PT 1600.

Результаты исследований сигнала ДТА и диэлектрической проницаемости ϵ' для образца объемного (R)-3-хинуклидинола показали, что при нагреве на зависимостях ДТА и $\epsilon'(T)$ наблюдается одна аномалия при температуре $T_{cl} \approx 400 \text{ К}$, соответствующая переходу из сегнетоэлектрической в неполярную фазу. Температура Кюри при охлаждении T_{c2} зависит от того до какой температуры был прогрет образец и с какой скоростью протекает охлаждение.

Для нанокompозитов (R)-3-хинуклидиол/пористое стекло (100 нм) результаты исследования показывают, что для (R)-3-хинуклидинола в пористом стекле происходит снижение температур фазовых переходов T_{cl} до 387 К и T_{c2} до 358 К .

Таким образом, проведенные исследования (R)-3-хинуклидинола, внедренного в пористое стекло, выявили понижение температуры Кюри, как при нагреве, так и охлаждении.

Список литературы

1. D.-W. Fu, W. Zhang, H.-L. Cai at all. Adv. Mater. **23**, 5658 (2011).
2. D.-W. Fu, H.-L. Cai, Y. Liu at all. Science **339**, 425 (2013).
3. A. Piecha, A. G. agor, R. Jakubas at all. Cryst. Eng. Commun. **15**, 940 (2013).
4. P.-F. Li, Y.-Y. Tang, Z.-X. Wang at all. Nature communications. **7**, 13635 (2016).
5. A.Yu. Milinskiy, S.V. Baryshnikov, E.V. Charnaya at all. J. of Phys.: Cond. Mat. **31**, 485704. (2019).
6. S.V. Baryshnikov, E.V. Charnaya, A.Yu. Milinskiy at all. Phase Trans. **91**, 293 (2018).

Низкотемпературные особенности тепловых и магнитных свойств нанокompозита свинец-пористое стекло в магнитном поле

Шитов А. Е.¹, Михайлин Н. Ю.¹, Кумзеров Ю.А.¹, Шамшур Д. В.¹

¹ФТИ им. А. Ф. Иоффе

e-mail: shitoov@gmail.com

В нанокompозитах свинец-пористое стекло (Pb-ПС) изучены температурные и магнитополовые зависимости сопротивления $R(T, H)$ теплоемкости $C(T, H)$, намагниченности $m(T, H)$, а также тепловые эффекты $Q(T, H)$ в сверхпроводящем (СП) состоянии материала. Образцы были созданы путем заполнения пористого стекла (средний размер пор 7 нм) свинцом из расплава под давлением. Свинец в нанокompозите образует трехмерную многосвязную систему нитей, характерный размер которых определяется размером пор. В такой структуре характерные размеры частиц сверхпроводника меньше, чем параметры СП состояния в массивном сверхпроводящем свинце: длина когерентности $\xi = 830$ нм и глубина проникновения магнитного поля $\lambda(T = 0 \text{ K}) = 370$ нм, что приводит к количественным и качественным изменениям сверхпроводящих свойств нанокompозита по сравнению с массивным материалом. Так, в ранее изученном нанокompозите индий-опал с минимальными размерами $d \geq 10$ нм критическое магнитное поле H_{c2} возрастает вплоть до величины $H_c(T = 0 \text{ K}) \leq 20$ кЭ; в Pb-ПС с диаметром каналов $d \sim 3$ нм $H_c(T = 0 \text{ K}) \leq 150$ кЭ (по сравнению со значениями для массивного индия $H_c(0) = 280$ Э и свинца $H_c(0) = 800$ Э) [1, 2]. На зависимостях $m(H)$ нанокompозита Pb-ПС в сверхпроводящем состоянии наблюдается гистерезис и скачки потока вплоть до $m(H) \sim 0$ [3], связанные с лавинообразным проникновением магнитного поля в образец при достижении критического тока в контуре токопроводящей сетки Pb [2].

Измерения нанокompозитов Pb-ПС ($d \sim 7$ нм) проводились на установке Quantum Design QD PPMS-14 при помощи вставок исследования намагниченности (вибрационный магнитометр), теплоемкости и резистивности (на переменном и постоянном токе) в диапазоне $T = 300 \text{ K} - 2 \text{ K}$ и $H \leq 140$ кЭ. СП переход нанокompозита Pb-ПС был зафиксирован в температурных зависимостях сопротивления, теплоемкости и магнитного момента при $T = 7.2 \text{ K}$. Скачки потока на зависимости $m(H)$ наблюдались при $T \leq 5 \text{ K}$. Предполагается, что скачки потока вызваны лавинообразным движением вихрей и должны сопровождаться выделением тепла в нанокompозите [1, 3]. С целью проверки этого предположения нами были проведены измерения $C(T, H)$, а также измерения T нанокompозита при развертке магнитного поля в области температур $T < T_c$. Было обнаружено, что в области

температур $T \leq 5$ К, в которой наблюдаются скачки потока, также наблюдается и заметный нагрев образца $\Delta T < 5\%$. Кроме того при изучении зависимости $C(H)$ в области скачков потока было обнаружено, что слабый внешний нагрев образца $\Delta T < 2\%$ приводит к скачкообразному нагреву образца $\Delta T < 20\%$, что, судя по всему, вызвано вихревыми эффектами, подобными тем, которые происходят во время скачков потока при измерении $m(H)$. Построена эмпирическая модель обнаруженных эффектов.

Список литературы

1. N.Yu. Mikhailin, Y.M. Galperin, V.I. Kozub, Yu.A. Kumzerov, M.P. Volkov, S.G. Romanov, A.V. Fokin, D.V. Shamshur, Low-temperature magnetic properties of superconducting indium nanocomposites in opal matrix ЖЭТФ, 2019, том 155, вып. 4, стр. 1–7
2. Д.В.Шамшур, Н.Ю.Михайлин, Р.В.Парфеньев, В.И.Козуб, Ю.М.Гальперин, Ю.А.Кумзеров, А.В.Фокин, Размерные зависимости магнитных свойств сверхпроводящих наноструктур свинца в пористом стекле, ФТТ, т.60, в.6, 1058 – 1061 (2018).
3. Tien C., Charnaya E. V., Xing D. Y., Pirozerskii A. L., Kumzerov Yu. A., Ciou Y. S., and Lee M. K.// Phys. Rev. B, 2011, **83**, 014502.

Неравновесные методы синтеза и модификации свойств оксида галлия

Никольская А. А.¹, Королев Д.С.¹, Е.В. Окулич¹, А.Н. Михайлов¹, А.И. Белов¹, А.В. Нежданов¹, В.Н. Трушин¹, Д.Е. Николичев¹, Ю.И. Чигиринский¹, А.В. Алмаев², М. Kumar³, R. Giulian⁴, Д.И. Тетельбаум¹

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия

²Томский государственный университет, Россия

³Indian Institute of Technology Jodhpur, India

⁴Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil

e-mail: nikolskaya@nifti.unn.ru

В течение многих десятилетий неоспоримое первенство в микроэлектронике принадлежало кремнию благодаря его уникальным свойствам (в сочетании с оксидом SiO_2) и практически неисчерпаемым запасом в природе. Позднее лидерство в отдельных направлениях перешло к сложным полупроводникам (GaAs , SiC и др.), но основу современной компьютерной техники составляют кремниевые интегральные схемы, а основу солнечной энергетики – кремниевые солнечные батареи. Однако в последние десятилетия на сцену выходит новый класс полупроводников – широкозонные полупроводники, среди которых наибольшие шансы на прорывные успехи в ряде областей техники получил оксид галлия [1]. Благодаря широкой запрещенной зоне, его можно использовать для создания газовых сенсоров, УФ детекторов, приборов силовой электроники, тонкопленочных электролюминесцентных дисплеев и др. Образцы оксида галлия являются радиационно-стойкими и могут сохранять свои свойства при высоких температурах и агрессивных средах. Объемные кристаллы большого диаметра могут быть выращены с помощью различных технологий: метод Чохральского, метод зонной плавки и др. Но применение этого уникального полупроводника пока сдерживается физическими ограничениями, которые трудно преодолеть при равновесных условиях синтеза [2]. В связи с этим возникла актуальная задача

– использовать для преодоления этих ограничений неравновесные методы. В настоящей работе рассматривается возможность синтеза и модификации свойств оксида галлия с использованием двух неравновесных методов – ионной имплантации и специальных режимов магнетронного осаждения. Такие методы позволяют контролировать дефектно-примесный состав материала, определяющий основные параметры полупроводников.

В методе ионной имплантации ионный пучок с энергией от сотен эВ до ~ 10 МэВ проходит по поверхности образца, позволяя локально модифицировать облучаемые участки с точной дозировкой легирующих примесей, и возможностью контролировать пространственное распределение примеси во всех трех измерениях. При имплантации становится возможным не только варьировать в весьма широких пределах (вплоть до превышения предела растворимости) концентрацию внедряемой примеси, но и вносимые радиационные дефекты, которые могут оказать радикальное влияние на электрические и оптические свойства полупроводников («инженерия дефектов»). При синтезе материалов методом магнетронного осаждения при специальных условиях возможно облучение осаждаемой пленки ионизованным пучком ускоренных частиц плазмы и частиц, вылетающих из мишени при ее распылении, что, как и в случае ионной имплантации, приводит к внесению дефектов. Вариация режимов ионной имплантации и магнетронного осаждения позволяет изменять энергетическую структуру полупроводника, управляя типом вносимых радиационных дефектов и примесных атомов.

В работе обсуждается влияние режимов магнетронного осаждения на структуру, электрические и оптические свойства пленок Ga_2O_3 , синтезированных на подложках сапфира, а также их дальнейшей модификации с помощью ионной имплантации и постимплантационного отжига. Особое внимание уделяется физике процессов, происходящих при внесении примеси и структурных дефектов – изменению электронной структуры, влиянию на электрические и оптические свойства. Рассматриваются наиболее перспективные и стабильные модификации – α и β - Ga_2O_3 . Ионная имплантация использована также для формирования нанокристаллов Ga_2O_3 в диэлектрической матрице Al_2O_3 . Для таких структур получен эффективный фотодетектор УФ-диапазона.

Неравновесный характер предлагаемых методов по нашему мнению откроет новые возможности модификации свойств оксида галлия и расширит его применение в твердотельной электронике нового поколения.

Исследование поддержано в рамках гранта БРИКС (РФФИ (19-57-80011), Department of Science and Technology (DST/IMRCD/BRICS/Pilot Call 3/ Ga_2O_3 /2019) and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Brazil). Никольская А.А. признательна за поддержку в рамках Стипендии Президента РФ (СП-1894.2021.5).

Список литературы

1. Kim J., Pearton S., Fares C., Yang J., Ren F., Kim SuH., Polyakov A.Y., Radiation damage effects in Ga_2O_3 materials and devices, J. Mater. Chem. C, V. 7, 10-24, 2019.
2. Peelaers H., Lyons J.L., Varley J.B., Wall C.G., Deep acceptors and their diffusion in Ga_2O_3 , APL Mater, V. 7, 022519, 2019

Водостойкие галогенидные перовскитные нанокристаллы для визуализации апконверсии в живой клетке

Тальянов П. М.¹, Пельтек О.О.¹, Машарин М.А.¹, Хубежов С.А.², Баранов М.А.¹, Драбавичюс А.³, Тимин А.С.^{4,5}, Зеленков Л.Е.¹, Пушкарев А.П.¹, Макаров С.В.¹, Зюзин М.В.¹

¹ИТМО

²СОГУ

³Центр физических наук и технологий. Вильнюс, Литва.

⁴НИТПУ

⁵ПСПБГМУ им. Павлова

e-mail: talyanov170195@gmail.com

На сегодняшний день перовскитные наноструктурные материалы широко применяются в оптике и электронике благодаря их превосходным свойствам, таким как узкая полная ширина на уровне половинной амплитуды, высокий квантовый выход фотолюминесценции, настраиваемые спектры излучения и т. д. [1]. Существует ряд работ, посвященных разработке оптоэлектронных устройств на основе перовскитных материалов, например, светодиодов, сцинтилляторов, лазеров, солнечных элементов [2]. Подобно линейным оптическим свойствам перовскитных нанокристаллов при возбуждении ультрафиолетом или видимым светом, их нелинейные оптические свойства, такие как иницилируемая в ближней инфракрасной области апконверсионная фотолюминесценция, могут быть применены для биоимаджинга *in vivo* из-за повышенной проникающей способности ближнего инфракрасного света в ткани. Однако нестабильность перовскитов в водных растворах (биологические жидкости, вода и др.) препятствует их использованию в биомедицинских целях.

Целью данной работы разработка синтеза водостойких галогенидных нанокристаллов на основе свинцовых перовскитов (CsPbBr_3), покрытых кремнезёмной оболочкой. Для этого тетраметилортосиликат (ТМОС) и триэтоксифенилсилан (фТЕОС), который содержит гидрофобную фенильную группу, добавляют в различных соотношениях (7 соотношений) к продукту модифицированного лиганд-ассоциированного осаждения. Реакция гидролиза-конденсации ТМОС и фТЕОС приводит к образованию разветвлённой трехмерной силоксановой сетки. Добавление фТЕОС увеличивает гидрофобность образующейся оболочки на основе SiO_2 , что способствует увеличению стабильности перовскитных наночастиц в водных растворах. Таким образом, было получено 7 перовскитных образцов, покрытых кремнезёмными оболочками различного состава. Высокое качество нанокристаллов CsPbBr_3 , покрытых оболочкой SiO_2 ($\text{CsPbBr}_3@\text{SiO}_2$), подтверждено данными просвечивающей и электронной микроскопии высокого разрешения, рентгеноструктурного анализа, инфракрасной Фурье спектроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, а также флуоресцентной спектроскопии. Стабильность полученных продуктов исследовали в воде в течение 24 ч. Была обнаружена сильная взаимосвязь между составом оболочки (добавленное соотношение ТМОС: фТЕОС во время синтеза) и водостойкостью нанокристаллов $\text{CsPbBr}_3@\text{SiO}_2$, что подтверждено измерениями фотолюминесценции в различные моменты времени. Полученные нанокристаллы $\text{CsPbBr}_3@\text{SiO}_2$ также продемонстрировали апконверсионные свойства. Для полученных наночастиц $\text{CsPbBr}_3@\text{SiO}_2$ с наилучшей стабильностью в воде была осуществлена визуализация фотолюминесценции *in vitro* в ассоциации с мезенхимальными стволовыми клетками человека (hMSC) и клеточной линией мышиной меланомы (клетки B16-F10). Образцы $\text{CsPbBr}_3@\text{SiO}_2$ продемонстрировали низкую цитотоксичность и возможность

ассоциации с живыми клетками. Кроме того, была проведена визуализация апконверсии перовскитных наночастиц в клетке.

Список литературы

1. Kovalenko, M. V.; Protesescu, L.; Bodnarchuk, M. I. Properties and Potential, Optoelectronic Applications of Lead Halide Perovskite Nanocrystals. Science 2017, 358 (6364), 745–750
2. Huang, H.; Polavarapu, L.; Sichert, J. A.; Susha, A. S.; Urban, A. S.; Rogach, A. L. Colloidal Lead Halide Perovskite Nanocrystals: Synthesis, Optical Properties and Applications. NPG Asia Mater. 2016, 8 (11), e328–e328

Исследование модификации при электролизе пленок графена, предназначенных для изготовления биосенсоров

Елисеев И. А.¹, Усиков А.С.^{2,3}, Лебедев С.П.¹, Росенков А.Д.⁴, Пузык М.В.⁵, Зубов А.В.³, Макаров Ю.М.², Лебедев А.А.¹, Гущина Е.В.¹, Воронина А.А.⁶, Шабунина Е.И.¹, Шмидт Н.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Nitride Crystals Inc., USA

³Университет ИТМО

⁴ГК “Нитридные кристаллы”

⁵РГПУ им. А. И. Герцена

⁶СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: zoid95@yandex.ru

Графен является перспективным материалом для создания биосенсоров, способных диагностировать предельно низкие концентрации биомолекул, связанных с различными социально значимыми заболеваниями на их ранней стадии, в том числе онкологии, гриппа и COVID-19. Пленка графена может присоединять на свою поверхность различные вещества и биомолекулы [1]. Недавно проведенные в Институте гриппа эксперименты показали, что биосенсоры на основе пленок графена, выращенных в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, позволяют детектировать на порядки более низкие концентрации вирусов гриппа по сравнению с традиционными методами иммуноферментного анализа [2]. Для обеспечения избирательной чувствительности пленок графена применяют специальные методы обработки, создающие дополнительные ковалентные связи, обеспечивающие химические реакции с детектируемыми биомолекулами. Изготовление биосенсоров на основе пленок графена, как правило, включает несколько подготовительных стадий: очистка поверхности графена, функционализация (присоединение фениламинной группы) и иммобилизация (присоединение антитела, родственного к антигену детектируемой биомолекулы). Каждая из подготовительных стадий влияет на итоговую чувствительность биосенсора. На стадии очистки поверхности требуется создание однородного распределения поверхностного потенциала по площади образца, что позволяет достигать полной функционализации всей поверхности графена и, как следствие, способствует увеличению чувствительности биосенсоров и улучшает воспроизводимость результатов детектирования биомолекул. При этом необходимо, чтобы в результате очистки структура графена не была нарушена.

В данной работе исследовалась модификация параметров поверхности графеновых чипов после стадии очистки в электролите NaClO_4 . Были исследованы два режима очистки. Первый режим обеспечивал удаление кислорода с поверхности графена, второй

– окисление поверхности. Пленки графена были получены путем термического разложения полуизолирующих подложек 4H-SiC [3]. Исследования проводились на чипах графена, полученных из 4-х пластин, и собранных на держатели с проводящими контактами. Размер сенсорной площади поверхности графена – 1×1.5 мм. Для контроля воспроизводимости параметров биосенсоров после очистки применялся комплекс методик, включающий: атомно-силовую микроскопию (АСМ), Кельвин-зондовую микроскопию (КЗМ), комбинационное рассеяние света (КРС), а также исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) и низкочастотного шума.

ВАХ всех чипов до и после очистки были линейными. Разброс значений сопротивления чипов на основе пленок графена из этих пластин не превышал 4%. Зависимости значений величин спектральной плотности флуктуаций напряжения (S_v) и токового шума (S_i) от частоты для всех чипов имели типичный для пленок графена вид зависимости $1/f$. Было обнаружено, что очистка поверхности в режиме удаления кислорода приводит к увеличению S_v (что может указывать на увеличение степени дефектности пленки графена), а очистка в режиме окисления почти не оказывает влияния на данный параметр. Согласно оценкам из данных КРС, после очистки с использованием обоих методов наблюдалось увеличение концентрации электронов с $(2-6) \cdot 10^{12}$ до $(8-9) \cdot 10^{12}$ см⁻², а также возникновение небольшого количества дефектов, связанных с вакансиями. Измерения поверхностного потенциала методом КЗМ показали, что после процедуры очистки происходит увеличение однородности распределения поверхностного потенциала по сравнению с исходными образцами. Величина разброса потенциала на площади 10×10 мкм² после такой процедуры уменьшается от 80–120 мВ для исходного образца до 40–50 мВ в случае очистки в режиме удаления кислорода и до 6–9 мВ в режиме окисления. Таким образом, методика очистки графена в режиме окисления повышает однородность распределения поверхностного потенциала, не вызывая при этом существенных нарушений кристаллической структуры графена, что способствует более успешному проведению последующих стадий, необходимых для получения биосенсоров с воспроизводимыми параметрами.

Список литературы

1. Li, X.; Tao, L.; Chen, Z.; *et al.* Graphene and related two-dimensional materials: Structure-property relationships for electronics and optoelectronics, *Appl. Phys. Rev.*, vol. 4(2), 021306, 2017.
2. Lebedev, A.A.; Davydov, S.Y.; Elisseyev, I.A.; *et al.* Graphene on SiC Substrate as Biosensor: Theoretical Background, Preparation, and Characterization, *Materials*, vol. 14, 590, 2021.
3. Lebedev A.A.; Davydov, V.Yu.; Novikov S.N.; *et al.* Graphene-Based Biosensors, *Tech. Phys. Lett.*, vol. 42, 729, 2016.
4. Lebedev, A.A.; Davydov, V.Yu.; Usachov D.Yu.; *et al.* Study of Properties and Development of Sensors Based on Graphene Films Grown on SiC (0001) by Thermal Destruction Method, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 951, 012007, 2018.

Модуляция состава в гетеросистеме $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}\text{-InP}$ при спиновом распаде в условиях внутреннего энергетического резонанса

Кузнецов В. В.¹, Москвин П.П.², Скуратовский С.И.²,

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

²Государственный университет «Житомирская политехника», Украина

e-mail: vvkuznetsov@inbox.ru

Особенностью четверной системы $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$ является то, что с увеличением числа степеней свободы, распад твердого раствора проходит по двум энергетически слабосвязанным подсистемам, которые образованы металлической и металлоидной подрешетками структуры сфалерита. Термодинамическое описание распада твердого раствора в гетерокомпозиции $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}\text{-InP}$ реализовали путем численного решения уравнений спиновом распаде Кана-Хилларда [1-2]. Настоящая работа стала логическим продолжением наших работ по теории распада, в которых успешно проведено описание указанного эффекта в тройных системах A^3B^5 и A^2B^6 [3,4].

Применение модели простых растворов для описания энергий твердофазного смешения компонентов и упругого приближения для энергии механических деформаций, образующихся включений, показало, что окончательное распределение состава в каждой из подрешеток твердого раствора $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$ подчиняется системе дифференциальных уравнений:

$$\beta_1 d^2x/dz^2 = RT[x \ln x + (1-x) \ln(1-x)] + \alpha^{s_{12}}x(1-x) + \alpha^{s_{cy}}x + \lambda_{ijk}N_0a(a-a_s)^2/4 - \mu_1$$

$$\beta_2 d^2y/dz^2 = RT[y \ln y + (1-y) \ln(1-y)] + \alpha^{s_{34}}y(1-y) + \alpha^{s_{cy}}y + \lambda_{ijk}N_0a(a-a_s)^2/4 - \mu_2$$

β_1, β_2 – коэффициенты разложения в степенной ряд свободной энергии Гиббса [1, 2]; z – координата вдоль выбранного кристаллографического направления; $\alpha^{s_{12}}, \alpha^{s_{34}}$ – приведенные энергии смешения в подрешетках структуры сфалерита [5]; $\alpha^{s_{cy}}$ – энергии парных взаимодействий между ближайшими атомами, расположенными в разных подрешетках; a, a_s – текущий период кристаллической решетки (ПКР) слоя и ПКР подложки (InP); λ_{ijk} – комбинация модулей упругости C_{ij} [3-5]; N_0 – число Авогадро; μ_1, μ_2 – химические потенциалы в подрешетках твердой фазы.

Величину компоненты энергии упруго деформированных включений рассчитывали относительно ПКР недеформированной подложки из InP (111).

Термодинамические параметры соединений, образующих систему $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$, заимствованы из [5].

Поиск условий, определяющих колебательный характер изменения состава твердого раствора, осуществляли путем расчетов фазовых портретов по методике [3,4]. Анализ фазового портрета в пространстве координат $X'(z)$ - x - y и $Y'(z)$ - x - y показал, что фазовые траектории являются разомкнутыми. Для системы уравнений вида (1) характерны так называемые квазипериодические решения, для которых период колебаний непостоянен и является слабо меняющейся величиной [6]. Появление непостоянства во взаимосвязанных колебательных процессах объясняется непрерывным энергетическим взаимообменом между подрешетками структуры сфалерита. В этой связи нарушение строгой периодичности колебаний, т.е. непрерывной вариации периодов идентичности, представляется

неизбежным. Однако вариации периода указанных колебаний незначительны при слабой энергетической взаимосвязи между подрешетками.

Анализ состава и ПКР по слою твердого раствора $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$, синтезируемого при 873 К и имеющего состав $x_0 = 0.554$ мол.дол.; $y_0 = 0.078$ мол.дол., когерентно сопряженного с подложкой InP (111), показал наличие периодичности - концентрационных доменов [3,4] - в составе твердого раствора в направлении роста слоя. Амплитуда колебательного процесса, ограниченная возможностью существования когерентного сопряжения зарождающейся фазы и решетки исходного раствора, не превышала 0.02 мол.дол. [3-5]. Важной особенностью полученных решений стало обнаружение резкого роста амплитуды колебаний состава твердого раствора, при симбатном изменении состава материала и температуры его синтеза вблизи когерентной спинодали твердого раствора. Подобный эффект возрастания амплитуды колебаний состава можно рассматривать как явление своеобразного резонанса.

Результаты моделирования показали, что условия такого резонанса реализуются, как и в рассмотренных ранее тройных системах, только в узком интервале термодинамических параметров процесса. При незначительном отклонении от этих параметров наблюдается срыв колебательного процесса, ответственного за модуляцию состава материала, а релаксация системы к равновесному состоянию проходит по затухающим функциям.

Список литературы

1. Cahn J.W. Acta Metallurgica, (1961) V.9. P. 81-87.
2. Хачатурян А.Г. Теория фазовых превращений и структура твердых растворов. Москва: Наука. 1974. 383 с.
3. Kuznetsov V.V., Moskvina P.P., Skuratovskiy S.I., et al. J. Physics: Conference Series 1697 (2020) 012092.
4. Moskvina P.P., Skuratovskiy S.I., Kravchenko O.P., et al. J. Cryst.Growth, (2019) V.510, p.40-46.
5. Кузнецов В.В., Москвин П.П. Межфазные взаимодействия при гетероэпитаксии полупроводниковых твердых растворов. Монография: Из-во «Лань», Санкт-Петербург, 2019 г., 376 с.
6. Демидович Б.П. Лекции по математической теории устойчивости. Московский ун-т, М.: 1998.

Тонкие нанокристаллические полупроводниковые пленки в качестве селективных химических сенсоров аммиака, ацетона, пропана и гексана

Чистяков В. В.¹, С.А. Казаков¹, М.А.Гревцев¹, С.М. Соловьёв¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: v.chistyakov@mail.ioffe.ru

Использование поликристаллических полупроводниковых плёнок в качестве сорбционных химических сенсоров ограничено низкой селективностью их к веществам одной природы: восстановительной или окислительной. Как правило, на практике применяются материалы *n*-типа [1], дающие рост электропроводности $\Delta\sigma$ при адсорбции донорных частиц (NH_3 , C_2H_6) и уменьшение — для акцепторных молекул (O_2 , O_3 , NO_x). При этом широко используется метод температурной модуляции [1], при котором сигнал $\Delta\sigma$

регистрируется в процессе быстрого сканирования по рабочей температуре сенсора в определенных пределах.

Условием селективной работы сенсора является различимость откликов $\Delta\sigma$ от разных молекул при различных концентрациях. Проблема решается авторами [1, 2, 3] одновременными усилиями в нескольких направлениях. Прежде всего, при синтезе материалов стараются уменьшить размеры кристаллитов, спекающихся при отжиге в ажурную и легко проницаемую для газовой среды сеть нанокристаллитов, главный вклад в электропроводность которой даёт поверхностная составляющая, увеличивающая гетерогенный фактор (S/V). Второе - подбор модификатора поверхности, создающий поверхностные центры для адсорбции различных молекул и радикалов [4]. Третье — обеспечение низкого уровня шумов и помех при измерении сигнала $\Delta\sigma$. Четвертое — выбор режима и границ температурной модуляции. И, наконец, пятое — создание алгоритма обработки откликов [3], позволяющего количественным образом их классифицировать при помощи некоего набора (вектора) величин в различающихся ситуациях.

Поставленные задачи были решены путем использования нанокристаллических плёнок ZnO и SmS, а также композитных материалов SnO_2/CuO , $\text{SnO}_2/\text{La}_2\text{O}_3/\text{V}_2\text{O}_5/\text{Pt}$ [4]. При этом использовались две апробированные стандартные технологии нанесения покрытий: взрывной метод напыления (для SmS) и золь-гель технология [4] с центрифугированием, затем пленки отжигались первоначально в инертной атмосфере, а потом на воздухе при температурах до 600°C. Такая технология обработки газочувствительных слоев стабилизировала структуру межкристаллитных шеек, обеспечивая тем самым низкий уровень шумов. Как показали данные сканирующей электронной микроскопии (SEM), полученные размеры кристаллитов варьировались от 5 до 20 нм, при этом толщины плёнок составляли значения от 100 до 200 нм.

Измерительная схема макетных образцов приборов позволяла осуществлять прецизионные измерения изменений электропроводности датчиков при росте температуры, которое представлялось как функция обратной текущей абсолютной температуры $\Delta\sigma(z=1000/T)$, изменявшейся в интервале от 430 до 770 К за время $\tau \sim 1.5$ с. Полученные массивы обрабатывались при помощи опции «Nonlinear estimation» программы StatSoft Statistica при помощи набора интерполирующих функций рационального типа $F_i(z)$ с последующим построением концентрационных зависимостей для т.н. главных параметров $A_i(C)$, $i=1, 2, \dots$ в совокупности составляющих *портрет селективности* примеси [3]. Отображение величин в логарифмических координатах и по шкале отношений ($\lg(A_i/A_1)$ vs $\lg C$) решало проблему разброса параметров плёнок и, отчасти, проблему стабилизации их электрофизических характеристик

Благодарности

Выражается благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 19-08-00576 А, за частичную поддержку данной работы.

Список литературы

1. Nakata S, Hashimoto T, Okunishi H., Analyst, 2002, 127, 1642–1648
2. Handbook of sensors and actuators, v.4 “Semiconductor sensors in physico-chemical studies” (edited by L.Yu.Kupriyanov), 1996, Chapter 1, “Physical and chemical basics of the method of semiconductor sensors”, pp. 5 - 24.
3. Чистяков В.В., Казаков С.А., Соловьев С.М., Гревцев М.А., Письма в ЖТФ, 2021, 6, с. 15-18, DOI: <http://dx.doi.org/10.21883/PJTF.2021.06.50751.18564>
4. М. В. Дуйкова, С. Э. Шконда, С. А. Казаков, М. А. Гревцев, «Научное приборостроение», 2020, том 30, № 4, с. 21–27.

Electrical properties of CdFeSe, CdMnTe epitaxial films

M.A. Mehrabova¹, H.R. Nuriyev², N.H. Hasanov³, R.M. Sadigov², V.G. Guluzade⁴, A.M. Nazarov²,
N.I. Huseynov¹, N.R. Gasimova⁵

¹Institute of Radiation Problems, ANAS, Baku, Azerbaijan

²Institute of Physics, ANAS, Baku, Azerbaijan

³Baku State University, Baku, Azerbaijan

⁴Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

⁵Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan

e-mail: mehrabova@mail.ru

Semimagnetic Semiconduction (SMSC) or Diluted Magnetic Semiconductors (DMS) are obtained by substitution of transition metal cation like Mn, Fe, Co in II-VI compounds. This leads to the appearance of the crystalline, chemical and magnetic disorder and the electronic structure of the valence band is affected by the 3d electrons correlations and their hybridization in s-p-d build valence band [1-3]. Unlike the well-known Mn-based DMS [4], the Fe-based II—VI compounds show a very low solubility of Fe, creating some difficulties in obtaining single phase samples for studying the electronic properties. The Cd_{1-x}Fe_xSe DMS are single-phase for $x < 0.15$. In Cd_{1-x}Fe_xSe the transition metal Fe²⁺ ions replace randomly the Cd cations in the wurtzite structure of the host CdSe crystal [2]. Similarly to the Mn-based DMS's [5,6], there is a large exchange interaction between the Fe 3d electrons, which lead to the spin splitting of the Fe 3d states into two groups of sublevels (spin-up and spin-down).

In this work the conditions of obtaining of perfect Cd_{1-x}Fe_xSe ($x < 0.08$) and Cd_{1-x}Mn_xTe ($x = 0.15$) epitaxial films and their electrical properties have been studied.

Thin films of Cd_{1-x}Fe_xSe ($x < 0.08$) and Cd_{1-x}Mn_xTe ($x = 0.15$) epitaxial films were obtained by Molecular Beam Condensation method in a vacuum of $(1,2) \cdot 10^{-4}$ Pa on a glass substrates. It is determined the optimal conditions to obtain of epitaxial films with perfect structure and a clean, smooth surface. The substrate temperature was $T_{sub} = 640 \div 670$ K and source temperature was $T_{sub} = 1100 \div 1200$ K. Epitaxial films was growing in the (111) plane of a face-centered cubic lattice.

Crystal structure of investigated epitaxial films were studied by X-ray diffraction (XRD) method on Broker, Germany D8 ADVANCE. XRD studies show that thin films grown on glass substrates at temperature $T_{sub} = 640 \div 670$ K have a monocrystalline structure

Surface morphology of investigated epitaxial films was studied by Scanning Electron Microscope (SEM) method on JEOL JSM-7600F Field Emission. SEM image shows that the obtained epitaxial films was smooth and glossy surface.

The dark electrical resistivity of Cd_{1-x}Fe_xSe, $x < 0.08$ epitaxial films was measured at $T = 300$ K temperature. In order to measure electrical resistivity silver paste was applied to make Ohmic contacts to Cd_{1-x}Fe_xSe, $x < 0.08$ epitaxial films. The VAX characteristics have linear nature which confirms that silver produces Ohmic contact with Cd_{1-x}Fe_xSe. The straight-line nature of resistivity plots suggests that the grain boundary limited conduction is the dominant conduction mechanism.

The calculated activation energy for Cd_{0.6}Fe_{0.4}Se ($x = 0.4$) epitaxial film was $E_a = 0.101$ eV and for Cd_{0.2}Fe_{0.8}Se ($x = 0.8$) epitaxial film was $E_a = 0.114$ eV. The measurement of thermo-emf across Cd_{1-x}Fe_xSe epitaxial films confirms that films are of n -type.

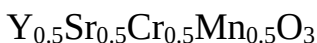
VAC of Cd_{1-x}Mn_xTe ($x = 0.15$) epitaxial film has been studied at room temperature. In VAC there is observed a linear part $J \sim U$ corresponding to Ohm's law, quadratic part $J \sim U^2$ and part of sharp growth. Analysis of the curves can be carried out within the framework of theory of injection currents in solid solutions. It was defined the electrical resistance $R = 44 \cdot 10^9 \Omega$.

Acknowledgment. This work was supported by the SOCAR 2019 grant.

References

1. Furdyna J. Diluted magnetic semiconductors. *J. Appl. Phys.* 1988, 64, R29
2. Wei S.H., Zunger A. Total energy and band structure calculations for the semimagnetic $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ semiconductor alloy and its binary constituents. *Phys. Rev. B* 1987, 35, 2340.
3. Masek J., Velicki B., Mn 3d states in photoelectron spectra from $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$. *Phys. Status Solidi B*, 1987, 140, 135.
4. Becker W.M. Band Structure and Optical Properties of Wide-Gap $\text{Al}_{1-x}\text{Mn}_x\text{BVI}$ Alloys at Zero Magnetic Field. *Semiconductors and Semimetals*, 1988, 25, 35.
5. Nuriyev I.R., Mehrabova M.A., Nazarov A.M., Hasanov N.H., Sadigov R.M., Farzaliyev S.S., Farajov N.V. Structure and surface morphology of $\text{Cd}_{1-x}(\text{Mn},\text{Fe})_x\text{Se}$ epitaxial films. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2019, 11, 78-80
6. Mehrabova M.A., Nuriyev H.R., Orujov H.S., Hasanov N.H., Kerimova T.I., Abdullayeva A.A., Kazimova A.I. Effect of gamma irradiation on conductivity of $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$. *Semiconductors*, 2020, 61, 12, 2306–2309

Магнитные и резонансные свойства поликристаллов



Патрин Г. С.^{1,3}, М.М. Матаев², К.Ж. Сейтбекова², Я.Г. Шиян^{1,3}, В.Г. Плеханов¹

¹Сибирский федеральный университет

²Казахский Государственный Женский педагогический университет

³Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН

e-mail: patrin@iph.krasn.ru

В настоящее время активно изучаются соединения на основе различных оксидов, где удастся получить как чисто магнитные соединения, так и те, которые относятся к классу мультиферроиков. Большой интерес представляют неоднородные среды с развитыми границами раздела между мезоскопическими структурными элементами, какими являются системы с фазовым расслоением, пленочные структуры, нано- и микроразмерные композиты. Поскольку данные магнитного резонанса дают информацию о внутренних полях и взаимодействиях в магнетиках., поэтому мы решили исследовать магниторезонансные свойства поликристаллического иттрий-стронциевого хромито-манганита.

Полученные образцы сложных оксидов были приготовлены методом твердофазной реакции. Более детальная информация по синтезу таких манганитов представлена в работе [1]. Фазовое состояние контролировалось методом рентгенофазового анализа, который проводили на рентгеновском дифрактометре Miniflex 600 (Rigaku). Магнитные характеристики изучались на СКВИД-магнитометре MPMS-XL в полях до 50 kOe. Спектры электронного магнитного резонанса (ЭМР) измерялись на спектрометре Bruker E 500 CW EPR, действующем на частоте $\omega_{\text{MWF}} = 9.48 \text{ GHz}$. Резонансные измерения проводились в интервале температур 5–300 K.

Методом рентгеновской спектроскопии было установлено, что кристаллы соответствуют номинальному составу и принадлежат орторомбической сингонии с параметрами ячейки $a = 0.7065 \text{ nm}$, $b = 0.7375 \text{ nm}$, $c = 0.6741 \text{ nm}$. Размер кристаллитов в образце был

порядка 1-2 мкм, а разброс содержания элементов в образце от точки к точке может составлять 5–6%. В результате магнитостатических измерений установлено, что при температурах ниже 30 К петля гистерезиса является раскрытой, а при более высоких температурах петля не раскрыта. В температурной зависимости намагниченности ($M(T)$) имеет место зависимость от режима охлаждения: магнитном в поле (FC) или без него (ZFC). Как раз при температуре $T \approx 35$ К в режиме ZFC имеет место максимум в зависимости $M(T)$. Данные магнитостатических измерений [1] показывают, что отдельные ферромагнитные кристаллиты связаны между собой антиферромагнитным взаимодействием (при $T < T_N = 80$ К).

Проведены экспериментальные исследования магниторезонансных свойств поликристаллической системы $Y_{0.5}Sr_{0.5}Cr_{0.5}Mn_{0.5}O_3$. Получено, что области магнитного упорядочения при $T < 80$ К в спектре наблюдается две линии поглощения. При переходе в парамагнитную область одна из линий исчезает, но появляются набор слабых линий, идентифицируемых как принадлежащие примесным ионам Mn^{2+} . В рамках теории одно ионной релаксации проведен анализ температурного поведения ширины линии основного пика. Установлено, что за низко температурный пик ответственные ионы Mn^{3+} , а за высоко температурный – ионы Cr^{4+} . Из анализа поведения ширины линии магнитного резонанса следует, что низкотемпературный максимум для линии 1 соответствует области магнитного упорядочения в кристаллите, тогда как высокотемпературный максимум попадает уже в парамагнитную область. Определены константы молекулярных полей, действующих на подсистемы ионов Mn^{3+} и Cr^{4+} .

Настоящие исследования ведутся по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSRZ-2020-0011) и в рамках договора о сотрудничестве между Сибирским федеральным университетом, Институтом физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН и Казахским государственным женским педагогическим университетом.

Список литературы

1. M.M. Mataev, G.S. Patrin, K.Zh. Seitbekova, et al. Synthesis and Analysis of Chromium and Calcium Doped $YMnO_3$. Orient. J. Chem., vol.35, 1162-1166, 2019
2. Г.С. Патрин, М.М. Матаев, К.Ж. Сеитбекова и др. Магнитные и резонансные свойства поликристалла $Y_{0.5}Sr_{0.5}Cr_{0.5}Mn_{0.5}O_3$. ФТТ, том. 62, 1204-1208, 2020.

Наноразмерная автоэмиссионная ячейка на основе графеновых пленок на SiC

Ревенко Я. О.¹, Житяев И. Л.¹, Светличный А. М.¹

¹ ЮФУ

e-mail: yrevenko16@yandex.ru

Стремительное развитие технологий и растущие требования к характеристикам электронных устройств приводят к тому, что стандартная полупроводниковая техника на основе кремния не может удовлетворить потребности в быстродействии транзисторных структур. Поэтому в последнее время проводятся активные научные исследования в области создания автоэмиссионных транзисторных структур с наноразмерным вакуумным каналом. Основное влияние на характеристики автоэмиссионных ячеек оказывает конструкция электродов, их расположение, материал и потенциалы. Перспективы

применения в автоэмиссионной наноэлектронике показывают углеродные наноматериалы, которые отличаются свойством низкого порога эмиссии, повышенной устойчивостью к ионной бомбардировке катода, электро- и теплопроводностью, механической прочностью. Катоды на основе углеродных аллотропных модификаций, таких как графен и нанотрубки, также отличаются высоким аспектным отношением, что способствует высоким значениям коэффициента усиления поля и снижению порогового напряжения. Уменьшение межэлектродного расстояния также способствует снижению порогового напряжения. Таким образом, целью работы является теоретическое исследование конструкции автоэмиссионной ячейки триодного типа с наноразмерным расстоянием катод-анод на основе графеновых пленок на полуизолирующем карбиде кремния.

В основе исследуемой конструкции ячейки лежит ранее разработанная автоэмиссионная диодная структура планарного типа. Пленки графена формируются методом термической деструкции карбида кремния в вакууме. В этом случае не требуется операция переноса графеновых пленок на диэлектрическую подложку. Формирование наноразмерного вакуумного канала обеспечивается прецизионным травлением материала с использованием метода фокусированных ионных пучков. В результате удалось снизить пороговое напряжение менее 1 В. В исследуемой триодной структуре расстояние катод-анод составило 100 нм. Центральная ось управляющих электродов находилась на расстоянии 50 нм от вершины катода. Радиус закругления вершины автоэмиссионного катода составил 10 нм. Толщина автоэмиссионной ячейки определяется толщиной графеновой пленки. В работе рассматривается многослойная графеновая пленка, состоящая из 10 слоёв.

Моделирование автоэмиссионной ячейки методом конечных элементов проводилось при различных параметрах расстояния между управляющими электродами в диапазоне от 50 до 150 нм. Потенциал управляющих электродов варьировался от +5 до -5 В. Напряжение анод-катод составило 10 В. По результатам моделирования выявлено, что в рассматриваемом диапазоне параметров возможно увеличение напряженности электрического поля у эмитирующей поверхности в 3 раза до значений $\sim 6,5 \cdot 10^8$ В/м при 50 нм зазоре между управляющими электродами и потенциале на них 5 В. При фиксированной величине потенциала на управляющих электродах напряженность электрического поля возрастает в 1,4 раза при уменьшении расстояния между ними до 50 нм. Минимизация межэлектродного расстояния позволяет понизить рабочее напряжение и уменьшить габариты автоэмиссионной ячейки.

Фазовые переходы в решетке полосовых доменов пленки феррита-граната

Безус А. В.¹, Сирюк Ю.А.¹, Капшуков Р.А.¹, Кононенко В.В.²

¹Донецкий национальный университет

e-mail: a.bezus@donnu.ru

Экспериментально изучены особенности жесткой решетки полосовых доменов в магнитоодносной пленке феррита-граната $(TmBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ ($T_N = 437K$, $T_C = 120K$), где T_N - температура Нееля, T_C - температура магнитной компенсации. Пленка имеет при $T = 300K$ фактор качества Q5. При такой величине фактора качества в доменной границе (ДГ) действием импульсного магнитного поля, перпендикулярного плоскости пленки, создаются вертикальные блоховские линии (ВБЛ) [1]. Доменная структура

наблюдается благодаря магнитооптическому эффекту Фарадея. Пленка имеет сильную одноосную анизотропию, вследствие чего в широком температурном интервале при $T T_C$ наблюдаются блоховские доменные границы (ДГ).

Актуальность этой работы в том, что исследования, проведенные в ней, могут быть использованы при создании устройств для транспортировки магнитомаркированных биологических частиц. Такие устройства можно использовать для сортировки при разных температурах химических частиц по их размерам.

Решетка полосовой доменной структуры (ПДС) формируется монополярным импульсным магнитным полем, перпендикулярным плоскости пленки, в отсутствие поля смещения. Частота и длительность импульса подбираются экспериментально. Затем поле выключается. Такая решетка ПДС является равновесной при температуре формирования [2].

Обнаружено, что период решетки ПДС зависит от величины напряженности импульсного поля. Получен целый ряд равновесных решеток полосовых доменных структур, сформированных при $T=300\text{K}$ импульсным магнитным полем с напряженностью $0.5H_C \leq H \leq 1.5H_C$ (H_C - поле коллапса цилиндрического магнитного домена при данной температуре). Решетка, сформированная полем с напряженностью $H = 1.5H_C$, имеет максимальный период и является неустойчивой. При выключении поля она переходит в равновесную волновую структуру (ВДС), т.е. происходит индуцированный полем фазовый переход (ФП) первого рода ПДС–ВДС.

Решетка ПДС₁, сформированная импульсным магнитным полем с напряженностью $H = 0.5H_C$ при $T_F = 300\text{K}$, сохраняется в широком температурном интервале $T_1 - T_2$, хотя является уже неравновесной. При T_1 ($T_1 T_F$) происходит ФП первого рода ПДС₁–ВДС₁ с уменьшением периода. При этом происходит ФП первого рода и в ДГ. С уменьшением ширины домена ($d = P/2$) уменьшается и ширина ДГ, поэтому число ВБЛ уменьшается путем аннигиляции. Общая энергия доменной структуры уменьшается. Неравновесная решетка полосовых доменов перешла в равновесную решетку ВДС₁. При дальнейшем нагревании пленки период ВДС₁ сохраняется до $T_{K2} = 0.98T_N$. При T_{K2} в ДГ происходит ФП первого рода в простую блоховскую границу. Волновая доменная структура переходит скачком в решетку полосовых доменов ПДС₂. Это ФП первого рода. При этом период ПДС₂ соответствует периоду равновесной ПДС при T_{K2} . При охлаждении пленки до T_2 ВБЛ в доменной границе решетки ПДС₁ исчезают путем раскручивания, и блоховская ДГ переходит в ДГ Нееля. Это ФП первого рода в доменной границе. При этом решетка полосовой структуры ПДС₁ скачком переходит в новую ПДС с большим периодом, т.е. в решетке происходит ФП первого рода. Решетка ПДС₂, полученная при $T_{K2} = 0.98T_N$, сохраняется в широком температурном интервале $T_{K2} - T_2$. Эта решетка имеет минимальный период, максимальную плотность и простую блоховскую границу. Из всех решеток полосовой структуры решетка ПДС₂ наиболее устойчива и сохраняется в максимальном температурном интервале.

Из приведенных результатов эксперимента видно, что температурный интервал устойчивости решетки ПДС увеличивается с уменьшением периода и уменьшением количества ВБЛ в доменной границе.

Таким образом, из экспериментальных результатов видно, что механизм формирования равновесных решеток ПДС и ВДС и механизм спонтанных фазовых переходов обусловлены структурой доменных границ и зависимостью магнитостатической энергии доменной структуры от ее периода.

Список литературы

1. А. Малоземов, Дж.Слонзуски. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. Мир, М. (1982). 384 с.
2. А.С. 1341681 СССР. Способ формирования решетки цилиндрических магнитных доменов в магнитоодноосной пленке / Ю.А.Мамалуй, Ю.А.Сирюк, Г.С.Ярош (СССР). –№4066126; заявл. 05.05.86, опубл. 17.11.87, бюл. №36.

Ultra-heat resistant phthalonitrile nanocomposites based on heterocyclic networks: structure, properties, origin of thermal stability

Якушев П. Н.¹, Bershtein V.A.¹, Fainleib A.M.², Kirilenko D.A.¹, Melnychuk O.G.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Institute of Macromolecular Chemistry, Ukraine

e-mail: yak@pav.ioffe.ru

A series of the hybrid Phthalonitrile/reactive amino-Montmorillonite (amino-MMT) polymer nanocomposites with 0.03–5.0 wt.% amino-MMT were synthesized from bisphenol A based phthalonitrile. Their structure, molecular dynamics, thermal, relaxation and elastic properties were characterized using TEM, EDXS, DMA, DSC, TGA, FTIR and Far-IR spectroscopies [1–3]. The complex heterocyclic matrix network containing phthalocyanine, triazine and isoindoline cycles, is formed (FTIR, Far-IR). Depending on the MMT content in the nanocomposites, very different levels of exfoliation of stacks of 2-D MMT silicate nanolayers within the amorphous matrix were registered by TEM and validated by EDXS, from single nanolayer to three-layer formations at 0.03–0.5 % MMT up to thin and “thick” MMT stacks of 5 nm and 20–30 nm in thickness, respectively, at 2 % and 5 % MMT. The EDX spectra, using electron beam focused to 2 nm spots, allowed tracking the basic features observed in the TEM images, e.g., a single 1 nm -thickness MMT nanolayer. The “constrained dynamics” effects were observed in DMA and Far-IR experiments. The pronounced dynamic heterogeneity in the glass transition of nanocomposites (T_g varied from 460⁰ to 570⁰C) was revealed by DMA. Positive impact of MMT additive on thermal stability of the nanocomposite at $T > 500^0\text{C}$ in air medium was shown (TGA).

The origin of very high thermal properties of these nanocomposites consisted in the basic role of phthalocyanine macrocycles in the molecular structure of matrix network, as confirmed by Far-IR [2], and chemical grafting of amino-MMT nanofiller to the polymer matrix. After heating the nanocomposite with 5% amino-MMT with the rate of 20⁰C/min up to 900⁰C in nitrogen atmosphere (TGA experiment), the characteristic changes in its FTIR spectrum were as follows: the intensities of absorption bands at 1360 cm⁻¹ and 1520 cm⁻¹ (triazine cycles), and 886 cm⁻¹ and 1503 cm⁻¹ (isoindoline cycles) sharply decreased, whereas the intensities of absorption bands at 1010 cm⁻¹ (displaced to 1028 cm⁻¹) and 3450 cm⁻¹ (phthalocyanine macrocycles) considerably increased. This result led to conclusion that at high temperature pyrolysis the destruction of triazine and isoindoline cycles occurred, with their partial transformation into very stable phthalocyanine macrocycles.

Thus, the unique (for polymeric materials) combination of properties is attained in these nanocomposites: (a) practically invariable modulus $E' = 3$ GPa over the temperature range from 20⁰ to 600⁰C; (b) increasing T_g up to 570⁰C, and (c) the satisfactory thermal stability, with retaining the material integrity at short-term heating up to 500⁰C in air medium or to 900⁰C in

oxygen-free medium (at mass loss of ca. 20%). Due to such thermal stability, lightweight and other properties, these nanocomposites may be considered as promising materials for the application under the extreme conditions in aerospace, submarine, microelectronic industries, and in “hot zones” of different constructions.

Список литературы

1. V.A. Bershtein, A.M. Fainleib, P.N. Yakushev, D.A. Kirilenko, K.G. Gusakova, D.A. Markina, O.G. Melnychuk, V.A. Ryzhov. *Polymer* **165**, 39-54 (2019).
2. V.A. Bershtein, A.M. Fainleib, P.N. Yakushev, D.A. Kirilenko, K.G. Gusakova, D.A. Markina, O.G. Melnychuk, V.A. Ryzhov. *Express Polymer Letters* **13**, 656-672 (2019).
3. V.A. Bershtein, A.M. Fainleib, P.N. Yakushev, D.A. Kirilenko, O.G. Melnychuk. *Physics of the Solid State* **61**, 1494-1501 (2019).

Синтез гексагональной фазы 9R-Si при вариации режимов ионной имплантации

Королев Д. С., А.А. Никольская, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, Д.И. Тетельбаум

Университет Лобачевского

e-mail: dmkorolev@phys.unn.ru

Кремний, благодаря его уникальным свойствам и широкой распространенности, является основным материалом современной электроники. Однако, его использование в перспективных оптических устройствах обработки и передачи данных ограничивается непосредственностью его энергетической структуры и, соответственно, крайне низкой интенсивностью люминесценции. В то же время, развитость методов получения кремния и технологических процессов изготовления приборов на его основе обуславливает актуальность проблемы преодоления этого фундаментального недостатка. Одним из новых перспективных подходов является использование гексагональных модификаций кремния, для которых было продемонстрировано существенное улучшение излучательных свойств по сравнению с традиционной кубической модификацией. Однако, для практического применения необходимо разработать технологию создания таких структур, полностью совместимую с современной кремниевой технологией. Недавно нами было продемонстрировано, что путем имплантации ионов с последующим отжигом в структуры SiO_2/Si возможно сформировать в подложке на границе с пленкой включения гексагональной фазы 9R-Si, обладающие люминесценцией на длине волны ~ 1235 нм [1]. В данной работе детально изучаются люминесцентные свойства структур SiO_2/Si , в которых включения фазы 9R-Si были синтезированы при вариации условий ионной имплантации и пострадиационного отжига.

В качестве исходных образцов использовались термические пленки SiO_2 с толщиной в диапазоне 50-300 нм на подложках кремния *n*- и *p*-типа. Далее образцы облучались ионами криптона, кремния, мышьяка с энергиями 50-100 кэВ и дозами в интервале 10^{15} - 10^{17} см⁻². Толщины пленок и режимы облучения подбирались для обеспечения различного взаимного расположения внедренных атомов и границы раздела пленка-подложка. Постимплантационный отжиг проводился в интервале температур 600-900 °С в течение 30 минут в атмосфере газообразного азота. Исследование люминесцентных свойств проводилось при возбуждении лазером 405 нм и температурах 10-300 К.

Изучение спектров фотолюминесценции (ФЛ) продемонстрировало наличие линии при ~ 1235 нм, существование которой было связано нами с наличием включений гексагональной фазы 9R-Si в кремниевой подложке на границе с пленкой, выявленных методом просвечивающей электронной микроскопии [1]. Показано, что интенсивность линии ФЛ существенно зависит от типа иона, дозы облучения и температуры отжига. Для разных толщин пленок обнаружена закономерность изменения интенсивности люминесценции с ростом толщины пленки и увеличением дозы облучения. По результатам сравнения расчетных данных распределения имплантированных атомов, а также создаваемых ионным пучком радиационных дефектов, с данными по интенсивности ФЛ для структур SiO_2/Si с различной толщиной термического окисла предлагается гипотеза образования гексагональной фазы 9R-Si в исследуемых структурах.

Исследование выполнено в рамках гранта Президента (МК-4092.2021.1.2), а также частично при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90204.

Список литературы

1. Photoluminescence of silicon at 1235 nm produced by irradiation of SiO_2/Si with Kr^+ ions and subsequent high-temperature annealing / A.A. Nikolskaya, D.S. Korolev, A.N. Mikhaylov, A.A. Konakov, A.I. Belov, M.O. Marychev, R.I. Murtazin, D.A. Pavlov, D.I. Tetelbaum // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol.386. – P.125496.

Влияние магнитного поля на формирование и свойства нанокompозитов поливиниловый спирт - многостенные углеродных нанотрубки

Васин С. В.¹, Низаметдинов А.М.¹, Ефимов М.С.², Сергеев В.А.^{1,2}

¹УФирЭ им. В.А.Котельникова РАН

²Ульяновский государственный технический университет

e-mail: svasin@ulireran.ru

Свойства полимерных композитных материалов, содержащих углеродные нанотрубки (УНТ), определяются как структурой УНТ и режимами их функционализации [1], так и характером распределения и ориентацией УНТ в полимерной матрице [2]. Особенно сильно характер распределения и ориентация УНТ должны проявляться в пленочных структурах толщина, которых сравнима с длиной УНТ [3,4]. Создание нанокompозитов с однородным распределением ориентированных определенным образом УНТ (гомогенизация) представляет сложную задачу, поскольку УНТ в полимерной матрице быстро агрегируют. Для управления ориентацией УНТ в полимерной матрице наиболее широко используется воздействие электрическим и/или магнитным полем [5].

В данной работе исследовалось влияние магнитного поля на процесс полимеризации и электрофизические характеристики пленок поливинилового спирта (ПВС) с включением многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ). Использовались МУНТ производства компании «Нанотех-центр» марки «Таунит», функционализированные прививкой на поверхности полярных карбоксильных групп (COOH). Диаметр МУНТ, по данным производителя, составляет 20-50 нм, длина ≥ 2 мкм. Дополнительной очистки МУНТ не производилось. В водный раствор ПВС методом ультразвукового перемешивания диспергировалось от 1% до 10% (от массы ПВС) МУНТ. Пленки толщиной 30-50 мкм

формировались сушкой раствора в чашке Петри на воздухе в течении суток при комнатной температуре при непрерывном воздействии постоянным магнитным полем с индукцией 0,3 Тл. Контрольные образцы получались в тех же условиях, но без воздействия магнитного поля. Исследовались морфология полученных пленок с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и проводимость пленок в постоянном и переменном (в диапазоне частот 20Гц-15МГц) электрическом полях. При исследовании проводимости направление электрического поля совпадало с направлением магнитного поля при сушке образцов.

СЭМ микрофотографии показали, что пленки, полученные при воздействии магнитного поля, имеют однородную структуру, в то время как в контрольных образцах присутствует значительное число агломераций МУНТ.

При исследовании проводимости на постоянном токе установлено, что пленки, полученные в магнитном поле, имеют проводимость существенно превосходящую проводимость контрольных образцов. Так удельное сопротивление контрольных пленок с 10% содержанием МУНТ составляет величину порядка $4 \cdot 10^7$ Ом·м, а для полимеризованных в магнитном поле – $1 \cdot 10^7$ Ом·м. Такое соотношение сохраняется вплоть до концентрации МУНТ порядка 1%, когда удельное сопротивление становится близко к удельному сопротивлению чистого ПВС.

Измерение проводимости на переменном сигнале показало, что частотная зависимость проводимости имеет вид, характерный для поляризованных диэлектриков, с ростом частоты происходит заметный рост проводимости. Во всем диапазоне частот проводимость пленок, полученных в магнитном поле, заметно выше проводимости контрольных образцов. В диапазоне частот до 10 кГц эта разница более порядка, далее с ростом частоты разница уменьшается.

Таким образом показано, что использование при полимеризации магнитного поля оказывает заметное влияние на свойства и характеристики пленок нанокомпозитов на основе ПВС и МУНТ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-42-730011

Список литературы

1. Сергеев В. А., Климов Е. С., Фролов И. В. Влияние функционализации на электропроводность и шумовые характеристики массивов многостенных углеродных нанотрубок, Журнал технической физики, т. 89, № 8, с. 1223, 2019.
2. Cob J., Oliva-Avilés A. I., Avilés F., Oliva A. I. Influence of concentration, length and orientation of multiwall carbon nanotubes on the electromechanical response of polymer nanocomposites, Polym. Compos., vol. 38, no. 2, pp. 287–298, 2017.
3. Васин С. В., Ефимов М. С., Сергеев В. А. Особенности токопереноса в пленках поливинилового спирта с включениями многостенных углеродных нанотрубок на подложках Si, *Письма в ЖТФ*, т. 46, № 12, с. 26, 2020.
4. Vasin S. V., Efimov M. S., Sergeev V. A., Frolov I.V. Current transfer mechanisms in polyvinyl alcohol films with inclusions of multi-walled carbon nanotubes, J. Phys. Conf. Ser., vol. 1697, no. 1, p. 012104, 2020.
5. Moaseri E., Fotouhi M., Bazubandi B., Karimi M., Baniadam M., Maghrebi M., Two-dimensional reinforcement of epoxy composites: alignment of multi-walled carbon nanotubes in two directions, Adv. Compos. Mater., vol. 29, no. 6, p. 547-557, 2020.

Особенности роста наноструктур InP на подложках Si(111) в квазиравновесных условиях

Власов А. С.¹, Карлина Л.Б.¹, И.В. Илькив², А.В. Вершинин², И.П. Сошников¹⁻³

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова

³ИАП РАН, Санкт-Петербург

e-mail: vlasov@scell.ioffe.ru

Проблемы производства оптоэлектронных устройств интегрированных с кремниевой технологией представляют особый интерес. Одно из направлений в этой области связано с выращиванием наноструктур III-V фосфидов на кремниевой подложке [1-5]. Ставшие традиционными технологии выращивания таких структур основаны на каталитическом росте методом пар-жидкость-кристалл (ПЖК) [2,3] и включают использование наноразмерных капель катализатора, предварительно нанесенных на поверхность кремния. Процесс подготовки структуры подложка-капли катализатора перед началом роста наноструктур, как правило, включает ряд технологических операций с целью уменьшения толщины или удаления слоя естественного окисла на поверхности кремниевой подложки и/или предварительного формирования каталитических центров роста нанодисперсных капель перитектических сплавов индий-золото [1].

В работе впервые проведены экспериментальные исследования каталитического роста InP наноструктур по механизму пар – жидкость – твёрдое из источника насыщенных паров Sn-InP в квазиравновесных условиях в квазизамкнутом объёме [6] на активированной золотом поверхности кремния (111). Большое внимание было уделено существенному изменению и упрощению начальной стадии подготовки синтеза наноструктур.

Коллоидные капли золота диаметром 60+₋5 нм наносились на поверхность подложек Si (111) из коллоидного раствора в соответствии с ранее развитой методикой [7]. Последующее хранение образцов для снижения образования окисного слоя осуществлялось в атмосфере водорода. При этом длительность хранения до процесса выращивания могла составлять свыше 30 дней без изменения характера синтезируемых наноструктур. Для синтеза наноструктур подложки кремния с коллоидными частицами золота помещались в ростовую камеру непосредственно под источник паров [6]. В процессе нагрева образцов и испаряемого материала формировались нанодисперсные частицы золото-индий. Рост наноструктур осуществлялся при температуре 500±10°C в течение 60± 10 минут.

Исследования поверхностной морфологии методом растровой электронной микроскопии обнаружило присутствие нитевидных нанокристаллов InP (ННК) различной высоты и диаметра. Анализ размеров ННК свидетельствует об их зависимости от времени процесса. Сопоставление длины и диаметра ННК показывает возрастающую от насыщения зависимость, что свидетельствует о преимущественно классическом ПЖК механизме роста. Дифракционная картина от полученных образцов показывает присутствие гексагональной (вюрцитной) фазы в InP ННК.

Спектры Рамановского рассеяния от образцов с синтезированными наноструктурами демонстрируют присутствие колебаний в диапазоне 296-303 см⁻¹, соответствующих модам поперечных колебаний InP. Положение и интенсивность колебаний оказывается неоднородным по поверхности образца и соответствует различной плотности и размеру полученных наноструктур. Изучение спектров фотолюминесценции показало наличие полосы излучения с центром на длине волны ~880 нм, что соответствует ширине запрещенной зоны InP.

Таким образом, проведен сравнительный анализ особенностей начального этапа роста InP наноструктур на поверхности кремния. Показана перспективность предложенного нами метода роста InP наноструктур на поверхности кремния.

Список литературы

1. A Mavel, N Chauvin, Ph Regreny, G Patriarche, B Masenelli, M Gendry, J Crystal Growth 458 (2017) 96
2. A Jaffa, P Regreny, G Patriarche, N Chauvin and M Gendry, Nanotechnology 31 (2020) 354003
3. S Breuer, M Hilse, L Geelhaar, H. Riechert, J Crystal Growth 323 (2011) 311
4. LC Chuang, M Moewe, Sh Crankshaw, and C Chang-Hasnain, Appl. Phys. Lett. 92 (2008), 013121
5. HA Fonseka, HH Tan, J Wong-Leung, JH Kang, P Parkinson and C Jagadish, Nanotechnology 24 (2013) 465602
6. LB Karlina, AS Vlasov, IP Soshnikov, IP Smirnova, BY Ber, AB Smirnov, Semiconductors 52 (2018) 1363
7. АД Буравлев, ИП Сошников, ГЭ Цырлин, И Илькив, Патент RU2016149164 (A) Method for deposition of colloidal nanoparticles of gold on surface of silicon semiconductor plates

Контактная литография тонких слоёв дихалькогенидов переходных металлов

Бородин Б. Р.¹, Бенимецкий Ф. А.², Алексеев П. А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Университет ИТМО

e-mail: brborodin@gmail.com

Исследования двумерных дихалькогенидов переходных металлов (2D-ДПМ), интенсивно проводимые в настоящий момент, выявляют всё больше уникальных свойств интересных не только для фундаментальной физики, но и для приборных применений. Некоторыми из таких свойств являются, например перестраиваемая в широких пределах ширина запрещенной зоны¹, аномально высокое поглощение света², огромная энергия связи экситонов³. Однако, одним из главных препятствий на пути приборной реализации подобных структур является их крайняя чувствительность к состоянию поверхности и разным поверхностным адсорбатам⁴. По этой причине общепринятые методы литографии, предполагающие нанесение резиста и химическое травление, плохо подходят для подобных материалов. Один из эффективных методов литографии, не предполагающих нанесения резиста на поверхность, – зондовая литография. Данный метод позволяет осуществлять локальное воздействие на материал и обладает высоким пространственным разрешением. Например разрешение литографии локального анодного окисления может достигать 10 нм⁵. Однако для материалов чувствительных поверхностной влаге (или быстро деградирующих на воздухе) скорее подойдет контактная зондовая литография, которую можно проводить как на воздухе, так и в условиях высокого вакуума. В данной работе мы демонстрируем применение такой литографии к дихалькогенидам переходных металлов, в частности к MoSe₂.

Эксперимент производился на приборе Ntegra Aura (NT-MDT) с использованием Si и DCP (NT-MDT) зондов с диаметром острия 10-100 нм и жесткость 3-85 Н/м. Тонкие слои MoSe_2 , полученные микромеханическим расслоением, переносились на Si-подложку, покрытую 50 нм золота. Далее на выбранных участках производилась контактная литография. Её суть заключается в том, что зонд атомно-силового микроскопа надавливает на поверхность образца с силой достаточной для механического разрушения материала в точке под зондом (проколе). Особенностью применяемой методики является малая сила нажима зонда при большом количестве повторений литографического паттерна. Таким образом литографический рисунок формируется не за счёт «разрезания» зондом материала, а скорее за счет постепенного послойного его «стирания» более твердым зондом. Данный способ позволяет избежать латеральных изгибов зонда, которые непременно появляются при сильном нажиме и значительно ухудшают разрешение данного метода. В ходе исследования удалось добиться разрешения такой литографии вплоть до 20 нм, а толщина структур, поддающихся такой литографии, может достигать 100 нм. Хотя и стоит отметить, что чем меньше толщина образца, тем проще добиться высокого разрешения, что связано с конической формой зонда.

Таким образом, в работе была исследована контактная литография тонких слоёв MoSe_2 . В ходе исследования были сформированы различные паттерны с разрешением вплоть до 20 нм, а также определено давление, при котором начинается эффективное стирание поверхности MoSe_2 . Результаты работы позволяют рассматривать контактную зондовую литографию, как один из эффективных методов, позволяющих формировать устройства электроники и оптоэлектроники из ДПМ, не возмущая их первоначальных свойств воздействием резиста.

Список литературы

1. Yun, W. S., Han, S., Hong, S. C., Kim, I. G. & Lee, J. Thickness and strain effects on electronic structures of transition metal dichalcogenides: 2H-M X 2 semiconductors (M= Mo, W; X= S, Se, Te). *Phys. Rev. B* 85, 033305 (2012).
2. Bernardi, M., Palummo, M. & Grossman, J. C. Extraordinary Sunlight Absorption and One Nanometer Thick Photovoltaics Using Two-Dimensional Monolayer Materials. *Nano Lett.* 13, 3664–3670 (2013).
3. Tonndorf, P. *et al.* Photoluminescence emission and Raman response of monolayer MoS_2 , MoSe_2 , and WSe_2 . *Opt. Express* 21, 4908–4916 (2013).
4. Song, H. *et al.* Origin of the relatively low transport mobility of graphene grown through chemical vapor deposition. *Sci. Rep.* 2, 1–6 (2012).
5. Borodin, B. R., Benimetskiy, F. & Alekseev, P. A. Study of local anodic oxidation regimes in MoSe_2 . *Nanotechnology* 32, 155304 (2021).

Критическое поведение двумерной ферромагнитной пленки на немагнитной подложке

Белим С. В.¹, Мальцев И.В.², Бычков И.В.²,

¹ОмГТУ

²ЧелГУ

e-mail: sbelim@mail.ru

Тонкие ферромагнитные пленки активно используются в устройствах спинтроники. Основная технология формирования тонких пленок состоит в напылении их на подложку. Особый интерес представляют монослойные ферромагнитные пленки. Эти пленки обладают новыми физическими свойствами. При изучении свойств этих пленок необходимо учитывать влияние подложки. Подложка выполнена из кристаллического материала. Кристаллическая решетка подложки отличается от решетки пленки. Подложка действует как внешний периодический потенциал. Атомы пленки меняют взаимное расположение под действием подложки. Структура пленки изменяется. Физические свойства ферромагнитной пленки также изменяются. Одним из проявлений изменения свойств пленки является смещение ее точки Кюри. Пленка переходит в ферромагнитное состояние при более высокой или более низкой температуре. Это явление называется фазовым переходом, индуцированным подложкой.

Поведение ферромагнитных тонких пленок MnAs на немагнитной подложке было исследовано в ряде работ [1-2]. Подложка в данной системе обладает кристаллической решеткой, отличной от пленки. Кроме этого, подложка создает ограничение на размер пленки. При нагревании создаются дополнительные напряжения. Эти напряжения связаны с различием в тепловом расширении пленки и подложки. В работе [3] показано, что деформация растяжения в пленке MnAs 0.5% приводит к изменению температуры фазового перехода на 50 К.

В работе проведено исследование критического поведения вблизи точки Кюри ферромагнитной пленки на немагнитной подложке методом компьютерного моделирования. Влияние подложки задается с помощью двумерного потенциала Френкеля-Конторовой. Исследования проводятся для двумерной пленки, описываемой моделью Изинга. На первом этапе вычисляются положения атомов на подложке в основном состоянии системы в зависимости от значения параметров. Параметрами системы служат отношения периодов подложки и кристаллической решетки пленки, а также отношение амплитуды потенциала подложки к коэффициенту упругости межатомного взаимодействия. Отношение периодов определяет коэффициент покрытия системы. Основное состояние ищется с помощью минимизации полной энергии системы. Расчеты показывают, что основное состояние обладает периодической структурой, отличной от квадратной решетки при коэффициенте покрытия не равном единице. Вычислены смещения атомов от положения равновесия для систем с различными линейными размерами.

Критическое поведение вблизи точки Кюри моделировалось с помощью кластерного алгоритма Вольфа. Температура фазового перехода определялась с помощью куммулянтов Биндера четвертого порядка. Получена зависимость температуры ферромагнитного фазового перехода от коэффициента покрытия и амплитуды потенциала подложки. Показано, что температура фазового перехода линейно убывает с убыванием амплитуды потенциала подложки. Скорость убывания температуры зависит от коэффициента покрытия. Вычислены критические индексы для различных значений параметров. Построена зависимость критических индексов от коэффициента покрытия системы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00053

Список литературы

1. J. Kim, H. Akinaga, and J. Kim, Appl. Phys. Lett. 98, 102511 (2011).
2. V. Z. C. Paes, I. L. Graff, J. Varalda, V. H. Etgens, and D. H. Mosca, J. Phys.: Condens. Matter 25, 046003 (2013).
3. V. Garcia, Y. Sidis, M. Marangolo, F. Vidal, M. Eddrief, P. Bourges, F. Maccherozzi, F. Ott, G. Panaccione, and V. Etgens, Phys. Rev. Lett. 99, 117205 (2007).

Кластеризация в тонких пленках серебра при нагреве

Казаков В. А.¹, Разина А.Г.¹, Смирнов А.В.¹

¹ЧГУ им. И.Н. Ульянова

e-mail: cossac@mail.ru

Плазмонные резонансные эффекты на кластерах серебра и золота рассматриваются как эффективный метод для повышения КПД фотодиодов и тонкопленочных фотоэлементов, механизм для увеличения захвата света в видимой и ближней ИК-области. В настоящее время ведется активный поиск наноматериалов с подобными эффектами и рассматриваются различные пути их интеграции в реальные фотовольтаические системы (фотодиоды и солнечные фотоэлементы). Имеются работы [1,2], в которых экспериментально рассматривается формирование кластеров Au и Ag на прозрачном проводящем контакте (TCO) a-Si:H p-i-n структурах и в качестве обратного контакта tandemных фотоэлементов. Наночастицы серебра [3] и золота [4] используются в спектроскопии поверхностно-усиленного рамановского рассеяния света SERS (Surface-enhanced Raman spectroscopy or surface-enhanced Raman scattering) для анализа углеродных структур и различных биомедицинских применений.

В работе исследуется кинетика формирования кластеров серебра Ag из нанотолщинных сплошных пленок Ag на поверхности силикатного стекла и композитных структур из пленок Ag с углеродом в виде сплошной пленки и отдельных наночастиц при отжиге на воздухе при температуре до 670К. В ходе работы методами атомно-силовой микроскопии и оптической спектрофотометрии получены зависимости морфологии поверхности кластеров серебра и спектров поглощения в видимом диапазоне длин волн.

Тонкие сплошные пленки серебра толщиной менее 20 нм при нагреве свыше 500 К распадаются на отдельные кластеры, проявляющие эффект поверхностного плазмонного резонанса [5,6]. Во время отжига в результате процессов диффузии и воздействия сил поверхностного натяжения происходит перестроение пленки, сплошность нарушается, пленка становится островковой. В спектрах экстинкции появляется поверхностное плазмонное поглощение, где центр полосы поглощения определяет характерный размер наночастиц серебра. Для наночастиц серебра эта полоса находится в диапазоне 300÷500 нм. Размеры кластеров и оптические свойства зависят от состава подложки, параметров отжига, толщины пленок [7].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Научным и технологическим исследовательским советом Турции в рамках научного проекта 20-58-46014.

Список литературы

1. Lükermann F, Heinzmann U and Stiebig H 2012 Plasmon enhanced resonant defect absorption in thin a-Si:H n-i-p devices *Appl. Phys. Lett.* 100
2. Ferry V E, Polman A and Atwater H A 2011 Light trapping in plasmonic solar cells *Opt. InfoBase Conf. Pap.* 18 237–45
3. Chen Y C, Young R J, Macpherson J V. and Wilson N R 2007 Single-walled carbon nanotube networks decorated with silver nanoparticles: A novel graded SERS substrate *J. Phys. Chem. C* 111 16167–73
4. Lee S, Hahm M G, Vajtai R, Hashim D P, Thurakitseree T, Chipara A C, Ajayan P M and Hafner J H 2012 Utilizing 3D SERS active volumes in aligned carbon nanotube scaffold substrates *Adv. Mater.* 24 5261–6
5. Д.Громов, А.Козлитин, А.Савицкий и А.Трифонов 2014 Кинетика формирования кластеров серебра на аморфном углероде при вакуумно-термическом испарении *Электроника. Наука. Технология. Бизнес.* 116–21
6. Ченцова И Е, Дубовик В И и Ковивчак В С 2012 Синтез наночастиц серебра на поверхности диэлектрической матрицы при термическом отжиге тонких пленок *Вестн. Ом. ун-та.* 110–4
7. Леонов Н Б, Гладских И А, Полищук В А and Вартанян Т А 2015 Эволюция оптических свойств и морфологии тонких металлических пленок в процессах роста и отжига *Оптика и спектроскопия* 119 458–63

Влияние обработки поверхностной электромагнитной волной на электрооптические свойства ИТО плёнок с углеродными нанотрубками

Тойка А. С.^{1,2,3}, Каманина Н.В.^{1,2,3}

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

²АО «ГОИ»

³НИИ - Курчатовский Институт (ПИЯФ)

e-mail: atoikka@obraz.pro

В связи с широким использованием материалов солнечной энергетики, лазерной и дисплейной техники, а также модуляционных оптоэлектронных схем, проблема поиска оптимальных проводящих покрытий и способов совершенствования их характеристик занимает видное место. Среди таковых покрытий гетероструктура на основе окислов индия и олова (ИТО) имеет ряд неоспоримых достоинств. Эти композиции обладают высоким оптическим пропусканием в видимой и БИК областях спектра, они не токсичны и хорошо согласуются с другими материалами по показателю преломления. Их важным преимуществом является возможность реализовывать просветляющие свойства в конфигурациях электрооптических устройств модуляции сигнала, фотовольтаики, а также при изготовлении сенсоров [1-3].

При модифицировании поверхности ИТО углеродными нанотрубками (УНТ) появляется ряд преимуществ. Во-первых, поскольку УНТ в широком спектральном диапазоне обладают показателем преломления порядка 1.1, то в этом случае потери на отражение могут быть существенно снижены. Затем, при осаждении нанотрубок увеличивается поверхностная проводимость плёнок из-за большого оттока электронов от остова

УНТ. Квантово-механические расчеты показывают, что в приповерхностных слоях на границе раздела: ИТО и УНТ - формируется новый ковалентный композит. Более того, появляется дополнительный механизм электронного транспорта, обусловленный сетью квази-графеновой конфигурации на концах УНТ [4-5].

При осаждении УНТ необходимо управлять глубиной проникновения, плотностью нанесения, а также их углом наклона. Для модификации свойств структур может быть применена обработка поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ). При лазерной абляции контура на границе раздела индуцируется ПЭВ, которая распространяется по поверхности [6]. Таким образом, происходит абляция структуры по двум механизмам: под действием лазерного излучения, а также за счет индуцированной ПЭВ. Важно заметить, что прецизионность обработкой ПЭВ значительно выше, поскольку диаметр пучка, интенсивность и период следования индуцированной ПЭВ значительно снижаются.

В текущей работе мы рассматриваем корреляцию параметров рельефа, показателя преломления и профиля электрической проводимости ИТО плёнок с УНТ в зависимости от параметров ПЭВ. ИТО плёнки и осаждение УНТ было реализовано методом лазерного ориентированного осаждения. Для этого использовался CO_2 лазер с мощностью 30 Вт. В процессе осаждения использовалось электрическое поле с напряжённостью 600 В/см. Для лазерной обработки поверхности использовался CO_2 маркер, который воздействовал на поверхность с плотностью излучения $23,6\text{--}37,7 \text{ кВт/см}^2$ с частотой модуляции в диапазоне 0,1-1 КГц и скоростью обработки 50-100 мм/с. Описанное лазерное излучение индуцировало ПЭВ, которая формировала решетку с периодичностью 10,6 мкм. Для диагностики рельефа поверхности использовался атомно-силовой микроскоп Solver Next, для контроля толщины пленок и измерения рефрактивных свойств использовался эллипсометр J.A. Woollam M-2000RCE. При помощи измерения ВАХ определялся профиль проводимости.

Анализируя полученные данные и результаты, удастся установить, что в зависимости от параметров ПЭВ удастся снизить поверхностное сопротивление ИТО плёнок с УНТ вплоть до 50%. Вместе с тем, сформированный рельеф снижает потери на отражение, что проявляется на спектральной зависимости показателя преломления в диапазоне 400-1650 нм. Особенно заметно это проявляется в области 1300-1650 нм, где спектрофотометрия показывает увеличение оптического пропускания на 3-10%. Отметим, что в описанной работе ПЭВ обработка использовалась после осаждения УНТ, в этом случае одной из важнейших задач этого процесса была корректировка рельефа. Однако, этот процесс может быть использован перед лазерным осаждением нанотрубок с целью создания поверхности для их ориентирования. Следовательно, проделанная работа показывает еще один механизм редактирования электрооптических свойств прозрачных ИТО контактов, который при этом является доступным и масштабируемым.

Список литературы

1. Z. Zhang et al. 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* 11 45903-45913
2. Valla et al. 2016 *Solar Energy Materials and Solar Cells* 157, 874-880
3. T. Lee et al. 2016 *Journal of Materials Chemistry C* 42 9947-9953
4. Kamanina et al. 2021 *Nano Express* 010006 1-7
5. Kamanina et al. 2018 *Journal of Optical Technology* 85 722-778
6. Либенсон М.Н. 1996 *Соросовский образовательный журнал* 11 103-110

Исследование поверхности разрушения титана ВТ1-0 в различных структурных состояниях, в том числе с нанесенными МДО покрытиями

Нарыкова М. В.¹, Бетехтин В.И.¹, Кадомцев А.Г.¹, Колобов Ю.Р.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Институт проблем химической физики РАН

e-mail: Maria.Narykova@mail.ioffe.ru

Целью работ являлось изучение влияния нанесения покрытия методом микродугового оксидирования (МДО) на особенности разрушения титана в различных структурных состояниях. Объектом исследований в настоящей работе является титан технической чистоты (сплав ВТ1-0) в субмикрорекристаллическом (СМК) и крупнозернистом (КЗ) состояниях.

СМК состояние было сформировано с использованием продольной и поперечно-винтовой прокатки, позволяющих получать прутки СМК титана диаметрами 4–10 мм. В данной работе использовали прутки титанового сплава ВТ1-0 диаметром 8 мм, которые подвергали финишному отжигу при температуре 623 К в течение 3 ч для снятия внутренних напряжений первого рода. После указанной обработки сплав характеризуется однородной зеренно-субзеренной структурой со средним арифметическим размером структурных элементов порядка 190 нм.

Для проведения исследования усталостных свойств из стержней изготавливались двутавровые образцы с толщиной рабочей области 1 мм и шириной 3 мм. На поверхность половины образцов, как в СМК, так и в КЗ состоянии, было нанесено пористое биосовместимое покрытие толщиной $8 \div 10$ мкм методом микродугового оксидирования (МДО). Фазовый состав в основном представлен аморфной стеклофазой с незначительными областями нанокристаллических оксидных фаз. В состав покрытия входят оксиды кремния, кальция, фосфора, натрия и титана.

Для исследования усталостных характеристик при растягивающей нагрузке для образцов титанового сплава ВТ1-0 использовалась испытательная машина, оснащенная электромагнитным приводом, Instron Electropulse E3000 в режиме нагружения с частотой 50 Гц при комнатной температуре. Испытания проводили по схеме нагружения растяжением в симметричном пилообразном цикле в области нагружения $0,9\sigma_{\max} - 0,2\sigma_{\max}$. Предельное количество циклов для исследованных образцов устанавливалось $2 \cdot 10^6$. Исследование фрактотграфии структуры излома разрушенных образцов проводили с использованием растровых электронных микроскопов Quanta 200 3D и Nowa NanoSEM 450 в режиме топографического контраста с использованием детектора вторичных электронов.

Анализ изображения поверхности изломов образцов сплава ВТ1-0 в КЗ и СМК состояниях (в том числе с нанесенными МДО покрытиями) после циклических испытаний на растяжение, были проведены после испытаний при различных напряжениях и числе циклов.

Для КЗ состояния структура поверхности излома всех исследованных образцов в области усталостного разрушения характерна для квазихрупкого излома. Разрушение происходит по межзеренному механизму, когда зарождение нанопор происходит на границах зерен и в тройных стыках. Коалесценция пор приводит к хрупкому расколу по границе. Увеличение нагрузки способствует более вязкому характеру разрушения. Нанесение МДО покрытие (для КЗ состояния) меняет характер излома в области усталостного разрушения. Структура поверхности в этой области характерна для ручейстого квазивязкого

излома с наличием характерных бороздок направленных перпендикулярно фронту распространения усталостной трещины. Такая структура характерна для более вязких материалов.

Структура поверхностей изломов СМК образцов в области усталостного разрушения типична для квазивязкого ручейного излома. Необходимо отметить, что нанесение МДО покрытия на поверхность образцов сплава ВТ1-0 в СМК состоянии кардинальным образом меняет характер излома образцов (хотя усталостные свойства меняются незначительно): для образцов с покрытием характерен выраженный квазихрупкий характер излома.

Необходимо в дополнение к морфологическим исследованиям констатировать высокие адгезионные свойства МДО покрытий на поверхности сплава ВТ1-0. В приповерхностной области покрытие оказывает упрочняющий эффект и противодействует пластической деформации. Об этом свидетельствует изменение направления вытягивания ямок при усталостном разрушении в приповерхностном слое.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-58-26005.

Способ определения средней длины углеродных нанотрубок на основе измерения сопротивления случайно ориентированного массива

Воробьев А.А.¹, Митин Д.М.^{1,2}, Бердников Ю.С.^{1,3}, Можаров А.М.¹, Мухин И.С.^{1,4}

¹СПбАУ РАН

²СПбПУ

³СПбГУ

⁴ИТМО

e-mail: alex.spbau@mail.ru

Производительность оптоэлектронных устройств в значительной степени зависит от свойств прозрачных проводящих электродов (ППЭ). ППЭ должны обеспечивать эффективный сбор носителей заряда, не препятствуя при этом вводу/выводу излучения. На сегодняшний день наиболее используемым материалом для создания ППЭ является оксид индий-олова (ИТО, indium tin oxide), который имеет самое низкое сопротивление (10 Ом/кв) при прозрачности электрода 90% [1]. Однако в ряде задач необходимо использование гибких ППЭ, где применение ИТО становится ограниченным. Углеродные нанотрубки (УНТ) являются одним из наиболее перспективных материалов для гибких приложений. Тем не менее, сопротивление и пропускание ППЭ из УНТ еще не сопоставимы с таковыми у ИТО, ввиду чего крайне важно исследовать возможности улучшения характеристик УНТ-электродов. Как правило, увеличение коэффициента пропускания слоя достигается за счет увеличения его сопротивления. Одним из способов улучшения свойств прозрачного электрода является текстурирование, иными словами, формирование прозрачных окон в сплошном слое УНТ, например, травлением. Текстурированный рисунок на поверхности УНТ повысит прозрачность имеющегося слоя, что позволит уменьшить оптические потери без ухудшения физико-электрических характеристик электрода.

Выбор оптимальной геометрии текстурированного рисунка – важная задача, определяющая эффективность использования данного подхода при создании ППЭ. Одним из

факторов, влияющих на выбор геометрии, является длина одиночных УНТ. Однако на сегодняшний день в литературе практически отсутствует описание методик, позволяющих быстро и точно определить среднюю длину нанотрубки, за исключением измерений с помощью СЭМ, АСМ [2,3]. Как правило, эти методы применимы к одиночным УНТ, а также ограничены разрешающей способностью и пространственными ограничениями в случае измерения длинных нанотрубок. Ввиду вышесказанного основной целью данной работы стало развитие метода определения средней длины нанотрубок на основе электрофизических измерений массивов из УНТ.

Сплошной слой случайно ориентированных УНТ толщиной 9 нм и прозрачностью 95% был синтезирован методом аэрозольного химического осаждения, после чего механически переносился на кремниевую, а также кварцевую подложку с предварительно нанесенными парами омических контактов Cr/Au (3 нм/200 нм), расположенных на разном расстоянии.

Слой УНТ на кремниевой подложке был исследован методом сканирующей гелий-ионной микроскопии. Установлено, что слой представляет собой массив не отдельных случайно ориентированных УНТ, а так называемых «жгутов», состоящих из сплетенных нанотрубок. Жгут представляет собой эффективную среду, через которую ток может протекать с меньшими потерями, чем через пересечения одиночных нанотрубок. Таким образом, протекание тока по слою УНТ можно рассматривать, как протекание тока по жгутам или их пересечениям, при этом фактическая длина проводящего канала может отличаться от длины одиночной УНТ. Характерная длина проводящего канала составила ~ 40 мкм. Двухзондовым методом были измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) слоя УНТ, нанесенного поверх пар контактов, расположенных на различном расстоянии друг от друга (5 – 500 мкм) и на основании которых строились зависимость сопротивления от расстояния между контактами. Было обнаружено, что с уменьшением расстояния между контактами возникает область отклонения удельного сопротивления от постоянного значения, предположительно связанная с приближением расстояния между контактами к длине УНТ. Характерная длина проводящего канала, при которой наблюдалось отклонение сопротивления от постоянного значения составила ~ 70 мкм, при фактической длине одиночных УНТ ~ 40 мкм.

Таким образом, предложенная в работе методика может быть использована для простого и быстрого определения средней длины массива УНТ произвольной толщины, а также отдельно лежащих УНТ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-60008.

Список литературы

1. Fraser D. B., Cook H. D. Highly Conductive, Transparent Films of Sputtered $\text{In}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_{3-y}$ // *Journal of the Electrochemical Society*. – 1972. – Т. 119. – №. 10. – С. 1368.
2. Nirmalraj P. N. et al. Electrical connectivity in single-walled carbon nanotube networks // *Nano letters*. – 2009. – Т. 9. – №. 11. – С. 3890-3895.
3. Lyons P. E. et al. The relationship between network morphology and conductivity in nanotube films // *Journal of Applied Physics*. – 2008. – Т. 104. – №. – С. 044302.

Исследование электрофизических и газочувствительных свойств тонких пленок ZnO-SnO_2 , сформированных золь-гель методом

Старникова А. П.¹, Гуляева И.А.¹, Стороженко В.Ю.¹, Волкова М.Г.¹, Баян Е.М.¹, Петров В.В.¹

¹ЮФУ

e-mail: a.starnikova@sfsu.ru

Наиболее распространенными материалами для сенсоров газов в последнее время являются нанокомпозиты на основе полупроводниковых оксидов металлов. Тонкие нанокомпозитные пленки на основе оксидов олова и цинка (ZnO-SnO_2) обладают рядом преимуществ, благодаря своей высокой чувствительности [1].

В данной работе тонкие пленки ZnO-SnO_2 были синтезированы золь-гель методом в мольных соотношениях Sn:Zn равных 100:0; 99:1 и 95:5. В качестве прекурсоров использованы пентагидрат хлорида олова (IV), гексагидрат нитрата цинка и изопропанол. Необходимое количество солей растворяли в изопропанол, после чего наносили трехкратно на предварительно очищенные поликорковые подложки. Температурную обработку осуществляли при 550°C в течение двух часов. После термообработки поверхность пленок наносилась V-Ni контактная металлизация.

Исследование электрофизических свойств образцов пленок проводилось на установке для исследования электрофизических свойств сенсоров газов [2]. Газочувствительные свойства ZnO-SnO_2 пленок исследовались при воздействии NO_2 с концентрацией 5-50 ppm с помощью установки «Микрогаз-ФМ» при рабочих температурах 150, 200 и 250 °C.

Исследование зависимости удельной проводимости пленок от температуры нагрева позволило рассчитать энергию активации проводимости. Для 180-300 °C она составила 0,125; 0,32 и 0,23 для пленок с соотношениями Sn:Zn в них равными 100:0; 99:1 и 95:5, соответственно.

Исследование газочувствительных свойств показало, что чистые золь-гель пленки SnO_2 имеют максимальный отклик при температуре 250°C. Коэффициент газовой чувствительности при воздействии NO_2 с концентрацией 50 ppm составил 97,0. Коэффициент газочувствительности рассчитывался по формуле:

$$S = R_g/R_0$$

где R_g , R_0 – сопротивление сенсора при воздействии и до воздействия газа, соответственно.

Небольшие добавки оксида цинка позволяют снизить рабочую температуру образцов ZnO-SnO_2 пленок до 200°C. У тонких пленок состава 95 SnO_2 :5 ZnO и 99 SnO_2 :1 ZnO показатель газочувствительности составил 64,8 и 68,0, соответственно. Найденные значения коэффициента газочувствительности коррелируют со значениями энергии активации проводимости.

Таким образом, в результате исследования газочувствительных свойств тонких нанокомпозитных пленок ZnO-SnO_2 , сформированных золь-гель методом, обнаружен эффект снижения рабочей температуры при небольших концентрациях оксида цинка. Величина коэффициента газочувствительности ZnO-SnO_2 -пленок коррелирует с энергией активации проводимости.

Список литературы

1. Shmatko V. A. et al. Influence of the surface morphology and structure on the gas-sorption properties of SiO_2CuO_x nanocomposite materials: X-ray spectroscopy investigations // *Physics of the Solid State*. 2015., V. 57, Is. 2. P. 399.
2. Petrov V. V. et al. Investigation of Rapid Gas-Sensitive Properties Degradation of ZnO-SnO_2 Thin Films Grown on the Glass Substrate // *Chemosensors*. 2020. V.8. №2. P. 40.

Лазерный синтез сферических наночастиц нитрида галлия

Черников А. С.¹, Кочув Д. А.¹, Чкалов Р. В.¹

¹ВлГУ

e-mail: an4ny.che@gmail.com

В последние годы повышенный интерес представляет направление, связанное с совершенствованием методов получения наноматериалов прямозонных полупроводников группы $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ (бинарные соединений III и V групп периодической системы) [1, 2]. Одним из таких соединений является нитрид галлия (GaN). Перспективным подходом для получения соединения GaN является применение лазерной абляционной обработки в реакционной среде [3, 4].

В данной работе в качестве источника лазерного излучения используется фемтосекундная Yb:KGW лазерная система (1030 нм, частота 10 кГц, длительность импульса 280 фс, энергия в импульсе 150 мкДж), для сканирования по двум координатам и фокусировки лазерного излучения используется гальваносканатор, оснащенный плоскопольным объективом с фокусным расстоянием 200 мм, в состав экспериментальной схемы входит вакуумная рабочая камера, вакуумная система (турбомолекулярный вакуумный насос) и источник постоянного высокого напряжения. В качестве реакционной среды был использован аммиак. Излучение лазерной системы с помощью гальваносканатора через прозрачное окно для ввода излучения направляется в вакуумную камеру и фокусируется на поверхность мишени. Абляционная обработка осуществляется путем сканирования подложки лазерным лучом по заданной траектории. При фокусировке фемтосекундного лазерного излучения на поверхность мишени происходит распыление поверхностных слоев материала в объеме вакуумной камеры. При взаимодействии излучения с мишенью образуется эрозионно-плазменный факел, компоненты которого осаждаются на расположенные по бокам подложки, к которым подведен ток.

Особенностью используемой схемы является наличие электростатического поля в зоне обработки. Стоит отметить важную роль осуществления процесса лазерной абляционной обработки в электростатическом поле. При абляции фемтосекундными лазерными импульсами в электростатическом поле появляется возможность не только осуществлять эффективный сбор синтезируемых наноматериалов, а также исключать повторное попадание аблированных частиц в область лазерного воздействия [5]. Использование электростатического поля позволяет получать более однородное распределение фракции синтезируемых частиц по сравнению с обычным режимом лазерной абляционной обработки, в процессе которой происходит коагуляции продуктов абляции за счет повторного воздействия лазерным лучом или взаимодействием с лазерным эрозионным факелом.

В результате проведенных экспериментов по фемтосекундной лазерной абляционной обработке были получены сферические наноматериалы GaN, дисперсия полученной фракции составляет 100-250 нм.

Список литературы

1. Mayer, B. et al. (2017, August). Monolithic integration of III-V nanostructures for electronic and photonic applications. In Low-Dimensional Materials and Devices 2017 (Vol. 10349, p. 103490L). International Society for Optics and Photonics.
2. Mikhailova, M. P., Moiseev, K. D., & Yakovlev, Y. P. (2019). Discovery of III–V semiconductors: physical properties and application. *semiconductors*, 53(3), 273-290.
3. Lam, H. M., Hong, M. H., Yuan, S., & Chong, T. C. (2004). Growth of β -Ga₂O₃ nanoparticles by pulsed laser ablation technique. *Applied Physics A*, 79(8), 2099-2102.4.
4. Demirel, A., Öztaş, T., Kurşungöz, C., Yılmaz, İ., & Ortaç, B. (2016). Synthesis of blue-shifted luminescent colloidal GaN nanocrystals through femtosecond pulsed laser ablation in organic solution. *Journal of Nanoparticle Research*, 18(5), 128.
5. Kochuev, D. A. (2020). Formation of Powdered Materials Exposed to Pulsed Laser Radiation in Combination with an Electric Arc Discharge. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 84, 330-335.

Зависимость морфологии поверхности эпитаксиальных пленок топологического изолятора PST от ростовой температуры

Кавеев А. К.¹, Бондаренко Д.Н.¹, Терещенко О.Е.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН

e-mail: kaveev@mail.ioffe.ru

Направление физики твердого тела, связанное с изучением топологических изоляторов, является одним из самых перспективных в области спинтроники, квантовых компьютеров и т.д. Известен класс т.н. кристаллических топологических изоляторов на основе соединений типа $\text{Sn}_x\text{Te}_{1-x}$ и $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, в которых топологическая защищенность поверхностных состояний определяется кристаллической симметрией, а не только симметрией по отношению к обращению времени, как в широко известных ван-дер-Ваальсовых топологических изоляторах. В частности, при значении $x=0.3$ недавно [1] обнаружен переход $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ в состояние топологического изолятора (далее PST). В настоящее время большая часть исследований свойств топологических изоляторов связана с объемными кристаллами и толстыми пленками. При этом актуальной задачей является получение сколь возможно тонких пленок топологических изоляторов с целью избежать эффекта шунтирования проводящих поверхностных состояний объемом. В настоящей работе выяснено, что при нанесении на поверхность (111) кремния пленок PST возможен их эпитаксиальный рост как с использованием флюоритового буферного слоя (CaF_2 , или ранее известного BaF_2), так и без. По аналогии с известным случаем [2] роста PST на поверхности $\text{Si}(001)$, эпитаксиальный рост на поверхности $\text{Si}(111)$ можно объяснить влиянием Sn, который, в силу химической пассивности к кремнию, способствуют лучшей смачиваемости поверхности как $\text{Si}(100)$ так и $\text{Si}(111)$, несмотря на большую величину рассогласования параметров решетки. В зависимости от температуры нанесения морфология поверхности

выращиваемого слоя с увеличением температуры меняется от плотноупакованных островков (150°C) к широким террасам (250°C), а затем – к плоским двумерным островам латерального размера 1-2 микрон и более (350°C), что является рекордным на настоящий момент результатом при выращивании тонких пленок топологических изоляторов [2, 3]. Т.е. происходит переход от режима роста Вольмера-Вебера, к режиму роста Странского-Крастанова. Низкотемпературный случай роста на Si(111) существенно отличается по морфологии от случая роста на Si(001), описанного в [2], где при той же температуре 150°C наблюдается планарный рост. Анализ картин атомно-силовой микроскопии позволил установить среднее значение высоты террас, средний латеральный размер террас и островов. Интересно, что при повышенных температурах на поверхности каждого острова наблюдается ряд моноатомных ступеней. Таким образом, показано, что в зависимости от ростовой температуры можно управлять не только характером морфологии, но и в существенной мере гладкостью поверхности, что крайне важно для дальнейших транспортных измерений пленок данного топологического изолятора. Работа поддержана грантом РФФИ № 21-52-12024.

Список литературы

1. Timothy H. Hsieh, Hsin Lin, Junwei Liu, Wenhui Duan, Arun Bansil & Liang Fu, Topological crystalline insulators in the SnTe material class, Nat. comm., 3, 982 (2012).
2. C. Boschetti, I. Bandeira, H. Closs, A. Ueta, P. Rappl, P. Motisuke, E. Abramof, Molecular beam epitaxial growth of PbTe and PbSnTe on Si(001) substrates for heterojunction infrared detectors, Infr. Phys. And Techn., 42, 91-99 (2001).
3. Walsh, L. A., Hinkle, C. L. (2017). Van der Waals epitaxy: 2D materials and topological insulators. Appl. Mat. Today, 9, 504–515 (2017).

Исследование фотоэлектрохимических свойств фотоанодов на основе массивов нанотрубок анодного оксида титана

Савчук Т. П.¹, Гаврилин И.М.¹, Дронов А.А.¹

¹МИЭТ

e-mail: wewillbe01@gmail.com

Множество работ посвящается разработке стабильных фотоанодов на основе полупроводниковых материалов для фотоэлектрохимического разложения воды на водород и кислород [1]. Одним из наиболее распространённых материалов для фотоанодов является наноструктурированный оксид титана за счет его фотокоррозионной стойкости и удачного расположения потенциала потолка валентной зоны относительно нормального водородного электрода [2]. Зачастую в исследовательских работах в качестве материала фотоанода используют иммобилизированные наноструктурированные порошки оксида титана на проводящей подложке, такой подход требует технологического шага нанесения материала на подложку после синтеза. В свою очередь с помощью метода электрохимического окисления металлов можно получать массивы нанотрубок оксида титана непосредственно на проводящей титановой подложке. Высокоупорядоченные массивы нанотрубок анодного оксида титана (НТАОТ) обладают большой удельной площадью поверхности. Строение нанотрубки такой структуры позволяет лучше разделять фотоиндуцированные носители заряда по сравнению с порошковыми слоями, тем самым увеличивая

эффективность процесса фотоэлектрохимического разложения воды [3]. Однако в настоящее время точно не определено влияние различных составных частей нанотрубки и самого массива нанотрубок сформированного в электролите на основе этиленгликоля на фотоэлектрохимические свойства материала.

В настоящей работе были исследованы фотоэлектрохимические свойства массивов нанотрубок анодного оксида титана в зависимости от времени анодирования. Массивы нанотрубок анодного оксида титана были получены методом электрохимического окисления металлов во фтор содержащем электролите на основе этиленгликоля. Морфология полученных образцов НТАОТ была исследована методом растровой электронной микроскопии. Фотоэлектрохимические свойства материала были исследованы методами фототока и спектроскопии электрохимического импеданса. Эффективность полученных фотоанодов на основе НТАОТ была оценена в процессе фотоэлектрохимического разложения воды на водород и кислород, посредством оценки объема сформированного водорода.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2020-2022 гг. соглашение FSMR-2020-0018.

Список литературы

1. Samuel E. et al. Morphology engineering of photoelectrodes for efficient photoelectrochemical water splitting //Nano Energy. – 2020. – Т. 72. – С. 104648.
2. Schneider J. et al. Understanding TiO_2 photocatalysis: mechanisms and materials //Chemical reviews. – 2014. – Т. 114. – №. 19. – С. 9919-9986.
3. Zarei E., Ojani R. Fundamentals and some applications of photoelectrocatalysis and effective factors on its efficiency: a review //Journal of Solid State Electrochemistry. – 2017. – Т. 21. – №. 2. – С. 305-336.

Методика анализа угловых зависимостей критического тока сверхпроводящих лент

Гурьев В. В.¹, Шавкин С.В.¹, Круглов В.С.¹,

¹НИЦ Курчатовский институт

e-mail: GuryevVV@mail.ru

При эксплуатации сверхпроводниковых устройств, таких как сверхпроводящие магниты, трансформаторы, индуктивные накопители энергии и т.д., сверхпроводящие ленты находятся в магнитном поле различной ориентации. Поэтому при разработке подобных устройств требуется корректный учет анизотропии токонесущей способности лент по отношению к направлению магнитного поля. В простейшем случае, когда магнитное поле ортогонально току, её можно выразить через зависимость $I_c(\theta)$, где θ - угол между магнитным полем и плоскостью сверхпроводящей ленты, I_c – критический ток ленты. На сегодняшний день нет достаточно полной физической модели, позволяющей проводить анализ угловых зависимостей $I_c(\theta)$. На практике зависимости $I_c(\theta)$ описываются чисто математически: сначала описываются отдельные пики зависимости $I_c(\theta)$, затем используется их комбинация с наилучшим подгоном весовых коэффициентов. При таком подходе подгоночные параметры не имеют физического смысла, что затрудняет сопоставление с данными микроструктуры материала и, таким образом, тормозит развитие технологии.

В данной работе мы предлагаем новый метод описания угловых зависимостей критического тока, основанный на ранее разработанной модели анизотропного пиннинга. Показана применимость этой модели для сверхпроводящих Nb-Ti лент, имеющих один пик на зависимости $I_c(\theta)$. В этом случае необходимы два подгоночных параметра, которые имеют смысл отношений глубин и ширин кооперативной потенциальной ямы. Выбор этих подгоночных параметров не является полностью свободным и имеет дополнительные ограничения. Введение таких параметров позволяет охарактеризовать степень анизотропии, проанализировать распределение центров пиннинга и состояние вихревой материи. Обсуждается возможность расширения этой модели для корректного описания и анализа угловых зависимостей с несколькими пиками, характерными для некоторых лент на основе высокотемпературных сверхпроводников.

Анизотропные нанокластеры золота на кристаллических поверхностях GaAs(001), пассивированных азотом или серой: создание, структурная диагностика, плазменная спектроскопия.

Берковиц В. Л.¹, Кособукин В.А.¹, Улин В.П.¹, Алексеев П.А.¹, Солдатенков Ф.Ю.¹, Левицкий В.А.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²НТЦ тонкопленочных технологий

e-mail: vladimir.berkovits@mail.ioffe.ru

Структуры Au/GaAs с нанокластерами золота, благодаря оптическим характеристикам прямозонного GaAs и высокой добротности плазмонов наночастиц Au, обладают большим потенциалом для использования в оптоэлектронике, нанофотонике, фотовольтаике и других областях. Однако создание таких структур является серьезной технологической проблемой из-за того, что золото уже при температурах $\sim 250^\circ\text{C}$ начинает взаимодействовать с GaAs, что приводит к диссоциации полупроводника и внедрению золота в объем кристалла с образованием сплава Au-Ga.

В этой работе показано, что проблема получения совершенных структур Au/GaAs с нанокластерами Au решается путем создания на поверхности подложек GaAs химически стабильных, пассивирующих покрытий из атомов серы или азота, формирующихся при сульфидировании и нитридации в растворах. Сульфидирование в водном растворе сульфида натрия (Na_2S) и последующий отжиг при 400°C приводят к формированию на поверхности GaAs(001) покрытия из атомов серы, связанных с атомами галлия поверхности кристалла. При нитридизации в гидразин-сульфидных растворах на поверхности GaAs(001) возникает покрытие из атомов азота, которые также когерентно связаны с атомами галлия кристалла [1]. Стабильность сульфидного и нитридного покрытий обеспечивается тем, что связи S-Ga и связи N-Ga существенно прочнее, чем связи Ga-As в кристалле. Для создания нанокластеров Au на сульфидированную или нитридизованную поверхность GaAs наносится слой золота толщиной 10 нм. Полученные структуры Au/S/GaAs и Au/N/GaAs подвергаются отжигу при температурах 300°C .

Методом сканирующей зондовой микроскопии установлено, что на поверхности структур обоих типов при отжиге формируются массивы нанокластеров Au, в которых доминируют анизотропные агрегаты в виде цепочек из небольшого (2-4) числа зерен Au,

вытянутых в направлении [1-10] поверхности GaAs(001). Плазмоны, локализованные в кластерах Au, исследовались с помощью спектроскопии отражения поляризованного света. Спектры отражения света с поляризацией E||[110] содержат слабую и относительно узкую особенность при 2.1 эВ. Для света с поляризацией E||[1-10] в спектре отражения наблюдается существенно более интенсивная и широкая особенность вблизи 1.8 эВ. Обнаруженная поляризационная анизотропия плазмонов нанокластеров Au в структурах обоих типов, существенно сильнее, чем наблюдавшаяся ранее анизотропия плазмонов кластеров In в структурах In/InAs [2].

Результаты плазмонной спектроскопии объяснены в модели нанокластеров, имеющих форму сфероидов с длинами полуосей a и b в плоскости (001). Предполагается, что $b \gg a$, т.е. сфероиды (нанокластеры Au) сильно вытянуты в направлении [1-10]. Сделан вывод, что спектральные особенности, наблюдаемые при 1.8 эВ и 2.1 эВ, связаны с анизотропными плазмонами, которые поляризованы соответственно вдоль и поперек цепочек зерен Au, вытянутых в направлении [1-10].

Таким образом показано, что сульфидирование или нитридизация поверхности подложки GaAs(001) перед нанесением пленки золота позволяет избежать химического взаимодействия Au и GaAs и обеспечить формирование массивов нанокластеров чистого золота на поверхности полупроводника. Форма нанокластеров обладает выраженной анизотропией, что свидетельствует об анизотропной диффузии атомов Au на кристаллической поверхности GaAs, сохраненной благодаря сульфидному или нитридного покрытию. Анизотропия формы нанокластеров Au приводит к сильной анизотропии локализованных плазмонов, которой, как ожидается, должны обладать нанокластеры металлов на кристаллической поверхности (001) полупроводников As_2B_5 .

Список литературы

1. V.L. Berkovits V.P.Ulin et. al., J. Electrochem. Soc. 158 (3), D127-D135, (2011)
2. V.L. Berkovits, V.A. Kosobukin et. al., Surf. Sci. 632, L9–L12 (2015)

Субмикронные кристаллические частицы кремния, полученные на нановолокнистом нетканом материале

Захаренко Н. Д.¹, И.С. Ожогин, А.А. Сердобинцев, А.В. Стародубов, И.О. Кожевников, А.М. Павлов.

¹СГУ им. Н. Г. Чернышевского

e-mail: zaharenko_nikita@mail.ru

Для получения субмикронных кристаллических частиц кремния использовались нановолокнистые нетканые материалы, полученные методом капиллярного электроформования из раствора. Были получены нетканые маты из полиамида ПА-6 и полиакрилонитрила (ПАН). Средняя толщина волокна составляла порядка 200 нм. На эти маты методом магнетронного распыления были напылены последовательно слои аморфного кремния и алюминия. В силу волокнистой природы нетканых материалов покрытия представляли собой протяжённые частицы, шириной не превышающие толщины волокна подложки. Затем нановолокнистые подложки с напылёнными слоями подвергали лазерному отжигу импульсным лазером с длиной волны 1064 нм.

Ранее было показано, что такой лазерный отжиг двухслойных структур позволяет кристаллизовать слой кремния [1,2]. Отжиг частиц кремния производится благодаря

верхнему слою алюминия, который поглощает лазерное излучение и нагревает кремний. Отжиг производился при фиксированных параметрах лазера, варьировалась только скорость его перемещения от 100 мм/с до 4000 мм/с. Отжиг производился при каждой скорости на квадратах размером 2*2 мм².

Методом Рамановской спектроскопии было установлено, что при лазерном отжиге происходит кристаллизация кремниевого покрытия на нановолокнистой подложке ПА-6. На подложке ПАН кристаллизованного кремния не обнаружено.

Расчёт внутренних напряжений кремния производился при помощи ранее известной формулы [3], которая основывается на результатах Рамановской спектроскопии. Расчёт выполнялся для каждой кристаллизованной точки исследуемого образца. За эталонное значение положения пика монокристаллического кремния было принято 520 см⁻¹. В итоге было установлено, что кристаллизованные плёнки находятся под растягивающим внутренним напряжением, значение которого составило -0,63 ГПа.

С помощью флуоресцентной и лазерной конфокальной микроскопии была обнаружена флуоресценция поверхности материала с кристаллизованными частицами кремния в диапазоне длин волн, характерном для наноструктурных кремниевых материалов. Данное явление, в частности, может быть применено для создания биохимических сенсоров благодаря большой удельной поверхности создаваемых структур и влиянию сорбированных веществ на результирующий спектр флуоресценции.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 17-79-20243.

Список литературы

1. Alexey A. Serdobintsev, Ilya O. Kozhevnikov, Andrey V. Starodubov, Peter V. Ryabukho, Victor V. Galushka, and Anton M. Pavlov. Scalable Approach for Amorphous Thin Silicon Films Near-IR Laser-Induced Crystallization Using Nickel Absorption Layer // *Phys. Status Solidi A* – 2019, V. 216, Issue 11, 1800964.
2. A. A. Serdobintsev, V. A. Luzanov, I. O. Kozhevnikov, P. V. Ryabukho, D. M. Mitin, D. N. Bratashov, A. V. Starodubov and A. M. Pavlov. Thin amorphous silicon films crystallization upon flexible substrates // *Journal of Physics: Conference Series*, 1400 (2019) 055034.
3. Lengsfeld, P., Nickel, N. H., Genzel, C., & Fuhs, W. (2002). Stress in undoped and doped laser crystallized poly-Si. *Journal of Applied Physics*, 91(11), 9128–9135. doi:10.1063/1.1476083.

Исследование упругих напряжений в конических нанопроводах

Дунаевский М. С.¹, Алексеев П.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: Mike.Dunaeffsky@mail.ioffe.ru

В последние годы большой интерес вызывает исследование влияния механических деформаций на оптические и транспортные свойства полупроводниковых нанопроводов (НП). За счёт изгибов нанопроводов в них можно создавать значительные упругие деформации (до 11 % [1]), что существенно отличает их от объёмных материалов. Вторая важная особенность тонких НП заключается в том, что сила необходимая для их изгиба достаточно мала и может составлять всего несколько наноньютонов. В недавней работе [2]

было показано, что можно на несколько порядков изменять проводимость тонких $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.85$) нанопроводов за счёт их изгиба СЗМ-зондом. Это открывает возможность создания переключателей и чувствительных сенсоров на базе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ нанопроводов.

Стоит отметить, что при изгибах цилиндрических $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ нанопроводов СЗМ-зондом на поверхности возникает упруго деформируемый слой с повышенной проводимостью (что обусловлено сдвигом положения дна зоны проводимости [2]). Величина упругих деформаций ε при этом максимальна у основания нанопровода и линейно спадает $\varepsilon \sim (L-z)$ до нуля вблизи точки приложения силы ($z=L$). Это приводит к тому, что при недостаточно высоких концентрациях индия в нанопроводах может не происходить переключение проводимости. В данной работе проведён поиск оптимальной формы для управления распределением упругих деформаций в НП и повышения эффективности переключения проводимости в нанопроводах.

Выполненные в данной работе расчёты (в рамках континуальной теории упругости) показывают, что распределение упругих деформаций в конических нанопроводах существенно отличается от ситуации в цилиндрических НП. Получено аналитическое выражение для распределения упругих деформаций вдоль длины конического нанопровода. Обнаружено, что при определённых углах коничности в нанопроводах может возникать протяжённая область достаточно высоких деформаций, сопоставимых или даже больших чем деформация $\varepsilon_{\text{base}}$ в основании НП. При достаточно высоких углах коничности область высоких деформаций захватывает практически всю длину нанопровода, что позволяет более эффективно переключать проводимость в таких НП. Стоит также отметить, что создание в НП протяжённых сильно деформированных областей востребовано при исследовании влияния деформаций на оптические и транспортные свойства НП.

Список литературы

1. Wang Y.-B., Wang L.-F., Joyce H. J., Gao Q., Liao X.-Z. et al., Super deformability and Young's modulus of GaAs nanowires, *Adv. Mater.* 23, 1356–1360, (2011)
2. Alekseev P.A., Sharov V.A., Dunaevskiy M.S. et.al., Control of conductivity of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ nanowires by applied tension and surface states, *Nano Letters*, 19, 4463–4469, (2019)

Изучение электропроводящих свойств растворов аспарагината хитозана для получения наночастиц

Луговитская Т. Н.¹, Зудина И.В.², Шиповская А.Б.²

¹УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина

²СГУ им. Н.Г.Чернышевского

e-mail: tlugovitskaja@mail.ru

Полимеры с ионогенными функциональными группами, диссоциирующие в полярной среде на макроион и свободные противоионы (полиэлектролитный режим) [1], находят широкое практическое применение в оптике, наноэлектронике, медицине. Такие полимерные системы могут изменять свои электропроводящие свойства в зависимости от концентрации компонентов, температуры, качества растворителя. Например, снижение полярности среды приводит к усилению электростатических и диполь-дипольных взаимодействий, сопровождающихся ионной ассоциацией макроион–противоион с образованием ионных пар и мультиплетов (иономерный режим) [2], вплоть до формирования

наноструктурированных систем [3, 4]. Перспективным полимером для получения наноразмерных структур путем изменения состояния противоионов рассматривается хитозан. Основными переносчиками тока в растворах хитозана являются противоионы, частично ассоциированные с поликатионом, оценить состояние которых возможно методом кондуктометрии.

Ранее нами сообщалось об условиях растворения хитозана в амфотерной *L*-аспарагиновой кислоте (AspA) с формированием солевого комплекса в виде аспарагината хитозана [5]. В настоящей работе приводятся результаты исследования электропроводности водного раствора аспарагината хитозана в широком диапазоне концентраций компонентов и температур, а также разработанный на их основе способ формирования нано- и микрочастиц.

Использовали хитозан ($\sim\text{NH}_2$) производства ЗАО «Биопрогресс», AspA – ЗАО «Био-амид», дистиллированную воду (H_2O) и этиловый спирт (EtOH, 95.6%). Растворы аспарагината хитозана с концентрацией полимера $(0.2\text{--}1.8) \cdot 10^{-2}$ М, концентрацией кислоты $(1.5\text{--}3.0) \cdot 10^{-2}$ М и молярным соотношением $[-\text{NH}_2 : \text{AspA}] = 0.07 : 0.60$ готовили согласно работе [5]. Электропроводность измеряли на кондуктометре Анион 4120 при 288–333 К. Для получения частиц в раствор полимера при перемешивании добавляли по каплям EtOH, либо распыляли раствор полимера на поверхность EtOH в объемном соотношении компонентов $[\sim\text{NH}_2 + \text{AspA} + \text{H}_2\text{O}] : [\text{EtOH}] = 1 : 1 - 1 : 5$. Образцы частиц сушили до воздушно-сухого состояния и анализировали на SEM MIRA\\LMU при напряжении 30 кВ и проводящем токе 400 пкА.

В результате проведенных исследований установлено:

- молярная электрическая проводимость уменьшается с повышением концентрации аспарагината хитозана в растворе вследствие снижения подвижности свободных противоионов под действием электростатического потенциала поликатиона;

- условные константа $(8.2 \cdot 10^{-4})$ и степень диссоциации солевой формы хитозана соответствуют мало диссоциирующим полиэлектролитам;

- количество противоионов, способных к переносу заряда, и их подвижность увеличиваются с повышением температуры; энергия активации электропроводности составляет 12.0 кДж/моль;

- в водной среде наряду с макрокатионом сосуществуют свободные и ассоциированные противоионы и реализуется смешанный полиэлектролитно-иономерный режим; при понижении полярности среды введением этилового спирта происходит ассоциация противоионов с заряженными звеньями макроцепи и переход макромолекул в иономерное состояние с последующим агрегированием мультиметов и формированием частиц твердой фазы;

- размер и форма частиц хитозана определяется способом введения этилового спирта: при диспергировании EtOH в объеме раствора полимера формируются анизодиаметричные частицы субмикронного и микронного размера (0.5 – 1.1 мкм); при диспергировании раствора полимера на границе раздела EtOH – воздух формируются наноразмерные частицы (50 – 80 нм) правильной сферической формы.

Таким образом, варьируя полярностью среды можно регулировать электропроводящие свойства раствора аспарагината хитозана и создавать наноразмерные структуры. Полученные нано- и микрочастицы могут быть перспективны для создания оптических датчиков, сенсоров, хемомеханических материалов, в медико-биологических приложениях.

Список литературы

1. Е. V. Volkov, O. E. Filippova, A. R. Khokhlov. Coll. J., 66, 6, 663–668 (2004).
2. Е. Y. Kramarenko, A. R. Khokhlov. Polym. Sci. Ser. A, 49, 9, 1053–1063 (2007).

3. O. E. Philippova, E. V. Korchagina, E. V. Volkov, V. A. Smirnov, A. R. Khokhlov, M. Rinaudo. *Carbohydr. polym.*, 87, 1, 687-694 (2012).
4. G. Kravanja, M. Primožič, Ž. Knez, M. Leitgeb. *Molecules*, 24, 10, 1960 (2019).
5. T. N. Lugovitskaya, I. V. Zudina, A. B. Shipovskaya. *Rus. J. Appl. Chem.*, 93, 1, 80-88 (2020).

Влияние обработки подложки Si фокусированными ионными пучками на эпитаксиальный рост GaAs

Ерёменко М. М.¹, Черненко Н.Е.¹, Балакирев С.В.¹, Солодовник М.С.¹, Агеев О.А.¹

¹ИНЭП ЮФУ

e-mail: mmeremenko@gmail.com

На сегодняшний день создание эффективных светоизлучающих устройств на кремнии является трудноразрешимой задачей [1]. Это связано с тем, что кремний является полупроводником с непрямой запрещенной зоной. В то же время, полупроводниковые материалы III/V, в частности GaAs, из-за их оптических характеристик широко используются для создания высокоэффективных элементов оптоэлектроники и нанофотоники. Несмотря на то, что монолитная интеграция источников излучения света на основе структур III/V с кремниевой технологией представляет собой достаточно сложную задачу, ее решение могло бы позволить создание фотонных интегральных схем, совместимых с современной кремниевой КМОП технологией [1, 2].

В данной работе представлены результаты проведенных исследований эпитаксиального роста GaAs на Si с аморфизированными участками. Эпитаксиальный рост проводился с использованием системы молекулярно-лучевой эпитаксии SemiTEq STE35 с твердотельными источниками. Для эпитаксиального роста использовались подложки Si(001) с областями $5 \times 5 \text{ } \mu\text{m}^2$, аморфизированными обработкой фокусированным пучком ионов Ga⁺ (ФИП) при различных дозах имплантации. Доза имплантации варьировалась от 1 до 21 пКл/мкм², сила тока составляла 1 пА. Удаление естественного окисла с поверхности Si проводилось при 900°C в вакууме в течение 30 минут. Затем был нанесен высокотемпературный (600°C) буферный слой GaAs со скоростью роста 0,1 МС/с.

Для определения оптимального режима ФИП обработки морфология поверхности эпитаксиальных структур была исследована методами растровой электронной и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Результаты анализа параметров структур GaAs/Si методами АСМ позволили выявить закономерности влияния дозы имплантации на шероховатость участков модифицированной поверхности Si кристаллитами GaAs и их высоту относительно исходной поверхности. Как показал анализ зависимостей с увеличением дозы имплантации ионов Ga от 1 до 7 пКл/мкм² шероховатость выращенных структур уменьшается с 55 до 23 нм. Однако, вне зависимости от величины тока пучка при увеличении дозы имплантации с 7 до 21 пКл/мкм² шероховатость увеличивается от 23 до 37 нм.

Величина тока и дозы имплантации также сказываются на высоте структур GaAs/Si относительно исходной поверхности в области модификации (перепад высот). С ростом дозы ионов высота слоя GaAs уменьшается на 8 нм, что обусловлено травлением поверхности в процессе ионно-лучевой обработки. Полученные значения хорошо коррелируют с данными АСМ-анализа исходных поверхностей (непосредственно после аморфизации).

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показывают, что формирование структур GaAs происходит преимущественно на модифицированных участках Si ионами Ga⁺. Исследование влияния параметров ФИП-обработки поверхности Si на рост GaAs позволило определить оптимизированный набор параметров тока (1 пА) и дозы имплантации ионов Ga⁺ (7 пКл/мкм²) для достижения минимальной шероховатости при меньших толщинах осаждения. Несмотря на то, что дефектность выращенного слоя GaAs велика, использование зародышевых слоев и техника многоступенчатого роста буферных слоев позволит обеспечить гладкий двумерный интерфейс.

Работа была поддержана грантом Российского научного фонда № 20-69-46076. Результаты были получены с использованием инфраструктуры Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

Список литературы

1. M. Tang, J-S. Park, Z. Wang *et al.* // Progress in Quantum Electronics, V. 66, 1-18 (2019).
2. M. Liao, S. Chen, Z. Liu *et al.* // Photonics Research, V. 6, 1062 (2018).

Изучение диффузии алюминия в тонких пленках аморфного кремния под воздействием лазерного излучения

Солодовникова С. О.¹, Волковойнова Л.Д.¹, Сердобинцев А.А.¹, Стародубов А.В.¹,
Кожевников И.О.¹, Павлов А.М.¹

¹СГУ им. Н. Г. Чернышевского

e-mail: svetulia1904@mail.ru

Данная работа посвящена исследованию механизма диффузии алюминия в тонких пленках кремния под воздействием разных режимов лазерного отжига. Стимулированная лазером диффузия используется для создания полупроводников с электронно-дырочным переходом. Данный метод заключается в том, что на поверхность пластины наносится тонкий слой легирующего элемента, а затем поверхность облучается импульсным лазерным пучком [1]. Подобные переходы образуются на границе двух разных типов проводимости и играют огромную роль в создании полупроводниковых приборов, в том числе и солнечных батарей [2], которые являются эффективным и экологичным источником энергии, генерируемой из возобновляемых природных ресурсов.

В настоящей работе исследовались образцы кремниевых плёнок на стеклянной подложке. В качестве легирующего элемента использовался алюминий. Оба слоя были получены методом магнетронного распыления. Затем полученная двухслойная структура подвергалась импульсному лазерному облучению с длиной волны 1064 нм. Подробнее процесс получения и лазерной обработки образцов описан в работах [3,4]. В ходе данной работы были проведены исследования нескольких образцов методами вторично-ионной масс-спектрометрии и комбинационного рассеяния света.

Профили распределения алюминия по толщине кремниевых плёнок могут быть отнесены к двум различным типам. Для малой мощности лазерного облучения концентрация алюминия плавно спадает с ростом глубины. Подобная картина характерна для диффузии с неограниченным или бесконечным источником [5]. Результаты спектроскопии комбинационного рассеяния свидетельствуют об аморфной структуре таких кремниевых плёнок.

Для образцов, полученных при повышенной мощности лазерного облучения, профиль алюминия имеет максимум на определённой глубине. Другими словами, концентрация алюминия максимальна в некоторой области под поверхностью кремниевой плёнки. В этом случае наблюдаемые профили характерны для диффузии с ограниченным источником [5]. В то же время обнаружено, что кремниевые плёнки с таким профилем распределения алюминия имеют поликристаллическую структуру.

Полученные результаты открывают возможности для получения поликристаллических плёнок кремния с контролируемым профилем легирования на изолирующих, полупроводниковых и проводящих подложках. Формирование материалов с управляемым (например, градиентным) изменением свойств (в частности, проводимости) по толщине также представляется перспективным для создания сверхтонких поглотителей электромагнитных волн, в том числе на основе метаматериалов [6].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 20-07-00929.

Список литературы

1. Смирнов В. И. Физико-химические основы технологии электронных средств: учебное пособие. - Ульяновск: Изд-во УЛГТУ. 2005. – 111 с.
2. N. Palina, T. Mueller, S. Mohanti and A. G. Aberle, «Laser assisted boron doping of silicon wafer solar cells using nanosecond and picosecond laser pulses,» 2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Seattle, WA, USA, 2011, pp. 002193-002197, doi: 10.1109/PVSC.2011.6186392.
3. Alexey A. Serdobintsev, Ilya O. Kozhevnikov, Andrey V. Starodubov, Peter V. Ryabukho, Victor V. Galushka, and Anton M. Pavlov. Scalable Approach for Amorphous Thin Silicon Films Near-IR Laser-Induced Crystallization Using Nickel Absorption Layer // Phys. Status Solidi A – 2019, V. 216, Issue 11, 1800964.
4. A. A. Serdobintsev, V. A. Luzanov, I. O. Kozhevnikov, P. V. Ryabukho, D. M. Mitin, D. N. Bratashov, A. V. Starodubov and A. M. Pavlov. Thin amorphous silicon films crystallization upon flexible substrates // Journal of Physics: Conference Series, 1400 (2019) 055034.
5. М. А. Королёв, Т. Ю. Крупкина, М. А. Ревелева. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. Ч. 1. Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование. Под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Бином. 2012. – 397 с.
6. D. Sood, C.C Tripathi. A wideband ultrathin low profile metamaterial microwave absorber. // Microw. Opt. Technol. Lett. 57 (2015) 2723-2728.

Эволюция кристаллографической текстуры в сплавах системы Cu-Zn, подвергнутых интенсивной пластической деформации

Зайнуллина Л. И.¹, Ситдилов В.Д.¹, Александров И.В.¹

¹УГАТУ

e-mail: ZaynullinaLI@yandex.ru

На сегодняшний день равноканальное угловое прессование (РКУП) является наиболее привлекательным методом интенсивной пластической деформации (ИПД), позволяющим формировать ультрамелкозернистые (УМЗ) состояния с улучшенными физико-механическими свойствами в различных металлических материалах [1,2]. Повышенный

уровень прочностных свойств этих материалов в той или иной мере определяется такими параметрами, как малый размер зерен, преимущественно высокоугловой характер спектра разориентировок границ зерен, высокая плотность внесенных дефектов и развитая кристаллографическая текстура. Последний параметр определяет важнейшие эксплуатационные свойства металлов и сплавов, являясь во многих случаях основным фактором, способствующим достижению в них наилучшего уровня физико-механических свойств.

Характер сформированных в результате пластической деформации преимущественных кристаллографических ориентировок зависит от активности тех или иных дислокационных систем скольжения (СС) или двойникования (СД). Активность СС и СД решающим образом зависит от величины энергии дефекта упаковки (ЭДУ) материала, температуры и степени деформации [3]. Хорошо известно, что при холодной плоской прокатке крупнозернистых металлических материалах с ГЦК-решеткой в зависимости от ЭДУ формируются два различных типа кристаллографической текстуры. В материалах с повышенной ЭДУ в основном формируются текстуры типа «меди» $\{111\}<112>$, а при уменьшении ЭДУ происходит переход к текстуре типа «латуни» $\{110\}<112>$ [4].

Анализ литературных источников показал, что анализ влияния ЭДУ на формирование кристаллографической текстуры в УМЗ материалах, активность СС и СД, уровень и анизотропию прочностных свойств при РКУП проведен недостаточно и является актуальной задачей. Исходя из этого, целью данной работы явилось исследование эволюции кристаллографической текстуры и установление активных СС и СД в чистой меди и ее сплавах с различной ЭДУ при РКУП.

Образцы чистой меди с ЭДУ $78 \text{ мДж} \cdot \text{м}^{-2}$ подвергали РКУП по маршруту В_с [5] при комнатной температуре, а образцы медных сплавов Cu-10 вес.% Zn с ЭДУ $35 \text{ мДж} \cdot \text{м}^{-2}$ и Cu-30 вес.% Zn с ЭДУ $14 \text{ мДж} \cdot \text{м}^{-2}$ при температурах 150 °С и 300 °С, соответственно. Число проходов при РКУП равнялось восьми.

Для построения полных полюсных фигур и функций распределения ориентировок, а также для определения типа и объемной доли идеальных кристаллографических ориентировок использовали программный пакет Labotex [6].

В рамках экспериментальных исследований и компьютерного моделирования с использованием вязкопластической самосогласованной модели пластического течения материала установлены закономерности формирования преимущественных ориентировок, количественно оценена доля тех или иных текстурных компонент, выявлены действующие СС и СД при РКУП меди и медных сплавов в зависимости от ЭДУ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-33-90109 и финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта 0838-2020-0006 «Фундаментальное исследование новых принципов создания перспективных электромеханических преобразователей энергии с характеристиками выше мирового уровня, с повышенной эффективностью и минимальными удельными показателями, с использованием новых высокоэффективных электротехнических материалов».

Список литературы

1. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V., Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Progress in Materials Science*, V. 45, 103-189, 2000,
2. Horita Z., Fujinami T., Langdon T.G., The Potential for scaling ECAP: Effect of sample size on grain refinement and mechanical properties, *Mater. Sci. Eng.*, A318, 34, 2001,
3. Jamaati R., Toroghinejad M.R., Effect of stacking fault energy on deformation texture development of nanostructured materials produced by the ARB process, *Materials Science & Engineering A*, V. 598., 263–276, 2014,

4. Almajid A.A., El-Danaf E.A., Soliman M.S., Effect of combining plane-strain compression with equal channel angular pressing on mechanical properties and texture development in an Al alloy, J Mater Sci., V. 44., 5654–5661, 2009,
5. Valiev R.Z., Langdon T.G., Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, Prog. Mater. Sci., 881, 2006,
6. www.labosoft.com

Текстурообразование в крупнозернистом и ультрамелкозернистом сплаве Cu-0,5Cr при плоской прокатке

Саркеева Е. А.¹, Ситдииков В. Д.¹, Александров И. В.¹

¹ФБГОУ ВО «УГАТУ»

e-mail: sarkeeva.e@inbox.ru

Медные сплавы системы Cu-Cr широко применяются в качестве электротехнических материалов, благодаря высоким электро- и теплопроводности в сочетании с замечательной пластичностью [1].

Применение методов интенсивной пластической деформации (ИПД) позволяет значительно повышать прочностные свойства металлических материалов, в том числе сплавов системы Cu-Cr, за счет формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры, характеризующейся размером зерен в десятки-сотни нанометров и преимущественно высокоугловыми границами зерен [2].

Плоская прокатка является технологическим процессом, используемым для придания заготовкам геометрической формы листов или лент. Плоская прокатка сопровождается эволюцией микроструктуры и свойств сплавов как в крупнозернистом (КЗ) состоянии, так и в УМЗ состоянии [3].

Старение дисперсионно-твердеющих сплавов системы Cu-Cr обеспечивает повышение электропроводности, как в исходном КЗ состоянии, так и в УМЗ состоянии, как следствие освобождения твердого раствора от атомов Cr. В результате формируется комплекс привлекательных прочностных и электрических свойств данных сплавов, особенно в УМЗ состоянии [4].

Процессы плоской прокатки и ИПД сопровождаются активными процессами текстурообразования [5]. Сформировавшиеся кристаллографические текстуры оказывают значительное влияние на уровень и анизотропию прочностных свойств, в результате активизации тех или иных систем скольжения (СС) и систем двойникования (СД) и формирования преимущественных кристаллографических ориентировок зерен. В то же время результаты подобных исследований применительно к сплавам системы Cu-Cr в научной литературе не представлены.

В настоящем докладе приведены и проанализированы результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования процессов эволюции кристаллографической текстуры в КЗ и УМЗ состояниях медного сплава Cu-0,5(вес.%)Cr, подвергнутом плоской прокатке со степенями обжатия 40%, 60%, 80% и 95% при комнатной температуре. УМЗ заготовки были получены с использованием ИПД, реализованной в результате 4 проходов равноканального углового прессования (РКУП) по маршруту В_с при комнатной температуре [3].

Экспериментальные исследования кристаллографических текстур проводили с использованием рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima, оснащенного многофункциональной текстурной приставкой. Текстуры различных исследованных структурных состояний представляли в виде полюсных фигур (ПФ) и функций распределения ориентировок (ФРО).

Анализ ПФ и ФРО позволил установить характер изменения преимущественных ориентировок (Brass, Goss, Copper, Cube, S, Rotated Cube) в зависимости от степени обжатия при плоской прокатке. Моделирование кристаллографических текстур с учетом упрочнения материала и вариации скалывающих напряжений сдвига позволило установить действующие системы скольжения и/или двойникования при прокатке КЗ и УМЗ сплава. При этом верификацию экспериментальных и смоделированных текстур осуществляли в результате сопоставления вида ПФ и объемной доли Brass, Goss, Copper, Cube, S, Rotated Cube ориентировок. По полученным двумерным проекциям контуров текучести, модулей Юнга и коэффициентов Ланкфорда сделаны выводы об уровне и анизотропии прочностных свойств сплава, прокатанного в КЗ и УМЗ состояниях.

Список литературы

1. Осинцев В. Н., Федоров О. Е., Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник М., Машиностроение, 336, 2004
2. Wei W., Wei K. X., Du Q. B., Hu J., Musin F. F., Alexandrov I. V., Strength and electrical conductivity of bulk nanostructured Cu and Cu-based alloys produced by SPD, Handbook of mechanical nanostructuring, 115-141, 2015
3. Валиев Р. З., Александров И. В., Объемные наноструктурные материалы: получение, структура и свойства, Москва: Академкнига, 271, 2007
4. Alexandrov I. V., Sitdikov V. D., Abramova M. M., Sarkeeva E. A., Wei K. X., Wei W., Microstructure evolution in a Cu-0,5Cr-0,2Zr alloy subjected to equal channel angular pressing, rolling or aging, Journal of Materials Engineering and Performance, volume 25, № 10, 4303-4309, 2016
5. Alexandrov I. V., Bonarski J., Korshunov A., Tarkowski L., Sitdikov V. D., Homogeneity of the crystallographic texture and deformation behaviour in Cu and Ti under severe plastic deformation, Archives of metallurgy and materials, volume 53, N. 1, 237-242, 2008

Исследование кинетики релаксации заряда в полиэтилене с нанонаполнителями

Павлов А. А.¹, Камалов А. М., Борисова М. Э., Грешняков Г. В.

¹СПбПУ

e-mail: pavlov.aa.hv@mail.ru

На сегодняшний день развитие промышленных отраслей прежде всего зависит от создания современных материалов, которые должны соответствовать возрастающим требованиям производства. Высоковольтная энергетика не является исключением: постоянно возникают новые цели и задачи, для достижения которых необходимы диэлектрические материалы с улучшенными свойствами.

В данной работе исследуются процессы накопления и релаксации заряда в композиционных материалах на основе полиэтилена, которые планируется использовать в

кабельных муфтах высокого напряжения с целью выравнивания электрического поля разделки кабеля.

Для выравнивания поля в подобных конструкциях необходимы материалы с высокой электрической проводимостью. С целью повышения проводимости полиэтилена в него были добавлены одностенные углеродные нанотрубки (ОСУНТ).

Объектом исследования является композиционный материал на основе полиэтилена высокого давления. Образцы в виде дисков и пленок изготовлены в институте высокомолекулярных соединений РАН. Диаметр дисковых образцов – 2 см, толщина – 2 мм. Ширина пленки – 25-30 мм, толщина от 50 до 120 мкм.

Исходные материалы – полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) Бареалис 4423 и концентрат одностенных нанотрубок (10%) в воске (90%) – TUBALL™ MATRIX 801 (OCsial). Лабораторные образцы были получены литьем из расплава.

В работе изучалась зависимость проводимости композита от процентного содержания нанонаполнителя. Образцы пленок с ОСУНТ имели 0%, 0.1%, 0.2% и 2% наполнителя соответственно. Диски с ОСУНТ были представлены с 0%, 1% и 2% наполнителя.

В результате проведенных испытаний изучена кинетика релаксации заряда в кабельном полиэтилене в зависимости от процентного содержания наполнителя. Измерения проведены в интервале температур от 50 до 90°C.

Установлено, что скорость релаксации заряда растет с увеличением процентного содержания углеродных нанотрубок. С ростом температуры скорость релаксации заряда также растет. Основываясь на полученных данных, для создания композитных материалов с заданными характеристиками можно варьировать концентрацию наполнителя.

Полученные в ходе выполнения данной работы результаты были проанализированы с использованием современных представлений о роли собственной проводимости в процессе релаксации заряда [1-3].

Список литературы

1. Борисова М.Э., Койков С.Н. Физика диэлектриков –Л.: Изд-во ЛГУ, 1979
2. Борисова М. Э., Галюков О. В. Физика диэлектрических материалов. Электроперенос и накопление заряда в диэлектриках. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004
3. Борисова М.Э. Физика диэлектриков. Физические основы диэлектриков. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014

Исследование оптических свойств эпитаксиальных гранатовых пленок, активированных Ce^{3+}

Васильева Н. В.¹, Спасский Д.А.^{2,4}, Куросава Ш.³, Омельков С.И.⁴, Кочурихин В.В.⁵,
Васильев Д.А.⁶

¹Московский Политех

²НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова

³Университет Тохоку, Сендай, Япония

⁴Институт физики Тартуского университета, Тарту, Эстония

⁵Корпорация C&A, Сендай, Япония

⁶ИОФ РАН

e-mail: natasha@myprism.ru

Эпитаксиальные гранатовые пленки, активированные ионами Ce^{3+} обладают высокими сцинтилляционными свойствами, которые позволяют применять их в качестве

быстрого люминофора в конструкции электронно-оптического преобразователя типа ПИФ-01, а также сцинтилляционного экрана для визуализации рентгеновских изображений [1-3]. Пленки выращивают методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденных растворов-расплавов на монокристаллических подложках. При жидкофазном синтезе пленок в их состав входят примесные ионы растворителя. В данной работе синтез осуществлялся на подложках $Gd_3Ga_5O_{12}$, $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}$ and $Y_3Ga_5O_{12}$ из растворов-расплавов на основе $PbO-B_2O_3$ и $Bi_2O_3-B_2O_3$. В этом случае примесными ионами являются ионы Pb^{2+} и Bi^{3+} соответственно.

Целью данного исследования являлось сравнение оптических свойств выращенных эпитаксиальных пленок $(Pb,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$ и $(Bi,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$.

В спектрах оптического поглощения пленок, измеренных при комнатной температуре, присутствовали полосы поглощения ионов Pb^{2+} , Gd^{3+} , Bi^{3+} и Ce^{3+} . В спектре поглощения эпитаксиальной пленки $Pb_{0,01}Ce_{0,02}Gd_{2,97}Al_{3,13}Ga_{1,87}O_{12}$ наблюдалась широкая полоса в интервале 260 – 290 нм, соответствующая электронному переходу $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ в ионах Pb^{2+} ($6s^2$ -конфигурация), и узкая полоса с максимумом на 273 нм, соответствующая переходу $^8S_{7/2} \rightarrow ^6I_{7/2}$ в ионах Gd^{3+} . Также наблюдались две широкие полосы поглощения в диапазонах 328 – 348 нм, соответствующие $4f-5d$ межконфигурационным электронным переходам в ионах Ce^{3+} ($4f^1$ -конфигурация). В спектре поглощения эпитаксиальной пленки $Bi_{0,14}Ce_{0,14}Gd_{2,72}Al_{4,99}Ga_{0,01}O_{12}$ наблюдались следующие полосы: широкая полоса в интервале 254 – 310 нм, соответствующая электронному переходу $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ в ионах Bi^{3+} ($6s^2$ -конфигурация), и две дополнительные широкие полосы поглощения в диапазонах 320 – 350 нм и 415 – 525 нм, соответствующие переходам $4f-5d_2$ и $5d_1$ в ионах Ce^{3+} . Был обнаружен сдвиг полосы поглощения $4f-5d_1$ в ионах Ce^{3+} на 25 нм в пленке $Bi_{0,14}Ce_{0,14}Gd_{2,72}Al_{4,99}Ga_{0,01}O_{12}$ по сравнению с максимумом этой полосы в пленке $Pb_{0,01}Ce_{0,02}Gd_{2,97}Al_{3,13}Ga_{1,87}O_{12}$. В исследованных пленках наблюдалась фотолюминесценция ионов Ce^{3+} . Сравнение спектров фотолюминесценции показало наличие сдвига максимума полосы на 13 нм в длинноволновую часть спектра с 570 нм для пленки $Pb_{0,01}Ce_{0,02}Gd_{2,97}Al_{3,13}Ga_{1,87}O_{12}$ до 583 нм для пленки $Bi_{0,14}Ce_{0,14}Gd_{2,72}Al_{4,99}Ga_{0,01}O_{12}$. На спектрах возбуждения фотолюминесценции Ce^{3+} наблюдались полосы, соответствующие полосам поглощения уровней $5d_2$ и $5d_1$ ионов Ce^{3+} , а также полосы поглощения ионов Pb^{2+} , Gd^{3+} и Bi^{3+} , что свидетельствует о передаче энергии от ионов Pb^{2+} и/или Gd^{3+} и Bi^{3+} и/или Gd^{3+} к ионам Ce^{3+} . Катодолюминесцентные измерения пленки $Pb_{0,01}Ce_{0,02}Gd_{2,97}Al_{3,13}Ga_{1,87}O_{12}$ показали световой выход около 43100 фотонов/МэВ и времена затухания 1.8 (1%), 24 (25%) и 60 нс (74%). Исследование сцинтилляционных свойств этой пленки показало, что сцинтилляционный световой выход составил около 20000 фотонов/МэВ и времена затухания - 3.9 (7%) и 43.6 нс (93%).

По результатам исследования оптических свойств эпитаксиальных пленок $(Pb,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$ и $(Bi,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}$ был сделан вывод о перспективности их использования в качестве люминофоров и сцинтилляционных экранов.

Список литературы

1. Д.А. Васильев, К.А. Верещагин, А.К. Верещагин, Д.А. Спасский, В.О. Соколов, А.В. Хахалин, Н.В. Васильева, А.М. Галстян, В.Г. Плотниченко, Влияние ионов Al на оптические и кинетические свойства эпитаксиальных пленок $(Pb,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce$, Прикладная физика, 4, 5-9 (2015).
2. D.A. Vasil'ev, D.A. Spassky, Sh. Kurosawa, S.I. Omelkov, N.V. Vasil'eva, V.G. Plotnichenko, A.V. Khakhalin, V.V. Voronov, V.V. Kochurikhin, Epitaxial growth of Ce-doped $(Pb,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12}$ films and their optical and scintillation properties, Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 5, 95-103 (2020).

3. M.S. Alekhin, J. Renger, M. Kasperczyk, P.-A. Douissard, T. Martin, Y. Zorenko, D.A. Vasil'ev, M. Stiefel, L. Novotny, M.J. Stipanoni, STED properties of Ce³⁺, Tb³⁺, and Eu³⁺ doped inorganic scintillators, Optics express 25, 1251- 1261 (2017).

Резистивное переключение в наноструктурированных слоях LiTaO₃

Белов А. Н.¹, Солнышкин А.В.², Пестов Г.Н.¹

¹МИЭТ, ²ТвГУ

e-mail: nanointech@mail.ru

В нейроморфных архитектурах для проектирования искусственных нейронов на основе КМОП - технологии обычно используется, реализация искусственных синапсов, что представляет собой серьезную проблему. Фактически, синапсы превосходят по численности нейроны на 3-4 порядка, поэтому для создания их прототипов требуются устройства с высокой плотностью и малым энергопотреблением. Более того, для интеграции их с нейронами на основе КМОП, они должны быть совместимы со стандартными процессами технологии микроэлектроники. В качестве элементов подобных систем перспективными являются устройства с резистивным переключением или мемристоры. Благодаря структурной простоте и масштабируемости мемристоры обладают огромным потенциалом для таких приложений как оперативная память и нейроморфные вычисления. Мемристоры могут обеспечивать низкую мощность, необходимую для этих приложений, и, следовательно, расширять вычислительные возможности будущих вычислительных систем. Они с высокой плотностью могут быть размещены в узлах сетки перекрестных проводящих шин, известной как кроссбар. Реализация такой структуры позволит обеспечить поверхностную плотность, большую чем у синапсов в ткани мозга. К тому же нейроморфные системы, основанные на мемристорных кроссбарах, имеют потенциал для работы с энергоэффективностью на 6-8 порядков выше, чем у традиционных процессоров. Одним из ограничений этих систем является текущее состояние мемристорной технологии. По мере развития мемристоров для систем энергонезависимой памяти эта технология вынудила разработать элемент, который может переключать весь свой диапазон сопротивления настолько быстро и надежно, насколько это возможно, чтобы обеспечить максимально быстрый доступ к памяти. Идеальный мемристор для нейроморфных вычислительных систем должен иметь несколько доступных уровней сопротивления, которые обеспечивают программируемый аналоговый диапазон сопротивления. Эффектом резистивного переключения обладает множество материалов. Среди них ниобат и танталат лития являются потенциальными кандидатами для создания на их основе нейроморфных вычислительных приложений. Эти материалы используются при создании элементов оптоэлектроники, а также обладают пьезоэлектрическими свойствами.

В настоящей работе представлены результаты по созданию мемристорных кроссбаров на основе танталата лития с использованием матрицы пористого наноструктурированного оксида кремния. Были исследованы вольтамперные характеристики элементов. Особое внимание было уделено программированию мемристивных ячеек импульсами напряжения и тока.

Метод получения композиционных материалов на динамической платформе из магнитоуправляемых частиц

Шорсткий И. А.¹, Соснин М.Д.¹

¹Кубанский государственный технологический университет

e-mail: thegector@mail.ru

Создание новых видов композиционных материалов с заданной упаковкой частиц на больших площадях представляет собой актуальную научно-прикладную задачу. Внутренняя архитектура массива частиц имеет важное значение для материалов-абсорберов электромагнитного излучения, применяемых для экранирования и защиты квантовых компьютеров, радиоаппаратурой техники, микроэлектроники. В настоящее время известны материалы-поглотители с различной морфологией, содержащие одномерную (1D; нанопроволоки, наночастицы), двумерную (2D; чешуйки, нанодиски) и трехмерную (3D; трубки, сферу с вискерсами, похожую на ежа) структуры упаковки частиц [1–3]. Дополнительно, управление архитектурой массива частиц позволяет влиять на прочностные и физико-механические свойства композиционных материалов (прочность на сжатие, пористость, плотность и пр.). Особое значение управление архитектурой массива частиц приобретает в нано-масштабных системах.

В работе представлен метод формирования объёмных массивов магнитоуправляемых частиц Fe и Fe₃O₄ с помощью вращающегося постоянного магнитного поля (ВПМП), для создания материалов с заданной укладкой массива частиц. Процесс формирования основан на магнитно-дипольном взаимодействии сферических намагничиваемых частиц из Fe₃O₄, что при внешнем воздействии вращающегося постоянного магнитного поля позволяет создавать высокоупорядоченные объёмные массивы. Находясь внутри постоянного магнитного поля магнитные частицы-диполи ориентируются вдоль силовых линий магнитного поля и перемещаются при его смещении [4]. На основе этого принципа сформированы плоские и объёмные массивы частиц с заданной структурой упаковки.

Для полученных композиционных материалов на основе магнитоуправляемых частиц Fe и Fe₃O₄ определены спектры поглощения и отражения электромагнитных излучений в сверхвысокочастотном диапазоне. На основе полученных данных проведено сопоставление данных с известными литературным и данными аналогичных исследований без применения ВПМП. Дополнительно проведен анализ состава частиц методом рентгено фазового анализа и анализ морфологии структуры массивов частиц.

Таким образом применение метода формирования композиционных материалов с вращающимся магнитным полем постоянных магнитов позволило получить композит с плотной упаковкой частиц, в котором реализуется принцип самоорганизации монослоев магнитных частиц.

Список литературы

1. Y. Li, K. Pan, G. Wang, N. Fan, X. Miao. Synthesis and photoluminescence properties of perovskite KMgF₃. Journal of Materials Research. 2011, 22, 2867-2870 p.
2. Serebryannikov S. V. Romyancev P. A., Cherkasov A. P., Eremcova, L. L. Magnetodielectric microwave radiation absorbers on the basis of ferrimagnetic compounds. Electricity, 2013, №. 11, 36-40p.
3. X.F. Zhang, X.L. Dong, H. Huang, B. Lv, J.P. Lei, C.J. Microstructure and microwave absorption properties of carbon-coated iron nanocapsules. Choi. J. of Physics D: App. Ph. 2017, 7, 5383-5388 p.

4. Shorstkii I, Yakovlev N. Synthesis of magnetically controlled Fe₃O₄ composites and their enhanced microwave absorption properties. *Mater. Res. Express*. 2019, 6, 046104.

Structure of GaN grown from vapor phase on seeded layer of gallium melt

Мынбаева М. Г.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: mgm@mail.ioffe.ru

Since the beginning of the “nitride revolution” in optoelectronics and solid-state illumination, real progress in improving the quality of nitride epitaxy has been expected from achievements in GaN substrate production. However, the existing technologies for the synthesis of single crystals of gallium nitride are still technologies of a high level of complexity, and the resulting material is extremely expensive. The dimensions of the plates obtained from bulk ingots are still far from meeting the needs of the mass production of devices. The development of alternative cost-effective approaches to the synthesis of bulk material, or a material close to it in properties, providing controlled growth, high purity, stoichiometric composition and type of crystal structure of the resulting products is an urgent task. Earlier, we have shown that large-area flat GaN slabs with a few millimeter thicknesses can be obtained by the chloride – hydride method (HVPE) on ceramic substrates. The grown material is a semiconductor with n-type conductivity with thermal and mechanical properties close to those of single-crystal GaN produced by conventional bulk growth techniques [1]. X-ray diffractometry and transmission electron microscopy (TEM) studies showed that the material represented a highly ordered [0001] wurtzite GaN texture or polycrystalline structure [2]. In those works, it was noted that nucleation process of GaN on ceramics differed significantly from the process of layer nucleation during epitaxy on traditional semiconducting or sapphire substrates, and occurs with the participation of the liquid phase of gallium melt. In the present work, two mechanisms of formation of bulk gallium nitride material with two different types of structures are proposed. Both mechanisms are realized under conditions of high gallium supersaturation in the growth zone. The saturation is supported by the presence of an additional Ga source in the liquid phase, which is formed as a result of the segregation of gallium delivered from the primary gaseous gallium chloride source. The probability of the growth proceeding according to the certain mechanism is determined by the conditions under which the initial stages of GaN nucleation and growth are occurring. The particular type of GaN structure formed depends on the character of spreading of liquid gallium over non-wettable surface of the substrate [3]. If gallium segregates in the form of droplets, then a polycrystalline structure is formed according to a mechanism similar to the vapor–liquid–solid (VLS) crystallization [4]. If the liquid phase forms a film, the growth of gallium nitride proceeds according to the van der Drift mechanism [5], and as a result, a c-GaN texture is formed.

Список литературы

1. Мынбаева М. Г., Печников А. И., Ситникова А. А., Кирilenko Д. А., Лаврент’ев А. А., Иванова Е. В., Николаев В. И., Large-area crystalline GaN slabs, *Technical Physics Letters*, Vol. 41, 246-248, 2015.

2. Dermeneva M., Muravijova D., Mynbaeva M., Bougrov V., Yagovkina M., Application of XRD methods for the pilot studies of new functional materials for photonics, Journal of Physics - Conference Series, Vol. 1124, 081008, 2018.
3. Zoltai L., Prediction of wettability between liquid metals and covalent ceramics, An-yagok Vilaga, Vol. 2, 3, 2001.
4. Gerlach J.W., Ivanov T., Neumann L., Höche Th., Hirsch D., Rauschenbach D., Epitaxial GaN films by hyperthermal ion-beam nitridation of Ga droplets, Journal of Applied Physics, Vol. 111, 113521, 2012.
5. van der Drift A., Evolutionary selection, a principle governing growth orientation in vapour-deposited layers, Philips Research Reports, Vol. 22, 267-288, 1967.

Разработка лабораторного стенда искрового спекания пористого кремния

Мирошниченко О. В.¹, Спивак Ю.М.¹, Мошников В.А.¹

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: olegmir97@mail.ru

Введение

Мультимодальные пористые материалы с несколькими уровнями пор, то есть микро-мезо-макропористые (М-М-М) материалы имеют эффективность выше, чем другие материалы того же состава: в работе [1] пористые микросферы с диаметром 6-8 мкм с иерархической структурой и высокой удельной площадью поверхности ($57 \text{ м}^2/\text{г}$) продемонстрировали адсорбционную способность выше, чем другие различные материалы.

Пористый кремний с иерархическим строением перспективен для применения в качестве компонента анода литий-ионных аккумуляторов или контейнера пролонгированной доставки лекарственных веществ [2]. Например, кремний в качестве компонента источника энергии накапливает ионы с высокой плотностью хранения энергии, причем скорость накопления выше, чем у аналогичных материалов анодов, а пористая структура препятствует разрушительным процессам в кремнии, которые происходят в процессе заряда и разряда аккумуляторов [3]. Так, в работе [2] показана возможность создания макропористого кремния методом холодной компрессии и последующего спекания. В данной работе для получения многоуровневой пористости предлагается использовать в качестве исходного материала порошок пористого кремния, а в качестве метода его консолидации — искровое спекание. Предполагается, что это позволит получить материал с высокой удельной площадью поверхности. Таким образом, целью данной работы является разработка лабораторного стенда для получения микро-мезо-макропористого кремния методом искрового спекания.

Разработка конструкции стенда

В работе предлагается лабораторный стенд, состоящий из генератора мощных импульсов с возможностью регулировки подаваемого тока и напряжения, а также частоты и длительности подаваемых импульсов и непосредственно ячейки, где располагаются образцы. Прессованная заготовка находится в кварцевой трубке, зажата высокопроводящими графитовыми электродами.

В нашем лабораторном стенде используется метод искрового спекания, который характеризуется коротким мощным разрядом. Основное преимущество — подавление роста

зерна, что особенно актуально для наноразмерных порошков, и возможность спекания образцов на воздухе без применения защитной атмосферы из-за кратковременности воздействия.

Отработка технологических режимов

В качестве материала для апробации стенда выбраны порошки монокристаллического кремния марки КЭФ-4,5 (111) и наночастицы пористого кремния, полученные из кремния КЭФ 4,5 (111) методом электрохимического анодного травления с последующим измельчением ультразвуком. Наночастицы пористого кремния, полученные в выбранных условиях, представляют собой мезо-макропористый кремний с характерным размером мезопор порядка 15-40 нм и макропор 60-80 нм. Наночастицы пористого кремния округлой формы с типичным размером диаметра порядка 500-600 нм [4, 5].

Требуется работа по поиску подходящих параметров спекания, ведь слишком высокие токи приведут к потере формы частичек и термодиффузионному залечиванию пор при спекании. Из предварительных результатов можно предполагать следующие параметры спекания. Предполагаемый размер спекаемой массы будет иметь диаметр от 5 до 10 мм, а толщина 3 мм. Напряжение и ток импульсов выбирается исходя из параметров спекания керамики, то есть напряжение от 0 до 20В, разрядный ток от 1 А до 10 кА [6-8]. Длительность токовых импульсов 0.5–2 с, паузы между импульсами 0.5–2 с, длительность высокотемпературной фазы спекания можно определить только для конкретного материала [9-11]. Оптимальные параметры спекания наночастиц пористого кремния будут исследованы в ходе дальнейшей работы.

Заключение

Разработана конструкция и реализован лабораторный стенд для получения пористого кремния методом искрового спекания. Отработаны технологические условия (разрядный ток, длительность импульсов) и получены серии пористых материалов их порошков кремния и пористого кремния. Оценка параметров полученных пористых материалов (удельная площадь поверхности, распределение пор по размерам) проводится методом тепловой десорбции азота (по БЭТ) и капиллярной конденсации.

Список литературы

1. Synthesis of hierarchical porous zinc oxide (ZnO) microspheres with highly efficient adsorption of Congo red / C. Lei, M. Pi, C. Jiang et al. // J. of Colloid and Interface Sci. 2017. Vol. 490. P. 242–251.
2. Е.В. Астрова, В.Б. Воронков, А.В. Нащекин и др. Получение пористого кремния путем спекания нанопорошка // Физика и техника полупроводников – 2019 – том 53 – вып. 4 – С. 540–550
3. Enevate's Silicon Anodes Could Yield EV Batteries That Run 400 km on a 5-Minute Charge // <https://spectrum.ieee.org/energywise/energy/batteries-storage/enevates-silicon-anodes-could-give-batteries-that-run-400-km-on-a-5minute-charge> (дата обращения: 17.11.2020)
4. Ю.М. Спивак, А.О. Белорус, А.А. Паневин и др. Пористый кремний как наноматериал для дисперсных транспортных систем направленной лекарственной доставки ко внутреннему уху // ЖТФ, 2018. Т. 88. Вып. 9. С. 1394-1403
5. Белорус А.О., Мараева Е.В., Спивак Ю.М. Современные методы анализа параметров пористой структуры материалов. Исследование порошков пористого кремния методом капиллярной конденсации // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2015. Т. 2. С. 11-14.

6. А. Ш. Асварова, А. Э. Муслимова, А. К. Ахмедов и др. Лабораторная установка искрового плазменного спекания керамических и композиционных материалов // Приборы и техника эксперимента – 2019 – Вып. 5 - С. 138–142
7. Е.А.Олевский, Е.В.Александрова, А.М.Ильина и др. Электроконсолидация порошковых материалов. I. Методы низковольтной и высоковольтной консолидации // Физика и химия обработки материалов – 2013 – Вып. 2 - С.53–64
8. Болдин М.С. Физические основы технологии электроимпульсного плазменного спекания: электронное учебно-методическое пособие. Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
9. Field Assisted Sintering Technology (“FAST”) for the consolidation of innovative materials, J. Hennicke, H.U. Kessel, cfi/Ber.DKG 81 [11] (2004) E14-E16.
10. Электроискровое спекание // <http://www.hydro.nsc.ru/technology/techn4.php> (дата обращения: 08.10.2020)
11. Анненков Ю. М., Акарачкин С. А. и Ивашутенко А. С. Физический механизм искрового плазменного спекания керамики // “Бутлеровские чтения”. <http://butlerov.com/readings/> (поступила в редакцию 20 апреля 2012 г.)

Исследование режимов осаждения Ga_2O_3 при газофазной эпитаксии

Сахаров А. В.¹, Лундин В.В.¹, Родин С.Н.¹, Сахаров А.В.¹, Артеев Д.С.¹, Елисеев И.А.¹,
Давыдов В.Ю.¹, Смирнов А.Н.¹, Цацульников А.Ф.², Яговкина М.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²НТЦ Микроэлектроники РАН

e-mail: val.beam@mail.ioffe.ru

Оксид галлия является крайне перспективным новым полупроводниковым соединением: его большая ширина запрещенной зоны (4.9 эВ), в сочетании с большим значением напряжения пробоя (6–8 МВ/см) [1,2], делает этот материал интересным для применений как в устройствах силовой электроники, так и в УФ-чувствительных фотодиодах.

Эпитаксиальный рост Ga_2O_3 может производиться различными методами: молекулярно-пучковой эпитаксией, хлоридной газофазной эпитаксией или газофазной эпитаксией из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС). При этом ГФЭ МОС обеспечивает наилучшее сочетание приемлемо высокой скорости роста и возможности формирования приборных гетероструктур. В качестве источника III группы при росте оксида галлия может использоваться как триэтилгаллий, так и триметилгаллий, но использование последнего реагента позволяет достичь больших скоростей роста [3], до 6 мкм/час при сохранении высокого качества материала, что важно при создании приборных структур.

Основной целью данной работы было исследование режимов формирования тонких плёнок Ga_2O_3 методом ГФЭ МОС. Рост производился на сильно модернизированный установке Epiquip VP-50 RP. Был изготовлен новый инжектор прекурсоров, позволяющий раздельно вводить в реактор прекурсоры III и VI группы. В данном исследовании в качестве прекурсоров использовались триметилгаллий (ТМГ) и кислород. Рост производился на подложках сапфира (0001) и кремния (111) с подслоем AlN. Исследовалась зависимость скорости роста и качества материала от потоков реагентов III и VI группы и температуры подложки. Полученные плёнки исследовались методами рентгеновской дифрактометрии (РД), оптического пропускания и комбинационного рассеяния света (КРС).

В зависимости от условий роста сформированные пленки оксида галлия были аморфными или кристаллическими. В случае роста кристаллической фазы формировался β -Ga₂O₃ без примеси других политипов, что подтверждается данными РД и КРС. Спектр КРС от эпитаксиальной пленки по числу и положению фононных мод полностью совпадает со спектром объемного β -Ga₂O₃ [4]. Исследования режимов роста показали, что скорость роста растет с температурой в диапазоне 500-700 С, с выходом на насыщение в диапазоне температур 700-800 С. При этом скорость роста линейно зависит от потока ТМГ во всем диапазоне исследованных температур. Это показывает, что снижение скорости роста при снижении температуры связано со снижением скорости реакции синтеза материала, а не с пассивацией поверхности, как в случае низкотемпературного роста GaN [5]. При высоких температурах (775 С) скорость роста слабо зависит от потока кислорода, однако при снижении температуры подложки до 700 С уменьшение потока кислорода приводит к снижению скорости роста, при этом при больших потоках ТМГ и малом отношении реагентов VI и III группы растет аморфный материал с высоким содержанием углерода, а при большом отношении реагентов VI и III группы формируется кристаллический эпитаксиальный слой.

Таким образом, в результате выполненных исследований были определены оптимальные режимы роста, позволяющие проводить эпитаксию кристаллического оксида галлия со скоростью роста до 2 мкм/час при использовании ТМГ в качестве источника реагентов III группы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-52-80033. РД исследования выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях», поддержанного Минобрнауки России (Уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0018).

Список литературы

1. M. Orita et al., Appl. Phys. Lett. 77(25), 4166 (2000).
2. M. Higashiwaki et al., Appl. Phys. Lett. 100(1), 013504 (2012).
3. G. Seryogin et al., Appl. Phys. Lett. 117, 262101 (2020).
4. Ch. Kranert et al., Scientific Rep. 6, 35964 (2016).
5. W.V. Lundin et al., Mater Sci Forum 264-2, 1125 Part 1-2 (1998).

Ab initio расчеты электронной структуры графена на поверхности Co₂FeSi

Лобанова Е. Ю.¹, Михайленко Е.К.^{2,3}, Дунаевский С.М.^{2,3}, Гребенюк Г.С.⁴

¹ИТМО

²ЛЭТИ

³ПИЯФ

⁴ФТИ

e-mail: elobanova@itmo.ru

Графен является одним из наиболее популярных двумерных материалов, что обусловлено его выдающимися характеристиками, которые делают его привлекательным материалом для различных технологических применений. В частности, материалы на основе графена и ферромагнитных металлов перспективны для применений в спинтронных устройствах. Такие материалы могут синтезированы путем интеркаляции графена, полученного

одним из стандартных методов, атомами ферромагнитных металлов и кремния. Так, показано, что с использованием этого подхода могут быть получены ферромагнитные силициды железа и кобальта под графеном, выращенным методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) [1], а также сублимации карбида кремния [2]. На основе ферромагнитных силицидов возможен и синтез сплавов Гейслера под графеном. Интерфейсы графен/сплав Гейслера могут быть в дальнейшем использованы как для инъекции спин-поляризованных электронов в графен, так и в устройствах магнитной памяти с повышенной плотностью записи. Предварительная информация о их электронной структуре и магнитных свойствах может быть получена из первых принципов.

Целью настоящей работы были *ab initio* расчеты электронной структуры графена на поверхности сплава Гейслера Co_2FeSi .

Все вычисления выполнены методом функционала плотности (DFT) с использованием пакета Quantum ESPRESSO [3]. Энергия обрезки плоских волн была выбрана равной 100 Ry. Было использовано обобщенно-градиентное разложение (GGA) и псевдопотенциалы PAW. Для интегрирования в обратном пространстве зона Бриллюэна была разбита на $8 \times 8 \times 1$ k -точек по алгоритму Monkhorst-Pack. При оптимизации геометрии учитывалось дисперсионное взаимодействие. Для удобства интерпретации данных полученные волновые функции были разложены в базисе атомных орбиталей.

Сначала был смоделирован исходный сплав Co_2FeSi со стандартной ячейкой и кубической решеткой Браве. Постоянная решетки была выбрана равной 5.64 Å в соответствии с данными работы [4]. Полученная электронная структура находилась в соответствии с литературными данными. Для моделирования интерфейса графен/ Co_2FeSi была выбрана гексагональная решетка Браве и расположение графена на грани $\text{Co}_2\text{FeSi}(111)$, так как оно соответствует симметрии графена. Суперячейка для моделирования интерфейса графен/ $\text{Co}_2\text{FeSi}(111)$ состояла из слоя графена размером 3×3 ячейки (18 атомов C) и слоя Co_2FeSi (18 атомов Co, 9 атомов Fe и 9 атомов Si). Величина вакуумного промежутка составила 15 Å.

Самосогласованные расчеты были проведены для случаев, когда графен был помещен на металлическую (FeCo) и силицидную (SiCo) поверхности. В первом случае оптимизация геометрии показала, что графен оказывается гофрированным, расстояние атомами углерода и железа составило 2.15 Å, что соответствует типичным расстояниям между графеном и металлом. В этом случае взаимодействие графена с подложкой определяется гибридизацией p состояний атомов углерода и d состояний металла. Гибридизированные состояния углерода находятся на 2 эВ ниже уровня Ферми, как и в интерфейсе графен/Co(0001). В случае, когда графен лежит на кремнии, расстояние между ним и подложкой оказывается равным 3.15 Å, что соответствует графену на силициде кобальта. Графен оказывается квазисвободным, и конус Дирака в его электронной структуре сохраняется. Спиновая поляризация на уровне Ферми составляет 75% для интерфейса графен/ Co_2FeSi и 86% для объемного Co_2FeSi . Величины магнитных моментов в объемном кристалле и на границе интерфейса отличаются незначительно.

Таким образом, в настоящей работе проведены первопринципные расчеты зонной структуры системы графен/ Co_2FeSi и показано, что большая величина спиновой поляризации в ней сочетается с линейной дисперсией π -состояний графена.

Авторы работы выражают благодарность центру обработки данных НИЦ "Курчатовский институт" - ПИЯФ за предоставленные ресурсы.

Список литературы

1. G. S. Grebenyuk et al. Applied Surface Science, 470, 840, 2019.
2. М.В. Гомоюнова и др. Физика твердого тела, 60 (7), 1423-1430, 2018.

3. O. Andreussi et al. Journal of Physics: Condensed Matter, 29, 09, 2017.
4. S. Wurmehl et al. Applied Physics Letters, 88 (3), 032503, 2006.

Формирование силицидов кобальта под графеном, выращенным на поверхности карбида кремния.

Гребенюк Г. С.¹, Лобанова Е. Ю.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Университет ИТМО

e-mail: georgijmail@gmail.com

В течение последних пятнадцати лет графен является одним из наиболее исследуемых материалов благодаря его уникальным свойствам, которые представляют огромный интерес как для фундаментальной науки, так и для практического применения. Перспектива интеграции графена в современные приборы сильно зависит от способности синтезировать и модифицировать графен на подходящей подложке, которая не будет ухудшать его электронные, оптические и термические свойства. Эпитаксиальный рост на карбиде кремния дает возможность формирования высококачественного графена на полупроводниковой подложке. Однако, в процессе роста графена возникают сложности из-за химических процессов на поверхности SiC, которые ухудшают его свойства. Например, эпитаксиальный графен может быть выращен на поверхности SiC(0001) с заданной толщиной и морфологией, однако наличие электронно-неактивного «буферного слоя» вызывает пониженную подвижность носителей в эпитаксиальном графене по сравнению со свободным графеном [1]. Одним из возможных путей решения этой проблемы является пассивирование «буферного слоя» другими атомами. Использование в качестве замещающих буферных слоев пленок силицидов кобальта, позволит не только получить квазисвободный графен, но и исследовать влияние интеркалированных атомов на электронные свойства графена.

Графен на поверхности карбида кремния формировался методом термического разложения поверхности SiC в среде инертного газа (аргона) [2]. Пленки силицидов кобальта под графеном выращивались методом интеркалирования графена последовательно атомами кобальта и кремния. Эксперименты были проведены на фотоэмиссионной станции RGL-PES Российско-Германского канала на синхротроне BESSY II (г. Берлин). Они были выполнены *in situ* в условиях сверхвысокого вакуума. Интеркалирование графена кобальтом и кремнием проводилось путем нанесения на поверхность образцов атомов соответствующих материалов и последующего отжига пленок при различных температурах в течение 10 min. Толщина напыляемых пленок контролировалась с помощью кварцевых микровесов и варьировалась в диапазоне 0.1 - 2 nm. Контроль элементного и химического состава поверхности образцов, а также их атомного строения проводился методами фотоэлектронной спектроскопии высокого энергетического разрешения и дифракции медленных электронов (ДМЭ). Исследование магнитных свойств пленок кобальта и силицидов кобальта, сформированных под графеном, проводилось *in situ* методом магнитного линейного дихроизма (МЛД) в угловом распределении остовных $Co\ 3p$ электронов.

На первом этапе синтеза силицидов кобальта графен интеркалировался атомами кобальта. Показано, что отжиг пленок Co , напыленных на графен при комнатной температуре, не приводит к интеркалированию графена кобальтом. Формирование интеркаляционной системы графен-кобальт-SiC обнаружено при нанесении атомов Co на образцы,

нагретые до температур выше $\sim 400^\circ\text{C}$. Этим способом под графеном сформированы пленки кобальта толщиной до 2 нм и показано, что они намагничиваются вдоль поверхности при толщинах более 1.3 нм. На втором этапе синтеза графен интеркалировался атомами кремния. Обнаружено, что атомы Co и Si, нанесенные на нагретые образцы, проникают под графен и локализуются между буферным слоем и подложкой, что приводит к трансформации буферного слоя в дополнительный слой графена. В результате происходит формирование под двухслойным графеном твердого раствора Co–Si и силицида CoSi, покрытых поверхностной фазой Co_3Si . Продемонстрирована возможность изменения толщины и состава формируемых силицидных пленок варьированием количества интеркалируемых материалов и очередности их нанесения. Синтезированные силициды при этом защищены графеном от воздействия окружающей среды.

Авторы выражают признательность В.Ю. Давыдову, И.А. Елисееву, С.П. Лебедеву и А.А. Лебедеву за возможность использования изготовленных и аттестованных ими образцов.

Список литературы

1. M. Beshkova, L. Hultman, R. Yakimova, *Vacuum* 128, 186-197 (2016).
2. В.Ю. Давыдов, Д.Ю. Усачёв, С.П. Лебедев, А.Н. Смирнов, В.С. Левицкий, И.А. Елисеев, П.А. Алексеев, М.С. Дунаевский, О.Ю. Вилков, А.Г. Рыбкин, А.А. Лебедев. ФТП 51, 1116 (2017).

Симметричные особенности сортировки углеродных нанотрубок

Коневцова О. В.¹, Рошаль Д.С.¹, Дмитриев В.П.^{1,2}, Рошаль С.Б.¹

¹ЮФУ

²SNBL/ESRF, Гренобль, Франция

e-mail: khelgla@yandex.ru

Вектор хиральности задает оптические, термические, механические и электронные свойства одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) и однозначно определяет нанотрубки, подходящие для создания композитных материалов в энергетике и биомедицине, микро- и оптоэлектронике. Однако существующие в настоящее время методы синтеза не позволяют полностью контролировать хиральность ОУНТ и не обеспечивают получение ОУНТ высокой чистоты и в достаточных количествах. Это привело к появлению большего количества методов сортировки предварительно полученных ОУНТ по их структурным параметрам [1]. На наш взгляд, путь к более эффективной сортировке открывается за счет использования тех органических молекул, которые по еще не понятным причинам проявляют глубокое сродство к ОУНТ только с определенными структурными параметрами.

Анализируя известные примеры молекул флавиновой группы и 2,4-дихлорфеноксикислоты, мы впервые показали, что это сродство зависит от способности молекул соразмерно оборачиваться вокруг ОУНТ [2]. Другими словами, функционализирующие молекулы могут формировать на поверхности сортируемых ОУНТ регулярные периодические сверхструктуры, соразмерные с их трубчатой решеткой. Соразмерность обеспечивает уменьшение свободной энергии образующейся двухслойной системы и делает покрытие намного более стабильным [2]. Размеры функционализирующих молекул и

возможность образования между ними определенных химических связей обуславливают геометрические ограничения на относительное расположение молекул вокруг нанотрубки. Установленная корреляция между размером молекулы и вектором хиральности ОУНТ является основным критерием образования соразмерного покрытия. Дополнительным критерием является возможность ориентации осаждающихся молекул в определенных направлениях сотовой углеродной решетки. Предложенная теория однозначно объясняет известные экспериментальные результаты по формированию спиральных структур из молекул флавиновой группы вокруг ОСУНТ и указывает на другие органические молекулы и полимеры, пригодные для эффективной сортировки УНТ. Разработанные критерии позволяют прогнозировать молекулярные покрытия пригодные для эффективной сортировки нанотрубок. Также наш подход выглядит многообещающим для понимания недавних результатов [3], согласно которым несколько типов органических молекул могут одновременно участвовать в сортировке углеродных нанотрубок. Разработанные геометрические принципы могут существенно улучшить и упростить молекулярно-динамическое моделирование образования покрытий.

Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант РФФИ 18-29-19043 мк.

Список литературы

1. Zheng M., Sorting Carbon Nanotubes, Top. Curr. Chem., 375, 13, 2017.
2. Konevtsova O. V., Roshal D. S., Dmitriev V. P. , & Rochal S. B., Carbon nanotubes sorting due to commensurate molecular wrapping, Nanoscale, 12(29), 15725-15735, 2020.
3. Zhang P., Yi W., Bai L., Tian Y. , Hou J., Jin W., Si J., Hou X., Enrichment of large-diameter semiconducting single-walled carbon nanotubes by a mixed-extractor strategy, Chemistry–An Asian Journal, 14(21), 3855-3862, 2019.

Изготовление и комплексное исследование LAFe на основе УНТ методом PECVD с островковым катализатором

Чумак М. А.¹, Рокачева А.А.¹, Филатов Л.А.¹, Колоско А.Г.², Филиппов С.В.², Попов Е.О.²

¹СПбПУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: equilibrium2027@yandex.ru

В данной работе предлагается новая концепция технологии роста вертикально ориентированных углеродных нанотрубок (vertical oriented carbon nanotubes – VACNT). Метод использует двухзонный по рабочей температуре CVD (Chemical vapor deposition) процесс с пиролизом ферроцена для формирования островковой плёнки катализатора (Fe) на подложке SiO₂/Si. На этой плёнке затем выращивается массив VACNT технологически надёжным методом DC-PECVD (Direct current plasma-enhanced CVD).

Классический метод создания островков заключается в формировании исходной плёнки катализатора (например, методами магнетронного [1] или электроннолучевого осаждения [2]) и последующего отжига этого слоя.

В предложенном методе рост островков происходит непосредственно в ходе осаждения металла на подложку. Контроль плотности и размеров островков осуществляется

вариацией параметров CVD процесса. Подобный подход можно встретить в литературе, например [3].

Дополнительным плюсом разрабатываемой методики может служить технологическая возможность проведения последовательных стадий получения катализатора и трубок в одном реакторе для CVD, что никогда ещё не рассматривалось. Это исключит этап перезагрузки образцов, а значит и неконтролируемое старение катализатора. Воспроизводимость процесса получения готовых структур существенно возрастет.

Целью данной работы является характеристика структуры и изучение автоэмиссионных свойств образцов, полученных описанной выше методикой.

Топография изготовленного образца была исследована при помощи SEM до и после проведения автоэмиссионных опытов (диаметр нанотрубок ~ 25 нм).

Созданная структура является проводящей и может быть применена в качестве многоострийного полевого катода [4]. Такого вида катоды являются перспективной заменой энергоёмких и инерционных термокатодов в таких вакуумных устройствах, как усилители электрических сигналов (travelling wave tubes – TWT), дисплеи высокой контрастности, рентгеновские аппараты, фотоэлектрические преобразователи, электронные микроскопы, системы электронной нанолитографии и т.д. [5].

Опыты по изучению автоэмиссионных свойств изготовленного образца были проведены с помощью уникальной компьютеризированной методики многоканального сбора и онлайн обработки данных под управлением LabVIEW [6]. Методика регистрирует: «быстрые» вольт-амперные характеристики (ВАХ), картины распределения эмиссионных центров по поверхности катода (т.н. картины свечения), а также уровень вакуума (не хуже 10^{-7} Торр).

На первом этапе измерений образец подвергался тренировке высоким напряжением. Затем, на относительно стабильном уровне эмиссионного тока проводилась серия стандартных измерений (предназначенных для составления паспорта опытного образца и его сравнительного анализа с другими эмиттерами).

Произведена оценка стабильности уровня тока 150 мкА ($St = 90\%$). Зарегистрирована серия «быстрых» ВАХ при разных уровнях напряжения. Анализ ВАХ с применением теста Форбса [7] показал, что созданный эмиттер подчиняется классическому закону полевой эмиссии Фаулера-Нордгейма. В режиме онлайн по «быстрым» ВАХ рассчитаны эффективные параметры (коэффициент усиления поля γ_{eff} и площадь эмиссии A_{eff}), построена и проанализирована статистика их флуктуаций: при 150 мкА $\langle \gamma_{eff} \rangle \sim 10^3$ и $\langle A_{eff} \rangle \sim 10^4$ нм².

С помощью системы компьютеризированного полевого эмиссионного проектора получена и проанализирована картина свечений. Определено положение основного набора эмиссионных центров, их количество ($N_{sites} = 45$ при 150 мкА) и оптимальная эмиссионная активность.

Адекватность проведённых оценок эффективности полевого эмиттера подтверждена их численной корреляцией параметра A_{eff} с результатами моделирования (модель полусферы на цилиндре с параметрами исследуемых VACNT).

В результате опытов было показано, что созданный по заявленной CVD технологии образец является перспективным прототипом полевого катода, заслуживающим дальнейшей технологической оптимизации.

Список литературы

1. Chhowalla M., Teo K. B. K., Ducati C., J. Rupesinghe N. L., Amaratunga G. A. J., Ferrari A. C., Roy D., Robertson J. and Milne W. I. *J. Appl. Phys.*, Vol. **90** (10), 2001, 5308-5317

2. Jeong K. Y., Jung H. K. and Lee H. W. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* Vol. **22**, 2012, 712–716
3. Kumar M., Kakamu K., Okazaki T. and Ando Y. *Chemical Physics Letters*, Vol. **385**, 2004, 161–165
4. Giubileo F., Bartolomeo A. D., Iemmo L., Luongo G. and Urban F. *Appl. Sci.*, Vol. **8** (4), 2018, 526, 21
5. Milne W. I., Teo K. B. K., Amaratunga G. A. J., Legagneux P., Gangloff L., Schnell J. –P., Semet V., Thien Binh V. and Groening O. *J. Mater. Chem.* Vol. **14** (6), 2004, 933 – 943.
6. Popov E. O., Kolosko A. G., Filippov S.V., Terukov E. I., Ryazanov R. M., Kitsyuk E. P. *J. Vac. Sci. Technol. B: Nanotechnology and Microelectronics*, Vol. **38** (4), 2020, 043203-1-9
7. Forbes R. G. 2019 Cite as: arXiv preprint arXiv:1905.12764

Фокусировка диаметров в ансамблях нитевидных нанокристаллов фосфида галлия при эпитаксиальном росте на подложках кремния без литографической подготовки

Бердников Ю. С.^{1,2}, Н.В. Сибирев¹, В. В. Фёдоров², С. В. Федина², Г. А Сапунов², А. Д. Большаков², И.С. Мухин²

¹СПбГУ

²Академический университет им. Ж.И. Алферова

e-mail: yury.berdnikov@gmail.com

Нитевидные нанокристаллы (ННК) фосфида галлия (GaP) обладают рядом свойств, позволяющих использовать их в качестве основных элементов для целого ряда оптоэлектронных устройств. Развитая боковая поверхность ННК делает их чувствительными к примесям, адсорбирующимся на боковой поверхности, что позволяет создавать высокочувствительные сенсоры на их основе [1,2]. Малый поперечный размер и высокая гладкость боковых граней позволяет использовать GaP ННК в качестве естественных оптических резонаторов, в том числе для генерации второй гармоники оптического излучения [3]. Для применений в качестве активных оптических элементов важной является возможность синтеза GaP ННК в вюрцитной фазе с прямой запрещенной зоной, в отличие от непрямозонной объемной фазы GaP со структурой цинковой обманки [4,5]. Для большинства применений ННК ключевой является однородность поперечного размера ННК в ансамбле, обеспечивающая однородность их физико-химических свойств. В данной работе представлено теоретическое и экспериментальное исследование методов, позволяющих достичь высокой степени однородности диаметров в результате эпитаксиального роста GaP ННК по механизму «пар-жидкость-кристалл».

Как правило, эпитаксиальный рост GaP ННК проводят либо с использованием золотого катализатора, либо методом селективной эпитаксии [4,6]. В первом случае возможно нежелательное встраивание примесных атомов золота в полупроводниковую структуру, второй же подход требует сложной и дорогостоящей литографической подготовки поверхности, масштабирование которой до размеров всей ростовой подложки крайне затруднительно. В данной работе исследуется так называемый «самокаталитический» синтез GaP ННК методом молекулярно-пучковой эпитаксии, в котором в качестве

катализатора выступает капля галлия. Такой подход позволяет избежать использование золота или другого стороннего катализатора. Также мы показываем возможность такого синтеза на подложках Si (111) без использования литографической маски.

Моделирование роста показало, что высокая однородность поперечных размеров ННК в нашем подходе достигается благодаря стабилизации диффузионного и адсорбционного потоков атомов Ga и P при определенном значении диаметра ННК. Ранее подобный эффект (так называемой «фокусировки» диаметров) наблюдался для системы материалов GaAs [7], но для ансамблей GaP ННК ранее подробно описан не был. В работе показано как теоретически, так и экспериментально, что в рамках такого подхода можно управлять диаметром GaP ННК, меняя соотношение потоков галлия и фосфора.

Таким образом, представлен метод управляемого синтеза однородных ансамблей GaP ННК, востребованных в оптоэлектронных устройствах благодаря высокой однородности поперечных размеров (а значит и свойств) без проведения предварительной литографической подготовки подложки.

Список литературы

1. Chen X. et al. Nanowire-based gas sensors // *Sensors Actuators B Chem.* Elsevier B.V., 2013. Vol. 177. P. 178–195.
2. Lard M., Linke H., Prinz C.N. Biosensing using arrays of vertical semiconductor nanowires: mechanosensing and biomarker detection // *Nanotechnology.* IOP Publishing, 2019. Vol. 30, № 21. P. 214003.
3. Fedorov V. V. et al. Gallium Phosphide Nanowires in a Free-Standing, Flexible, and Semitransparent Membrane for Large-Scale Infrared-to-Visible Light Conversion // *ACS Nano.* 2020. Vol. 14, № 8. P. 10624–10632.
4. Halder N.N. et al. Growth of large diameter pure phase wurtzite GaP nanowires by a two-step axial-radial growth approach // *Appl. Phys. Lett.* 2018. Vol. 112, № 13. P. 133107.
5. Sibirev N.V., Berdnikov Y.S., Sibirev V.N. Crystalline-Phase Switching in Heterostructured Ga(As,P) Nanowires under the Impact of Elastic Strains // *Semiconductors.* 2020. Vol. 54, № 10.
6. Oehler F. et al. Measuring and Modeling the Growth Dynamics of Self-Catalyzed GaP Nanowire Arrays // *Nano Lett.* 2018. Vol. 18, № 2. P. 701–708.
7. Tauchnitz T. et al. A simple route to synchronized nucleation of self-catalyzed GaAs nanowires on silicon for sub-Poissonian length distributions // *Nanotechnology.* 2018. Vol. 29, № 50.

Электрохимическое формирование модифицированных оловом нитевидных нанокристаллов Ge из водных растворов

Гаврилин И. М.¹, Захаров А.Н.¹, Мартынова И. К.¹

¹МИЭТ

e-mail: gavrilin.ilya@gmail.com

Актуальность исследования нитевидных нанокристаллов германия (Ge ННК) обусловлена большим потенциалом их применения в металл-ионных аккумуляторах [1, 2]. Для формирования Ge ННК в основном используется газозольное осаждение с использованием металлических катализаторов по механизму пар-жидкость-кристалл (ПЖК), где

размер частиц металла задает геометрические параметры ННК, такие как их диаметр и длину [3]. Однако процессы газофазного осаждения зачастую требуют использования сложного технологического оборудования и осуществляются при достаточно высоких температурах, что не всегда приемлемо как технологически, так и экономически. С этой точки зрения, использование технологически простого электрохимического осаждения Ge ННК из водных растворов GeO_2 с использованием наночастиц легкоплавких металлов (In) как центров кристаллизации, является многообещающим [4]. Одним из преимуществ метода формирования нитевидных нанокристаллов Ge катодным осаждением из водных растворов является возможность простого управления структурно-геометрическими параметрами формируемых структур путем изменения состава раствора, в котором происходит процесс роста. В частности, по аналогии с электроосаждением пленок различных металлов и их сплавов можно получать структуры различного состава. Интересным является получение сплава германия с оловом. Так было показано, что путем варьирования концентрацией Sn возможно управлять оптическими и механическими свойствами структур [5]. В частности, можно получать структуры с прямой запрещенной зоной.

В данной работе представлены результаты исследования влияния добавления в раствор электролита хлорида олова (II) в различном соотношении на морфологию и элементный состав нитевидных массивов германия. Полученные образцы исследовали с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) в совокупности с энергодисперсионным микроанализом, а также спектроскопией комбинационного рассеивания света (КРС).

На основе полученных результатов установлено, что при объемном соотношении 7:3 (Ge:Sn) и плотности тока $0,2 \text{ mA/cm}^2$ формируются отдельные кристаллы Sn на поверхности образца и наблюдаются частицы In. При повышении плотности тока частицы In покрываются слоем германия. Кроме того на крупных кристаллах Sn наблюдаются нитевидные структуры Ge. При плотности тока 1 mA/cm^2 на кристаллах Sn формируются плотные нитевидные массивы Ge. В случае уменьшения концентрации Sn в растворе и плотности тока 1 mA/cm^2 образование крупных кристаллов Sn не наблюдается, при этом формируется нитевидный массив Ge. По результатам энергодисперсионного анализа установлено, что в нитевидных нанокристаллах Ge присутствуют атомы олова.

Таким образом, предложенный подход перспективен для формирования нитевидных наноструктур на основе сплава $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации № МК-5839.2021.1.3.

Список литературы

1. I.M. Gavrilin, V.A. Smolyaninov, A.A. Dronov, S.A. Gavrilov, A.Yu. Trifonov, T.L. Kulova, A.A. Kuz'mina, A.M. Skundin. Electrochemical insertion of sodium into nanostructured materials based on germanium // *Mendelev Communications*. – 2018. – Vol. 28, № 6. – P. 659–660.
2. I.M. Gavrilin, V.A. Smolyaninov, A.A. Dronov, S.A. Gavrilov, A.Yu. Trifonov, T.L. Kulova, A.A. Kuz'mina, A.M. Skundin. Study of the Process of Reversible Insertion of Lithium into Nanostructured Materials Based on Germanium // *Russian Journal of Electrochemistry*. – 2018. – Vol. 54, №12. – P. 907–912.
3. O'Regan C., Biswas S., Petkov N., Holmes J. D. Recent advances in the growth of germanium nanowires: synthesis, growth dynamics and morphology control // *Journal of Materials Chemistry C*. – 2014. – Vol. 2. – P. 14-33.
4. Gavrilin, I. M., D. G. Gromov, A. A. Dronov, S. V. Dubkov, R. L. Volkov, A. Yu. Trifonov, N. I. Borgardt, and S. A. Gavrilov. "Effect of Electrolyte Temperature on

the Cathodic Deposition of Ge Nanowires on in and Sn Particles in Aqueous Solutions // Semiconductors. – 2017. – Vol.51, № 8. – P.1067–1071.

5. Doherty J., Biswas S., Saladukha D., Ramasse Q., Bhattacharya T. S., Singha A., J. Ochalski T. J., Holmes J. D. Influence of growth kinetics on Sn incorporation in direct band gap $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ nanowires // Journal of Materials Chemistry C. – 2018. – Vol. 6, № 32. – P. 8738-8750.

Исследования методом спектроскопии КРС свойств наноуглерода, применяемого в качестве электродного материала литий-ионных аккумуляторов

Смирнов А. Н.¹, Елисеев И. А.¹, Давыдов В.Ю.¹, Платонов А.В.¹, Явсин Д.А.¹, Гуревич С.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: alex.smirnov@mail.ioffe.ru

В последнее время одной из наиболее важных областей применения углеродных материалов становится их использование в накопителях электрической энергии, в том числе в литий-ионных аккумуляторах [1]. В этой области одно из направлений состоит в использовании мелкодисперсных порошков аморфного углерода или углеродных волокон с высокой проводимостью в качестве добавок к катодным материалам [2]. В другом варианте различные углеродные микро- и наноструктурированные материалы применяются в качестве анодных материалов литий-ионных аккумуляторов, как альтернатива традиционным порошкам графита [3]. Во втором случае основная задача состоит в обеспечении максимальной величины удельной емкости материала анода по отношению к накоплению атомов лития. Недавно нами было обнаружено, что покрытия из аморфного нанолуглерода, получаемые при лазерном распылении мишени графита, обладают исключительно высокой удельной емкостью по литию [4]. В этой работе были приведены предварительные результаты исследования свойств получаемых структур. Цель настоящей работы состоит в изучении с использованием метода спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) свойств аморфного нанолуглерода, полученного методом лазерного испарения.

Пленки из аморфного нанолуглерода, толщиной от единиц до десятков микрон, были получены при распылении мишени из изостатического графита излучением Nd:YAG лазера с длиной волны 1.06 мкм, длительностью импульса 25 нс, с энергией в импульсе 220 мДж. Излучение фокусировалось на поверхность мишени в пятно диаметром около 1 мм, при этом удельная мощность излучения на поверхности мишени составляла порядка 10^{13} Вт/м². Процесс проводился в вакуумной камере при давлении 10^{-4} Па.

Основными структурными параметрами пленок, определяемыми методом спектроскопии КРС, являются средний размер кристаллитов, доля sp^3 -связей и содержание примесей. Для определения этих параметров было проведено моделирование экспериментально измеренных спектров КРС в области частот 800–2300 см⁻¹. Моделирование производилось с использованием четырех компонент: G (~1580 см⁻¹), D (~1350 см⁻¹), $D3$ (~1500 см⁻¹) и $D4$ (~1200 см⁻¹), соответствующих колебаниям атомов углерода, а также линий с частотой 1870, 1900 и 2100 см⁻¹, соответствующих колебаниям углерод-водородных цепочек [5,6]. На основе анализа интенсивности, ширины и положения компонент, соответствующих углеродным колебаниям, были сделаны выводы о типе микроструктуры (стадии аморфизации) данных пленок, среднем размере кристаллитов в них и о

преобладающем типе гибридизации в связях углерод-углерод [7]. Средний размер кристаллитов определялся с использованием соотношений, приводимых в литературе для соответствующего типа материала [7,8]. Анализ спектральных линий в области частот 1800–2300 см⁻¹ позволил получить информацию о присутствии углерод-водородных цепочек в исследуемых образцах и о длине данных цепочек [6].

Исследованные в рамках данной работы образцы можно отнести к двум категориям, каждая из которых соответствует определенной стадии аморфизации (стадии I или II согласно принятой в литературе терминологии [7]). Образцы на стадии аморфизации I представляют собой наноструктурированный графит с размером частиц от 6 до 12 нм [8]. Образцы, относящиеся к стадии II, можно классифицировать как переходный материал между нанокристаллическим графитом и так называемым аморфным *sp*²-углеродом (*a*-C) [7], основное отличие которого от нанографита заключается в присутствии в кристаллической решетке данного материала топологического беспорядка и оборванных связей. Средний размер кристаллитов в образцах стадии II составлял от 3 до 5 нм [7].

Полученные с использованием спектров КРС результаты помогли связать структурные параметры пленок наноуглерода, обладающих различной степенью аморфизации, с их электрическими характеристиками и выявить технологические условия, необходимые для синтеза пленок с максимальной величиной удельной емкости по отношению к накоплению атомов лития.

Список литературы

1. Zhang H., Zhao H., Khan M.A., Zou W., Xu J., Zhang L., Zhang J., Recent progress in advanced electrode materials, separators and electrolytes for lithium batteries. *J. Mater. Chem. A* 2018, 6, 20564–20620, doi:10.1039/C8TA05336G.
2. Cho, I.; Choi, J.; Kim, K.; Ryou, M.H.; Lee, Y.M. A comparative investigation of carbon black (Super-P) and vapor-grown carbon fibers (VGCFs) as conductive additives for lithium-ion battery cathodes. *RSC Adv.* 2015, 5, 95073–95078, doi:10.1039/c5ra19056h.
3. Guo, Z.; Wang, C.; Chen, M.; Li, M. Hard carbon derived from coal tar pitch for use as the anode material in lithium ion batteries. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2013, 8, 2702–2709.
4. Гуревич, С.А.; Горохов, М.В.; Кожевин, В.М.; Кукушкин, М.В.; Левицкий, В.С.; Марков, Л.К.; Явсин, Д.А. Формирование аморфных наночастиц углерода методом лазерного электродиспергирования. *Письма ЖТФ* 2018, 44, 57, doi:10.21883/pjtf.2018.05.45708.17124.
5. Ravagnan, L.; Siviero, F.; Lenardi, C.; Piseri, P.; Barborini, E.; Milani, P.; Casari, C.S.; Li Bassi, A.; Bottani, C.E. Cluster-Beam Deposition and in situ Characterization of Carbyne-Rich Carbon Films. *Phys. Rev. Lett.* 2002, 89, 285506, doi:10.1103/PhysRevLett.89.285506.
6. Endo, M.; Kim, Y.A.; Hayashi, T.; Muramatsu, H.; Terrenes, M.; Saito, R.; Villalpando-Paez, F.; Chou, S.G.; Dresselhaus, M.S. Nanotube coalescence-inducing mode: A novel vibrational mode in carbon systems. *Small* 2006, 2, 1031–1036, doi:10.1002/smll.200600087.
7. Ferrari, A.C.; Robertson, J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Phys. Rev. B* 2000, 61, 14095–14107, doi:10.1103/PhysRevB.61.14095.
8. Cañado, L.G.; Takai, K.; Enoki, T.; Endo, M.; Kim, Y.A.; Mizusaki, H.; Jorio, A.; Coelho, L.N.; Magalhães-Paniago, R.; Pimenta, M.A. General equation for the

determination of the crystallite size l_a of nanographite by Raman spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.* 2006, 88, 163106, doi:10.1063/1.2196057.

Энергетический спектр, оптическое поглощение эндоэдральных комплексов $E_{r_2}C_2@C_{90}$ на основе изомеров №21 и №44

Жуманазаров А. П.¹, Мурзашев А.И.¹, Кокурин М.Ю.¹,

¹Марийский государственный университет

e-mail: zallayar@mail.ru

Интерес исследователей к изучению фуллеренов и аналогичных им углеродных структур, обусловлен тем, что применение этих материалов в различных отраслях науки и технологий сулит прорывное их развитие. Уникальность свойств этих материалов связано с уникальностью свойств углерода. Углерод в этих системах находится в sp^2 -гибридизованном состоянии. Три из четырех валентных электронов углерода образуют жесткие связи (σ -связи), формирующие геометрическую структуру этих систем, четвертый валентный электрон остается не связанным, и его состояния формируют зону, называемую π -электронной зоной, состояния в этой зоне частично локализованы. Граница между занятыми и вакантными состояниями лежит в этой зоне, что обуславливает тот факт, что все наблюдаемые свойства, в частности электропроводность и оптическое поглощение, определяются состояниями этих электронов.

Представления об электронном строении углеродных систем с sp^2 -гибридизацией основываются на работах Уоллеса [1] и Саваги [2]. В [1] в 1948 г., Уоллес используя хюккелевское приближение показал, что в графитовых плоскостях ширина зоны проводимости π -электронов равна $6|B|$, где B – интеграл перескока π -электронов между соседними узлами. Измерения плотности электронных состояний графита, выполненные Савагой методом оже-спектроскопии в [2], показали, что заполненная часть зоны проводимости, которая составляет половину всей зоны проводимости, имеет ширину ~ 5.8 eV. Из чего была получена оценка для интеграла перескока $B \sim 2$ eV. Позднее из сравнения с СОП углеродных нанотрубок (УНТ) эту оценку уточнили $B \sim 2.6$ eV [3-5]. На основе энергетического спектра, вычисленного при этом значении параметра B , удалось объяснить кривые СОП фуллерена C_{60} . Однако попытки объяснения электронного строения других фуллеренов в рамках простой хюккелевской модели с параметром $B \sim 2.6$ eV не привели к успеху. Ярким примером этого является фуллерен C_{74} [6]. В рамках хюккелевского приближения с параметром $B \sim 2.6$ eV, щель между занятыми и вакантными состояниями, именуемая ВЗМО-НВМО (верхняя заполненная молекулярная орбиталь – нижняя вакантная молекулярная орбиталь) имеет малое значение ~ 0.01 eV, что никак не согласуется с экспериментом [6].

В работе [7] мы отмечали, что безуспешность попыток получить качественное согласие между экспериментальными и теоретическими кривыми СОП фуллеренов, оставаясь в рамках традиционной модели с учетом лишь перескоков электронов с интегралом перескока $B \sim 2.6$ eV, связана с тем, что в углеродных системах с sp^2 -гибридизацией ВУКВ π -электронов, может достигать значений ~ 10 eV [12(7)]. Как показано в наших предыдущих работах [7-8] и др., ВУКВ приводит к расщеплению каждого энергетического уровня π -электронов на два, разделенные между собой на величину параметра кулоновского

взаимодействия U . Что не учитывается в традиционных моделях электронного строения углеродных систем с sp^2 -гибридизацией.

Следуя результатам наших работ [7-8] в предлагаемой работе на примере систем $\text{Er}_2\text{C}_2@\text{C}_{90}$ учтено расщепление энергетического спектра и смоделированы спектры оптического поглощения (СОП) эндоэдральных комплексов $\text{Er}_2\text{C}_2@\text{C}_{90}$ на основе изомеров №44(C_2) №21(C_1) фуллерена C_{90} . Расчет выполнен в рамках двух моделей. В рамках первой модели, которая является традиционной, учитывались лишь перескоки π -электронов с узла на узел (интеграл перескока на ближайшие узлы $B \sim 2.6$ eV). В рамках второй модели, развиваемой в серии наших работ [7-8], кроме перескоков с узла на узел (интеграл перескока на ближайшие узлы $B \sim 1.0$ eV) также учитывалось внутриузельное кулоновское взаимодействие (ВУКВ) π -электронов (интеграл кулоновского взаимодействия $U \sim 7.0$ eV). Сравнение кривых СОП, полученных нами, с экспериментальными данными убедительно свидетельствует, что вторая модель более адекватно описывает СОП эндоэдральных комплексов $\text{Er}_2\text{C}_2@\text{C}_{90}$ на основе исследованных изомеров. Величина переноса заряда от системы Er_2C_2 в фуллереновую оболочку оказалась равной $-4e$.

Список литературы

1. Wallace P.R. // Phys. Rev. 1947. V.71. P.622.
2. Sagawa T. // J.Phys. Society of Japan. 1966. V.21. P.49.
3. Wildoer J.W.G., Venema L.C., Rinzler A.G. et al. // Nature. 1998. V.59. P.391.
5. Kuzmany H., Burger B., Hulman M. et al. // Europhys. Lett. 1998. V.44. P.518.
6. Michael D.D. // Nature. 1998. V.393. P.668.
7. Мурзаев А.И., Назарова Т.Э. // ЖЭТФ. 2014. Т.146. С.1026.
8. Мурзаев А.И. // ЖЭТФ. 2009. Т.135. С.122.

Неаффинные деформации аморфных наноструктур

Семенов А. А.¹, Конюх Д.А.¹, Бельтюков Я.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: sanya_sem@mail.ru

В последнее время все большую актуальность приобретают исследования механических, колебательных и теплопроводных свойств различных наноструктур. В том числе важную роль играют структуры, содержащие как кристаллические, так и аморфные составляющие. Присущее аморфным телам неупорядоченное расположение атомов существенно влияет как на поведение аморфных тел на масштабах нескольких нанометров, так и на их макроскопические свойства. Так, при деформации аморфного тела существенное влияние на ее макроскопическую жесткость оказывает микроскопическая неоднородность деформаций, поскольку их характерный масштаб оценивается как десятки межатомных расстояний [1, 2]. Такие неоднородные деформации являются *неаффинными*, поскольку они не сводятся к простым растяжениям или сдвигам.

В данной работе было изучено поведение модельной двумерной наноструктуры, состоящей из двух кристаллических слоев, разделенных аморфной прослойкой конечной толщины h , при воздействии внешней деформации. Основной задачей работы было исследование деформации приграничных переходных слоев кристалл-аморфное тело для различных значений толщины аморфного слоя h и степени беспорядка аморфного тела.

Для исследования поведения данной структуры мы рассмотрели упрощенную скалярную модель, в которой смещения атомов описываются скалярной величиной u_i . Для описания кристаллических областей мы рассмотрели динамическую матрицу, ненулевые недиагональные элементы которой имеют вид $M_{ij}^{(c)} = 1$ для соседних атомов i и j . Элементы динамической матрицы аморфного слоя до некоторой степени являются случайными величинами. При этом важную роль играет требование механической устойчивости. В наиболее общем виде сильно разупорядоченную устойчивую механическую систему можно описать с помощью динамической матрицы $M = AA^T$, где элементы матрицы A отвечают за взаимодействие соседних атомов и являются случайными числами, имеющими гауссово распределение [3].

Для описания аморфной системы с произвольной степенью беспорядка, мы рассмотрели динамическую матрицу в виде $M^{(a)} = AA^T + \mu M^{(c)}$

Параметр μ может изменяться в широком диапазоне значений, позволяя варьировать степень беспорядка. В данной работе изучались структуры с $\mu \ll 1$, что соответствует большой степени беспорядка.

При приложении внешней деформации к исследуемой трехслойной структуре были рассчитаны внутренние деформации как кристаллических областей, так и аморфной прослойки. Было показано, что в данной структуре распределение упругой энергии внутренних деформаций существенно неоднородно.

Во-первых, за счет разницы в макроскопических упругих модулях рассмотренных кристаллических и аморфных слоев упругая энергия в слоях, в среднем, отличается. Во-вторых, внутри аморфной прослойки есть неоднородные деформации, за счет неоднородности ее упругих свойств. Расчет показал, что данные флуктуации усредняются на масштабе $l \sim \mu^{-1/4}$.

Кроме того, было показано, что приграничный слой обладает упругой энергией отличной от кристаллического или аморфного слоев. Таким образом, вблизи границы эффективные упругие модули отличаются от соответствующих объемных значений. Для усреднения неоднородностей упругой энергии в аморфном слое, полученные результаты усреднялись по 10^3 реализаций. Полученное распределение упругой энергии показывает, что в аморфном слое имеется дополнительная плотность упругой энергии, имеющая вид

$$\Pi \sim e^{-x/w}$$

где x – расстояние от границы, а характерная ширина w имеет степенную зависимость от параметра μ

$$w \sim \mu^{-1/4}$$

и по порядку величины совпадает с характерным размером минимального репрезентативного объема l и длиной Иоффе-Регеля [3]. В свою очередь, со стороны кристалла наблюдалось степенное изменение дополнительного вклада в упругую энергию

$$\Pi \sim 1/x^\alpha$$

где параметр $\alpha \approx 2$

Полученные результаты не только важны для понимания макроскопических упругих свойств наноструктур и нанокомпозитов, но и демонстрируют взаимосвязь механических свойств с кроссовером Иоффе-Регеля, который оказывает существенное влияние на колебательные свойства и эффекты теплопереноса.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-72-20201.

Список литературы

1. С. Е. Maloney. Physical Review Letters **97**, 035503 (2006).

2. F. Leonforte, R. Boissiere, A. Tanguy, J.P. Wittmer, and J-L. Barrat, *Physical Review B* **72**, 224206 (2005).
3. Y. M. Beltukov, V. I. Kozub, and D. A. Parshin, Ioffe-Regel criterion and diffusion of vibrations in random lattices, *Phys. Rev. B* **87**, 134203 (2013).

Изготовление острия зондов методом ФИП для нанодиагностики поверхности твердых тел методом атомно-силовой микроскопии.

Подригес Д.Х.¹, Баллоук А.Х.¹, Котосонова А.В.¹, Осотова О.И.¹, Коломийцев А.С.¹

¹ЮФУ

e-mail: priviet122@gmail.com

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) является мощным инструментом исследования рельефа и различных физико-химических свойств поверхности твердых тел. Стандартные зонды для АСМ имеют ограниченную номенклатуру геометрических параметров, что часто приводит к появлению нежелательных искажений изображения [1]. Часто для получения адекватных результатов измерений рельефа наноразмерных структур требуется изготовление зондов со специальной формой острия, например, с увеличенным аспектным соотношением или уменьшенным радиусом закругления. Одним из методов, позволяющих формировать острия зондов в широком диапазоне геометрических параметров, является локальное ионно-стимулированное осаждение материалов из газовой фазы с использованием фокусированного ионного пучка (ФИП) [2]. Целью настоящей работы является изготовление зондов для АСМ методом ФИП и исследование влияния геометрических параметров зондов на точность исследования рельефа наноразмерных периодических структур методом АСМ.

Экспериментальные исследования производились с использованием растрового электронно-ионного микроскопа Nova NanoLab 600 (FEI, Нидерланды), оснащенного системой ФИП. Формирование острия зондов производилось на основе балок стандартных АСМ кантилеверов НА_HR (NT-MDT), собственные острия которых были предварительно удалены методом ионно-лучевого травления ФИП. Новые острия зондов формировались ионно-стимулированным осаждением углерода, при подаче в зону воздействия ионного пучка летучего соединения C₁₀H₈.

Для исследования влияния формы зонда на точность измерения топологии поверхности были изготовлены кантилеверы с остриями двух типов: цилиндрического с высоким аспектным соотношением и конического ступенчатого. Формирование высокоаспектного острия производилось путем осаждения углерода при токе ФИП 50 пА, ускоряющем напряжении 30 кэВ и времени воздействия ионного пучка в точке – 1 мкс. Высота полученного острия составила 4,75 мкм при диаметре 675 нм. Ступенчатый зонд осаждался в виде структуры из четырех дисков высотой 1,5; 2; 3 и 1 мкм и диаметрами 4,5; 1,8; 0,7 и 0,35 мкм, соответственно. Ионный ток при осаждении составлял 0,5 нА для первых трёх дисков и 50 пА для последнего.

С целью оценки влияния формы полученных зондов на точность проведения измерений с помощью полученных кантилеверов была исследована поверхность калибровочной решетки TGZ3 (NT-MDT) в полуконтактном режиме АСМ. Для сравнительной оценки

результатов исследования такое сканирование также проводилось с использованием кантилевера NSG10 (NT-MDT).

Для оценки точности отображения рельефа было произведено сравнение полученных профилограмм поверхности с эталонным профилем решетки. Методика оценки точности измерений основывалась на нахождении отношения суммы площадей участков, имеющих отклонение от эталонной, и площади эталонной структуры. Рассчитанное по такой методике отклонение составило: 26,46% для кантилевера NSG10, 12,8% для высокоаспектного и 18,08% для ступенчатого зондов. Угол наклона стенки вертикального элемента решетки составил приблизительно 40°, 15° и 25° для левых стенок и 60°, 20° и 40° для правых. По полученным данным можно заключить, что оба изготовленных зонда внесли меньше искажений в изображение, чем стандартный зонд АСМ, что позволило повысить точность измерений в 1,46 раз для ступенчатого зонда и в 2,07 раз для высокоаспектного.

Выполненные исследования показали, что применение метода ФИП позволяет с высокой скоростью, точностью и воспроизводимостью формировать острия зондов, параметры которых существенно отличаются от параметров стандартных зондов, что позволяет увеличить точность исследования рельефа поверхности. Результаты данной работы могут быть полезны при исследовании микро- и наноструктур, а также могут быть использованы для дальнейшей разработки технологии изготовления и модифицирования зондов методом ФИП.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № 0852-2020-0015.

Список литературы

1. De Felicis D., Mughal M., Bemporad E. A method to improve the quality of 2.5 dimensional micro-and nanostructures produced by focused ion beam machining. Micron. 2017. 101. P. 8–15.
2. Б. Г. Коноплев, О. А. Агеев, А. С. Коломийцев, модификация зондов для сканирующей зондовой микроскопии методом фокусированных ионных пучков, том 41, № 1, с. 47–56, 2012.

Исследование фотокаталитических свойств гетероструктур $\text{Cu}_x\text{O-TiO}_2$ на основе массивов нанотрубок анодного оксида титана

Пинчук О. В.¹, Савчук Т.П.¹, Иванова Е.А.¹, Дронов А.А.¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

e-mail: okv1995@mail.ru

В последнее время множество работ посвящается разработке стабильных фотокатализаторов активных в видимом диапазоне солнечного света. Наиболее распространённые процессы, где находят применение фотокатализаторы, это фотоэлектрохимическое разложение воды на водород и кислород, фотоиндуцированное разложение токсичных органических веществ на воду и CO_2 , а так же преобразование CO_2 до прекурсоров органического топлива [1]. В научно-технической литературе чаще всего встречаются работы по исследованию фотокатализаторов на основе широкозонных полупроводников, таких как WO_3 , TiO_2 , ZnO . Такие полупроводники находят свое применение в фотокатализе за счет

высокой фотокоррозионной стойкости по сравнению с узкозонными полупроводниками CuO , Cu_2O , Fe_2O_3 . Однако, эффективность таких широкозонных полупроводников ограничена при использовании источников света с малой долей ультрафиолета, в связи с тем, что необходимым условием начала фотокаталитической реакции является наличие свободных носителей заряда в полупроводнике. Одним из способов расширения спектра поглощения света фотокатализаторов на основе широкозонных полупроводников является нанесение на их поверхность наночастиц полупроводников с малой запрещенной зоной.

Оксид титана является одним из наиболее изученных материалов для применения в фотокатализе. В большинстве случаев работы научных групп направлены на исследования наноструктурированных порошков TiO_2 . Однако, использование порошка в качестве фотокатализатора затруднено из-за необходимости шага фильтрации обеззараживаемой жидкости, в то же время получение фотоэлектродов для фотоэлектрохимического разложения воды требует иммобилизации полупроводника на проводящую подложку [2]. В свою очередь, массивы нанотрубок анодного оксида титана (НТАОТ), в силу метода формирования, изначально находятся на проводящей Ti подложке. Также благодаря наноструктурированной вертикально ориентированной морфологии, массивы нанотрубок обладают высокой удельной площадью поверхности, за счет строения нанотрубок время жизни носителей заряда в таких структурах больше по сравнению с порошками оксида титана [3]. Однако, НТАОТ не проявляют повышенную активность в видимом диапазоне длин волн.

В настоящей работе были получены гетероструктуры $\text{Cu}_x\text{O}-\text{TiO}_2$ с целью расширения спектра поглощения фотокатализатора на основе НТАОТ и увеличения его фотокаталитической активности в видимом диапазоне длин волн. Оксиды меди были нанесены методом молекулярного насаивания из жидкой фазы (SILAR) на массивы нанотрубок оксида титана, полученных методом электрохимического окисления металлов. Морфология образцов НТАОТ до и после осаждения оксидов меди была изучена с помощью растровой электронной микроскопии. Полиморфная модификация осажденных оксидов меди была определена методами спектроскопии комбинационного рассеяния (КРС) и рентгеноструктурного анализа. Оптические свойства гетероструктур $\text{Cu}_x\text{O}-\text{TiO}_2$ были исследованы методом оптической спектроскопии. Фотоактивность полученных фотокатализаторов в видимом диапазоне была исследована методом измерения фототока с использованием солнечного симулятора в качестве источника света. Фотокаталитические свойства сформированных гетероструктур были оценены в процессе фотокаталитического разложения метилена голубого в водном растворе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-23038 мк.

Список литературы

1. Ganguly P. et al. Recent Advances in Photocatalytic detoxification of water // *Nanoscale materials in water purification*. – 2019. – С. 653-688.
2. Weon S., Choi W. TiO_2 nanotubes with open channels as deactivation-resistant photocatalyst for the degradation of volatile organic compounds // *Environmental science & technology*. – 2016. – Т. 50. – №. 5. – С. 2556-2563.
3. Babusen A. et al. Charge transfer mediated photoluminescence enhancement in carbon dots embedded in TiO_2 nanotube matrix // *Carbon*. – 2020. – Т. 161. – С. 535-541.

Исследование фотоэлектрических свойств наноструктурированных барьеров шоттки Au- Pd-n-GaP

Давыдов Р. В.¹, Мелебаев Д.², Шамухаммедова М.², Рудь В.Ю.³

¹СПбПУ

²Туркменский государственный университет им. Махтумкули

³ФТИ им. А.Ф.Иоффе

e-mail: romanvproze@gmail.com

Настоящая работа посвящена исследованию фотоэлектрических свойств поверхностно-барьерных (ПБ) структур Au-Pd-n-GaP в видимой области спектра под действием как естественного, так и поляризованного излучения, с целью получения новых данных о высоте барьера, зонной структуре GaP и межфазной границе раздела металл-полупроводник. Такие фотоприемники коротковолнового (УФ) излучения перспективной структуры металл (m) - полупроводник (s) с барьером Шоттки (БШ) на основе фосфида галлия просты и дешевы в изготовлении, надежны в эксплуатации, поскольку GaP-хорошо освоенный промышленностью широкозонный полупроводник. Высокая фоточувствительность прибора в УФ области спектра обеспечивается большим значением пороговой энергии прямых оптических переходов GaP ($E_0=2.8$ эВ, 300 К).

Объектом исследования служили наноструктурированные структуры Au-Pd-n-GaP. Исходным материалом для изготовления структур служили ориентированные в кристаллографический плоскости (100) пластинки n-GaP [$n=(0.1-5) \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$, 300 К] толщиной 350-400 мкм, выращенные методом Чохральского. Между полупроводником (GaP) и металлом (Au) тонкий нанослой Pd выполняет функцию барьера для предотвращения диффузии Au в сторону GaP, и способствует улучшению качества границы раздела металл-полупроводник [1].

Полученные структуры исследованы методом поляризационной фотоэлектрической спектроскопии. При наклонном падении линейно-поляризованного излучения (ЛПИ) на поверхность БШ возникает наведенный фотоплекроизм [1, 2]. Измеренная величина коэффициента наведенного фотоплекроизма P зависит от угла падения ЛПИ на приемную плоскость, и с его увеличением растет по квадратичному закону $P \sim \Theta^2$. Поляризационный фототок во всех исследованных структурах подчиняется обобщенному закону Малюса и экспериментальные результаты согласуются с результатом теоретического рассмотрения явления фотоплекроизма [2].

Исследования фоточувствительности наноструктурированных структур типа Au-Pd-n-GaP в видимой области спектра позволило получить важную информацию о параметрах потенциального барьера, зонной структуры полупроводника. Таким образом, промежуточный нанослой Pd между GaP и Au толщиной 20-30 Å, создает в наноструктуре Au-Pd-n-GaP специфические свойства, имеющие важное научно-практическое значение.

Список литературы

1. Konnikov S.G., Rud V.Yu., Rud Yu.V., Melebaev D., Berkeliev A., Serginov M. and Tilevov S. Photoplectroism of $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ Surface-Barrier Structures. // Jpn. J. Appl. Phys. -1993. –Vol.32, №3, -p.515-517.
2. Кесаманлы Ф.П., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В. // Физика и техника полупроводников Обзор. 1999 ФТП.33, 5 ,513-536.

Изучение оптических свойств нанокompозитного покрытия NiO/AuNP/NiO, перенесенного на прозрачное гибкое основание

Эннс Я. Б.^{1,2}, Кондратьева А.С.^{1,2}, Комаревцев И.М.^{1,2}, Казакин А.Н.^{1,2}, Мишин М.В.^{1,2}

¹СПбАУ им. Ж.И. Алферова

²СПбПУ Петра Великого

e-mail: ennsjb@gmail.com

Задача управления распространением электромагнитных волн привлекает все больше внимания [1]. Одним из возможных подходов к решению данной задачи является организация поверхностного плазмонного резонанса. Поверхностный плазмонный резонанс – модель, описывающая передачу электромагнитных волн для геометрически изолированных объектов [2]. Плазмонные колебания чувствительны к свойствам среды, в которой они распространяются. Так, например, изменение показателя преломления среды приводит к сдвигу резонансной частоты. Введение плазмонных частиц, например, наночастиц золота (AuNP), в матрицу из широкозонного материала позволяет переводить край фундаментального поглощения материала в видимую область [3]. Было показано [4], что такие гетероструктуры могут являться высокочувствительными элементами оптических датчиков различного назначения.

Важнейшей характеристикой оптически активных гетероструктур являются их спектральные характеристики пропускания, поглощения и отражения. Однако, современные технологии формирования слоев сложного состава и структуры ориентированы на использование непрозрачных в оптической области подложек (кремний, арсенид галлия). При этом, известно, что на начальные стадии роста оказывает существенно влияние материал подложки (элементный состав, структура, морфология). В этой связи актуальной задачей является поиск путей переноса сформированного покрытия с ростовой подложки на оптически прозрачный носитель.

В данной работе предложен метод переноса материала на прозрачное в оптической области основание, реализованный для сформированных на кремниевых подложках нанокompозитных структур Si/NiO/AuNP/NiO, активных в видимом диапазоне длин волн, и фоторезиста SU-8, обладающего высокой прозрачностью в диапазоне 0,35 – 1,2 мкм [5].

Перенос осуществлялся путём нанесения плёнки SU-8 на ростовую кремниевую подложку с нанокompозитом и последующего травления кремния в КОН 30% при температуре 75 °С. Предложенный подход позволил получить семейство спектральных характеристик нанокompозита NiO/AuNP/NiO в диапазоне 0,35 – 1,2 мкм.

Данная работа была выполнена в рамках реализации обязательств по Государственному Заданию СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова № 0791-2020-0011.

Список литературы

1. Заерко, Д. В., Гайда, Л. С. (2016). Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 2: Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне, 6(2), 64-69.
2. Ramesh, C., Tyagi, P., Senthil Kumar, M., & Kushvaha, S. S. (2020). Journal of nanoscience and nanotechnology, 20(6), 3839-3844.
3. Mishin, M. V., Vorobyev, A. A., Kondrateva, A. S., Koroleva, E. Y., Karaseov, P. A., Bespalova, P. G., Filimonov, A. V. (2018). Semiconductor Science and Technology, 33(7), 075014.

4. Bespalova, P., Vorobyev, V., Kondrateva, A., Mishin, M. (2019, October). In 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech) (pp. 244-246). IEEE.
5. Piruska, A., Bhagat, A. A. S., Zhou, K., Peterson, E. T. K., Papautsky, I., Seliskar, C. J. (2006, January). In Microfluidics, BioMEMS, and Medical Microsystems IV (Vol. 6112, p. 611207). International Society for Optics and Photonics

Исследование электрофизических параметров тонких пленок пористого анодного оксида алюминия

Муратова Е. Н.¹, Налимова С.С.¹, Бобков А.А.¹, Мошников В.А.¹

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: Sokolovaeknik@yandex.ru

Тонкие пленки на основе пористого анодного оксида алюминия (ПАОА) представляют большой интерес для различных областей науки и техники за счет своей биологической инертности, стойкости и уникальной упорядоченной структуры. Активное изучение в последние годы электрофизических свойств таких материалов связано в значительной степени с развитием полупроводниковой сенсорики. Нанопористые слои представляют интерес для газоселективных мембран и сенсоров для детектирования газов-восстановителей, мезопористые слои могут применяться в датчиках влажности, а микропористые – в фильтрах для воды.

Пленки ПАОА часто исследуют с помощью методики спектроскопии импеданса[1]. Установлено, что они сочетают в себе малую емкость и малый тангенс угла потерь с превосходными свойствами высоких выдерживаемой напряженности поля ($1,7\text{--}2,7 \text{ М.В. см}^{-1}$), низкий ток утечки ($(3\text{--}20) \times 10^{-12} \text{ мм}^{-2}$ при $1,0 \text{ В. см}^{-1} = (4\text{--}6) \times 10^{-3}$). Выявленный разброс диэлектрической проницаемости, хотя и в пределах 10%, и наличие пиков потерь на температурных и частотных зависимостях $\text{tg } \delta$ обозначают влияние механизма ионной релаксации на поляризуемость диэлектриков с характерными временами от 10 до 145 мкс в зависимости от типа диэлектрика. В работе [2] показано, как технологические параметры анодирования влияют на электрофизические свойства пленок ПАОА. Их электрическая прочность уменьшается с ростом напряжения анодирования, концентрации электролита, а также с ростом толщины пленки. Определяющим фактором в данном случае является диффузия ионов окислителя через растущий оксид к поверхности подложки.

Целью данной работы было исследование электрофизических параметров тонких пленок ПАОА с помощью методики спектроскопии импеданса при различных температурах.

Для экспериментов в качестве исходного материала была использована алюминиевая фольга толщиной 50 мкм. Анодирование проводилось во фторопластовой электрохимической ячейке вертикального типа с системой водяного охлаждения в режиме постоянного напряжения (100 В), который обеспечивался источником питания АТН-1351, в электролите на основе водного раствора ортофосфорной кислоты. Температура процесса поддерживалась в диапазоне 5-7 °С.

Измерение частотных зависимостей модуля комплексного сопротивления и угла фазового сдвига между током и напряжением в емкостной цепи производили в диапазоне

частот от 5 кГц до 500 кГц с помощью импедансметра Z500P (Элинс, Черноголовка). Для обработки экспериментальных данных импеданса использовался метод комплексной плоскости, на которой импеданс, как и любое комплексное число, представлялось в виде зависимостей реальных и мнимых компонент комплексного сопротивления. Исследования проводились в температурном интервале от 20 °С до 255 °С.

Установлено, что радиус окружности, аппроксимирующей экспериментальные результаты, увеличивается с увеличением температуры. Это может быть связано с влиянием адсорбированных молекул воды, так как рост температуры приводит к уменьшению их концентрации, и, следовательно, уменьшению влияния поверхностной проводимости в адсорбированном слое воды. Проведенные ранее исследования [3] показали, что молекулы воды на поверхности пористых материалов образуют фрактальные агрегаты. Фундаментальным механизмом влияния влажности на электрофизические свойства пористых материалов является физическая абсорбция молекул воды на первоначально хемосорбированном слое гидроксильных ионов [4]. Хемосорбированные гидроксильные ионы повышают электрическую проводимость материала либо за счет переноса электронов в зону проводимости основного материала, либо за счет прыжков протонов между соседними гидроксильными группами при приложении электрического поля.

Таким образом, в работе показано увеличение импеданса слоев ПАОА с увеличением температуры, полученные зависимости объяснены изменением проводимости в адсорбированном слое воды при изменении температуры.

Работа выполнена при поддержке гранта президента Российской Федерации: МК-2268.2020.8: соглашение № 075-15-2020-520 от 13.04.2020

Список литературы

1. Mozalev A., Sakairi M., Takahashi H., Habazaki H., Hubálek J. Nanostructured anodic-alumina-based dielectrics for high-frequency integral capacitors // *Thin Solid Films*, V. 550, P. 486-494, 2014.
2. Филяк М.М., Каныгина О.Н. Электрофизические свойства анодного оксида алюминия // *Вестник ОГУ*, №9, С. 240-244, 2013.
3. Власюк Д.П., Мамыкин А.И., Мошников В.А., Муратова Е.Н. Механизмы роста и структура адсорбционного слоя воды на поверхности пористого кремния // *Физика и химия стекла*, Т. 41, С. 745-752, 2015.
4. Dickey E.C., Varghese O.K., Ong K.G., Gong D., Paulose M., Grimes C.A. Room temperature ammonia and humidity sensing using highly ordered nanoporous alumina films // *Sensors*, V. 2, P. 91-110, 2002.

Стабильность и устойчивость звездообразного палладийсодержащего катализатора по отношению к реакции щелочного окисления метанола

Пушанкина П. Д.¹, Луценко И.С.¹, Глазкова Ю.С.¹, Мальков Т.И.¹, Барышев М.Г.^{1,2}, Петриев И.С.^{1,2}

¹Кубанский государственный университет

²Южный научный центр РАН

e-mail: polina_pushankina@mail.ru

Согласно последним исследованиям в области наноматериалов, наночастицы благородных металлов находят все более широкое применение в качестве катализаторов в реакциях каталитического восстановления кислорода, топливных элементах и других гетерогенных каталитических процессах. Универсальными катализаторами в различных реакциях, в том числе окисления спиртов, считаются Pt и Pd. Палладий является достаточно устойчивым к каталитическим ядам, таким как монооксид углерода (CO), что делает его перспективным материалом для использования в кислородно-водородных и спиртовых топливных элементах.

В ходе исследования были разработаны две методики синтеза наноструктурированных катализаторов типа «наночастицы» с шарообразной формой частиц и «нанозвёзды» с пентаразветвленной формой частиц на поверхности палладийсодержащих пленок. Последний пентадвойникованный звездообразный катализатор имел достаточно сложный механизм роста. Атомы серебра в совокупности с атомами палладия, попадая на подложку определенным образом, формируют посредством многократного двойникования и образования дефектов пентагонально структурированные частицы. Такого рода симметрия считается запрещенной в классической кристаллографии, однако, допустима для ультрадисперсных сред с размером металлических частиц в области от 1 до 100 нм [1]. Каждая полученная в результате синтеза наночастица обладает большим количеством высокоиндексных граней, оканчивающихся недокоординированными атомами [2].

Каталитическая активность синтезированных катализаторов оценивалась в реакции электрохимического окисления метанола в щелочной среде. Циклические вольтамперограммы снимались в рабочем диапазоне потенциалов от – 0.9 до 0.5 В. Значительное увеличение плотности тока в реакции окисления метанола для электродов с катализаторами с принципиально новой пентагональной структурой частиц отражает увеличение истинной каталитической активности. Пики плотности тока в прямом и обратном направлениях в анодной зоне указывают на блокировку каталитической поверхности при более высоком потенциале и её удаление при более низком потенциале во время обратного сканирования [3]. Первой причиной возникновения второго анодного пика является окисление адсорбированных ядовитых углеродистых частиц ($\text{Pd-CO}_{\text{адс}}$). Вторая причина – адсорбирование спирта после удаления ядовитых интермедиатов с поверхности с более низким потенциалом. Можно отметить анодный сдвиг прямого пикового потенциала для пента разветвленного катализатора относительно катализатора типа «наночастицы», который составил 0.065 В. Этот сдвиг, по-видимому, обусловлен структурными эффектами и приводит к усилению окисления ядовитых интермедиатов, таких как $\text{Pd-CO}_{\text{адс}}$, при более высоком пиковом потенциале и, следовательно, к увеличению каталитической активности электродов.

Циклические вольтамперограммы исследуемых электродов при снятии 100 последовательных циклов продемонстрировали достаточно постоянные показатели пиковых

токов и потенциалов. Приблизительно 90% пиковой плотности тока сохраняется в 100-м цикле по сравнению с 30-м циклом, что указывает на высокую стабильность электродов, модифицированных звездообразным катализатором.

Работа выполнена при финансовой поддержке основной части государственного задания Министерства науки и высшего образования Кубанского государственного университета № FZEN-2020-0022, гранта РФФИ и Краснодарского края № 20-42-235001 и Кубанского научного фонда в рамках проекта №МФИ-20.1/132.

Список литературы

1. Taffs J., Royall C.P. // Nat. Communications. 2016. V. 7. 13225.
2. King M., Personick M. // Nanoscale. 2017. V. 9. 17914.
3. Petriev I., Pushankina P., Lutsenko I. et. al. // Nanomaterials. 2020. V. 10. 2081.

Синтез гетероструктурированных InGaN нитевидных нанокристаллов методом молекулярно-пучковой эпитаксии на кремнии

Гридчин В. О.¹, Резник Р.Р.¹, Котляр К.П.¹, Лендяшова В.В.^{1,2}, Драгунова А.С.³, Крыжановская Н.В.³, Кириленко Д.Ю.², Цырлин Г.Э.^{1,2}

¹СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

³НИУ ВШЭ

e-mail: gridchinfo@yandex.ru

В настоящее время InGaN вызывает повышенный интерес для создания источников видимого диапазона излучения и возобновляемых источников энергии благодаря возможности излучать от ближнего УФ до ближнего ИК в зависимости от содержания индия (x_{In}) [1]. Основной проблемой получения тройных соединений InGaN с заданными составами во всем диапазоне их изменений является довольно широкая область несмешиваемости, обусловленная существенной разницей между параметрами решетки InN и GaN (10.7 % для a и 15 % для c) [2,3]. Кроме того, синтез InGaN слоёв с высоким кристаллическим качеством затруднен отсутствием решетчато-согласованных подложек. Одним из возможных способов решения указанных проблем является рост нитевидных нанокристаллов (ННК). Ранее было показано, что ННК могут быть синтезированы с крайне низким количеством дефектов на подложках с несоответствующими параметрами решетки и коэффициентами термического расширения, в частности, на кремнии [4]. При этом, получение InGaN с x_{In} от 0 до 1 возможно в таких структурах как ННК [5]. Однако, прямой рост InGaN ННК на подложках кремния методом молекулярно-пучковой эпитаксии был продемонстрирован только несколькими научными группами, и влияние ростовых параметров на физические свойства формируемых InGaN нитевидных нанокристаллов остается слабоизученным.

В данной работе мы исследовали влияние ростовой температуры подложки в диапазоне 655-665 °С на структурные и оптические свойства InGaN ННК. Рост ННК проводился на подложках кремния с кристаллографической ориентацией (111) методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота на установке Riber Compact 12. С целью получения ННК, ростовые эксперименты проводились в азот обогащенных условиях. Эквивалентные давления молекулярных потоков галлия и индия были равны между

собой. Структурные и оптические свойства образцов исследовались методами растровой электронной микроскопии (РЭМ), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и фотолюминесценции (ФЛ).

Было обнаружено, что при ростовой температуре 665 °С формируется слой InGaN, состоящий из плотноупакованных наноструктур, ориентированных вдоль по нормали к подложке. При этом, x_{In} вдоль высоты структур распределен неоднородно и увеличивается от 0 до 10 %. При понижении температуры до 660 °С образуется массив частично сросшихся ННК. При этом, в несросшейся части ННК формируется структура типа «ядро-оболочка» с $x_{In}=40\%$ в ядре и практически чистым GaN ($x_{In}=0-4\%$) в оболочке. При дальнейшем снижении температуры до 655 °С формируются однородные несросшиеся ННК, по всей длине которых прослеживается структура типа «ядро-оболочка». По данным ПЭМ, x_{In} в ядре на несколько процентов выше, чем в предыдущем образце, x_{In} в оболочке составляет 0-4%. Образцы демонстрируют спектры фотолюминесценции с максимумами при 420, 520 и 580 нм в соответствии с понижением ростовой температуры и увеличением содержания In в ядре.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для создания светоизлучающих устройств, в частности белых светодиодов, на основе InGaN нитевидных нанокристаллов, выращенных на кремнии.

Эксперименты по росту выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-32-90189). Исследования свойств образцов были проведены в рамках гос. задания № 0791-2020-0003.

Список литературы

1. Yam, F. K., and Z. Hassan. «InGaN: An overview of the growth kinetics, physical properties and emission mechanisms.» *Superlattices and Microstructures* 43, 23 (2008).
2. Edgar J. H. (ed.). *Properties of group III nitrides*. – Inst of Engineering & Technology, 1994. – №. 11.
3. Ho I., Stringfellow G. B. Solid phase immiscibility in GaInN // *Applied Physics Letters*. – 1996. – Т. 69. – №. 18. – С. 2701-2703.
4. Dubrovskii, V. G., G. E. Cirilin, and V. M. Ustinov. «Semiconductor nanowhiskers: synthesis, properties, and applications.» *Semiconductors* 43, 1539 (2009).
5. Roche E, Andre Y, Avit G, Bougerol C, Castelluci D, Réveret F, Gil E, Médard F, Leymarie J and Jean T 2018 *Nanotechnology* 29 465602

Гибридные III-V наноструктуры комбинированной размерности на кремнии

Резник Р. Р.¹

¹СПБАУ РАН им Ж.И. Алфёрова

e-mail: moment92@mail.ru

В настоящее время нитевидные нанокристаллы (ННК) привлекают всё большее внимание исследователей, благодаря возможности реализации на их основе различных приборных компонентов, в том числе солнечных элементов, зондов для сканирующей туннельной микроскопии, лазеров, светодиодов, транзисторов, детекторов, эмиссионных катодов и т. п. [1]. Использование таких технологических методов синтеза ННК как метод

молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) [2,3] позволило воспроизводимо получать наноструктуры с комбинированной размерностью, например, типа "квантовая точка (КТ) в ННК" [4-7]. В отличие от КТ, сформированных по механизму Странски-Крастанова [8], диаметр, высота и плотность таких КТ определяются диаметром ННК, временем роста и плотностью ННК, соответственно. Благодаря эффективной релаксации механических напряжений на боковых гранях ННК, подобные гибридные наноструктуры могут быть сформированы на поверхности кремния. Ранее было показано, что GaAs КТ в теле AlGaAs ННК, в том числе, выращенных на кремниевой подложке, являются эффективными источниками одиночных фотонов [9, 10], что указывает на перспективность их применения для квантовой криптографии. При этом, как сами AlGaAs ННК, так и GaAs КТ формировались в ранее мало изученной для этой системы вюрцитной кристаллографической фазе [11].

В данной работе приведены результаты экспериментов по МПЭ росту и исследованию физических свойств гибридных наноструктур комбинированной размерности на основе InP ННК с InAsP КТ, GaAs ННК с InGaAs КТ, AlGaAs ННК с InGaAs КТ, AlGaAs ННК с GaAs КТ на поверхности кремния. Было показано, что наноструктуры на основе InP ННК с InAsP КТ, GaAs ННК с InGaAs КТ, AlGaAs ННК с InGaAs КТ демонстрируют спектры фотолюминесценции вплоть до комнатной температуры в широком диапазоне длин волн от 800 до 1400 нм, включая стратегически важную длину волны вблизи 1.3 мкм, что позволяет рассматривать данную систему как перспективную для дальнейшей интеграции оптических элементов на кремниевой платформе с волоконно-оптическими системами. Помимо этого, были проведены исследования направленности излучения из GaAs КТ в теле AlGaAs ННК, выращенных методом МПЭ на поверхности кремния. В результате исследований было показано, что интенсивность излучения из GaAs КТ в теле AlGaAs ННК в направлении роста ННК на 2 порядка превышает интенсивность излучения из КТ в направлении, перпендикулярном росту ННК. Следовательно, AlGaAs ННК с GaAs КТ являются перспективными объектами для использования в качестве наноисточников направленного излучения.

Список литературы

1. Dubrovskii V.G., Cirlin G.E., Ustinov V.M. // *Semiconductors*. 2009. V. 43. № 12. P. 1539. doi:10.1134/s106378260912001x
2. Cirlin G.E., Dubrovskii V.G., Samsonenko Yu.B., Bouravleuv A.D., Durose K., Proskuryakov Y.Y., Mendes B., Bowen L., Kaliteevski M.A., Abram R.A., Zeze D. // *Physical Review B*. 2010. V. 82. № 3. P. 035302. doi:10.1103/PhysRevB.82.035302
3. Ignatiev A., Freundlich A., Pchelyakov O., Nikiforov A., Sokolov L., Pridachin D., Blinov V // *Molecular Beam Epitaxy*, Elsevier. 2018. P. 741-749. doi:10.1016/B978-0-12-812136-8.00035-9
4. Резник Р.Р., Цырлин Г.Э., Штром И.В., Хребтов А.И., Сошников И.П., Крыжановская Н.В, Моисеев Э.И., Жуков А.Е // Письма в Журнал технической физики. 2018. Т. 44. № 3. С. 55-61. doi:10.21883/PJTF.2018.03.45579.16991
5. Dalacu D., Mnaymneh K., Lapointe J., Wu X., Poole P.J., Bulgarini G., Zwiller V., Reimer M.E. // *Nano letters*. 2012. V. 12. № 11. С. 5919-5923. doi: 10.1021/nl303327h
6. Cirlin G.E., Reznik R.R., Shtrom I.V., Khrebtov A.I., Soshnikov I.P., Kukushkin S.A., Leandro L., Kasama T., Akopian N. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2017. V. 50. № 48. С. 484003. doi:10.1088/1361-6463/aa9169
7. Renard J., Songmuang R., Bougerol C., Daudin B., Gayral B. // *Nano letters*. 2008. V. 8. № 7. С. 2092-2096. doi:10.1021/nl0800873

8. Dubrovskii V.G., Cirlin G.E., Ustinov V.M. // Phys. Rev. B. 2003. V. 68, 075409. doi:10.1103/PhysRevB.68.075409
9. Leandro L., Gunnarsson C.P., Reznik R., Jöns K.D., Shtrom I., Khrebtov A., Kasama T., Zwiller V., Cirlin G., Akopian N. // Nano letters. 2018. V. 18. № 11. С. 7217-7221. doi: 10.1021/acs.nanolett.8b03363
10. Leandro L., Hastrup J., Reznik R., Cirlin G., Akopian N. //npj Quantum Information. 2020. V. 6. № 1. С. 1-5. doi:10.1038/s41534-020-00323-9
11. Leandro L., Reznik R., Clement J.D., Repän J., Reynolds M., Ubyivovk E.V., Shtrom I.V., Cirlin G., Akopian N. // Scientific Reports. 2020. V. 10. № 1. С. 1-6. doi:10.1038/s41598-020-57563-0

Молекулярно-пучковая эпитаксия массивов самокаталитических вертикальных нитевидных нанокристаллов GaP с заданной морфологией и высокой поверхностной плотностью на подложках Si (111)

Федина С. В.¹, Сапунов Г. А.¹, Бердников Ю. С.¹, Федоров В. В.¹, Мухин И. С.¹

¹СПБАУ РАН

e-mail: fedina.serg@yandex.ru

Эпитаксиальные массивы нитевидных нанокристаллов (ННК) на основе полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ являются перспективным материалом современной оптоэлектроники. При формировании ННК по механизму пар-жидкость-кристалл, наиболее широкие возможности контроля морфологии массивов ННК открываются при использовании каталитических частиц сторонних материалов - как правило, капель Au, предварительно осаждаемых на ростовую подложку. Однако, материал катализатора может встраиваться в решетку растущего ННК, из-за чего образуются дефекты с глубоким уровнем, увеличивающие вероятность безызлучательной рекомбинации. Формирование ННК по самокаталитическому механизму, когда в качестве катализатора используя элемент III-группы самого ННК (например, Ga для GaP) исключает встраивание инородного материала в структуру ННК, однако накладывает ограничения на диапазон возможных ростовых параметров и, как следствие, морфологию формируемых массивов ННК [1]. Также важными проблемами является зарождение наклонённых ННК и нежелательный островковый рост.

Целью данной работы было исследовать влияние предварительного осаждения Ga, ростовой температуры и потока Ga на плотность эпитаксиального массива вертикальных самокаталитических нитевидных нанокристаллов GaP, формирующихся в процессе молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках Si (111). Морфология массивов ННК исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии.

Было обнаружено, что предварительное осаждение Ga ведёт к снижению плотности вертикальных ННК, а самоорганизованное формирование каталитических капель Ga необходимого размера может осуществляться в присутствии адатомов P.

Изучено влияние температуры роста и потока Ga на поверхностную плотность и вертикальность массивов GaP ННК. Увеличение температуры роста с 610°C до 630°C способствует резкому увеличению доли вертикальных ННК в несколько раз. А при уменьшении в два раза абсолютных потоков Ga и P с сохранением отношения ВЕР потоков резко подавляется островковый рост.

Список литературы

1. Дубровский, В. Г., Цырлин, Г. Э., и Устинов, В. М. Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы: синтез, свойства, применения. // Обзор. Semiconductors 2009, 43(12), 1585-1629.

Разработка подходов к формированию планарного электровакуумного диода на основе массива из УНТ, синтезированных на торце пленки Co-Nb-N(O)

Ерицяг Г. С.^{1,2}, Громов Д.Г.¹, Дубков С.В.¹, Кицюк Е.П.², Савицкий А.И.², Дудин А.А.³

¹НИУ МИЭТ

²НПК «Технологический центр»

³ИНМЭ РАН

e-mail: gosha22_07@mail.ru

Современный мир невозможно представить без интегральных схем. В связи с этим, технологии полупроводниковых ИС непрерывно развиваются. Известным недостатком полупроводниковых микросхем является их низкая радиационная стойкость. ИС оказываются чувствительными к воздействию высокоэнергетических частиц, что проявляется в возникновении радиационных дефектов и нарушении работы р-п переходов и, как следствие, приводит к выходу из строя ИС. Другой проблемой при использовании ИС, в частности, в космическом пространстве является негативное воздействие высоких и низких температур, что приводит к выходу из строя ИС. Таким образом, развитие физико-технологических основ технологии изготовления ИС, работающих в подобных условиях, является актуальным. Интегральные автоэмиссионные микроприборы - перспективное направление микроэлектроники, связанное с использованием качественно новых материалов, которые могут использоваться в качестве автоэлектронных эмиттеров. Относительно малый диаметр УНТ по сравнению с их длиной, приводит к уникальному аспекту отношению, играющему важную роль в эмиссионной электронике. В сочетании с большой механической прочностью и химической стабильностью, преимущества УНТ делают их использование более привлекательными в качестве эмиссионных катодов электровакуумных устройств по сравнению с другими известными материалами, например молибденом, кремнием, алмазом, графитом [1]. Несмотря на то, что работа выхода для МУНТ ~ 5 эВ, сравнима с графитом, углеродные нанотрубки остаются привлекательными для использования в области электронных эмиттеров из-за большой напряженности электрического поля у концов трубок, при низких макроскопических полях между анодом и катодом (102-103 В/мкм) [2].

В данной работе представлена возможность формирования эмиссионных элементов на основе аморфного сплава Co-Nb-N(O). Привлекательность предложенного подхода использования многокомпонентных пленок сплавов позволяет провести операцию травления и затем при термообработке локально сформировать кластеры на открытых участках сплава. Другой особенностью предложенного процесса роста УНТ на многокомпонентных пленках сплавов состоит в широком наборе факторов для управления процессом, что позволяет управлять геометрическими параметрами массивов УНТ. При использовании пленок сплавов рост УНТ возможен на тонких пленках различной толщины и проводимости. Все это указывает на хорошую технологичность такого приема роста УНТ, что

позволяет встраивать этот процесс в технологию изготовления ИС для формирования эмиссионных элементов на торцах многокомпонентного сплава.

Пленка каталитического сплава формировалась подложках кремния. После химической обработки они были окислены. Далее осаждалась пленка Si_3N_4 . Каталитическая пленка наносилась методом магнетронного распыления.

Полученные подложки прошли процесс осаждения SiO_2 , необходимого для создания твердой маски. Далее проводилось ионное травление. Для синтеза УНТ был выбран способ химического осаждения из газовой фазы. Образцы, полученные по результатам проведенных процессов, исследовались при помощи электронно-ионного растрового микроскопа. На специальном стенде была оценена адгезия УНТ к поверхности катализатора. При помощи измерительного комплекса с вакуумной камерой были получены ВАХ сформированных структур.

Были исследованы особенности формирования углеродных наноструктур. Определены основные технологические режимы для получения массивов УНТ с необходимой геометрией. Проведенные испытания показали, что массивы УНТ имеют отличную адгезию: усилие на отрыв достигает 5 МПа. Был сформирован технологический маршрут и разработан процесс травления пленки катализатора. Удалось разработать вариант топологии эмиссионного прибора и получить УНТ на торцах пленки катализатора. Получены часть ВАХ сформированных структур, необходимо дальнейшее исследование для определения эмиссионных характеристик.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2020-2022 гг. соглашение FSMR-2020-0018 и при поддержке РФФИ, проект 19-38-90206

Список литературы

1. W. Zhu et al. Science 282 (1998), C. Bower et al. Appl.Phys.Lett. 75 (1999)
2. Gao Y.-L., Zhu C.-C. Displays. 30 (2009)

Optical and electrical properties of CdSe/CdS/ZnS quantum dots Langmuir monolayer

AL-ALwani A. J.¹, Mironyuk V.N.¹, Begletsova N.N.¹, Glukhovskoy E.G.¹

¹Saratov State University

e-mail: ammarhamlet2013@yahoo.com

The optical and electric properties of CdSe/CdS/ZnS quantum dots (QDs) monolayer studied under the influence of the distance between quantum dots monolayer and substrate. Langmuir monolayers of CdSe/CdS/ZnS quantum dots [1] (with an average diameter of 8 nm and stabilized by 3-n-octylphosphine oxide molecules TOPO) deposited on a silicon substrate. Langmuir Blodgett (LB) method [2] provides an excellent reproducibility of mono and multilayer thin film. The tunneling current depends on the distance between the QD monolayer and the conducting surface of the substrate (applied voltage ± 1 V by the STM method). The current value at any voltage was higher for the QD monolayer coated substrate without an insulating layer. In this case, both the value of the potential barrier height between the probe and the QD and between the QD and the substrate decreases. The I-V characteristics were recorded for each case at least 30 times. The resulting current for the QD monolayer was a decrease of about 66% with the presence of a three-layer of liquid crystal 8CB [3] (8CB as an insulator between quantum dots and substrate). The photoluminescence properties showed that the insulator film (8CB layers)

between the QD monolayer and the substrate made it possible to significantly increase the photoluminescence intensity and to decrease the rate of QD oxidation upon laser irradiation. Also, It was found that during the process of irradiation, the luminescence peak is shifted to the blue region. The peak width at half maximum decreased from 7.3 to 2.7 nm.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 19-03-00763-a), within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for Ivanovo State University (project No. FZZM-2020-0006).

References

1. Ammar J.K. Al-Alwani, A.S. Chumakov, O.A. Shinkarenko, I.A. Gorbachev, M.V. Pozharov, S Venig, E.G. Glukhovskoy Formation and optoelectronic properties of graphene sheets with CdSe/CdS/ZnS quantum dots monolayer formed by Langmuir-Schaefer hybrid method // Applied Surface Science. - 2017. - Vol. 424. - P. 222-227.
2. Begletsova N.N., Baimagambetova L.T., Mironyuk V.N., Smirnova A.I., Venig S.B., Usol'tseva N.V., Glukhovskoy E.G. Formation of Gibbs and Langmuir floating layers based on copper nanoparticles: temperature and concentration effects, J. Phys.: Conf. Ser. 1410, 012216, 2019.
3. Begletsova N.N., Mironyuk V.N., Santer S., Smirnova A.I., Usol'tseva N.V., Glukhovskoy E.G. Effect of the composition and temperature of the subphase on the surface potential of the Langmuir monolayer of 8CB liquid crystal // J. Phys.: Conf. Ser. 2020 1697 012112; doi:10.1088/1742-6596/1697/1/012112.

Плазмохимическое осаждение фосфида галлия при низких температурах

Уваров А. В.^{1,2}, Баранов А.И.^{1,2}, Вячеславова Е.В.^{1,2}, Максимова А.А.^{1,2}, Морозов И.А.^{1,2},
Кудряшов Д.А.^{1,2}, Гудовских А.С.^{1,2}

¹СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

e-mail: lumenlight@mail.ru

В последние годы растет интерес к таким некристаллическим полупроводниковым материалам, как a-Si: H, CdTe, CIGS и др. [1]. На сегодняшний день с использованием этих материалов производится большинство TFT-дисплеев и тонкопленочных солнечных элементов [2]. Кроме того, некристаллические полупроводниковые материалы положены в основу таких современных направлений, как многопереходные фотоэлектрические преобразователи третьего поколения, гибкие и прозрачные светодиодные дисплеи [3]. Таким образом, актуальной на данный момент задачей является поиск новых аморфных и микрокристаллических полупроводниковых материалов для расширения диапазона их возможностей и областей применения. Одним из таких материалов является фосфид галлия (GaP), полупроводниковый материал с шириной запрещенной зоны в кристаллической форме равной 2,26 эВ. Оптические свойства аморфного фосфида галлия находят применение в нелинейной фотонике при создании волноводов, оптических резонаторов а также при генерации второй гармоники[4][5].

Ранее микрокристаллический и аморфный GaP был получен методами катодного и магнетронного распыления [6][7]. Было отмечено, что в зависимости от метода получения, свойства GaP могут варьироваться в широком диапазоне. Одним из методов

получения фосфида галлия является газофазное плазмохимическое осаждение (PECVD), с использованием триметилгаллия ($\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$) и фосфина (PH_3) в качестве источников галлия и фосфора, соответственно. При этом благодаря активации прекурсоров при помощи ВЧ плазмы (13,56 МГц) возможно создать достаточно низкую температуру роста для формирования аморфного материала. Преимущества данного метода дают предпосылки для формирования тонких слоев аморфного GaP при низких температурах. Актуальным является исследование свойств аморфного фосфида галлия полученного методом PECVD при низких температурах.

В данной работе представлены результаты по формированию и исследованию свойств аморфного GaP полученного при температуре 250 °С методом PECVD. Изучены структурные свойства и морфология поверхности полученных слоев GaP на подложках кремния. Исследованы оптические и электрофизические свойства аморфного фосфида галлия и проведена оценка возможности его использования в приборах оптоэлектроники и солнечной энергетики.

Список литературы

1. Hideo Hosono et. al. Proceedings of the National Academy of Sciences, **114** (2) 233-238 (2017)
2. Sharma, S., Jain, K. K., & Sharma, A. Materials Sciences and Applications, **6**(12), 1145 (2015).
3. Sheng, J., et. al. Journal of Semiconductors, **39**(1), 011008. (2018)
4. Tilmann B., et. al., Nanoscale Horiz. **5**, 1500 (2020).
5. Wilson D. J., et. al, Nat. Photonics **14**, 57 (2019).
6. Elgun N., Gurman S.J., Davis E.A., J. Phys. Condens. Matter **12**, 4723 (2000).
7. Matsumoto N., Kumabe K., Jpn. J. Appl. Phys. **18**, 1011 (1979).

Влияние температуры субфазы на морфологию пленки Ленгмюра-Блоджетт арахидовой кислоты, содержащей наночастицы меди

Беглецова Н. Н.¹, Миронюк В. Н.¹, Аль-Алвани А.Ж.К.¹, Глуховской Е. Г.¹

¹СГУ им. Н. Г. Чернышевского

e-mail: nadya-beg98@yandex.ru

Ранее проведенные исследования показали, что повышение температуры субфазы усиливает процесс сорбции наночастиц меди (HЧ Cu) из объема на поверхность субфазы. Кроме того он протекает более интенсивно при наличии на поверхности монослоя молекул арахидовой кислоты. Методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) ранее было показано, что степень конденсации монослоя при его переносе на твердую подложку существенно влияет на степень агрегации HЧ Cu : их количество, латеральные размеры и высота увеличиваются при увеличении давления переноса [1-3]. Проведенные исследования являются продолжением работы по изучению влияния управляющих параметров (температуры субфазы, ее состава, объема аликвоты наносимого вещества на поверхность водной субфазы, давления переноса монослоя на твердую подложку и т.п.) на формирование монослоя и пленочных структур поверхностно-активных веществ (ПАВ), содержащих металлические наночастицы.

В настоящей работе монослои арахидиновой кислоты формировали при двух температурах 23 °С и 37 °С на поверхности чистой водной субфазы и водного раствора, содержащего наночастицы меди, стабилизированные ПАВ додецилсульфатом натрия (ДДС). После формирования монослои переносились на подложки монокристаллического кремния и исследовались методом АСМ в полуконтактном режиме на сканирующем зондовом микроскопе Nanoscope II (NT-MDT, Россия).

На АСМ изображениях пленки арахидиновой кислоты на твердой подложке, перенесенной при температуре субфазы 23 °С, наблюдалась адсорбция ПАВ ДДС с НЧ Cu. На них четко просматривались сферические объекты в виде частиц Cu с ПАВ ДДС в составе пленки.

На АСМ изображениях было видно, что монослой, сформированный при температуре 37 °С на поверхности деионизованной воды (без добавления наночастиц меди), имеет круговые разрывы. Вместе с этим он становится менее однородным, уменьшается степень покрытия им подложки, увеличивается средняя толщина и шероховатость пленки. Такое поведение может объясняться увеличением расстояния между молекулами арахидиновой кислоты при более высокой температуре субфазы.

Таким образом, наблюдаемые изменения в морфологии пленки связаны с агрегацией наночастиц меди при увеличении температуры водной субфазы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-03-00763-а) и в рамках госзадания Минобрнауки РФ для Ивановского государственного университета (проект № FZZM-2020-0006)

Список литературы

1. Chumakov A., Al-Alwani A.J., Ermakov A., Shinkarenko O., Begletsova N., Glukhovskoy E., Santer S. The formation of arachidic acid Langmuir monolayers on the NiCl_2 solution, J. Phys.: Conf. Ser. 1124, 081009, 2018.
2. Begletsova N.N., Baimagambetova L.T., Mironyuk V.N., Smirnova A.I., Venig S.B., Usol'tseva N.V., Glukhovskoy E.G. Formation of Gibbs and Langmuir floating layers based on copper nanoparticles: temperature and concentration effects, J. Phys.: Conf. Ser. 1410, 012216, 2019.
3. Al-Alwani A.J., Chumakov A., Shinkarenko O., Qassime M., Begletsova N., Gorbachev I., Venig S., Kazak A., Glukhovskoy E. Effect of subphase conditions on the formation of graphene Langmuir layers, J. Phys.: Conf. Ser. 1135, 012029, 2018.

Influence of plasmon resonance on the luminescence of thin oxide films doped with rare earth ions

Lapinski Marcin¹, Sadowski Wojciech¹, Kuznetsov Vladimir V.², Charykov Nikolay², Koscielska Barbara¹

¹University of Technology, Poland

²Saint-Petersburg State Electrotechnical University, Russia

e-mail: marcin.lapinski@pg.edu.pl

Integration of the luminescence materials with plasmonic nanostructures may open new applications possibilities. Especially when it leads to enhance of luminescent properties. Such a hybrid structure can be formed by thin oxide layers doped with rare earth ions, deposited on metal nanostructures. The oxide material can here be, for example, TiO_2 or TeO_2 . Titanium

dioxide seems to be one of the most popular oxide material, as a matrix for rare-earth ions. On the other hand, tellurium dioxide can be also considered as excellent in hosting rare-earth ions because of its low phonon energy (ca. 700–800 cm^{-1}), what allows to minimize the non-radiative losses. Among all rare earth ions, europium (Eu) has been intensely studied for a few decades. Whereas Eu usually assumes trivalent oxidation state (Eu^{3+}), divalent one is also stable (Eu^{2+}), but characterized by different luminescent properties. As a red light emitter, Eu^{3+} may be employed in various optical devices. In turn, a very special metal, among various plasmonic materials, is gold. This is due to two properties of Au: plasmon resonance in the visible range of electromagnetic radiation and high chemical stability. Moreover, research shows that Au nanoparticles can positively influence the intensity of rare earth ion luminescence emission.

In this work the study of the optical properties of europium doped titanium dioxide and tellurium dioxide thin films ($\text{TiO}_2\text{:Eu}$ and $\text{TeO}_2\text{:Eu}$) enhanced by gold plasmonic nanostructures are presented. Plasmonic platforms were manufactured by thermal annealing of thin film of Au, deposited on a Corning glass substrate. As a result of thermal treatment, gold spherical nanostructures with average dimensions of 50 nm were obtained. Luminescent $\text{TiO}_2\text{:Eu}$ or $\text{TeO}_2\text{:Eu}$ films were deposited by RF magnetron sputtering from mosaic targets. Morphology of gold nanostructures were investigated by SEM and TEM microscopes, while composition of oxides films were analyzed by XPS methods. Luminescence properties were studied on the basis of excitation and emission spectra. Experiments have shown that such structures exhibit interesting luminescent properties and could be potential candidates for optoelectronics.

Подавление релаксации высших поляризационных моментов щелочных атомов в сверхчастых спин-обменных столкновениях

Окуневич А. И.¹

¹ФТИ им. А.Ф.Иоффе

e-mail: Al.Okunevich@mail.ru

Подавление релаксации поперечной ориентации в слабом продольном магнитном поле (ларморовская частота много меньше частоты столкновений) хорошо известно [1-3]. Оно нашло применение в магнитометрии [4] и получило название SERF (спиновый обмен без релаксации). В настоящей работе путем решения нелинейных уравнений спин-обмена показано, что поперечная релаксация подавляется не только у ориентации, но ещё и у всех высших поляризационных моментов (ПМ): выстраивания, октупольного, гексадекапольного и других моментов. Вследствии этого поперечные высшие ПМ становятся сравнимыми по амплитуде с поперечной ориентацией. В нулевом магнитном поле поперечная релаксация всех ПМ становится равной нулю и реализуется сохранение во времени всех поперечных ПМ. Эффект подавления реализуется только у компонент ПМ с проекцией ± 1 . Необходимым условием эффекта у высших ПМ является наличие продольной поляризации атомов. Обнаруженное подавление релаксации вызвано сохранением поперечного углового момента щелочных атомов в столкновениях.

Список литературы

1. W. Happer, H. Tam, Effect of rapid spin exchange on the magnetic-resonance spectrum of alkali vapors, *Phys. Rev*, **A16**, N5, p. 1877 1891 (1977)
2. I. M. Savukov, M. V. Romalis, Effects of spin-exchange collisions in a high-density alkali vapor in low magnetic fields, *Phys. Rev*, **A71**, 023405 (2005)
3. A. I. Okunevich and N. A. Dovator, Merging resonant frequencies and changing the sign of the g-factors of different atoms with frequent spin exchange, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1400** 066034 (2019)
4. I. M. Savukov, Spin Exchange Relaxation Free (SERF) High Sensitivity Magnetometers, *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation* 19, DOI 10.1007/978-3-319-34070-8_15, Springer International Publishing Switzerland 2017

Оптические свойства монокристаллов $\text{CsGd}(\text{MoO}_4)_2$ с двойным допированием ионами Tb^{3+} - Yb^{3+}

Рядун А. А., Рахманова М.И., Трифанов В.А., Павлюк А.А.

ИНХ СО РАН

e-mail: ryadunalexey@mail.ru

Новые монокристаллы оптического качества $\text{CsGd}(\text{MoO}_4)_2$ с двойным допированием ионами тербия Tb^{3+} и иттербия Yb^{3+} были выращены методом Чохральского с низким градиентом температур. Оптические свойства кристаллов $\text{CsGd}(\text{MoO}_4)_2: \text{Tb}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ исследованы методом фотолюминесценции в интервале температур 77–340К. Спектры излучения кристаллов $\text{CsGd}(\text{MoO}_4)_2: \text{Tb}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ при возбуждении на 330нм Хелампой мощностью 450Вт состоят из двух хорошо разрешенных групп линий. Полосы излучения в зеленой области спектра относятся к переходам Tb^{3+} с уровня $^5\text{D}_4$ на уровни $^7\text{F}_i$ ($i = 3, 4, 5, 6$). Полосы излучения в ближней инфракрасной области относятся к переходу $^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$ ионов Yb^{3+} в диапазоне, соответствующем ширине запрещенной зоны кремния в солнечных элементах. Квантовый выход излучения Yb^{3+} при возбуждении 330нм составляет 34%. Эти результаты показывают, что между примесными ионами происходит передача энергии. Таким образом, кристаллы $\text{CsGd}(\text{MoO}_4)_2: \text{Tb}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ являются многообещающим материалом для повышения эффективности преобразования энергии кремниевых солнечных элементов. Были получены кривые затухания энергетических уровней $^5\text{D}_4 \text{ Tb}^{3+}$ и $^2\text{F}_{7/2} \text{ Yb}^{3+}$ в кристаллах $\text{CsGd}(\text{MoO}_4)_2$ и измерены времена жизни. Время затухания переходов Tb^{3+} значительно меняется при температурах, близких к температуре окружающей среды. Такое поведение температурной зависимости времени затухания предполагает перспективное применение этого эффекта для бесконтактной термометрии времени жизни люминесценции. Хорошая относительная чувствительность наблюдается в диапазоне 240–340 К. Чувствительность составляет $1 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}$ при 300К, что сопоставимо с чувствительностью материалов, используемых в настоящее время. Кроме того, результаты исследования диаграммы цветности показывают, что $\text{CsGd}(\text{MoO}_4)_2: \text{Tb}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ обладают зеленым свечением в видимом диапазоне, близким к стандартам SMPTE для основного зеленого цвета [1-3], что показано на диаграмме CIE 1931. Коррелированная цветовая температура варьируется от 5538К при 77К до 4297К при 340К.

Список литературы

1. P. Abdul Azeem, M. Kalidasan, R.R.Reddy, K.Ramagopal, Spectroscopic investigations on Tb^{3+} doped lead fluoroborate glasses, Opt.Commun., 285 (2012) 3787-3791. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.05.034>
2. B.C. Jamalaih, M.V.Vijaya Kumar, K.Rama Gopal, Investigation on luminescence and energy transfer in Tb^{3+} - doped lead telluroborate glasses, Phys.B 406 (2011) 2871-2875. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2011.04.051>.
3. J. Young Park, Hong Chae Jung, G. Seeta Rama Raju, Byung. Kee Moon, Jung Hyun Jeong, Jung Hwan Kim, Solvothermal synthesis and luminescence properties of Tb^{3+} -doped gadolinium aluminum garnet J.Lumin.130 (2010) 478-483. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2009.10.017>

Оптимизация структур кремниевых наносфер для фокусировки света

Устименко Н. А.¹, Барышникова К. В.¹, Мельников Р. В.¹, Корнован Д. Ф.¹, Ульянов В. И.¹, Евлюхин А. Б.^{2,1,3}

¹ИТМО

²Leibniz Universitat Hannover

³МФТИ

e-mail: nustimenko38@gmail.com

Диэлектрическая металинза – аксиально-симметричная структура диэлектрических или полупроводниковых наночастиц для фокусировки света и/или построения изображения [1]. Интерес к металинзам вызван возможностью создать на их основе компактные оптические устройства. Металинзы обладают большим числом параметров, которые нужно точно задать в процессе разработки. Часто эти параметры определяют ручным перебором, что приводит к большим затратам вычислительных ресурсов и времени разработки, при этом для аперiodических структур проблема усугубляется. Оптимизационные методы могут значительно повысить эффективность разработки металинз.

В настоящей работе предложен метод разработки диэлектрических металинз на основе одновременного применения мультипольного разложения, нулевого борновского приближения и генетического алгоритма. Мы исследуем фокусировку света с помощью структур, состоящих из конечного числа кремниевых наносфер, поддерживающих электрические и магнитные мультипольные резонансы. Мы используем разложение по декартовым мультиполям вплоть до квадруполей [2], когда оптический отклик каждой частицы в структуре связан с возбуждением её дипольных и квадрупольных моментов, которые являются источниками рассеянных волн в системе. Поскольку эффект фокусировки достигается за счёт интерференции падающей и рассеянных волн, можно контролировать фокусировку, оптимизируя положение частиц в пространстве и, как следствие, их оптический отклик. Считая, что мультипольные моменты сфер возбуждаются только падающей волной, т.н. нулевое борновское приближение, мы оптимизировали координаты частиц с помощью эволюционного алгоритма SEMO [3] для фокусировки на расстоянии 5 мкм от структуры на длинах волн мультипольных резонансов частицы диаметром 200 нм. В процессе оптимизации диаметр всех частиц был одинаковым и фиксированным, а минимальное расстояние между частицами было ограничено. Это ограничение продиктовано применимостью мультипольного разложения и нулевого борновского приближения, и оно было предварительно найдено для одного кольца как базовой структуры двумерных металинз. Распределение интенсивности вблизи оптимизированных структур и положение фокуса находятся в согласии с расчётом методом Т-матриц [4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и DFG в рамках научного проекта №20-52-12062.

Список литературы

1. M. Khorasaninejad, F. Capasso, Metalenses: Versatile multifunctional photonic components, *Science*, **358**, eaam8100, 2017.
2. V.E. Babicheva, A.B. Evlyukhin, Analytical model of resonant electromagnetic dipole-quadrupole coupling in nanoparticle arrays, *Phys. Rev. B*, **99**, 195444, 2019.
3. D. Kalyanmov, *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, Vol. **16**, John Wiley & Sons, 2001.

4. G.D. Gillen, S. Guha, Modeling and propagation of near-field diffraction patterns: A more complete approach, *Am. J. Phys.*, **72**, 1195-1201, 2004.

Спектральный метод исследования структуры сигнала ядерного магнитного резонанса

Макеев С. С.¹

¹СПбПУ

e-mail: st_makeev@mail.ru

Развитие научно-технического прогресса привело к появлению большого числа задач в прикладной физике, которые необходимо решать, например, при контроле состояния конденсированных сред. Наибольшие сложности возникают при разработке быстрых и надежных методов экспресс-контроля состояния конденсированных сред [1-3]. Это связано с тем, что после экспресс-контроля необходимо получить подтверждение о выявленном в среде отклонении от стандартного на приборах высокого разрешения в стационарной лаборатории [3-6]. По этой причине измерения, которые используются для экспресс-контроля не должны вносить изменений в физическую структуру и химический состав исследуемой среды. Наиболее универсальными (можно использовать для всех конденсированных сред, в составе которых есть ядра с магнитными моментами) являются приборы, принцип работы которых основан на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [5, 6].

Остальные типы приборов (оптические, ультразвуковые, рентгеновские и т.д.) для экспресс-контроля конденсированных сред это условие могут обеспечить только при работе с определенным классом сред [2, 4, 5].

Одним из недостатков использования модуляционной методики при экспресс-контроле состояния конденсированных сред является отсутствие адекватной теоретической модели, которая позволяет воспроизводить форму линии регистрируемого сигнала ЯМР в слабом поле и расшифровывать информацию, которая содержится в ней. Например, определять структуру сигнала или состав компонент, из которых состоит исследуемая среда. Проведенные исследования показали, что это существенно ограничивает возможности экспресс-контроля состояния конденсированных сред методом ЯМР в месте взятия пробы. Одним из возможных вариантов решения этой задачи является использование спектрального анализа для расшифровки регистрируемых сигналов ЯМР от конденсированной среды с использованием модуляционной методики. Для этого нами была разработана метод, позволяющий на основе сравнения спектральных компонент экспериментальных сигналов поглощения и дисперсии с расчетными этими сигналами, определять, как структуру линии сигнала ЯМР, так и состав компонент среды, если она является смесью сред, которые не вступили между собой в химическую реакцию. Для его реализации на основании проведенных исследований было обосновано использование дискретного преобразования Фурье для построения амплитудных и фазовых спектров сигналов ЯМР, регистрируемых в условиях модуляции слабого магнитного поля в межполюсном пространстве малогабаритного ЯМР спектрометра, а также для рассчитанных сигналов ЯМР с использованием уравнений Блоха с новыми коэффициентами.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что разработанный спектральный метод исследования не имеет ограничений по использованию. Для её

применения необходимо зарегистрировать сигнал ЯМР от среды, содержащей ядра с магнитными моментами, например, на резонансной частоте протонов (в состав более 99 % жидких сред входят протоны) и измерить константы релаксации T_1 и T_2 для расчета сигналов поглощения и дисперсии. Построить его амплитудные и фазовые спектры. Рассчитать для этой среды сигналы поглощения и дисперсии. Построить их амплитудные и фазовые спектры. Подобрать весовые коэффициенты в спектрах получить совпадения гармоник между экспериментом и теорией. Значения весовых коэффициентов в этом случае определяют вклад в структуру сигнала ЯМР сигналов поглощения и дисперсии. С учетом того, что регистрация сигнала ЯМР при максимальном отношении сигнал/шум сигнал поглощения всегда больше сигнала дисперсии, весовые коэффициенты определяются однозначно. При исследовании смесей число весовых коэффициентов увеличивается, кроме того появляются коэффициенты, соответствующие концентрациям сред в смеси. Определение их позволяет идентифицировать состав и концентрацию компонент в смеси.

Список литературы

1. Муссил, В.В. Экспресс-метод определения показателя преломления жидкостей / В. В. Муссил, В. В. Пилипенко, Е. Т. Лемешевская, К. Д. Керемжанов // Приборы и техника эксперимента. – 2011. - № 3. – С. 113-115.
2. Васильев, Н. С. Статистический Фурье-спектрометр для проведения экспресс-анализа химических веществ / Н. С. Васильев, Ил. С. Поляк, Иг. С. Поляк, А. А. Есаков, А. Н. Морозов, С. Е. Табалин // Приборы и техника эксперимента. - 2015. - № 1. - С. 181–184.
3. Rykin, E. V. The development of a new method for making justified decisions by municipal authorities in the management of territories on the basis of the results of the environmental express-control of the state of various media / E.V. Rykin, A.V. Moroz, K.J. Smirnov, V.V. Davydov, V.V. Yushkova // MATEC Web of Conference. – 2018. – V. 245. – P. 12002.
4. Архипов, В. В. Малогабаритные Фурье-спектрометры общего назначения: устройство и исследование / В. В. Архипов // Приборы и техника эксперимента. - 2012. - № 6. - С. 91–94.
5. Давыдов, В. В. Многофункциональный малогабаритный ядерно-магнитный спектрометр / В. В. Давыдов, Н. С. Мязин // Измерительная техника. - 2017. - № 2. - С. 58–62.
6. Myazin, N.S. On the possibility of recording absorption spectra in weak magnetic fields by the method of nuclear magnetic resonance / N. S. Myazin, V. V. Davydov, V. V. Yushkova, V. Yu. Rud // Journal of Physics: Conference Series. - 2018. - Vol. 1038 (1). – P. 012088.

Численное моделирование плазмонной линзы для фокусировки лазерного излучения

Козлова Е. С.^{1,2}, Котляр В. В.^{1,2}

¹ИСОИ РАН — филиал ФНИЦ Кристаллография и фотоника РАН

²Самарский университет

e-mail: kozlova.elena.s@gmail.com

В настоящее время большое количество работ посвящено фокусировке электромагнитного излучения плазмонными линзами, которые позволяют возбуждать и фокусировать поверхностные плазмон-поляритоны [1]. Плазмонные линзы, фокусирующие затухающие волны вблизи своей поверхности, часто имеют достаточно простую структуру в виде набора концентрических колец и/или канавок. Например, в [2] экспериментально исследована плазмонная линза, представляющая собой набор концентрических нано-щелей во внутренней части элемента и нано-канавок на внешних радиусах протравленных в тонкой металлической пленке, напыленной на подложку. Рассматриваемая линза позволяет остро фокусировать свет с длинами волн 650 нм и 750 нм, в обоих случаях позволяя достигнуть глубины по полуспаду интенсивности в 400 нм. При этом наиболее узкое пятно (0,32 от длины волны по полуспаду интенсивности) было получено для излучения с длиной волны 650 нм. Фокус располагался на расстоянии в 500 нм. В [3] рассматривается дизайн иммерсионной линзы, представляющей собой набор отверстий в пленке золота нанесенной на кварцевую подложку. Численное моделирование предсказывает наличие субволнового пятна с шириной по полуспаду интенсивности 0,22 от длины волны при фокусировке излучения в масле. Фокусное расстояние составляет порядка 300 нм. Необходимо отметить, что в воздухе данная линза фокусирует в пятно с шириной по полуспаду интенсивности 0,38 от длины волны. В [4] предложено три вида плазмонных линз в основу которых положены наборы концентрических колец в центральной части линзы и массив наноотверстий по окружности большего радиуса. Показано, что форма нанотверстий сильно влияет на дифракционные свойства линзы. Наиболее узкий фокус (0,14 от длины волны для моделирования и 0,2 от длины волны для эксперимента) дает дизайн плазмонной линзы с Т-образными отверстиями. Плазмонная линза с переменной глубиной рельефа, изготовленная из алюминия на стеклянной подложке, была рассмотрена в [5]. Линза, осуществляющая фокусировку в точку, была рассмотрена численно, а планарный ее аналог был изготовлен и исследован методом сканирующей ближнепольной оптической микроскопии. При фокусировке в точку ширина пятна составляла $\text{FWHM}=0,9\lambda$.

В данной работе была исследована плазмонная линза с непрерывным рельефом в тонких пленках (высотой 200 и 100 нм) золота и серебра. Линза представляла собой круговую диафрагму с диаметром $D_2 = 5$ мкм и дискообразное углубление в центре, глубиной 80 нм. Исследование проводилось путем численного моделирования процесса фокусировки радиально поляризованного гауссова пучка с длиной волны $\lambda = 633$ нм. Радиус гауссова пучка для обеих компонент E_x и E_y был выбран таким образом, чтобы его максимальная интенсивность приходилась на диафрагму. В процессе моделирования варьировалась высота пленки: 200 нм и 100 нм, а также диаметр центрального углубления в интервале от 1 мкм до 2 мкм с шагом 100 нм.

Результаты моделирования показали, что для обоих металлов толстая пленка дает более высокую интенсивность вблизи элемента. Однако, этим излучением достаточно сложно воспользоваться при решении практических задач. В связи с этим оптимизация дизайна проводилась для получения максимальной интенсивности на некотором

расстоянии от линзы. В этом случае, наиболее приемлемой оказалась толщина пленки в 100 нм. Сравнивая результаты для тонкой пленки можно видеть, что в обоих случаях лучшим оказался дизайн с диаметром углубления $D1 = 1,6$ мкм, при этом интенсивность в фокусе плазмонной линзы из серебра в 2 раза выше, чем интенсивность в фокусе плазмонной линзы из золота. В то же время ширина фокального пятна по полуспаду интенсивности для обеих линз практически одинакова и равна $\text{FWHM} = 0,38\lambda$. Предложенная линза может применяться для формирования оптических пинцетов и ловушек [6].

Список литературы

1. Barnes, W.L. Surface pLasmon subwaveLength optics / W.L. Barnes, A. Dereux, and T.W. Ebbesen // *Nature*. - 2003. - V.424 - P. 824-830.
2. Chang, K.-H. Three-Dimensional Resolvable Plasmonic Concentric Compound Lens: Approaching the Axial Resolution from Microscale to Nanoscale / K.-H. Chang, Y.-C. Chen, W.-H. Chang, and P.-T. Lee // *ACS Photonics*. - 2018. - V.5(3). - P. 834-843.
3. Zhu, Y. Robustly Efficient Superfocusing of Immersion Plasmonic Lenses Based on Coupled Nanoslits. / Y. Zhu, W. Yuan, Y. Yu, and P. Wang // *Plasmonics*. - 2016. - V.11. - P. 1543-1548.
4. Chang, K.-H. Efficient modulation of subwavelength focusing via metaaperture-based plasmonic Lens for multifunction applications. / K.-H. Chang, Y.-C. Chen, W.-H. Chang, and P.-T. Lee // *Sci. Rep.* - 2018. - V. 8. - P. 13648.
5. Wang, H. Subwavelength Light focusing of plasmonic Lens with dielectric filled nanoslits structures / H. Wang, Y. Deng, J. He, P. Gao, N. Yao, C. Wang, X. Luo // *Journal of Nanophotonics*. - 2014. - V. 8(1). - P. 083079.
6. Pan, Y.-L. Optical-trapping of particles in air using parabolic reflectors and a hollow laser beam / Y.-L. Pan, A. Kalume, I. C. D. Lenton, T. A. Nieminen, A. B. Stilgoe, H. Rubinsztein-Dunlop, L. A. Beresnev, Ch. Wang, and J. L. Santarpia // *Optics Express*. - 2019. - V.27(23). - P. 33061-33069.

NEXAFS исследования карбонат-замещенного биоапатита

Петрова О.В.¹, Бакина К.А.^{1,2}

¹ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

²СГУ им. П. Сорокина

e-mail: teiou@mail.ru

Кость имеет многоуровневую иерархическую структуру и представляет собой биологический композит, в состав которого входят как органические компоненты к которым относится коллаген, составляющий более 90% органического матрикса, так и неорганические - биоапатиты, а также липиды и вода. Кость характеризуется высоким содержанием минерализованной компоненты, для позвоночных она составляет около 66% веса и 50 % объема, при этом процентное содержание минерализованной компоненты в составе костей рыб может быть значительно меньше, поэтому они обладают меньшей плотностью. Соотношение между органической и неорганической компонентами минерализованной ткани, а так же степень их взаимодействие между собой отвечает за такие ее физические свойства как твердость, прочность и упругость [1, 2, 3].

Основу костных тканей позвоночных составляет слабокристаллизованный биоапатит, с размерами отдельных кристаллитов порядка $\sim 50 \times 25 \times 5$ nm и малым по сравнению с

кристаллическим апатитом содержанием гидроксильной группы [ОН] [1]. В костных тканях (кости, дентин, эмаль и чешуя, в случае рыб) млекопитающих и большого числа рыб биоапатит представлен в виде гидроксилапатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ и его замещенных форм, в частности карбонат-замещенного гидроксиапатита кальция В-типа.

Связь между белковой и минеральной составляющей в костной ткани осуществляется за счет внедрения карбонатной группы $[\text{CO}_3]^{2-}$ на место фосфатного аниона $[\text{PO}_4]^{3-}$ и формирования карбонат-замещенного гидроксиапатита кальция В-типа. В зависимости от вида минерализованной ткани (кость, дентин и эмаль) и ее функций в живом организме биоапатит может содержать от 3 до 6 масс.% групп $[\text{CO}_3]^{2-}$. Наличие карбонатных групп в составе биоапатита увеличивает его реакционную способность и растворимость, которые непосредственно влияют на процессы ре- и деминерализации твердых тканей [2].

Ввиду сложности количественного определения содержания анионов $[\text{CO}_3]^{2-}$, карбонат-замещенный гидроксиапатит кальция В-типа характеризуют атомной пропорцией между кальцием и фосфором (апатитовый модуль). При этом органическую составляющую костной ткани характеризуют процентным массовым содержанием углерода. Метод NEXAFS-спектроскопии, позволяет достоверно определять наличие аниона $[\text{CO}_3]^{2-}$ в составе биоапатита по наличию характерного высокоинтенсивного пи-резонанса в C1s-спектре поглощения и определять его процентное содержание в исследуемых образцах. Метод NEXAFS-спектроскопии характеризуется атомной селективностью, дипольными правилами отбора, высокой чувствительностью к элементному составу и параметрам ближайшего окружения атома, поглотившего рентгеновский квант [4]. Ранее было показано, что анализ NEXAFS-спектров позволяет проводить элементный и химический анализ минерализованных тканей рыб, а также природных и синтетических материалов, содержащих кальций в своем составе [4,5].

В данной работе на примере костей рыб и млекопитающих, путем анализа C1s-, N1s-, P2p-, и Ca2p-NEXAFS спектров, проводится определение атомного и химического состава исследуемых образцов, а также оценка процентного содержания атомов углерода входящего в $[\text{CO}_3]^{2-}$ группу в составе карбонат-замещенного гидроксиапатита костей.

Исследования NEXAFS C1s-, N1s-, P2p-, и Ca2p спектров поглощения в рамках данной работы проводились на Русско-Немецком канале выхода и монохроматизации СИ на BESSY-II методом полного электронного выхода (Total electron Yield, TEY) [7].

Работа выполнена в рамках двусторонней программы Русско-Германской лаборатории BESSY II, при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-42-110002) и гранта Президента РФ №МК-3796.2021.1.2.

Список литературы

1. P. Szpak, Fish bone chemistry and ultrastructure: Implications for taphonomy and stable isotope analysis, J. of Archaeological Science, V.38, P.3358-3372, 2011.
2. J. D. Pasteris, B. Wopenka, J.J. Freeman et. al., Lack of OH in nanocrystalline apatite as a function of degree of atomic order: implications for bone and biomaterials, Biomaterials, V25(2), P.229-238, 2004.
3. H. Ehrlich Extreme Biomimetics, Springer, Berlin 2016.
4. J. Stor, NEXAFS Spectroscopy, Springer, Berlin, 1992.
5. H. Ehrlich, M. Ilan, M. Maldonado, et al., Three-dimensional chitin-based scaffolds from Verongida sponges (Demospongiae: Porifera). Part I. Isolation and identification of chitin, Int. J. Bio. Macromol, V.47(2), P.132-140, 2010.
6. Petrova O.V., Nekipelov S.V., Sivkov D.V et. al. // Comparative NEXAFS study of the selected icefish hard tissues and hydroxyapatite. J Phys Conf Ser Series V.917, P.042001, 2017.

7. S. I. Fedoseenko, D.V. Vyalikh, I.E. Iossifov et al., Commissioning results and performance of the high-resolution Russian–German Beamline at BESSY II, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, V.505, P.718-728, 2003.

Спектральная фурье-микроскопия переодических структур на основе аморфных и кристаллических пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

Соломонов А. И.^{1,2}, С.И. Павлов¹, П.И. Лазаренко³, В.В. Ковалюк⁴, А.Д. Голиков⁴, А.И. Проходцов⁴, Г.Н. Гольцман⁴, С.А. Козюхин⁵, С.А. Дьяков⁶, Н.А. Гиппиус⁶, С.Г. Тиходеев^{7,8}, А.Б. Певцов¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Университет ИТМО

³МИЭТ

⁴МГУ им. М. В. Ломоносова

⁵ИОНХ,

⁶Сколковский институт науки и техники

⁷МГУ

⁸ИОФ РАН

e-mail: solomonoff.alexandr@gmail.com

Материалы с фазовой памятью на основе сложных халькогенидов системы Ge-Sb-Te являются перспективными средами для реализации метаповерхностей различной конфигурации [1,2]. Подобные структуры могут служить платформой для создания новых элементов управления световыми потоками за счет изменения фазового состояния материала при различных внешних воздействиях [3].

В настоящей работе реализованы метаповерхности, представляющие собой системы полосок с субмикронным периодом как из аморфного, так и кристаллического $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Показано, что в таких объектах могут эффективно возбуждаться квазиволноводные моды, что в свою очередь, приводит к возникновению узких резонансов в оптическом отклике структуры в видимом спектральном диапазоне. Исследованы спектрально–угловые зависимости наблюдаемых пиков в спектрах отражения. Экспериментальные данные сопоставлены с расчетами дисперсионных кривых в одномерных периодических решетках из аморфного и кристаллического $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.

Аморфные тонкие пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ толщиной 130 нм формировались на кварцевых подложках методом магнетронного распыления поликристаллической мишени. Применение методов электронной литографии и плазмохимического травления позволило сформировать из однородной пленки периодические решетки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с различным периодом Λ (100 нм до 1 мкм) и фактором заполнения w/Λ (от 0,2 до 0,9), где w – ширина полосок. Нагрев пленок при температуре 160°C переводил их в кристаллическое состояние.

Оптические спектры отражения с угловым разрешением были измерены методом спектральной фурье-микроскопии. Фокусные расстояния и дистанции между линзами в оптической схеме установки были подобраны таким образом, что на поверхность CCD матрицы проецировалось фурье-изображение исследуемого объекта. В итоге в реальном масштабе времени формировалась двумерная карта спектров (в координатах длина волн–угол) измеряемой периодической структуры.

Спектры отражения синтезированных структур были рассчитаны с помощью Фурье-модального метода в форме матрицы рассеяния [4]. Сопоставление результатов

теоретического анализа с данными измерений позволяет сделать вывод, что наблюдаемые в эксперименте спектрально-угловые зависимости пиков отражения, обусловлены возбуждением, распространением и дисперсией квазиволноводных мод в исследуемых структурах.

Таким образом, методом магнетронного распыления с последующей электронной литографией и температурной обработкой синтезирован набор субмикронных периодических решеток $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в аморфном и кристаллическом состоянии. Методом спектральной фурье-микроскопии исследованы спектры отражения с угловым разрешением полученных структур. Установлен вид кривых дисперсии квазиволноводных мод в исследуемых структурах. Рассмотрены перспективы подобных структур для создания переключающих элементов для фотоники.

Список литературы

1. Wang Q, Rogers E T F, Gholipour B, Wang C M, Yuan G, Teng J and Zheludev N I 2016 Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials *Nat. Photonics* **10** 60–5
2. Dyakov S A, Gippius N A, Voronov M M, Yakovlev S A, Pevtsov A B, Akimov I A and Tikhodeev S G 2017 Quasiguided modes of opaline photonic crystals covered by $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ *Phys. Rev. B* **96** 45426
3. Karvounis A, Gholipour B, MacDonald K F and Zheludev N I 2016 All-dielectric phase-change reconfigurable metasurface *Appl. Phys. Lett.* **109** 051103
4. Tikhodeev S G, Yablonskii A L, Muljarov E A, Gippius N A and Ishihara T 2002 Quasiguided modes and optical properties of photonic crystal slabs *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* **66** 451021–4510217

Нелинейная оптическая динамика двумерных сверхрешёток квантовых Λ -излучателей

Рыжов И. В.¹, Маликов Р. Ф.², Малышев А. В.^{3,4}, Малышев В. А.^{1,5}

¹РГПУ им. А. И. Герцена

²БГПУ им. М. Акмуллы

³GISC, Universidad Complutense, Madrid, Spain

⁴ФТИ им. А. Ф. Иоффе

⁵ZIAM, University of Groningen, The Netherlands

e-mail: igoryzhov@yandex.ru

В течение последнего десятилетия мета-поверхности, состоящие из мета-атомов, привлекают большое внимание в силу их исключительных функциональных возможностей в управлении светом и уникальных применений в нанофотонике [1-3]. В частности, было экспериментально продемонстрировано, что атомарно тонкий слой MoSe_2 , инкапсулированный гексагональным нитридом бора, проявляет высокий коэффициент отражения в окрестности коллективного (экситонного) резонанса [4,5]. Квантовые метаповерхности массивов атомов, захваченных в оптической решетке [6] и двумерные суперкристаллы полупроводниковых квантовых точек [7-9] обнаруживают аналогичное поведение [10,11]. При этом, оптический отклик последних может демонстрировать мультистабильность и неустойчивости разных типов, такие как периодические и аperiodические автоколебания и динамический хаос.

Мы проводим теоретическое исследование оптического отклика двумерной сверхрешётки Λ -излучателей на квазирезонансное возбуждение. Полное поле, действующее на излучатель со стороны других, учтено в рамках приближения среднего поля. Последнее зависит от текущего состояния излучателя и в силу этого вносит в систему положительную обратную связь, приводящую к экзотическому отклику системы. Оптическая динамика излучателя описывается уравнениями для матрицы плотности 3×3 .

1. Аналитически рассчитан стационарный оптический отклик системы и показано, что он, как функция внешнего поля, может быть многозначным (мультистабильность) и неустойчивым в некоторых интервалах изменения параметров системы. Устойчивость/неустойчивость отклика анализируется на основе локальных показателей Ляпунова.

2. Расчитана бифуркационная диаграмма оптического отклика, дающая общее представление о возможных сценариях оптической динамики системы в целом. Обнаружены различные типы бифуркаций, такие как сверхкритические и субкритические бифуркации Андронова-Хопфа, а также бифуркации предельный цикл - хаос.

3. Изучена оптическая динамика системы. Найдено, что оптический отклик обнаруживает целый ряд неустойчивостей, таких как периодические и апериодические автоколебания и динамический хаос. Окалось, что частота автоколебаний зависит от амплитуды падающего поля, и для некоторых наборов параметров попадает в терагерцовый диапазон.

4. Показано, что в окрестности коллективного (экситонного) резонанса система полностью отражает падающее поле, действуя как идеальное зеркало. Кроме того, коэффициент отражения системы обнаруживает бистабильность и гистерезис.

Двумерные сверхрешётки легированных полупроводниковых квантовых точек с (дыркой в валентной зоне) [12] и органических нанокристаллов с вибронной структурой основного состояния [13], а также и оптические решётки с массивами захваченных атомов с Λ -конфигурацией оптических переходов можно рассматривать в качестве реализации предложенной модели.

Полученные результаты предполагают различные практические применения двумерных сверхрешёток квантовых Λ -излучателей, такие как бистабильное зеркало нанометровой толщины, перестраиваемый генератор когерентного терагерцового излучения (в режиме автоколебаний) и генератор оптического шума (в режиме хаоса). Чувствительность оптического отклика к начальным условиям (в хаотическом режиме) может быть интересна для кодирования информации. Найденные особенности делают рассматриваемую систему перспективной для нанофотоники. Они также стимулируют новые эксперименты.

Р. Ф. М. благодарит БГПУ им. М. Акмуллы за финансовую поддержку.

А. В. М. благодарит за поддержку Spanish MICIN grants MAT2016-75955 and PID2019-106820RB-C21.

Список литературы

1. H.-T. Chen, A. J. Taylor, N. Yu, Rep. *A review of metasurfaces: physics and applications*. Progr. Phys. **79**, 076401 (2016).
2. H.-H. Hsiao, C. H. Chu, D. P. Tsai. *Fundamentals and Applications of Metasurfaces*. Small Methods **1600064** (2017).
3. S. Chang, X. Guo, X. Ni. *Optical Metasurfaces: Progress and Applications*. Annu. Rev. Mater. Res. **48**, 279 (2018).
4. P. Back, S. Zeytinoglu, A. Ijaz, M. Kroner, A. Imamoglu. *Realization of an electrically tunable narrow-bandwidth atomically thin mirror using monolayer MoSe*. Phys. Rev. Lett. **120**, 037401 (2018).

5. G. Scuri, Y. Zhou, A. A. High, D. S. Wild, C. Shu, K. De Greve, L. A. Jauregui, T. Taniguchi, K. Watanabe, P. Kim, M. D. Lukin, H. Park. *Large excitonic reflectivity of monolayer MoSe₂ encapsulated in hexagonal boron nitride*. Phys. Rev. Lett. **120**, 037402 (2018).
6. R. Bekenstein, I. Pikovski, H. Pichler, E. Shahmoon, S. F. Yelin, M. D. Lukin. *Quantum metasurfaces with atom arrays*. Nat. Physics **16**, 676 (2020).
7. W. H. Evers, B. Goris, S. Bals, M. Casavola, J. de Graaf, R. van Roij, M. Dijkstra, D. Vanmaekelbergh. *Low-dimensional semiconductor superlattices formed by geometric control over nanocrystal attachment*. Nano Lett. **13**, 2317 (2013).
8. A. S. Baimuratov, V. K. Turkov, A. V. Baranov, A. V. Fedorov. *Quantum-dot supercrystals for future nanophotonics*. Sci. Rep. **3**, 1727 (2013).
9. A. S. Baimuratov, A. I. Shlykov, W. Zhu, M. Yu. Leonov, A. V. Baranov, A. V. Fedorov, I. D. Rukhlenko. *Excitons in gyrotropic quantum-dot supercrystals*. Opt. Lett. **42**, 2423 (2017).
10. I. V. Ryzhov, R. F. Malikov, A. V. Malyshev, V. A. Malyshev. *Nonlinear optical response of a two-dimensional quantum-dot supercrystal: Emerging multistability, periodic and aperiodic self-oscillations, chaos, and transient chaos*. Phys. Rev. A **100**, 003800 (2019).
11. Д. Я. Байрамдурдыев, Р. Ф. Маликов, И. В. Рыжов, В. А. Малышев. *Нелинейная оптическая динамика и высокая отражательная способность монослоя трёхуровневых квантовых излучателей с дублетом в возбуждённом состоянии*. ЖЭТФ, **158**, 269 (2020).
12. D. Brunner, B. D. Gerardot, P. A. Dalgarno, G. Wust, K. Karrai, N. G. Stoltz, P. M. Petroff, R. J. Warburton. *A coherent single-hole spin in a semiconductor*. Science **325**, 70 (2009).
13. K. Baba, H. Kasai, K. Nishida, H. Nakanishi. Functional organic nanocrystals, in *Nanocrystals*, ed. Y. Masuda (IntechOpen, 2011) Ch 15, p. 397.

Новая методика исследования магнитной дорожки от подвижного объекта

Логунов С. Э.¹

¹Северо-Западный открытый технический университет

e-mail: sema-logunov@ya.ru

Изучение магнитных полей и физических явлений является актуальной задачей фундаментальной и прикладной физики. Магнитная дорожка является одним из самых сложных явлений для исследований. Его возникновение связано с изменением структуры силовых линий в зоне движения магнитного объекта на глубине более 550 м. Исследование магнитной дорожки на полевых объектах является очень дорогостоящим сложным процессом, поэтому методы, позволяющие исследовать его в лабораторных условиях, чрезвычайно популярны.

Для решения этой проблемы мы предлагаем новый оптический метод исследования структуры и параметров магнитной дорожки с помощью лазерного излучения, который востребован в исследованиях.

На основании предыдущих исследований нами была разработана экспериментальная установка для исследования магнитной дорожки.

Лазерное излучение с $\lambda = 632$ нм поступает через диафрагму и линзу на прозрачную поверхность ячейки из кварцевого стекла. Ячейка находится в поле электромагнита с индукцией $B_0 = 86$ мкТл - среднего магнитного поля Земли на рассматриваемых глубинах. Отраженное излучение от наночастиц магнетита, которые равномерно распределены по всему объему ячейки, регистрируется ПЗС-камерой. В зоне движения магнитного объекта наночастицы располагаются на силовых линиях его магнитного поля. Агломераты, состоящие из наночастиц, образующих в рассеянном лазерном излучении спекл-структуры.

После появления в зоне магнитного поля магнитного объекта силовые линии на нем замыкаются. Начинается уничтожение агломератов. Записанная структура спеклов изменяется. Это разрушение зависит от скорости движения объекта и его магнитного поля.

Анализ полученных спекл-изображений показывает, что разработанный нами оптический метод позволяет определить наличие магнитной дорожки на глубине и изучить ее параметры в зависимости от различных факторов.

Список литературы

1. Logunov S.E., Rud V.Yu., Davydov R.V., Moroz A.V., Smirnov K.J. Optical method for studying the magnetic field structure // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1124(4). – P. 041011.1.
2. Logunov, S.E., Davydov, V.V., Rud, V.Yu. Development of a new method for determining the parameters of a moving object based on the study of the structure of the magnetic track of colloidal solution nanoparticles // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1400. – P. 066022.

Температурная зависимость оптического пропускания монокристаллов германия

Иванова А. И.¹, Третьяков С.А., Иванов А.М., Мариничева К.А., Молчанов С.В., Каплунов И.А.

¹ТвГу

e-mail: alex.ivanova33@yandex.ru

Кристаллический германий активно используется в микроэлектронике, лазерной технике, для изготовления фотоэлектрических преобразователей, а также в оптических устройствах ИК техники, что обусловлено высокой прозрачностью в спектральном диапазоне длин волн 2,5 - 14 мкм [1-2]. Известно, что лучшими оптическими свойствами обладают монокристаллы германия n-типа с удельным электросопротивлением 5-15 Ом×см. Основным недостатком оптического германия является наличие резкой температурной зависимости оптического пропускания [3-4]

В настоящей работе проведены исследования оптического пропускания кристаллов германия (удельное электросопротивление 1-3 Ом×см), легированных донорными примесями (сурьма и висмут) и акцепторными примесями (галлий и медь) в диапазоне длин волн 2–14 мкм и в интервале температур от 86 К до 523 К. Так, для Ge n-типа с удельным электросопротивлением 3 Ом×см для длины волны $\lambda = 5,5$ мкм пропускание уменьшается с 48% ($T = 86$ К) до 0,5% при нагреве до 523 К. Определены температурные зависимости длин волн, соответствующих краю основной полосы поглощения в данном

температурном интервале. В частности, при охлаждении монокристалла, легированного сурьмой до $T = 86$ К, край основной полосы поглощения смещается в коротковолновую часть спектра на $\sim 0,23$ мкм. Для кристалла р-типа, легированного галлием, сдвиг составлял $\sim 0,2$ мкм. Экспериментальные данные хорошо согласуются с температурными изменениями ширины запрещенной зоны. Получены значения коэффициентов ослабления для исследуемых кристаллов. Минимальные коэффициенты ослабления в диапазоне 2,1 -14 мкм в интервале температур от 86 К до 323 К характерны для монокристаллов германия, легированных сурьмой и составляют 0,001-0,0231 см⁻¹.

Качество обработки поверхности значительно влияет на оптические характеристики кристаллов германия, дефекты и рельеф оптической поверхности кристаллов вносят свой вклад в ослабление излучения [5]. В работе проведена количественная оценка шероховатости поверхности, определено влияние температуры на шероховатость поверхности германия, получены профилограммы поверхности образцов монокристаллического германия, легированных галлием и висмутом в диапазоне температур 284-336 К.

Работа выполнена в рамках государственного задания по научной деятельности № 0817-2020-0007 с использованием ресурсов Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

Список литературы

1. Каплунов И.А., Роголин В.Е. Оптические свойства и области применения германия в фотонике // Фотоника. 2019. №1. С. 88-106. (DOI: 10.22184/FRos.2019.13.1.88.106)
2. Claves C., Simoen E. Germanium Based Technologies: from Materials to Devices. Elsevier, 2007. 476 p.
3. Подкопаев О.И., Шиманский А.Ф., Копыткова С.А., Филатов Р.А., Голубовская Н.О. Исследование влияния легирования на температурную стабильность оптических свойств монокристаллов германия//Физика и техника полупроводников, 2016, том 50, вып. 10. 1309-1312.
4. В.А. Голенищев-Кутузов, А.В. Голенищев-Кутузов, И.М. Несмелова. Перспективные материалы и приемники излучения фотоэлектроники и фотоэнергетики. Монография. Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. 171 с.
5. Колесников А.И., Каплунов И.А., Морозова К.А., Третьяков С.А. Влияние рельефа поверхности на отражение и пропускание электромагнитного излучения// Проблемные вопросы построения систем и средств ВКО. 2018. С.5-11.

Исследование нелинейно-оптических характеристик кристалла BaGa₂GeSe₆

Ерушин Е. Ю.^{1,2,3}, Костюкова Н.Ю.^{1,2,3}, Грибачёва Ю.С.^{1,3}, Бойко А.А.^{2,3}, Колкер Д.Б.^{1,2,3},
Бадиков Д.В.⁴, Бадиков В.В.⁴

¹ Новосибирский государственный технический университет

² Новосибирский государственный университет

³ Институт лазерной физики

⁴ Кубанский государственный университет

e-mail: render2012@yandex.ru

При создании источников излучения с короткими (наносекундными) или ультракороткими (пикосекундными и фемтосекундными) импульсами на основе параметрических преобразователей частоты необходимо учитывать влияния нелинейно-оптических процессов высоких порядков на процессы параметрического преобразования. Такие нелинейные эффекты могут приводить к рассогласованию фаз, и тем самым снижать эффективность преобразования [1, 2]. Влияние нелинейной рефракции света может приводить к самофокусировке или дефокусировке излучения внутри нелинейного кристалла, пространственному распределению и расширению импульса. Нелинейное поглощение снижает эффективность преобразования и даже приводит к повреждению элемента, что особенно критично в мощных лазерных системах. Поэтому выходная мощность параметрических преобразователей частоты и срок службы кристаллов ограничены влиянием указанных нелинейно-оптических эффектов [3, 4]. Для анализа изменения пространственных, спектральных и временных характеристик мощного лазерного излучения необходимо знать величину нелинейно-оптических характеристик материалов.

Для создания высокоэффективных параметрических преобразователей частоты, широко перестраиваемых в среднем ИК диапазоне, необходимо использовать нелинейные кристаллы, обладающие высокой нелинейностью и широким диапазоном пропускания. Одним из таких материалов является кристалл четверной бариевый халькогенид $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ (BGGSe), который обладает достаточно высоким «параметром качества» FM (figure-of-merit) 75,3 пм/В² [5] и прозрачен вплоть до 18 мкм по урону 0 [6]. Однако, как было показано в работе [7], кристалл BGGSe имеет сильное двухфотонное поглощение излучения с длиной волны 1,053 мкм.

В данной работе мы представляем экспериментально измеренные данные коэффициента двухфотонного поглощения и нелинейного показателя преломления кристалла BGGSe для обыкновенной (o) и необыкновенной (e) волны. Для измерения использовался метод Z-сканирования. Исследовалась зависимость нелинейно-оптических коэффициентов от мощности излучения и частоты следования импульсов. В качестве источника излучения использовался Nd:YLF лазер с длиной волны 1,053 мкм, генерирующий импульсы наносекундной длительности (5-6 нс) с частотой следования 100 Гц и 1000 Гц. В результате исследования была обнаружена зависимость нелинейно-оптических характеристик от частоты следования импульсов. Так коэффициент двухфотонного поглощения для необыкновенной волны на частоте следования импульсов 1000 Гц составил 4,6 см/ГВт, а на частоте 100 Гц 2,8 см/ГВт. Нелинейный показатель преломления составил $5,8 \cdot 10^{-13}$ см²/Вт и $1,6 \cdot 10^{-13}$ см²/Вт для 1000 Гц и 100 Гц, соответственно.

Работа выполнена при поддержке РФФИ 20-42-543004 и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Госзадания FSUS-2020-0036.

Список литературы

1. F. Q. Li, N. Zong, F. F. Zhang, J. Yang et al., "Investigation of third-order optical nonlinearity in $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$ crystal by Z-scan," Appl. Phys. B 108(2), 301–305 (2012).
2. I. A. Begishev, M. Kalashnikov et al. "Limitation of second-harmonic generation of femtosecond Ti:sapphire laser pulses," J. Opt. Soc. Am. B 21(2), 318–322 (2004).
3. R. W. Boyd, Nonlinear Optics (Academic, 1992).
4. W. Koechner, Solid-state Laser Engineering (Spring-Verlag, 1999).

5. Kiyoshi Kato et al., “Effective nonlinearity of the new quaternary chalcogenide crystal BaGa₂GeSe₆”, Optics Letters, Vol. 45, №8, 2136–2139 (2020).
6. V. V. Badikov, D. V. Badikov et al., “Crystal growth and characterization of new quaternary chalcogenide nonlinear crystals for the mid-IR: BaGa₂GeSe₆ and BaGa₂GeSe₆,” Opt. Mater. Express 6, 2933–2938 (2016).
7. N. Y. Kostyukova, A. A. Boyko, E. Y. Erushin, A. I. Kostyukov, V. V. Badikov, D. V. Badikov, D. B. Kolker “Laser-induced damage threshold of BaGa₄Se₇ and BaGa₂GeSe₆ nonlinear crystals at 1.053 μm”, JOSA B, Vol. 36, №8, 2260–2265 (2019)

Спектральные исследования висмутсодержащих керамик со структурой пирохлора

Некипелов С. В.^{1,2}, Жук Н.А.², Петрова О.В.¹, Сивков Д.В.^{1,3} Бакина К.А.^{1,2}, Богачук Д.В.¹, Скандаков Р.Н.¹, Сивков В.Н.¹

¹ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

²СГУ им. Питирима Сорокина

³СПбГУ

e-mail: NekipelovSV@mail.ru

Соединения со структурой пирохлора вызывают неиссякаемый интерес ученых в связи с проявлением широкого спектра практически полезных свойств, таких как фотокалалитические, диэлектрические, электрооптические и пьезоэлектрические свойства. При этом сложные висмутсодержащие пирохлоры отличаются своими превосходными диэлектрическими свойствами. Их отличает сравнительно невысокая температура синтеза и химическая инертность по отношению к Ag-электродам. Полезным обстоятельством является и тот факт, что сложным висмутсодержащим пирохлорам отвечают широкие области гомогенности благодаря структурной гибкости кристаллической решетки пирохлора. Находясь в пределах одного структурного типа и меняя качественный и количественный составы, в том числе допируя структуру малыми содержаниями атомов 3d-металлов, можно существенно варьировать свойства пирохлора, что позволяет изучать влияние химического состава на его физико-химические характеристики.

В представленной работе показаны результаты исследования методами NEXAFS- и XPS-спектроскопии электронного состояния и характера межатомных взаимодействий атомов 3d-металлов (М) в титанатах Bi₂M_xTi₂O₇, ниобатах Bi₂MgNb₂M_xO₉ и танталатах Bi₂Mg₁Ta₂M_xO₉ висмута со структурой пирохлора. Все образцы были исследованы методами рентгеноабсорбционной (NEXAFS) спектроскопии с использованием синхротронного излучения накопителя BESSY II (Берлин, Германия) и рентгеноэлектронной (XPS) спектроскопии с использованием рентгеновского спектрометра Thermo Scientific ESCALAB 250Xi в ресурсном центре «Физические методы исследования поверхности» Научного парка Санкт-Петербургского университета. На основании спектральных исследований было показано, что атомы марганца, кобальта, никеля и меди в данных твердых растворах висмутсодержащие пирохлоров присутствует в основном в степени окисления +2, а железа +3.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента РФ (МК-3796.2021.1.2), РФФИ и Республики Коми в рамках научного проекта № 20-42-110002 р-а и двухсторонней программы Российско-Германской лаборатории на BESSY II.

C₆₀ optical constants in the NEXAFS C1s region

Sivkov D. V.^{1,2}, Nekipelov S. V.², Petrova O. V.², Bogachuk D. V.², Skandakov R. N.², Sivkov V. N.²

¹Saint-Petersburg State University, Russia

²Komi Science Centre Ural Division of the RAS, Russia

e-mail: danjorno@yandex.ru

The near edge X-ray absorption fine structure (NEXAFS) reflects the resonant nature of the interaction between X-ray and particular chemical elements in the core electron ionization threshold region. The anomalous refraction in the NEXAFS is observed. The X-rays refractive coefficient is a fundamental spectral characteristic that contains unique information about the material. In the NEXAFS region its dependence on energy has a complex non-monotonic form, and changes in its magnitude are small thus its experimental measurement in this region is a hard task. The currently available methods for obtaining data on refractive coefficients in the NEXAFS region are indirect and aimed at receiving the values of the dispersion corrections for the atomic form factor. However, it is known that the real and imaginary parts of the complex dielectric constant, refraction and reflection coefficients, and atomic form factor are related to each other in a wide energy range by integral Kramers-Kronig relations (KKR) [1,2]. KKR allow to obtain one part (imaginary or real) of the optical constant for certain energy by integrating the function of the remaining constant over the entire spectral range.

The purpose of the work is the calculation of the refraction coefficient spectral dependence $n(E)$ in the C₆₀ C1s absorption edge energy region using the absorption cross-section data. The absorption cross-sections near the C₆₀ NEXAFS C1s absorption edge (280-350 eV) were measured in Russian-German beamline at BESSY II. The $n(E)$ spectral dependence in the region was calculated using data on atomic carbon cross-sections in the 10-30000 eV region outside the resonant absorption [3] and on C₆₀ cross-sections in the 0-120 eV region [4-6]. The absorption cross sections in the energy range above 30 keV were obtained by extrapolating power-dependent data in the range of 10-30000 eV [3]. All the absorption cross-sections data were reduced to an absolute scale in Megabars.

The calculated C₆₀ absorption cross section sum in the energy range 0-100 keV per carbon atom was 6.4, which is in good agreement with the Thomas-Reiche-Kuhn sum rule (close to the number of electrons in the carbon atom $Z=6$) and indicates high reliability and accuracy of the obtained data.

The $n(E)$ was calculated by numerical integration. The absorption cross-section spectral dependence in the regions far from the absorption edges was interpolated by the power law. The remaining optical coefficients are uniquely determined from the spectral dependences $n(E)$ and $\sigma(E)$.

The reported study was funded by RFBR, project number 19-32-60018, and with the financial support of the grants of the President of the Russian Federation (MK-3796.2021.1.2), the Komi Republic (20-42-110002 r-a) and the bilateral program of the Russian-German Laboratory at BESSY II.

References

1. H.A. Kramers // Atti Congr. Intern. Fisica. Como., V. 2, 545-557 (1927).
2. R. Kronig // J. Opt. Soc. Am., V. 12, 547-557 (1926).
3. B. L. Henke, E. M. Gullikson, and J. C. Davis // At. Data Nucl. Data Tables. 1993. V.54. pp. 181 – 343
4. B.P. Kaffle, H. Katayanagi, S.I. Prodhon *et al.* // Journal of the Physical Society of Japan, V. 77, 014302 (2008).

5. R. Jaensch, W. Kamke // *Mol. Mat.*. V. 13 (1-4), 163-172 (2000).
6. H. Yasumatsu, T. Kondow, H. Kitagawa *et al.* // *J. Chem. Phys.*, V. 104, 899 (1996).

Анизотропия оптических и электронных свойств в объемном Ga_2O_3

Дементьева Е. В.¹, Дементьев П.А.¹, Д. Ю. Панов², А.Е. Романов², В.Е. Бугров², Заморянская М.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Университет ИТМО

e-mail: ivanova@mail.ioffe.ru

Оксид галлия привлекает внимание исследователей в связи с тем, что является перспективным материалом для оптоэлектроники. Это связано с тем, что этот материал является широкозонным полупроводником с интенсивной собственной люминесценцией. Ширина запрещенной зоны оксида галлия составляет 4.8–4.9 eV при комнатной температуре (в зависимости от состава и структурной модификации кристалла). Особый интерес к этому материалу связан с возможностью получения объемного оксида галлия методами Чохральского и Степанова [1]. Исследования проводятся как для чистых, так и для легированных материалов [2].

Исследуемые монокристаллы $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ были получены вытягиванием из расплава по методу Чохральского в ростовой установке «Ника-3» с индукционным нагревом (производство ФГУП ЭЗАН, Черноголовка). В качестве исходного материала использовался порошкообразный Ga_2O_3 , чистота реактива составляла 99.99% (4N), тигель был изготовлен из иридия. Вытягивание кристаллов проводилось в атмосфере двуокиси углерода CO_2 при давлении около 1 Bar на затравки Al_2O_3 и Ga_2O_3 . Подробности технологического процесса описывались нами ранее в [3]. Выращенные кристаллы имели цилиндрическую форму диаметром ~ 20 и длиной ~ 15 mm. Образцы для исследований были получены из кристаллов путем резки и скалывания по плоскостям скольжения.

Методом рентгеноспектрального микроанализа было показано, что при использовании затравки Al_2O_3 в объемном $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ наблюдается содержание Al порядка 0,01%ат, а при использовании затравки Ga_2O_3 содержание Al менее порога обнаружения. Были получены изображения и спектры катодолюминесценции (КЛ) объемного $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ с плоскостей (100) и (010). Также были измерены динамики катодолюминесценции и поглощенного тока. Было показано, что спектры КЛ, полученные с плоскости (010) существенно интенсивней, чем спектры, полученные с плоскости (100). Причем эффект анизотропии люминесцентных свойств проявляется сильнее на образце, выращенном на затравке Al_2O_3 . Как было показано ранее [4], в объемном $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ наблюдается локализация как положительного, так и отрицательного заряда. Было обнаружено, что именно локализация электронов приводит к уменьшению интенсивности катодолюминесценции. Также, было обнаружено существенное различие в локализации заряда в зависимости от кристаллографического направления.

Список литературы

1. H.F. Mohamed, Ch. Xia, Q. Sai, H. Cui, M. Pan, H. Qi. *J. Semicond.* 40, 011801 (2019).
2. S.I. Stepanov, V.I. Nikolaev, V.E. Bougrov, A.E. Romanov. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 44, 63 (2016).

3. P.N. Butenko, D.I. Panov, A.V. Kremleva, D.A. Zakgeim, A.V. Nashchekin, I.G. Smirnova, D.A. Bauman, A.E. Romanov, V.E. Bougrov. *Mater. Phys. Mech.* 42, 802 (2019).
4. Е.В. Иванова, П.А. Дементьев, М.В. Заморянская, Д.А. Закгейм, Д.Ю. Панов, В.А. Спиридонов, А.В. Кремлева, М.А. Одноблюдов, Д.А. Бауман, А.Е. Романов, В.Е. Бугров. *ФТТ*, 63(4) (2021).

Моделирование плазмонного резонанса наночастиц серебра на поверхности кремния

Большаков В.О.¹, Жарова Ю.А.², Толмачев В.А.², Ермина А.А.^{1,2}

¹ИТМО

²ФТИ им А.Ф. Иоффе

e-mail: lion080895@gmail.com

Проведено исследование оптических свойств наночастиц серебра на поверхности кремния. Наночастицы были получены путем химического осаждения серебра на кремниевую подложку. Образцы отличались толщиной слоя наночастиц от 15 нм до 45 нм и фактором заполнения от 40% до 70 %. Для исследования оптических свойств полученных образцов была использована спектральная эллипсометрия, используя которую был обнаружен резонанс с положением около 330 нм. Для интерпретации полученных данных было применено моделирование. Математическое представление оптических свойств исследуемого материала в виде модели позволяет прогнозировать изменения коэффициентов отражения и поглощения в зависимости от различных параметров объекта [1].

Наночастицы серебра обладают уникальными оптическими свойствами, обусловленными резонансными эффектами, которые возникают благодаря наличию в них электронов проводимости. Эти электроны при взаимодействии с фотонами могут создавать локализацию электрических полей на границах раздела с окружающей средой [2]. Для исследования часто используют наночастицы серебра, нанесенные на прозрачную подложку, в то время как в данной работе рассматриваются наноструктуры Ag на Si, которые представляют большой интерес для практических применений.

Взаимодействие света с наноструктурами может быть описано с помощью различных моделей (псевдодиэлектрических функций, эффективной среды, тонкослойных структур и др.), а для экспериментального определения их параметров должны быть использованы оптические методы (рефрактометрия, спектрофотометрия и др.), к которым также относится эллипсометрия, имеющая высокую чувствительность и информативность. Эллипсометрия дает возможность разностороннего изучения оптических параметров моделей, которые зависят от топологии, состава и толщины слоя исследуемых структур [3].

Если измерения пленок Ag на подложке не представляют особых трудностей, то анализ и расчет оптических характеристик наночастиц осложнено их неоднородностью в трех измерениях. В данной работе для моделирования оптических свойств такого рода объектов использовался программный пакет Comsol Multiphysics, в частности модель конечных элементов. Благодаря обширному инструментарию, применяя метод конечных элементов и систему уравнений Максвелла, определялись коэффициенты отражения для *p*- и *s*-поляризаций и эллипсометрические параметры. В этой программе были смоделированы слои наночастиц Ag различной формы и размера на поверхности Si, а также изучено распределение электромагнитного поля. Данное моделирование позволило подробно рассмотреть процессы, происходящие в структуре, сопоставить с экспериментальными

эллипсометрическими данными, изучить влияние морфологии на параметры плазмонного резонанса.

В данной работе рассматривается локальный плазмонный резонанс, который проявляется при возбуждении плазмонов в частице на их резонансной частоте внешней электромагнитной волной. Были проведены расчеты для различного диаметра серебряных наночастиц на кремниевой подложке с различным периодом структуры. Полученные рассчитанные спектры имеют хорошую сходимость с экспериментальными данными, полученными с образцов. В результате проведенного моделирования выяснена закономерность, что положение плазмонного резонанса зависит от плотности расположения наночастиц серебра, при ее увеличении резонанс имеет смещение в сторону длинноволновой области. Изменение положения имеет незначительный характер и происходит в районе 320-370 нм. В том же диапазоне происходит изменение положения при изменении размера частицы и при его увеличении происходит смещение в сторону длинноволновой области.

Список литературы

1. Masanobu Iwanaga «Plasmonic Resonators: Fundamentals, Advances, and Applications», Pan Stanford Publishing, 2016, 310 p
2. Майер А. Стефан «Плазмоника. Теория и приложения», М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. - 278 с.
3. Шве́ц В.А., Спесивцев Е.В. Учебно-методическое пособие по методу эллипсометрии. Новосибирск: издательство НГУ, 2013. 87 с.

Применение спектроскопии комбинационного рассеяния для исследования процессов поверхностной графитизации алмаза фемтосекундным лазерным излучением в одноимпульсном режиме

Хомич А. А.¹, Кононенко В. В.², Козлова М. В.³, Поклонская О. Н.⁴, Хмельницкий Р. А.⁵

¹ИРЭ РАН

²ИОФ РАН

³МГУ им. М. В. Ломоносова

⁴БГУ

⁵ФИАН

e-mail: antares-610@yandex.ru

Рекордная твердость и химическая стойкость алмаза стимулируют развитие лазерно-индуцированных технологий обработки как поверхности, так и объема алмаза [1]. Интенсивное лазерное излучение применяется для задач локальной модификации структуры и поверхностных свойств алмаза с целью создания новых полностью углеродных структур для фотоники и электроники. Традиционный метод лазерной обработки алмаза основан на импульсном нагреве и испарении (абляции) поверхностного слоя образца, сопровождающимся трансформацией алмазной решетки в зоне облучения в углеродные фазы с преимущественной sp^2 -гибридизацией. Такая технология позволяет, например, изготавливать элементы алмазной дифракционной оптики [2,3], проводить поверхностную гравировку природных алмазов [4], генерировать приповерхностные азот-вакансионные

центры для задач квантовой оптики [5] и для нанесения лазерных микроподписей кристаллов [6], а также формировать объемные электроды в алмазных датчиках [7].

Спектроскопия комбинационного рассеяния продемонстрировала свою эффективность как при изучении физики лазерно-индуцированных процессов в алмазах [8], так и при их радиационном повреждении [9]. В работе исследованы процессы и механизмы поверхностной графитизации облученного реакторными нейтронами природных алмазов в результате воздействия мощного фемтосекундного УФ лазерного излучения. Преимуществом использования сверхкоротких импульсов является то, что перестройка атомов углерода происходит преимущественно за счёт передачи энергии от возбужденных электронов в колебания кристаллической решетки. При этом, в отличие от термического нагрева в воздухе, на поверхности алмаза остается, не успев окислиться, тонкий графитоподобный слой, что меняет не только оптические и электрические, но и химические свойства поверхности, делая возможной, например, ее металлизацию.

На грани (111) облученного быстрыми нейтронами алмаза фемтосекундным УФ лазером в одноимпульсном режиме сформировано несколько серий пятен с изменением плотности энергии в центре пятна от единиц до нескольких десятков Дж/см². Использование УФ лазера (длина волны 266 нм) обеспечивало эффективное поглощение непосредственно вблизи алмазной поверхности. Вдоль диаметра сформированных лазерным излучением пятен выполнено сканирование с шагом 0.5-1.0 мкм спектров комбинационного рассеяния в диапазоне от 175 до 4000 см⁻¹ и проведена идентификация углеродных фаз, формирующихся на и вблизи поверхности облученного быстрыми нейтронами алмаза в результате воздействия одиночного УФ лазерного импульса. Установлена величина порога графитизации - 15 Дж/см². В широком диапазоне плотностей энергии изучены механизмы одноимпульсной лазерной графитизации радиационно-модифицированного алмаза. Полученные результаты проанализированы в сопоставлении с проводившимися нами ранее аналогичными исследованиями графитизации поверхности неповрежденного алмаза лазерными импульсами фемтосекундной длительности с близкими плотностями энергии [10], а также по изучению дефектообразования и структурной перестройки кристаллической алмазной решетки при облучении быстрыми нейтронами и последующих лазерных и термических отжигах.

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ № 20-72-00122, РФФИ № 19-52-04008 и БелРФФИ № F19RM-054.

Список литературы

1. Konov V. I., Laser in micro and nanoprocessing of diamond materials, Laser Photon. Rev., vol. 6, 739-766, 2012;
2. Kononenko V. V., Konov V. I., Pimenov S. M., Prokhorov A. M., et al., Diamond diffraction optics for CO₂ lasers, Quantum Electron., vol. 29, 9-10, 1999;
3. Kumar S., Eaton S. M., Bollani M., Sotillo B., et al., Laser surface structuring of diamond with ultrashort Bessel beams, Sci. Rep. vol. 8, 14021, 2018;
4. Joya Y. F., Yan B., James K., Yue L., et al., Ultrafast femtosecond laser micro-marking of single-crystal natural diamond by two-lens focusing system, Mater. Today Comm., 101800, 2020;
5. Kononenko V. V., Vlasov I. I., Kononenko T. V., Khomich A. A., et al., Nitrogen-vacancy defects in diamond produced by femtosecond laser nanoablation technique, Appl. Phys. Lett., vol. 111, 081101, 2017;
6. Kempkes M., Zier T., Singer K., Garcia M. E., Ultrafast nonthermal NV center formation in diamond, Carbon, vol. 174, 524-530, 2021;

7. Kononenko T. V., Khomich A. A., Konov V. I., Peculiarities of laser-induced material transformation inside diamond bulk, *Diam. Relat. Mater.*, vol. 37, 50-54, 2013;
8. Girolami M., Bellucci A., Calvani P., Orlando S., et al., Raman investigation of femto-second laser-induced graphitic columns in single-crystal diamond, *Appl. Phys. A*, vol. 117, 143-147, 2014;
9. Khomich A. A., Khmelnskiy R. A., Khomich A. V., Probing the nanostructure of neutron-irradiated diamond using Raman spectroscopy, *Nanomaterials* vol. 10, 1166, 2020;
10. Kononenko V.V., Khomich A.A., Khomich A.V., Khmelnskiy R.A., et al., Highly oriented graphite produced by femtosecond laser on diamond, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 114, 251903, 2019;

Исследование физических свойств объемных кристаллов $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ полученных из расплава методом Чохральского

Спиридонов В. А.¹, Панов Д.Ю.¹, Закгейм Д.А.¹, Кремлева А.В.¹, Смирнов А.М.¹, Бауман Д.А.¹, Романов А.Е.¹, Бугров В.Е.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия

e-mail: vladspiridonov@itmo.ru

В настоящее время многочисленные исследовательские группы в мире разрабатывают новые полупроводниковые материалы. Одним из таких перспективных материалов является оксид галлия ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$). Монокристалл $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ представляет собой широкозонный полупроводник с запрещенной зоной $\sim 4,8$ эВ, высоким напряжением электрического пробоя (>8 МВ/см) и относительно высокой подвижностью электронов (~ 150 см²/Вс) [1-3]. В литературе стали появляться первые упоминания об успешном изготовлении приборов из оксида галлия с рекордными характеристиками. Например, в работе [4] авторы сообщают о создании МОП-транзистора с пробивным напряжением выше 1000В. Однако, монокристаллы твердых растворов оксидов галлия и алюминия $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ являются более перспективными материалами для компонентной базы силовой электроники, благодаря высокому напряжению пробоя (до 10 МВ/см в зависимости от состава твердого раствора) и более широкой запрещенной зоны (ширина запрещенной зоны $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 8,8$ эВ) [5]. Один из способов создания такого полупроводника является добавление оксида алюминия в состав исходной шихты $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ и формирование тройного соединения $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$, т.е. твердого раствора Al_2O_3 и Ga_2O_3 . Добавляя алюминий в оксид галлия различных концентрациях, можно управлять величиной запрещенной зоны кристалла, без существенных изменений в технологии его получения.

В данной работе кристаллы $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ были получены методом Чохральского в роторной установке Ника-3. В качестве исходного материала использовались порошки Al_2O_3 и Ga_2O_3 чистоты 5N. Для получения расплава использовался иридиевый тигель. Образцы синтезировались в замкнутой системе с постоянной атмосферой. Атмосфера представляла собой смесь 95% аргона и 5% кислорода. В качестве затравки использовались кристаллы $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$, выращенные на сапфировой затравке.

В работе были получены кристаллы из расплавов оксида галлия с добавлением различного количества оксида алюминия. Путем скалывания кристаллов были получены плоскопараллельные образцы толщиной 1 мм и исследованы их оптические свойства. Измерения состава образцов было проведено методом энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (РСМА).

В результате измерений было установлено что образцы прозрачны в среднем УФ, видимом и ближнем ИК оптических диапазонах. Ширина запрещенной зоны составила 4.5 эВ - для чистого β -Ga₂O₃, 4,7 эВ - для образца с содержанием 7.5% оксида алюминия в расплаве и 5 эВ – для образца с содержанием 15% оксида алюминия в расплаве. По данным РСМА в образце с содержанием 7.5% оксида алюминия в расплаве атомарное соотношение было следующим: O₂ - 59.31%, Al - 4.63%, Ga - 36.06%. Для образца с 15% алюминия в расплаве: O₂ - 63.68 Al - 9.11 Ga - 27.22. Для чистого оксида галлия: O₂ - 53.67, Ga - 46,33. Таким образом было показано что с увеличением содержания оксида алюминия в кристалле увеличивается ширина его запрещенной зоны.

Список литературы

1. Galazka Z. β -Ga₂O₃ for wide-bandgap electronics and optoelectronics // Semicond. Sci. Technol. IOP Publishing, 2018. Vol. 33, № 11. P. 113001.
2. Stepanov S.I. et al. Gallium oxide: properties and applications – a review // Rev. Adv. Mater. Sci. 2016. Vol. 44. P. 63–86.
3. Pearton S.J. et al. A review of Ga₂O₃ materials, processing, and devices // Applied Physics Reviews. American Institute of Physics, 2018. Vol. 5, № 1. P. 011301.
4. Hu Z. et al. Enhancement-Mode Ga₂O₃ Vertical Transistors With Breakdown Voltage >1 kV // IEEE Electron Device Letters. 2018. Vol. 39, № 6. P. 869–872.
5. Santos R.C.R. et al. Elucidating the high-k insulator α -Al₂O₃ direct/indirect energy band gap type through density functional theory computations // Chemical Physics Letters. 2015. Vol. 637. P. 172–176.

Влияние малых добавок германия на оптические свойства халькогенидного стекла As_{30,5}S_{44,5}I₂₅

Кликов В. А.¹

¹СПбПУ

e-mail: klinkovvictor@yandex.ru

Средняя инфракрасная (ИК) спектральная область имеет высокую практическую значимость для различных сфер человеческой деятельности: лазерная и тепловизионная техника, экологический мониторинг, биомедицина, космические технологии, оптоволоконные линии связи, обработка материалов и оптоэлектроника [1; 2]. Номенклатура существующих материалов для средней ИК области ограничена, преимущественно используются дорогостоящие и трудоемкие в получении и обработке кристаллические материалы, такие как: ZnSe, ZnS, Ge, TlBr-TlI [3]. Их альтернативой могут быть халькогенидные стекла, которые обеспечивают необходимый уровень и спектральную область пропускания.

Последние годы технологически востребованным направлением исследований ИК материалов является разработка термопластичных составов стекол, позволяющих получить оптические компоненты (линзы, окна, призмы) методами полимерной оптики: литье в формы, горячее прессование и послойное наплавление [4]. Для данных целей также перспективны легкоплавкие халькогенидные стекла, температура размягчения которых может находиться в области (60 – 400) °С

Основной особенностью большинства составов халькогенидных стекол, ограничивающих их практическое применение в оптическом приборостроении, является высокая

склонность к кристаллизации. Наличие объемной, либо поверхностной кристаллизации приводит к деградации оптических характеристик стекол. Несмотря на большое число публикаций посвященных халькогенидным системам, на данный момент существует лишь 3 состава стекол, производимых коммерчески: AMTIR-1 (на основе Ge-As-Se), AMTIR-3 (Ge-Sb-Se), AMTIR-7 (As-Se) [5].

Известны также халькогенгалогенидные йодсодержащие стекла, которые имеют низкую температуру плавления, высокий показатель преломления, но также склонные к кристаллизации. Известно, что малые добавки *p*-элементов, могут выполнять роль стабилизаторов аморфной структуры. В данной работе, в качестве такого элемента был выбран германий. В исследовании приводятся результаты изучения оптических характеристик стекол на основе состава As-S-I с малыми добавками германия Ge. В качестве исходного был выбран состава $As_{30,5-x}Ge_xS_{44,5}I_{25}$, где $x = 0, 1, 3, 5$ (мол. %), расположенный в центре области стеклообразования тройной системы.

Для синтеза использовались элементарные мышьяк, сера, йод и германий марки «ОСЧ». Навеска помещалась в кварцевую ампулу и с помощью форвакуумного насоса откачивалась до давления 10^{-2} Па и запаивалась. Затем ампулы помещались в трубчатую печь специальной конструкции, обеспечивающей перемешивание расплава. Температурный режим синтеза стекла имел ступенчатый профиль, связанный с различными температурами плавления и давлениями паров компонентов стекла. Температура синтеза не превышала 600°C.

В работе проведено изучение физико-химических и спектроскопических характеристик синтезированных стекол. Установлено влияние добавок германия на положение края фундаментального поглощения, значений показателя преломления и температуры размягчения и стеклования. По спектрам ИК пропускания проведена идентификация и оценка содержания примесей. Определен состав стекла, имеющий наименьшую склонность к кристаллизации.

Работа была выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых-кандидатов наук № МК-2869.2021.1.2.

Список литературы

1. J. Eggleton, B. Luther-Davies, K. Richardson, Chalcogenide photonics, *Nat. Photonics* 5 (2011) 141–148, <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.309>
2. Semencha, Aleksander, et al. «Effective Diagnostics of Internal Defects of Diamonds in the Near Infrared Range on the Basis of Immersion Medium Made from Low-Melting Chalcogenide Glass.» *Key Engineering Materials*. Vol. 822. Trans Tech Publications Ltd, 2019.
3. Zhukova, L. V., et al. «Domestic developments of IR optical materials based on solid solutions of silver halogenides and monovalent thallium.» *Optics and Spectroscopy* 125.6 (2018): 933-943.
4. Установка для формирования линз из расплава оптических материалов [Текст]: пат. 177885 Рос. Федерация : МПК B29D 11/00 03/2018.
5. Hilton A. R., Kemp S. Chalcogenide glasses for infrared optics. – McGraw-Hill Education, 2010.

Микромеханические устройства управления световыми потоками посредством магнитного поля

Корнеев В. С.¹, Шергин С.Л.¹

¹СГУГиТ

e-mail: korneyv@mail.ru

Микро-электромеханические системы (МЭМС) находят широкое применение в системах управления и контроля, в том числе в оптоэлектронике для пространственного управления потоками излучения. В большинстве МЭМС используется электростатическое управление подвижными элементами, обеспечивающее высокое быстродействие и точность позиционирования [1, 2]. Однако, наряду с преимуществами, этот способ управления имеет свои недостатки, которые связаны с необходимостью дополнительного экранирования электронной части схемы от силового управляющего воздействия.

В работах [3-5] представлены образцы МЭМС дефлекторов, изготовленных с помощью технологии объемного травления кремния, которая позволяет получить на одной кремниевой пластине серию однотипных устройств с одинаковыми рабочими параметрами. Устройства представляют собой массив торсионных микрозеркал, на которые наносится в вакууме тонкий ферромагнитный слой. Взаимодействие внешнего магнитного поля с этим слоем позволяет управлять угловым положением микрозеркал. При синхронном повороте всех микрозеркал на заданный угол происходит изменение угла отражения падающего на них светового потока.

Магнитный способ управления обеспечивает высокую точность позиционирования отраженного светового потока в статическом режиме работы, при плавной регулировке величины индукции магнитного поля.

Результаты экспериментальных исследований параметров МЭМС дефлекторов и метод, позволяющий определять углы поворота подвижных микрозеркал, представлены в работах [6-8]. Экспериментальные образцы МЭМС дефлекторов в статическом режиме функционирования позволяют получить разрешение $30 \div 35$ элементов при угле отклонения до 5° для излучения с длиной волны $0,532$ мкм; в динамическом режиме амплитуда угла отклонения до 1° обеспечивается в диапазоне частот сканирования $0,1 \div 5$ кГц.

Представленные МЭМС устройства управления световыми потоками могут найти применения, в первую очередь, как быстродействующие дефлекторы и сканеры оптического излучения произвольной длины волны и степени когерентности, в широком диапазоне частот сканирования.

Список литературы

1. Косцов Э.Г. Низковольтный элемент программируемой полем динамической дифракционной решётки / Э.Г.Косцов, В.С. Соболев // Автометрия. – 2010. Т.46, №3 – С.101–108.
2. Князев И.В. Моделирование динамических характеристик переключения элементов микро-оптоэлектромеханической перестраиваемой дифракционной решетки / И.В. Князев // Вестник СГУГиТ. – 2017. Т.22, №1. – С.235-251.
3. Чесноков, Д.В. Микромеханический дефлектор световых потоков. // Оптический журнал. - 2007. – Т.74, № 4. - С.51–54.
4. Корнеев В.С. Микромеханическая управляемая дифракционная решетка с изменяемым углом блеска / В.С. Корнеев // Оптический журнал. – 2010. – Т.77. – №5. – С.69-71.

5. V. S. Korneyev, V. V. Chesnokov, D. V. Chesnokov. Micromechanical optical scanner for terahertz spectrum diapason // Key Engineering Materials. 2010. V.473. – P.291-295.
6. Vladimir S. Korneyev Study of the parameters of micromechanical devices with electromagnetic control // Inter. school and seminar Modern problems of Nan electronics, Micro- and Nan systems Technologies. Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.113–115.
7. Корнеев В.С. Экспериментальное исследование крутильных колебаний полосок микромеханической управляемой дифракционной решетки / В.С. Корнеев // Вестник СГГА. – 2010. – Выпуск 1 (12). – С.177-121.
8. Горелик Г.С. Применение модуляционного метода в оптической интерферометрии / Г.С. Горелик // Доклады Академии Наук СССР. – 83, 549 – 1952.

Кинетика экситонного излучения атомарно тонких слоев дисульфида молибдена

Елисеев И. А.¹, Галимов А. И.¹, Рахлин М. В.¹, Давыдов В. Ю.¹, Thiele S.², Pezoldt J.²,
Шубина Т. В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²FG Nanotechnologie, Institut für Mikro- und Nanoelektronik and Institut für Mikro- und Nanotechnologien MarcoNano, Germany

e-mail: ilya.eliseyev@mail.ioffe.ru

Атомарно тонкие слои дихалькогенидов переходных металлов активно используются для исследования экситонных эффектов в физике 2D структур [1]. Подобно другим дихалькогенидам, объемный MoS₂ является непрямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны ~1.3 эВ. В монослойном пределе происходит трансформация зонной структуры: материал становится прямозонным [2], демонстрируя интенсивную фотолуминесценцию (ФЛ) А-экситона с энергией порядка 1.9 эВ и характерными временами затухания в пикосекундном диапазоне [3]. В многослойных структурах наблюдаются линии излучения как прямого, так и непрямого экситонов, причем излучение последнего активируется с ростом температуры [4]. Ранее нами было предложено объяснение этого явления, предполагающее, в частности, что нижнее по энергии состояние непрямого экситона является темным (запрещенным по спину) [5].

В данной работе проведено исследование кинетики экситонной ФЛ в монослойных и бислойных структурах MoS₂, полученных методом штамп-переноса на плоские и профилированные поверхности различных подложек. Исследования кинетики ФЛ проводились методом спектроскопии микро-ФЛ с временным разрешением ~40 пс в температурном диапазоне от 10К до 300К. Временной интервал, в котором измерялись кривые затухания ФЛ (десятки нс) был существенно шире используемых ранее [6,7], что позволило впервые зарегистрировать и проследить изменение с температурой медленных компонент излучения. Для структурной диагностики образцов, в том числе определения числа слоев MoS₂, использовались методы спектроскопии ФЛ и комбинационного рассеяния света.

Исследования кинетики излучения показали несущественное различие характерных времен затухания линий А-экситона в монослое и бислое (быстрое время ~1 нс, медленное ~5 нс). Зависимости энергии и интенсивности этих линий от температуры для монослоя и бислоя также оказались близки. Излучение непрямого экситона в бислое на энергии ~1.5 эВ имеет выраженную медленную компоненту с временами затухания на уровне десятков

нс, что характерно для экситонных состояний, не прямых как по моменту, так и по спину. Однако температурной активации непрямого экситона, имеющей место в объемном кристалле [4], не наблюдалось, и излучение довольно быстро гасло. В спектрах микро-ФЛ монослоев при измерении на вершинах конусов профилированных сапфировых подложек, а также в районе складок на плоских подложках, обнаружена дополнительная линия X с энергией до 200 мэВ ниже энергии A-экситона. Появление линии X связано, вероятно, с растягивающими напряжениями на острие конуса, поскольку энергетическое расстояние от пика A-экситона уменьшалось при удалении от конуса. В бислоях линия X отсутствовала, что может объясняться их большей механической жесткостью по сравнению с монослоем. На основании полученных данных можно предположить следующее: 1) расщепление между темным и светлым состоянием непрямого экситона в атомарно тонких структурах MoS₂ мало или имеет иной знак по сравнению с объемным материалом; 2) напряжения, возникающие при деформации монослоев на остриях и складках, приводят к изменению потенциального рельефа и, возможно, локальной перестройке зонной структуры.

Исследования поддержаны Российским научным фондом (проект №19-12-00273).

Список литературы

1. G. Wang.; A. Chernikov, M.M. Glazov et al, Colloquium: Excitons in atomically thin transition metal dichalcogenides. Rev. Mod. Phys., vol. 90, 21001, 2018
2. K.F. Mak, C. Lee, J. Hone et al, Atomically thin MoS₂: A new direct-gap semiconductor. Phys. Rev. Lett., vol. 105, 2, 2010
3. M. Palummo, M. Bernardi, J. Grossman. Exciton Radiative Lifetimes in Layered Transition Metal Dichalcogenides, Nano Lett., vol. 15(5), 2794, 2015.
4. T.V. Shubina, M. Remškar, V.Yu. Davydov et al, Excitonic Emission in van der Waals Nanotubes of Transition Metal Dichalcogenides. Ann. Phys., vol. 531(6), 1800415, 2019
5. O.O. Smirnova, I.A.Eliseyev, A.V. Rodina et al, Temperature activation of indirect exciton in nanostructures based on MoS₂, J. Phys. Conf. Ser., vol. 1482, 012038, 2020
6. T. Korn, S. Heydrich, M. Hirmer et al, Low-temperature photocarrier dynamics in monolayer MoS₂, Appl. Phys. Lett., vol. 99, 2, 2011
7. C. Robert, D. Lagarde, F. Cadiz et al, Exciton radiative lifetime in transition metal dichalcogenide monolayers. Phys. Rev. B, vol. 93, 205423, 2016

Оптические исследования плёнок оксида индия на сапфировых подложках

Тихий А. А.¹, Жихарева Ю.И.² и Жихарев И.В.³

¹ЛГПУ, Луганск

²КНУ, Киев, Украина

³ДонФТИ им.А.А.Галкина, Донецк

e-mail: ea0000ffff@mail.ru

По результатам эллипсометрических измерений и измерений спектров оптического пропускания построены модели и определены оптические свойства плёнок In₂O₃ на подложках Al₂O₃ (012). Плёнки получены методом dc-магнетронного распыления [1].

Напыление производилось в течение 15, 35, 45, 60, 120 и 180 минут при токе 50 мА и напряжении 300 В. Температура подложек в процессе напыления составляла 600 °С. Эллипсометрические измерения проведены многоугловым методом на длине волны 633 нм. Измерения оптического пропускания – в интервале длин волн от 1000 до 200 нм.

Ранее [2] нами было установлено, что оптическое пропускание данных плёнок аномально уменьшаться с уменьшением длины волны. Для объяснения этого была предложена модель исследованных пленок, согласно которой, они состоят из трех слоев. Оптические свойства среднего слоя соответствуют кубической модификации In_2O_3 (пространственная группа Ia-3) согласно [3], а его толщина составляет от 5 до 290 нм в зависимости от времени напыления. Поверхность пленки предполагается шероховатой и смоделирована как однородный слой с оптическими свойствами, рассчитанными на основе диэлектрической проницаемости кубической модификации In_2O_3 и коэффициента заполнения 0,5, в соответствии с уравнением Клаузиуса-Моссотти. Толщина поверхностного слоя составляет 60 нм, практически не зависит от времени напыления и определяется в основном режимом напыления. Толщины указанных слоев определены на основании интерференционной картины, наблюдаемой в спектрах оптического пропускания.

Однако наличие только указанных слоев не полностью объясняет наблюдаемые спектры. Для их объяснения в модель вводится третий слой, расположенный между пленкой и подложкой. Этот слой обладает высоким коэффициентом экстинкции, спектральная зависимость которой описывается законом фундаментального поглощения в полупроводнике с шириной запрещенной зоны 1,39 эВ для прямых переходов и не зависит от времени напыления. Высокое значение коэффициента экстинкции данного слоя затрудняет нахождение его толщины и показателя преломления по результатам измерения оптического пропускания, поэтому его параметры были определены эллипсометрическим методом. Согласно полученным результатам его толщина несколько ниже, чем предполагалось нами ранее [2], на основании одних лишь измерений оптического пропускания. Она составляет порядка 30 нм, а показатель преломления существенно выше, и варьируется, для различных образцов, в пределах от 3 до 4.

Уточненные таким образом параметры моделей не только хорошо согласуются с наблюдаемыми спектрами оптического пропускания исследованных плёнок, но и с результатами эллипсометрических измерений.

Образование переходного слоя на границе с подложкой, по-видимому, не требует большого нарушения стехиометрии пленки, так как это, возможно, связано с размытием запрещенной зоны из-за большого количества дефектов в кристаллической структуре, а также образование примесных уровней внутри запрещенной зоны. Толщина этого слоя практически не зависит от времени напыления, и, следовательно, его появление обусловлено влиянием поверхности подложки.

Список литературы

1. Николаенко Ю.М., Мухин А.Б., Чайка В.А., Бурховецкий В.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. – с. 115.
2. Тихий А.А., Николаенко Ю.М., Жихарева Ю.И., Жихарев И.В. // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128, № 10. – с. 1544.
3. Schleife A., Neumann M.D., Esser N., Galazka Z., Gottwald A., Nixdorf J., Goldhahn R., Feneberg M. // New J. Phys. 2018. V. 20. – P. 053016.

Нелинейная оптическая динамика сверхрешёток квантовых V-излучателей

Байрамдурдыев Д. Я.¹, Маликов Р. Ф.¹, Рыжов И. В.², Малышев В. А.^{2,3}

¹БГПУ им. М.Акмиллы, Россия

²РГПУ им. А.И.Герцена, Россия

³ZIAM, University of Groningen, Groningen, The Netherlands

e-mail: d.bayramdurdiyev@gmail.com

Современные методы микро- и нанотехнологии позволяют создавать объекты с необычными электромагнитными свойствами, так называемые метаматериалы [1–3], среди которых двумерные сверхрешётки полупроводниковых квантовых точек [4–5] и органических полимеров [6] представляют особый интерес. Оптические свойства сверхрешётки зависят от размера квантовой точки, их формы, химического состава и геометрии решётки и могут быть целенаправленно контролируемы (см. работу [5] и ссылки в ней). К настоящему времени выполнен ряд теоретических исследований энергетической структуры [5–7] и линейных оптических свойств двумерных сверхрешёток полупроводниковых квантовых точек [8, 9]. В этих работах были продемонстрированы широкие возможности управления линейным оптическим откликом сверхрешёток, что создает платформу для практического применения подобных объектов в нанопотонике. В то же время нелинейные оптические свойства двумерных сверхрешёток исследованы в значительно меньшей степени.

В недавних работах [10,12] было показано, что нелинейный оптический отклик двумерных сверхрешёток квантовых излучателей с лестничной схемой [10] и Λ -схемой оптических переходов [11] обнаруживает мультистабильность, автоколебания и динамический хаос.

Мы теоретически исследуем нелинейную оптическую динамику двумерных сверхрешёток трехуровневых квантовых излучателей с дублетом в возбужденном состоянии (излучатели V-типа [12]) на действие монохроматического электромагнитного поля, квазирезонансного оптическим переходам в излучателе. Полное западающее диполь-дипольное взаимодействие излучателей учитывается в приближении среднего поля. Это взаимодействие играет роль положительной обратной связи, которая в сочетании с собственной нелинейностью самих излучателей приводит к мультистабильности отклика сверхрешётки. Для анализа устойчивости различных ветвей последнего используется метод показателей Ляпунова. Найдено, что тип неустойчивости зависит от величины расщепления дублета и эволюционирует от автоколебаний к хаосу по мере увеличения расщепления. Мы также учитываем дефазировку оптических переходов и её влияние на оптический отклик сверхрешётки.

Другим важным свойством сверхрешётки является её высокая (практически стопроцентная) отражательная способность в определенной полосе частот, т. е. в данной полосе сверхрешётка функционирует как идеальное зеркало нанометровой толщины, причем, отражение может быть переключено на пропускание небольшим изменением амплитуды падающего поля (бистабильность) [11].

Перечисленные особенности нелинейного оптического отклика двумерных сверхрешёток квантовых V-излучателей представляются чрезвычайно перспективными для применений в оптических наноустройствах. В качестве квантового V-излучателя может выступать, например, полупроводниковая квантовая точка с вырожденной валентной зоной в магнитном поле [13].

Р. Ф. Маликов и Д. Я. Байрамдурдыев благодарят БГПУ им. М. Акмуллы за финансовую поддержку.

Список литературы

1. N. I. Zheludev, The Road Ahead for Metamaterials, *Science*, 328, 582 (2010).
2. C. M. Soukoulis and M. Wegener, Optical Metamaterials—More Bulky and Less Lossy, *Science*, 330, 1633 (2010).
3. W. H. Evers, B. Goris, S. Bals et al., Low-Dimensional Semiconductor Superlattices Formed by Geometric Control over Nanocrystal Attachment, *Nano Lett.* 13, 2317 (2013).
4. M. P. Boneschanscher, W. H. Evers, J. J. Geuchies et al., Long-range orientation and atomic attachment of nanocrystals in 2D honeycomb superlattices, *Science* 344, 1377 (2014).
5. A. V. Baranov, E. V. Ushakova, et al., Self-Organization of Colloidal PbS Quantum Dots into Highly Ordered Superlattices, *Langmuir* 31, 506 (2015).
6. W. Liu, X. Luo, Y. Bao, et al., A two-dimensional conjugated aromatic polymer via C–C coupling reaction, *Nature Chem.* 9, 563 (2017).
7. I. A. Vovk, N. V. Tepliakov, A. S. Baimuratov, et al., Excitonic Phenomena in Perovskite Quantum-Dot Supercrystals, *Phys. Chem. Phys.* 20, 25023 (2018).
8. J. F. Nossa and A. S. Camacho, Optical properties of supercrystals, *Microelectron. J.* 38, 251 (2008).
9. A. S. Baimuratov, Y. K. Gun'ko, A. V. Baranov, et al., Chiral quantum supercrystals with total dissymmetry of optical response, *Sci. Rep.* 6, 23321 (2016).
10. I. V. Ryzhov, R. F. Malikov, A. V. Malyshev, and V. A. Malyshev, Nonlinear Optical Response of A Two-Dimensional Quantum-Dot Supercrystal: Emerging Multistability, Periodic and Aperiodic Self-Oscillations, Chaos, and Transient Chaos, *Phys. Rev. A*, 100, 033820 (2019).
11. I. Ryzhov, R. Malikov, A. Malyshev, and V. Malyshev, A monolayer of three-level quantum Λ -emitters: A perspective system from the viewpoint of nonlinear optical dynamics and nanophotonics, *Eur. Phys. J. Web of Conf.* 220, 02012 (2019).
12. D. Ya. Bairamdurdyev, R. F. Malikov, et al., Nonlinear Optical Dynamics and High Reflectance of a Monolayer of Three-Level Quantum Emitters with a Doublet in the Excited State, *JETP* 131, 244 (2020).
13. Al. L. Efros, M. Rosen, M. Kuno, et al., Band-edge exciton in quantum dots of semiconductors with a degenerate valence band: Dark and bright exciton states, *Phys. Rev. B* 54, 4843 (1996).

Влияние затухания на генерацию оптических вихрей в мультигеликоидальных волокнах

Латин Б. П., Алексеев К.Н., Алиева С.С., Баршак Е.В., Яворский М.А.

КФУ им. В. И. Вернадского

e-mail: lapinboris@gmail.com

Введение

Современная волоконная оптика уделяет много внимания вопросам генерации оптических вихрей (ОВ) [1] с помощью волоконных оптических систем. ОВ выделяются из

всех оптических полей наличием винтового волнового фронта. Если винтовая поверхность имеет l ветвей, говорят, что топологический заряд (ТЗ) ОВ равен l .

Интерес к ОВ обусловлен тем, что они могут быть использованы в самых разных областях [2-4]. Особые перспективы имеет применение пучков с ТЗ в информационных технологиях для передачи информации на основе волоконно-оптических линий или в свободном пространстве [5,6]. Выгода передачи информации посредством ОВ состоит в том, что один и тот же частотный диапазон может использоваться для передачи множества сигналов, каждому из которых отвечают вихри с разными значениями ТЗ. Нужно отметить, что теоретически количество таких каналов на одной частоте не ограничено сверху, так как ТЗ может быть сколь угодно большим.

С практической точки зрения передача ОВ с помощью оптических волокон осложняется двумя обстоятельствами. Во-первых, ОВ в обычных волокнах неустойчивы по отношению к возмущениям, вызванным, например, их изгибом или кручением. Впрочем, стоит отметить, что недавние исследования показали способность некоторых типов волокон с дискретной вращательной симметрией поддерживать устойчивое распространение по ним ОВ [7,8]. Во-вторых, несмотря на обилие способов возбуждения вихревых полей, при генерации ОВ в случае их последующей передачи по оптическому волокну желательно использовать оптические волокна, так как сопряжение волокна с волокном минимизирует потери ввода. Поэтому актуальным является поиск волоконных способов генерации ОВ.

Одним из возможных волоконных устройств, позволяющих генерировать ОВ из регулярных пучков без дислокаций волнового фронта, являются устройства на основе мультигеликоидальных волокон (МГВ). На генерацию ОВ в таких волокнах влияют, прежде всего, геометрические параметры волокна, а также распределение показателя преломления. Количественные и качественные характеристики такого влияния неоднократно обсуждались в литературе [9-13]. Однако помимо упомянутых в этих работах факторов, в реальных хиральных волокнах всегда присутствует диссипация энергии. В этой связи встаёт вопрос: как диссипация энергии, вызванная поглощением среды, влияет на процессы генерации ОВ в хиральных волокнах? Мы продемонстрируем, что наличие поглощения в среде может существенно менять характер генерации ОВ из регулярных пучков.

Модель

МГВ состоит из сердцевины в виде стрежня с многозаходной резьбой с показателем преломления n_{co} , погруженную в среду с показателем преломления n_{cl} . Степень отклонения формы сердцевины от круга с радиусом r_0 характеризуется величиной α . Волокно в целом характеризуется шагом скрутки H и, соответственно, модулем вектора обратной решётки $q=2\pi/H$.

Распределение показателя преломления в МГВ таково, что в нём обеспечивается связь между модами, чьи азимутальные числа отличаются на величину, равную порядку вращательной симметрии сердцевины волокна. Отметим, что модами МГВ без поглощения являются ОВ.

Результаты

Вблизи резонансных значений q связь между модами начинает играть значительную роль и в результате её действия в системе формируются гибридные моды, представленные суммой ФМ и ОВ. Отметим, что мы работали в рамках скалярного приближения, потому парциальные поля имеют один тип поляризации. Одновременный учёт диссипации энергии в МГВ позволил установить следующее.

1) Гибридные моды затухают одинаково при равных коэффициентах затухания для парциальных полей, их составляющих.

2) Преобразование ФМ в ОВ в МГВ возможно, но при отличии коэффициентов затухания парциальных полей друг от друга эффективность процесса конверсии даже при идеальной настройке системы становится меньше 100%.

3) При некоторых значениях коэффициентов затухания для парциальных полей процесс конверсии ФМ в ОВ прекращается.

Список литературы

1. J.F. Nye, M.V. Berry. Dislocations in Wave Trains / J.F. Nye, M.V. Berry // *Proc. R. Soc. Lond. A*. - 1974. - Vol. 336. - P. 165-190.
2. B. Chen, X. Hou, F. Ge, X. Zhang, Y. Ji, H. Li, P. Qian, Y. Wang, N. Xu, J. Du. Calibration-Free Vector Magnetometry Using Nitrogen-Vacancy Center in Diamond Integrated with Optical Vortex Beam / B. Chen, X. Hou, F. Ge, X. Zhang, Y. Ji, H. Li, P. Qian, Y. Wang, N. Xu, J. Du // *Nano Letters*. - 2020. - Vol. 20. - P. 8267–8272.
3. E. Mari, G. Anzolin, F. Tamburini, M. Prasciolu, G. Umbriaco, A. Bianchini, C. Barbieri, F. Romanato. Fabrication and Testing of $l = 2$ Optical Vortex phase masks for Coronagraphy / E. Mari, G. Anzolin, F. Tamburini, M. Prasciolu, G. Umbriaco, A. Bianchini, C. Barbieri, F. Romanato // *Optics Express*. - 2010. - Vol. 18. - P. 2339-2344.
4. Z. Zhou, L. Zhu. STED microscopy based on axially symmetric polarized vortex beams / Z. Zhou, L. Zhu // *Chinese Physics B*. - 2016. - Vol. 25. - P. 030701
5. R.M. Nejad, K. Allahverdyan, P. Vaity, S. Amirizadeh, C. Brunet, Y. Messaddeq, S. LaRochelle, L.A. Rusch. Mode division multiplexing using orbital angular momentum modes over 1.4-km ring core fiber / R.M. Nejad, K. Allahverdyan, P. Vaity, S. Amirizadeh, C. Brunet, Y. Messaddeq, S. LaRochelle, L.A. Rusch // *Journal of Lightwave Technology*. - 2016. - Vol. 34. - P. 4252-4258.
6. J. Wang. Advances in communications using optical vortices / J. Wang // *Photonics Research*. - 2016. - Vol. 4. - P. B14-B28.
7. N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A.E. Willner, S. Ramachandran. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers / N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A.E. Willner, S. Ramachandran // *Science*. - 2013. - Vol. 340. - P. 1545-1548.
8. S. Ramachandran, P. Kristensen. Optical vortices in fiber / S. Ramachandran, P. Kristensen // *Nanophotonics*. - 2013. - Vol. 2. - P. 455-474.
9. C.N. Alexeyev, B.P. Lapin, M.A. Yavorsky. Generation of optical vortices in multihelical optical fibers / C.N. Alexeyev, B.P. Lapin, M.A. Yavorsky // *Optics and Spectroscopy*. - 2013. - Vol. 114. - P. 849-854.
10. C.N. Alexeyev, T.A. Fadeyeva, B.P. Lapin, M.A. Yavorsky. Topological activity in Bragg elliptical twisted fibers / C.N. Alexeyev, T.A. Fadeyeva, B.P. Lapin, M.A. Yavorsky // *Applied Optics*. - 2012. - Vol. 51. - P. C7-12.
11. C.N. Alexeyev, T.A. Fadeyeva, B.P. Lapin, M.A. Yavorsky. Generation and conversion of optical vortices in long-period twisted elliptical fibers / C.N. Alexeyev, T.A. Fadeyeva, B.P. Lapin, M.A. Yavorsky // *Applied Optics*. - 2012. - Vol. 51. - P. C193-197.
12. C.N. Alexeyev, T.A. Fadeyeva, B.P. Lapin, M.A. Yavorsky. Generation of optical vortices in layered helical waveguides / C.N. Alexeyev, T.A. Fadeyeva, B.P. Lapin, M.A. Yavorsky // *Physical Review A*. - 2011. - Vol. 83. - P. 063820.
13. C.N. Alexeyev, A.N. Alexeyev, T.A. Fadeyeva, B.P. Lapin, M.A. Yavorsky. Topological activity of layered chiral optical Bragg waveguides / C.N. Alexeyev, A.N. Alexeyev, T.A. Fadeyeva, B.P. Lapin, M.A. Yavorsky // *Journal of Optics*. - 2011. - Vol. 13. - P. 095701.

14. A.W. Snyder, J.D. Love Optical Waveguide Theory / A.W. Snyder, J.D. Love - London, New York: Chapman and Hall, 1985. - 750 p.

Исследование воздействия сульфата меди на спектральные характеристики гречиши посевной

Горяинов В. С.¹, Бузников А.А.¹

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: vsgoriainov@etu.ru

Тяжелые металлы входят в число наиболее распространенных загрязнителей почвы, воды и растительности. В литературе описаны индикаторные свойства некоторых видов растений, проявляющиеся в изменении спектров отражения их листьев в присутствии в почве солей тяжелых металлов [1]. Значительная часть этих видов относится к семейству злаковых (Poaceae), включающему ряд важнейших сельскохозяйственных культур (например, пшеницу и рожь). Индикаторные свойства гречиши посевной (*Fagopyrum esculentum*), относящейся к семейству гречишных (Polygonaceae), пока исследованы в недостаточной степени [2, 3].

Первый этап эксперимента по исследованию воздействия загрязнения почвы медью на спектры отражения гречиши был проведен авторами в лабораторных условиях [4]. Результаты этапа позволили выделить три спектральных индекса, принимавших экстремальное значение в момент максимального развития растений, качественно связанное с содержанием меди в почве.

Эксперимент с выращиванием гречиши в открытом грунте был проведен в сентябре – октябре, до начала повторяющихся ночных заморозков. Семена были высажены в четыре кюветы, в которые предварительно был внесён водный раствор сульфата меди, обеспечивающий концентрацию меди 0, 20, 40 и 60 мг/кг соответственно. Спектры отражения гречиши регистрировались каждые 2 – 3 дня при помощи спектрометра «Радуга» [1], построенного по модифицированной оптической схеме круга Роуланда с вогнутой дифракционной решеткой (120 штр/мм), дающей спектральное разрешение 1 нм в рабочем диапазоне 400 – 1100 нм. Угол поля зрения спектрометра равен $12' \times 5^\circ$. Фотоприемником служит ПЗС-линейка Toshiba TCD1304AP. Связь с персональным компьютером через последовательный порт позволяет устанавливать оптимальное время интегрирования и сохранять спектры в бинарных файлах.

По результатам измерений рассчитывались распределения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) по формуле $R_\lambda = (L_o(\lambda) - L_D(\lambda)) / (L_s(\lambda) - L_D(\lambda))$, где $L_o(\lambda)$ – монохроматическая яркость объекта измерений на длине волны λ , $L_s(\lambda)$ – монохроматическая яркость белого эталона на той же длине волны, $L_D(\lambda)$ – условная яркость, соответствующая уровню темнового шума в соответствующем канале. Спектральные индексы представляют собой отношения КСЯ $R_{\lambda 1} / R_{\lambda 2}$ на двух длинах волн, соответствующих минимумам или максимумам поглощения излучения растительными пигментами.

Параллельно спектральным измерениям проводилась регулярная съемка кювет цифровой камерой с постоянного ракурса для оценки воздействия проективного покрытия на вид спектров отражения. Пиксели снимков разделялись методом k-средних [5] на два кластера (листья и фон).

Максимальное покрытие было достигнуто на 27 день после высадки семян для кюветы "0" (чистая почва) и на 23 день для всех остальных кювет. Доля изображения, занятая листьями, при этом составила, в порядке увеличения степени загрязнения, 0,58; 0,72; 0,67 и 0,68.

Как и на первом этапе эксперимента, рассчитывались 4 спектральных индекса: R_{435} / R_{620} , R_{670} / R_{500} , R_{550} / R_{485} , R_{900} / R_{735} . В результате наиболее информативными для определения степени загрязнения почвы оказались 2 индекса, использующие длины волны "по краям" спектра. Так, на 35-й день эксперимента (стадия увядания растений) для кюветы "0" $R_{435} / R_{620} = 1,36$, а для "60" — 0,86. Для тех же кювет значения индекса R_{900} / R_{735} составили 0,66 и 1,5. В то же время индекс R_{670} / R_{500} принял значения (для чистой почвы и максимального загрязнения) 0,71 и 0,73; индекс R_{550} / R_{485} — 0,88 и 1,02. В целом изменчивость индексов под влиянием загрязнения почвы оказалась меньшей, чем на первом, лабораторном этапе эксперимента.

Второй этап эксперимента подтвердил восприимчивость спектральных характеристик гречихи посевой к загрязнениям почвы медью. В дальнейшем планируется повторение спектральных съемок под открытым небом и продолжение их до дальнейших этапов развития растений (рост третьего и последующих листков, цветение). Интерес представляет также установление количественных зависимостей, опирающихся на химический анализ почвы и зеленой массы.

Список литературы

1. Бузников А. А., Тимофеев А. А. Региональный экологический мониторинг: метод и аппаратно-программный комплекс для дистанционной оценки загрязнения индикаторных видов растительности тяжелыми металлами // Региональная экология. 2010, № 3 (29). С. 9–17.
2. Григорьева О. Б., Дроздова И. Б., Шилин Б. Б. Экспериментальное обоснование возможностей видеоспектральной дистанционной индикации кратковременного стресса растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 15, 2018, № 7. С. 78–88.
3. Груздев В. Н., Дроздова И. В., Кузнецов А. Ю. и др. Решение задач экологической безопасности видеоспектральным методом // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 15, 2018, № 1. С. 9–17.
4. Горяинов В. С., Полякова А., Бузников А. А. Исследование влияния загрязнения почвы медью на спектры отражения гречихи посевой // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. Вып. 9, 2020. С. 53–56.
5. Weller H. colordistance: Distance Metrics for Image Color Similarity. R package version 1.1.0. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=colordistance>.

Интегральный радиофотонный фильтр на основе селективного элемента в виде Брэгговской решетки и фотонного кольцевого резонатора

Зарецкая Г. А.¹, Дроздовский А.В.¹

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: shishmacova@gmail.com

В последнее десятилетие на базе интегральных оптических микроволноводов реализованы различные системы фильтрации радиосигнала. Зачастую основными элементами таких систем фильтрации являются кольцевые резонаторы на основе оптических микроволноводов [1-4].

В данной работе предложена топология интегрального радиофотонного фильтра на основе микроволноводных структур для создания перспективных СВЧ-приборов и устройств. Интегральный радиофотонный фильтр состоит из Брэгговской решетки и следующим за ней кольцевым резонатором. При этом Брэгговская решетка в составе интегральной фильтрующей оптической структуры состоит из четного числа секций пространственно-периодических структур, образованных периодическим изменением ширины интегрального микроволновода прямоугольного поперечного сечения, разделенных между собой линиями задержки. В результате такой конструкции в полосе заграждения обусловленной брэгговскими резонансами образуется полоса пропускания близкая к прямоугольной. При этом период изменения ширины интегрального микроволновода должен быть кратен половине длины волны оптического излучения в структуре, а длины, образованные периодическим изменением ширины интегрального микроволновода, должны быть кратны четвертьволновой нагрузке и подчиняться выражениям $l_1 = (n/2 + 1/4)\lambda_1$ и $l_2 = (m/2 + 1/4)\lambda_2$, длина линий задержки между Брэгговскими решетками соответствует l_1 , где n и m – произвольные целые числа, определяемые требуемыми характеристиками фильтрации (шириной полосы пропускания и заграждения, подавления в полосе заграждения и другими), λ_1 и λ_2 – длина волны в первом и втором участке периодической структуры на центральной частоте полосы пропускания фильтра. Важным условием обеспечения формы полосы фильтрации близкой к прямоугольной является условие $L_1 = L_q$, $L_2 = L_3 = \dots = L_{q-1} = L_1 \cdot 2 = 2 \cdot k \cdot (l_1 + l_2)$, где L_i – протяженность участка пространственно-периодической структуры, k – число периодов в структуре L_1 , q – количество пространственно-периодических структур в составе Брэгговской решетки.

Принцип действия такого интегрального радиофотонного фильтра основан на последовательности процессов. Оптическое излучение, модулированное СВЧ-сигналом, поступает на вход фильтрующей оптической структуры. Брэгговская решетка в конструкции фильтра является полосно-пропускающим оптическим фильтром, который имеет характеристику передачи близкую к прямоугольной. Далее оптический сигнал, прошедший через микроволновод, переизлучается в кольцевой резонатор, который изготовлен таким образом, чтобы в полосе пропускания Брэгговской решетки укладывалось три резонансных пика. Длина волны центрального резонанса выбирается равной центральной длине волны полосы пропускания Брэгговской решетки. Излучение перестраиваемого лазера, модулируемого СВЧ-сигналом, настраивается на центральную длину волны полосы пропускания Брэгговской решетки. При совпадении частоты модуляции с областью свободной дисперсии резонатора на фотодетекторе, расположенном после фильтрующей структуры, наблюдается СВЧ сигнал.

Предлагаемый сверхвысокочастотный радиофотонный фильтр позволит заменить стандартные элементы фильтрации, такие как фильтрующие системы на основе резонаторов с модами шепчущей галереи и оптоволоконные Брэгговские решетки. Кроме того, он позволит существенно уменьшить массогабаритные параметры и в дальнейшем реализовать такие интегральные устройства как фазовращатели, генераторы, мультиплексоры и другие.

Работа частично поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект "Госзадание", грант № FSEE-2020-0005).

Список литературы

1. Song S. [et al.], Tunable single passband microwave photonic filter using a cascaded pair of microring resonators, 2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), 1-4, 2017
2. Palací J. [et al.], Single bandpass photonic microwave filter based on a notch ring resonator, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 22, №. 17, 1276-1278, 2010
3. Marpaung D. [et al.], Si_3N_4 ring resonator-based microwave photonic notch filter with an ultrahigh peak rejection, Optics express, Vol. 21, №. 20, 23286-23294, 2013
4. Nikitin A.A. [et al.], Carrier-induced optical bistability in the silicon micro-ring resonators under continuous wave pumping, Optics Communications, Vol. 480, 126456, 2021

Особенности оптической активности неидеальных молекулярных кристаллов, обусловленные наличием структурных дефектов

Румянцев В.В.¹, Рыбалка А.Е.¹, Федоров С.А.¹, Гуменник К.В.¹

¹ДонФТИ им. А.А. Галкина

e-mail: rybalka96@inbox.ru

При изучении оптических явлений в кристаллах, особенности, связанные с сильным взаимодействием структурных единиц кристалла с электромагнитным полем («поляритонный эффект») следует отличать от явления пространственной дисперсии (ПД), то есть зависимости диэлектрической проницаемости ε как от частоты ω , так и от волнового вектора $\vec{k}$ электромагнитной волны. Учет ПД дает возможность расширить спектр изучаемых явлений и рассматривать такие эффекты, как естественная оптическая активность (ЕОА), электрогирация, круговой дихроизм и т. п. Изучение дисперсии гиротропных характеристик позволяет выявлять структурные особенности соответствующих сред, определять важные динамические параметры образующих их молекул.

Известно, что ответы на ряд вопросов таких, как определение частотной дисперсии угла вращения плоскости поляризации линейно поляризованной монохроматической электромагнитной волны, нахождение связи угла вращения со структурой экситонных состояний, определение численных значений исследуемых величин и т.п., могут быть получены лишь в рамках микроскопической теории ЕОА. Применительно к молекулярным кристаллам построение микротории ЕОА оказалось возможным после создания Аграновичем [1] и Давыдовым [2] теории экситонов Френкеля для молекулярных кристаллов. В работах [3-5] было проведено дальнейшее развитие теории ЕОА, в которой удалось

выразить экспериментально измеряемые величины через микрохарактеристики среды. Значительный интерес представляет изучение зависимости характеристик ЕОА неидеальных систем от концентрации структурных дефектов в различных частотных областях. Настоящая работа посвящена решению именно этой проблемы при исследовании важной количественной характеристики гиротропии – вращательной способности неидеального тернарного молекулярного кристалла и ее частотной дисперсии в экситонной области спектра.

В рамках одноуровневой модели проведено численное моделирование особенностей вращательной способности $\rho(\vec{s}, \omega, C_1, C_2, C_v)$, обусловленных наличием дефектов в структуре топологически упорядоченной кристаллической системы с примитивной решеткой, в узлах которой случайным образом расположены два сорта изотопических молекул и вакансии с концентрациями соответственно C_1, C_2 и C_v . Для конкретизации проблемы рассмотрена $\rho(\vec{s}, \omega, C_1, C_2, C_v)$, используя типичные [6] для молекулярных кристаллов бензола со случайной заменой атомов водорода на атомы дейтерия в интервале $\hbar\omega$ вблизи молекулярных энергий возбуждения: $E_1 = 3 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$, $E_2 = 3,0033 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$. Из полученной зависимости, следует, что для рассматриваемой системы имеются частотные области, которым соответствуют существенно различные зависимости вращательной способности от C_2, C_v .

Список литературы

1. Агранович В.М. Теория экситонов. М.: Наука. 1968. 382с.
2. Давыдов А.С. Теория молекулярных экситонов. М.: Наука, 1968. 296с.
3. Овандер Л.Н., Тю Н.С., Федоров С.А. К теории оптической активности молекулярных кристаллов. 2. Дисперсия оптической активности // УФЖ. 1983. Т.28, № 11. С.1674 -1677
4. Rumyantsev V.V., Fedorov S.A., Gumennyk K.V. Theory of Optically Active Imperfect Composite Materials. Selected Topics. Colne: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012, 52p.
5. Рыбалка А.Е., Румянцев В.В., Федоров С.А. Дисперсия оптической активности неидеальных молекулярных кристаллов // Мониторинг. Наука и технологии 2020. – Т. 44. , № 2. – С 79-86
6. Броуде В.Л., Рашба Э.И., Шека Е.Ф. Спектроскопия молекулярных кристаллов. М.: Энергоиздат. 1981. 248с.

Влияние квантовых флуктуаций на солитонные режимы в микролазерах

Федоров С. В.¹, Веретеннов Н. А.¹, Розанов Н. Н.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: sfedorov2006@bk.ru

Влияние квантовых флуктуаций на положение и спектральные характеристики солитонов в микролазерах - одна из актуальных задач в постановочных экспериментах, [1,2], цель которых - использование их в схемах оптической памяти, [3]. Эти усилия сосредоточены на использовании консервативных солитонов с керровской нелинейностью. Однако

свойства консервативных солитонов даже в классическом пределе предполагают дрейф как спектральных, так и пространственных характеристик при сколь угодно малом возмущении, не обязательно квантовом. В последнее время была разработана общая теория, описывающая влияние квантовых флуктуаций на положение и спектр лазерных солитонов, равновесие и устойчивость которых связано с диссипативной нелинейностью в центре линии лазерной генерации, см. [4,5]. Разработка альтернативных схем управления солитонами на основе диссипативной нелинейности, позволяющей более точно контролировать дискретный спектр их характеристик может обеспечить и перспективу их миниатюризации.

В данном сообщении анализируется возможность реализации диссипативных солитонов в лазерах микронного размера с учетом влияния квантовых флуктуаций накачки. Для того, чтобы обеспечить процедуру наблюдения возможности квантового сжатия солитона, предусмотрена синхронизация лазерной генерации внешним слабым электромагнитным воздействием. Проведено прямое численное моделирование лазерного солитона с учетом квантовых флуктуаций накачки. Расчитана область захвата частоты для синфазных режимов генерации локализованных состояний. Она расположена вне области гистерезиса как синфазных, так и противофазных однородных режимов генерации. Нижняя граница области захвата соответствует интенсивности падающего пучка на шесть порядков меньше интенсивности насыщения пассивной среды. Показано, что с помощью однородного управляющего пучка можно изменять топологию солитона. Определены новые устойчивые состояния связанных дислокаций с сильной и сверхсильной связью. Управление частотой и амплитудой небольшого поддерживающего излучения позволяет переходить между разными состояниями устойчивых комбинаций вихрей. Прямое численное моделирование в рамках решения стохастического уравнения показывает устойчивость двумерных солитонов относительно квантовых возмущений накачки, в том числе устойчивость траекторий классического движения солитона при условии наличия когерентного поддерживающего излучения.

Приведен вывод и оценка величины безразмерной константы, задающей масштаб квантовых возмущений накачки. Показано, что в полупроводниковых лазерах на основе CdSe квантовых точек квантовые возмущения в центре области устойчивости лазерного солитона не превышают 10^{-5} от величины поля солитона. Проведен вывод и получено решение линеаризованного по квантовым возмущениям стохастического уравнения. Получены явные выражения для временной зависимости дисперсии импульса и координаты солитона для возмущений, усредненных по резервуару. Показано, что дисперсия импульса солитона выходит на константу. Показано, что вблизи порога бифуркации Хопфа дисперсия квантовых возмущений стремится к бесконечности. Проведен анализ величины квантовых возмущений вблизи порога возникновения гистерезиса. Показано, что квантовые возмущения существенно не зашумляют профиль солитона даже с очень малой, стремящейся к нулю интенсивностью. Число фотонов в таких солитонах у порога возникновения гистерезиса, и без поддерживающего излучения может доходить до единицы.

Основное содержание исследований было выполнено в рамках гранта РФФИ 18-02-00402a

Список литературы

1. Bao, C., Suh, M.G., Shen, B. et al. «Quantum diffusion of microcavity solitons». Nat. Phys. (2021). <https://doi.org/10.1038/s41567-020-01152-5>
2. Herr, T. et al. «Temporal solitons in optical microresonators». Nat. Photon. 8, 145–152 (2014).

3. Wabnitz, S. «Suppression of interactions in a phase-locked soliton optical memory». Opt. Lett. 18, 601–603 (1993).
4. Golubeva T.Yu., Golubev Yu.M., Fedorov S.V., et al. «Quantum theory of laser soliton». Laser Physics Letters. 16, 125201 (2019).
5. Голубева Т.Ю. Голубев Ю.И., Федоров С.В., и др. «Квантовые флуктуации в лазерном солитоне». Опт. и Спектр. 128 517 (2020).
6. Fedorov S.V., Rosanov N.N. et al. «Quantum field fluctuations in the vicinity of a classical laser soliton». Laser Physics Letters. 18, 015204 (2021).

The Rayleigh wave scattering on a rectangular discontinuities lattice of an isotropic solid three-dimensional roughness in the Laue-Bragg-Wulff limit

Чуков В. Н.¹

¹ИБХФ им. Н.М. Эмануэля РАН

e-mail: vchukov@mail.ru

The problem of the surface acoustic Rayleigh wave scattering on a deterministic three-dimensional roughness, occupying a finite size rectangular region of an isotropic solid free surface, is solved in the Rayleigh-Born approximation of the perturbation theory in a roughness amplitude [1-4]. Formula for the displacement field in the scattered Rayleigh wave at a big distance from the roughness, as compared to rough region sizes $L_{1,2}$ along the x_1 , x_2 - axes respectively, and asymptotic formulas for this displacement field in the Bragg, i.e. short-wavelength $\lambda \ll L_{1,2}$ limit, where λ is the wavelength, are derived. It is obtained, that scattering in this limit takes place on the discontinuities of a roughness or of its non-zero derivatives in coordinates of any order along each axis x_1 and x_2 for the considered model of a roughness, factorized in coordinates. The resonances of scattering on a periodic Bragg lattice of discontinuities and spectrum of scattering in the region of the wavelength to surface area size ratio far from the classical Bragg resonances are considered from the single point of view as a diffraction pattern, produced by the Rayleigh wave scattering on a solid surface roughness. The last scattering is named the generalized Laue-Bragg-Wulff scattering, and the Bragg resonance scattering on a periodic lattice itself is named the classical Laue-Bragg-Wulff scattering [5-10], since the well-known Bragg-Wulff law of scattering follows from the Laue conditions of resonances, obtained earlier [5-8]. As a whole this scattering of the acoustic Rayleigh wave is the wave analog of the classical Laue-Bragg-Wulff scattering of the Rontgen rays in crystals [9-12]. It gives the well-known short-wavelength oscillations of the indicatrix of scattering contrary to the extraordinary oscillations in the long-wavelength $\lambda \gg L_{1,2}$ Rayleigh [2] limit, obtained in [13,14]. The resonances satisfy the classical Laue-Bragg-Wulff conditions of the scattered waves phases synchronism. It is obtained, that oscillations of the indicatrix of scattering far from the classical Laue-Bragg-Wulff resonances satisfy the generalized Laue-Bragg-Wulff conditions, which depend on a number of discontinuities in a lattice contrary to the classical resonances. The generalized, independent on a number of a lattice unit cells, Laue-Bragg-Wulff conditions of the resonances of scattering on the arbitrary non-periodic, chaotic lattice of discontinuities are obtained first [15,16]. These generalized Laue-Bragg-Wulff resonances of the indicatrix of scattering on a chaotic lattice have the same amplitude as the classical Laue-Bragg-Wulff resonances of scattering on a periodic lattice,

containing the same number of discontinuities unit cells. The new laws of scattering are obtained. They are caused by a strong modulation of scattering by the roughness form. They exceed the fundamental physical conception, that a wave scattering in the short-wavelength limit takes place on a medium discontinuities, by the statement, that a wave strongly senses the structure of a medium in the near vicinity of discontinuities as well as the form-factor of the discontinuities lattice. This form-factor is a dependence of the discontinuity amplitude, i.e. of a difference of the left and right limit values of a roughness non-zero derivative in coordinate at a point of discontinuity, on a number of this discontinuity in a lattice. These exceeded physical conception violates the classical and generalized Laue-Bragg-Wulff laws of scattering in the short-wavelength limit $\lambda \ll L_{1,2}$ both for periodic and chaotic lattices of discontinuities. The problem of a number of the resonance nodes of the reciprocal lattice, lying on the Ewald circle of reflection [11], is stated and solved analytically first for the Rayleigh wave scattering both on the classical Laue-Bragg-Wulff periodic lattice and on arbitrary chaotic one, which the virtual Laue-Bragg-Wulff periodic lattice of a roughness discontinuities [16] always corresponds to.

Список литературы

1. Lord Rayleigh, Proc. Lond. Math. Soc., volume 17, 4, 1885.
2. Lord Rayleigh. The theory of sound. Vols. I, II. New York. Dover. 1945.
3. Maradudin A.A., Mills D.L. Annals of physics (N.Y.), volume 100, 262, 1976.
4. Chukov V.N. Candidate of science dissertation. Moscow. МЕРФИ. 1994, 164 p. Abstract of dissertation. Moscow. МЕРФИ, 1994. 20 p. www.scribd.com.
5. Laue M., Friedrich W., Knipping P. Ber. Bayer. Akad., volume 363, 303, 1912.
6. Laue M, Friedrich W., Knipping P. In: X-Ray and Neutron Diffraction (in English), ed. by G.E. Bacon. Pergamon Press, 1966, pp. 89-108.
7. Bragg W.L. Proc. Camb. Philos. Soc., volume 17, 43, 1913.
8. Wulff G.V. Physikalische Zeitschrift, volume 14, 217-220, 1913.
9. Bijvoet J.M., Burgers W.G., Hagg G. (Eds.) Early papers on diffraction of X-rays by crystals., Springer, 1969. V. I. 372 p. Springer, 1972. V. II. 484 p.
10. Laue M. History of physics. Academic Press Inc. New York. 1950.
11. Ewald P.P. Acta Cryst. A, volume 25, 103, 1969.
12. Robinson I.K., Tweet D.J. Rep. Prog. Phys., volume 55, 599, 1992.
13. Chukov V.N.. Solid State Communications, volume 149, 2219, 2009.
14. Chukov V.N. Ultrasonics, volume 52, 5, 2012.
15. Чуков В.Н. Сборник трудов XVII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова («Волны-2020»). (ISBN 978-5-6045125-0-0): секция 8, *Акустика неоднородных сред*, стр. 24-29.
16. Чуков В.Н. Труды III Всероссийской Акустической конференции. Политех-Пресс, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург 2020. ISBN 978-5-7422-7029-4. Стр. 87. <https://acoust-conference.iapras.ru>

Исследование градиентного Yb,Er:PPLN усилителя

Строганова Е. В.¹, Галуцкий В.В., Куплевич М. А., Понетаева И.Г., Пузановский К.В.

¹Кубанский государственный университет

e-mail: stroganova@phys.kubsu.ru

Примером сочетания свойств нелинейно-оптического преобразователя PPLN с градиентом концентрации примесных ионов является PPLN:Er³⁺,Yb³⁺. Предлагается устройство, в котором на одном кристалле реализованы процессы усиления и генерации второй гармоники. Первые попытки были предложены в начале 2000х [1], которые состояли в интеграции нелинейных и генерационных свойств ниобата лития. Однако результативность таких процессов весьма низкая и составляет величину 7,5%. С целью повышения эффективности в работе рассматривается оптический усилитель с градиентом концентрации оптических центров Yb³⁺ вдоль PPLN.

Моделирование процесса генерации второй гармоники осуществлялось по квазичетырёхуровневой энергетической схеме оптических центров Yb³⁺ и Er³⁺ для градиентного PPLN [2]. Поглощение излучения накачки для Yb³⁺ предполагалось на длине волны 941 нм (954 нм или 980 нм), а излучение – на длине волны 1029 нм (или 1060 нм). Недостатком схемы одновременного усиления и преобразования излучения во вторую гармонику является необходимость сочетания достаточной геометрической длины PPLN для преобразования во вторую гармонику с положительной инверсией на протяженном участке преобразователя.

Для построения физико-математической модели функционирования градиентных преобразователей оптического сигнала рассмотрим PPLN градиентно-активированный ионами Yb³⁺ Er³⁺. Система расщепления уровней энергии Yb³⁺ и Er³⁺ в ниобате лития определялась из спектров поглощения и излучения. Мощность лазера накачки модулировалась в диапазоне 0÷5 Вт, с шагом 0,1 Вт. Состав ниобата лития для изготовления PPLN был постоянный и соответствовал Li_{0,99}Nb_{1,01}O_{3,02} (Li/(Li+Nb)=49,5%).

Далее в градиентных Yb³⁺,Er³⁺:PPLN учитывались процессы нелинейно-оптического преобразования на сформированных сегнетоэлектрических доменах с периодом 7 мкм. При рассмотрении модели градиентного усилителя оптический канал сигнала расположен на длине волны 1,06 мкм лазерного перехода Yb³⁺ в ниобате лития, вторая гармоника канала - на длине волны 0,53 мкм; для Er³⁺ - 1,58 мкм и 0,79 мкм, соответственно. В модели участвуют обыкновенная и необыкновенная поляризация волн сигнального канала и его второй гармоники. На входе в Yb³⁺,Er³⁺:PPLN вторая гармоника отсутствует.

Коэффициенты усиления и поглощения сигнала учитываются в усилении сигнала и убывании накачки соответственно, при распространении вдоль градиентно-активированного Yb³⁺,Er³⁺:PPLN. Далее учитывалось нелинейно-оптическое взаимодействие волн, соответствующих сигнальной длине волны и ее второй гармоники, амплитуды соответствующих волн определяются известными уравнениями.

Согласно полученным зависимостям интенсивностей излучения (1060 нм) и его второй гармоники от мощности излучения накачки (954 нм) и длины активированного фотонного устройства, сначала достигается пороговое значение мощности накачки, после чего начинается генерация второй гармоники. В [2] было показано, что в случае наличия градиента периода или состава по основным компонентам в PPLN можно достигать пиковых значений в узком интервале мощности накачки. Применяя и здесь такой подход, можно обеспечить условия квазифазового синхронизма вдоль активированного Yb³⁺,Er³⁺:PPLN таким образом, что на начальном этапе усиления переход мощности во

вторую гармонику будет минимальным, увеличиваясь по длине преобразователя. Это может повысить эффективность преобразования, обеспечить усиление оптического сигнала и его преобразование в одном элементе активированного градиентного $\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}:\text{PPLN}$.

Работа выполнена при поддержке проекта КНФ № МФИ-20.1-35/20 и РФФИ № 19-42-230006 p_a.

Список литературы

1. Capmany J. et al., Self-frequency doubling in Yb^{3+} doped periodically poled $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ bulk crystal, [et al.], Applied Physics Letters, v. 76, 1374 – 1376, 2000.
2. Stroganova E.V. et al., Frequency conversion in compositionally graded PPLN crystals, Quantum Electronics, v. 44, №1, 30 – 33, 2014.

Анализ деформаций и оптических возмущений прозрачных материалов с помощью датчика волнового фронта на эффекте Тальбота

Музыка А. Ю.¹, Андреев С.Н.¹, Казанцев С.Ю..¹,

¹Московский политехнический университет

e-mail: zy4kamu@yandex.ru

Известно, что для анализа волнового фронта широкоапертурных лазерных пучков ИК диапазона значительные преимущества имеет подход, основанный на эффекте Тальбота [1, 2]. Датчик волнового фронта на основе эффекта Тальбота позволяет визуализировать и исследовать оптические искажения, возникающие на трассе лазерного пучка с большими поперечными размерами. Отсутствие оптики позволяет применять данные датчики в рентгеновском и ИК спектральных диапазонах, а высокая чувствительность позволяет их использовать для контроля и юстировки различных оптических систем [2-4]. В прошлом, проблемы достижения высокого пространственного разрешения для изображений в ИК или рентгеновской области, а также необходимость их быстрой обработки, не позволили в полной мере проявить все преимущества датчиков ВФ на основе эффекта Тальбота. Прогресс в области создания цифровых оптических камер, разработка эффективных экранов для визуализации, а также совершенствование средств обработки изображений позволяет сегодня разрешить эти проблемы. Поэтому в последнее время проявляется значительный интерес к различным приложениям эффекта Тальбота [5-7].

Для отработки математический алгоритмов анализа тальбограмм нами была создана установка – датчик волнового фронта на основе эффекта Тальбота. С целью использования этой установки в учебном процессе, а также демонстрациях, иллюстрирующих эффект Тальбота, были исследованы различные типы периодических решеток и отработаны методики их изготовления. Установлено, что для лазерных источников видимого диапазона периодические решетки для датчика волнового фронта могут быть напечатаны лазерным принтером на прозрачной лавсановой пленке. Использование обычной офисной техники позволило создать решетки специальной формы, с использованием которых была показана возможность визуализации малых оптических искажений в различных прозрачных материалах. Показано, как тальбограммы позволяют визуализировать распределение деформаций в пластине оргстекла и других материалах при их деформации, что позволяет находить участки повышенной напряженности. Исследования продемонстрировали значительные преимущества датчика волнового фронта на основе эффекте Тальбота для

анализа динамических возмущений оптической плотности в прозрачных материалах, а также и воздушных трассах. Показано, что отсутствие специальной дорогой оптики, возможность увеличения поперечного размера тестируемого пучка свыше 10 см и применение для регистрации тальбограмм дешевых цифровых видеокамер делает метод, основанный на эффекте Тальбота привлекательным для самых разных приложений.

Список литературы

1. А.С. Коряковский, В.М.Марченко. //ЖТФ - 1981. - т.51, вып.7. - с. 1432 – 1438.
2. Игнатьев А.Б. и др. //Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38. – №. 1. – С. 69-72.
3. Коряковский А. С., Марченко В. М., Прохоров А. М. Дифракционная теория метода Тальбот-интерферометрии и диагностики широкоапертурных волновых фронтов //Труды ИОФАН. – 1987. – Т. 7. – С. 33-92.
4. В.В.Лобачёв, В.А.Соколов. // Оптика и спектроскопия. - 1996. - т.81, №1. - с.119 - 126.
5. Podanchuk D. V. et al. //Applied optics. – 2016. – Т. 55. – №. 12. – С. B150-B157.
6. Wen J., Zhang Y., Xiao M. //Advances in optics and photonics. – 2013. – Т. 5. – №. 1. – С. 83-130.
7. Agarwal S., Kumar V., Shakher C. //Imaging Systems and Applications. – Optical Society of America, 2017. – С. JTU5A. 27.

Разработка волоконно-оптической линии связи с кодовым разделением каналов

Поповский Н. И.¹

¹СПбГУТ

e-mail: nikitanikita24@mail.ru

Развитие современных технологий, систем связи и навигации требует использования высокоскоростных систем передачи информации. Волоконно-оптические линии связи используются в большинстве систем бортовой связи, радиолокационных станциях, системах спутниковой навигации для передачи информации и сигналов управления. Сигналы передаются, как внутри станции, например, радара, так и на большие расстояния. В последние годы широкое применение получили оптические сети множественного доступа с кодовым разделением каналов (OCDMA), которое позволяет иметь большое число абонентов и обеспечивает высокую помехоустойчивость к узкополосным и импульсным помехам. Основными характеристиками сетей OCDMA являются вероятность ошибки на бит с учетом интерференций, скорость передачи сообщений, число активных абонентов и структура сети [1]. Сети OCDMA как правило имеют топологию "точка-точка" или "звезда", где каждый узел имеет свой код. Скорость передачи уменьшается достаточно медленно с ростом числа пользователей. Принцип кодового разделения остается таким же, как в радиоканале, однако, имеется ряд отличий: во-первых, используется волоконно-оптический тракт для передачи сигналов, во-вторых, применяются другие методы модуляции [2].

В OCDMA сетях разные пользователи используют общую коммуникационную среду, в которой сигналы от разных передатчиков могут перекрываться как по времени, так и по частоте [2]. Множественный доступ достигается путем назначения различных кодовых последовательностей разным передатчикам, которые впоследствии обнаруживаются в приемнике при наличии множественных помех от других пользователей.

Основной проблемой при передаче информации с кодовым разделением каналов является обеспечение малого уровня интерференционных помех. Для решения этого необходимо использовать ортогональные оптические последовательности с хорошими авто и взаимно корреляционными свойствами [3]. Использование таких последовательностей позволяет достичь малого уровня боковых пиков, которые определяют шумы неортогональности и соответственно уровень интерференционных помех.

В качестве решения снижения уровня помехи от соседнего пользователя в разработанной конструкции волоконно-оптической линии связи кодеры и декодеры последовательностей реализуются на решетках Брега. Поскольку при высокоскоростной передаче используются большие полосы частот сигнала, то целесообразно использовать внешний модулятор, например модулятор Маха-Цандера. Обработка сигналов может быть когерентной на корреляторах или некогерентной на согласованных фильтрах. Синхронизация в приемнике производится после демодуляции. Декодирование кодов проводится спектрально-фазовым декодером. При таком построении ВОЛС происходит более медленное увеличение битовой ошибки при увеличении числа активных абонентов в сети. В разработанной нами ВОЛС на $\lambda = 1550$ нм, при скорости передачи 150 Мбит/с, мощности шума

приемника -10 дБм - битовая ошибка не превышает  при одновременной работе 16 абонентов из 32 на линии. Спектральная эффективность составляет порядка 2 бит/с/Гц. В случае полной загрузки линии – одновременная работа всех абонентов в сети вероятность битовой ошибки увеличивается до 10^{-8} . Это может привести в ряде случаев к потере информации при приеме сигнала.

Полученные результаты исследований показали, что для дальнейшего снижения скорости увеличения битовой ошибки, которая связана с влиянием интерференционных явлений, в случае возрастания числа абонентов, наиболее целесообразно использовать когерентный прием оптических сигналов. В этом случае детектор выделяет сигнал и синфазную составляющую интерференционной помехи. Квадратурная составляющая интерференционной помехи, которая в наибольшей степени влияет на скорость битовой ошибки, при этом полностью исключается. При использовании ортогональных кодов ошибки при когерентном приеме обусловлены флуктуациями амплитуды помехи, имеющей нормальное распределение вероятностей, которые незначительно возрастают при увеличении числа абонентов.

Список литературы

1. Kitayama, Ken-Ichi Optical Code Division Multiple Access / Ken-Ichi Kitayama // New York: Cambridge University Press – 2014. – 344 с.
2. Shiraz, H.G. Optical CDMA Networks Principles, Analysis and Applications / H.G. Shiraz, M.M. Karbassian // Chichester: John Wiley & Sons Ltd. – 2012.
3. Karanov, B. End-to-end deep learning of optical fiber communications / B. Karanov, M. Chagnon, F. Thouin, T.A. Eriksson, H. Bulow, D. Lavery, et al. // J. Lightwave Technol. – 2018. – Vol. 36 (20). – P. 4843-4855.
4. Popovskiy, N.I. Features of the construction of fiber-optic communication lines with code division multiplexing / N.I. Popovskiy, V.V. Davydov, L.R. Valiullin // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1695(1). – 012120.

Стационарный режим работы одноатомного лазера в Q-представлении

Ларионов Н. В.^{1,2}

¹СПБПУ, ²СПБГМТУ

e-mail: larionov.nickolay@gmail.com

В настоящее время источники неклассических состояний света востребованы в таких областях физики как квантовая информатика, квантовые коммуникации, квантовая криптография и квантовые стандарты частоты [1-3]. Проводятся различные исследования, направленные на создание таких источников. В частности, есть работы в которых, для получения определенных состояний света или создания элементов квантовых компьютеров, предлагается использовать системы состоящие всего из одного или нескольких квантовых излучателей [4,5]. Свойства одиночных излучателей отображаются на состоянии электромагнитного поля, что позволяет получить, к примеру, суб-пуассоновский свет [6].

Одной из фундаментальных моделей квантовой оптики является модель одноатомного лазера: двухуровневый атом с некогерентной накачкой, взаимодействующий с одной затухающей модой резонатора. Эта модель впервые была рассмотрена в работе [7] и после этого исследовалась многими другими авторами. Существенный вклад в изучение свойств одноатомного лазера был сделан группой учёных из Института физики НАН Беларуси (см. [8,9] и ссылки там же). Один из теоретических подходов, используемый в работах этой группы, основан на анализе уравнения для оператора плотности системы, записанного для таких квазираспределений как P и Q , позволяющих находить нормально- и антинормально упорядоченные корреляционные функции полевых операторов, соответственно.

В [10], для случая стационарного режима работы лазера, нами было выведено линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка для P -распределения, усредненного по фазе. В предельном случае, когда связь поля с атомом сильнее, чем связь поля с резервуаром, обеспечивающим его распад, было получено приближенное решение этого уравнения. Это решение, являющееся порождающим в проблеме малого параметра у старшей производной (сингулярно возмущенная задача), для определенных значений параметров лазера дает хорошее согласие с численными расчетами и, более того, содержит в себе некоторые предельные решения, полученные в [8,9]. Дальнейший наш анализ этого уравнения позволил получить приближенное выражение для P -распределения, которое, в отличие от предыдущих решений, может становиться отрицательно определенным [11].

В силу специфики P -распределения (P -функция может быть отрицательной и/или неограниченной), анализ упомянутого уравнения и его приближенных решений сталкивается с определенными трудностями. В связи с этим возникает естественное желание получить похожее уравнение, но для «хорошей» квазивероятности. В качестве последней было выбрано Q -распределение.

Вывод уравнения для Q -распределения основан на записи уравнения для оператора плотности рассматриваемого лазера

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = & -\frac{i}{\hbar} [\hat{V}, \hat{\rho}] + \frac{\kappa}{2} (2 \hat{a} \hat{\rho} \hat{a}^\dagger - \hat{a}^\dagger \hat{a} \hat{\rho} - \hat{\rho} \hat{a}^\dagger \hat{a}) + \frac{\gamma}{2} (2 \hat{\sigma} \hat{\rho} \hat{\sigma}^\dagger - \hat{\sigma}^\dagger \hat{\sigma} \hat{\rho} - \hat{\rho} \hat{\sigma}^\dagger \hat{\sigma}) \\ & + \frac{\Gamma}{2} (2 \hat{\sigma}^\dagger \hat{\rho} \hat{\sigma} - \hat{\sigma} \hat{\sigma}^\dagger \hat{\rho} - \hat{\rho} \hat{\sigma} \hat{\sigma}^\dagger), \hat{V} = i \hbar g (\hat{a}^\dagger \hat{\sigma} - \hat{\sigma}^\dagger \hat{a}) \end{aligned}$$

где $\hat{a}, \hat{a}^\dagger$ – операторы уничтожения и рождения фотона в моде резонатора; $\hat{\sigma} = |1\rangle\langle 2|, \hat{\sigma}^\dagger = |2\rangle\langle 1|$ – атомные проекционные операторы, где вектор $|1\rangle$ соответствует основному состоянию атома, а вектор $|2\rangle$ – возбужденному; $\hat{V}$ – оператор взаимодействия атома с модой резонатора и g – соответствующая константа связи. Второе слагаемое справа в уравнении соответствует распаду моды резонатора со скоростью $\kappa/2$. Третье слагаемое справа соответствует спонтанному распаду атома с верхнего уровня на нижний со скоростью $\gamma/2$. И последнее слагаемое справа соответствует некогерентной накачке атома с нижнего уровня на верхний со скоростью $\Gamma/2$.

Переход в представление по когерентным состояниям $|z\rangle$ ($z = \sqrt{I} \exp(i\phi), I = |z|^2$) проводится стандартным способом. В конечном итоге, для стационарного случая, можно получить следующее дифференциальное уравнение пятого порядка для усредненного по фазе ϕ Q -распределения

$$\sum_{\nu=0}^5 f_{\nu}(I) Q^{(\nu)}(I) = 0,$$

где полиномы f равны

$$\begin{aligned} f_5(I) &= a_{02}I^2 + a_{03}I^3, f_4(I) = a_{11}I + a_{12}I^2 + a_{13}I^3, f_3(I) = \\ &= a_{20} + a_{21}I + a_{22}I^2 + a_{23}I^3, f_2(I) = \\ &= a_{30} + a_{31}I + a_{32}I^2 + a_{33}I^3, f_1(I) = a_{40} + a_{41}I + a_{42}I^2, f_0(I) = a_{50} + a_{51}I + a_{52}I^2 \end{aligned}$$

и $a_{ik} = a_{ik}(\Gamma, \gamma, \kappa, g)$ – функции параметров лазера.

Анализируя полученное уравнение для $Q(I)$, для некоторых предельных случаев ($\Gamma/2g1$ и $\kappa/2g1$), нам удастся получить его аналитические решения. Эти решения сравниваются с соответствующими решениями уравнения для P -функции, в частности с решением, полученным в [12]. Строятся зависимости среднего числа фотонов и их дисперсии от параметров лазера, и результаты сравниваются с результатами численного моделирования уравнения для оператора плотности системы.

Список литературы

1. I. R. Berchera and I. P. Degiovanni, Quantum imaging with subpoissonian light: challenges and perspectives in optical metrology, *Metrologia* 56, 024001 (2019).
2. V. D'ambrosio, N. Spagnolo, L. D. Re, S. Slussarenko et al., Photonic polarization gears for ultra-sensitive angular measurements, *Nature Communications* 4, (2013).
3. S. Pogorzalek, K. G. Fedorov, M. Xu et al., Secure quantum remote state preparation of squeezed microwave states, *Nature Communications* 10, (2019).
4. С. О. Тарасов, С. Н. Андрианов, Н. М. Арсланов, С. А. Моисеев, Квантовый транзистор на атомно-фотонной молекуле, *Известия Российской академии наук, Серия физическая*, Т. 82, № 8, С. 1148-1152, (2018).
5. A. A. Sokolova, G. P. Fedorov, E. V. Il'ichev, O. V. Astafiev, Single-atom maser with an engineered circuit for population inversion, *Phys. Rev. A* 103, 013718 (2021).
6. Д. Ф. Смирнов, А. С. Трошин, Новые явления в квантовой оптике: антигруппировка и субпуассоновская статистика фотонов, сжатые состояния, *УФН*, Т. 153, С. 233–271, (1987).
7. Mu Yi, C. M. Savage, One-atom lasers, *Phys. Rev. A*, Vol. 46, No. 9, p. 5944, (1992).

8. С. Я. Килин, Т. Б. Карлович, Одноатомный Лазер. Когерентные и неклассические эффекты в режиме сильной атомно-полевой корреляции, Журнал экспериментальной и теоретической физики, Т. 122, № 5, С. 933-949, (2002).
9. Т. Б. Карлович, С. Я. Килин, Квантовые статистические свойства одноатомных лазеров, Оптика и спектроскопия, Т. 91, № 3, С. 374-382, (2001).
10. N. V. Larionov, M. I. Kolobov, Quantum theory of a single-emitter nanolaser, Phys. Rev. A, Vol. 88, p. 013843, (2013).
11. E. N. Popov, N. V. Larionov, Glauber-Sudarshan P function in the model of a single-emitter laser generating in strong coupling regime, Proceeding of SPIE, 9917, 99172X, 2016.
12. N. V. Larionov, Behavior of a Single-Atom Laser in the Sub-Poissonian Regime, 2020 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St. Petersburg, Russia, 2020, pp. 265-268, doi: 10.1109/EExPolytech50912.2020.9243955.

Исследование мультимодного зондирования оптической плотности жидких сред

Алексеев В.А.¹, Усольцев В.П.¹, Юран С.И.², Бузилов С.В.¹

¹ИжГТУ имени М.Т. Калашникова

²ИжГСХА

e-mail: buzilov@mail.ru

Анализ оптической плотности жидких сред играет важную роль при контроле загрязнения источников водоснабжения и является реальным фактором, который оказывает существенное влияние на здоровье людей. Воды природных водоемов представляют сложную неоднородную систему, загрязненную разнообразными веществами, которые представлены в ее составе в растворенном и нерастворенном виде, а также в коллоидном состоянии. Помимо этого, в поверхностных и подземных водах, даже в мировом океане, содержатся крупные примеси, в том числе в виде микрочастиц – отходы растительного происхождения, синтетические поверхностно-активные вещества, образующихся в результате (процессе) жизнедеятельности человечества, а также природных явлений, и состоящих из органических и неорганических материалов (веществ).

Для контроля и мониторинга загрязнения природных вод, в том числе обнаружения и идентификации загрязнений используется широкий спектр аналитических приборов. В основе их работы лежат различные физическо-химические методы (кондуктометрические, диэлькометрические, потенциометрические, оптические и др.). Среди них большими возможностями обладают оптические методы, работающие в ультрафиолетовом, рентгеновском, ближнем инфракрасном и ИК-диапазонах. Перспективными являются методы и приборы на основе одновременного использования источников излучения с разной длиной волны.

В данной работе для обнаружения неоднородностей жидкой среды (вида и степени посторонних включений) исследовалось изменение оптической плотности водной среды при определенных длинах волн лазерного излучения и загрязнении воды твердыми частицами, нефтью и нефтепродуктами, антибиотиками, частицами синтетических материалов. Получены аналитические выражения для расчета зональной оптической плотности при многоканальном лазерном зондировании. Для упрощения и повышения наглядности

аналитических выражений спектральную плотность потока излучения лазеров и спектральную чувствительность фотодиода аппроксимированы известной, хорошо исследованной параметрической функцией с использованием известной функции Лапласа, значения которой рассчитаны и приводятся в соответствующих таблицах.

Для эксперимента использована лабораторная установка на основе имитационной модели загрязнения воды. Установка позволяет имитировать любое из известных загрязнений, время их устранения, вид, содержание и концентрацию загрязнений, влияние факторов, снижающих достоверность контроля, и экспериментально обосновать выбор признаков загрязнений сточных вод и идентификационных параметров изменения оптической плотности.

При использовании трехчастотного зондирования выбраны источники излучения, красный - 650 нм, зеленый - 532 нм, синий - 445 нм, спектральная ширина 1 - 3 нм, дисперсия, характеризующая размах вариации = 0.5 нм, средняя мощность излучения 1.0 мВт, световой поток 0,16 лм. Относительное изменение оптической плотности составило 13%. Из полученных на виртуальной панели управления экспериментальной установки осциллограммах изменения оптической плотности наглядно видно, что, задавая режимы работы контрольной аппаратуры можно фиксировать изменение величины параметров загрязнения на 67–92% при изменении оптической плотности на 5 – 15 %. Расчеты показывают, что многочастотное зондирование позволяет повысить точность идентификации вида и степени загрязнений на 50 – 70% в сравнении с известными способами.

Список литературы

1. Alekseev V.A., Usoltsev V.P., Yuran S.I. Analysis of the probabilistic-temporal characteristics of wastewater of mechanical engineering enterprises // ICCATS 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Volume 962, №4, 2020, 042022 doi:10.1088/1757-899X/962/4/042022 Scopus
2. Alekseev V.A., Yuran S.I., Usoltsev V.P., Shulmin D.N. System of Laser Monitoring of Water Pollution with Application of Relative Description of Signal Shape // Devices and Methods of Measurements. - 2020, vol. 11, no. 2, pp. 114–121. DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-2-114-121
3. Alekseyev V.A., Usoltsev V.P., Yuran S.I. Industrial wastewater monitoring on enterprises in case of emergency // Actual Scientific & Technical Issues of Chemical Safety (ASTICS-2020): Book of Abstracts Vth International Conference Kazan, October 6 - 8, 2020. – С.209. eds.: Prof. Alexander V. Roshchin, PhD Elena G. Raevskaya DOI:10.25514/CHS.2020.05.7755
4. Усольцев В.П. Оптоэлектронный контроль аварийных сбросов сточных вод опасных промышленных объектов / Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения: Сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции, 11-13 декабря 2019, Саратов: ООО «Амирит», 2019. Часть 1. С.102-106. - 237 с.
5. Алексеев В.А., Усольцев В.П., Юран С.И., Шульмин Д.Н. Оптико-электронный стенд регистрации изменений оптической плотности жидких сред // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте – 2020: труды XXVIII Междунар. конф. г. Новороссийск, 7-12 сентября 2020 г.) / под ред. проф. В.Е. Привалова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. – С. 65-67.
6. Патент 2710358 РФ МПК G01N 33/18, C02F 1/00 Способ интерполяционного контроля загрязненности сточных вод и промышленных стоков / Алексеев В.А.,

Усольцев В.П., Юран С.И., Шульмин Д.Н. Заявка: 2019103060 от 04.02.2019. Оpubл. 26.12.2019. Бюл. № 36.

7. Патент 2741041 РФ МПК G01N 33/00; G01N 33/18; C02F 1/00; C02F 9/00 Способ контроля и очистки сточных вод/ Юран С.И., Алексеев В.А., Усольцев В.П., Буранов Д.Н., Шульмин Д.Н. Заявка: 2020106356 от 10.02.2020. Оpubл. 22.01.2021 Бюл. № 3

Структурные, оптические и люминесцентные свойства кристаллов $Gd_3Al_xGa_{5-x}O_{12}$ ($x = 0,1,2,3$)

Спасский Д.А.^{1,2}, Федюнин Ф.Д.³, Морозов В.А.³, Забелина Е.В.⁴, Касимова В.М.⁴, Козлова Н.С.⁴, Бузанов О.А.⁵

¹НИИЯФ МГУ

²Институт физики Тартуского университета, Эстония

³МГУ

⁴МИСиС

⁵АО «Фомос-Материалы», Россия

e-mail: deris2002@mail.ru

Кристаллы $Gd_3Al_xGa_{5-x}O_{12}:Ce^{3+}$ являются перспективным материалом для сцинтилляционных детекторов, которые могут применяться в медицине (ПЭТ, СПЕКТ) и физике высоких энергий [1]. Варьирование относительной концентрации замещаемых атомов Al/Ga позволяет изменять структурные, оптические и люминесцентные свойства смешанных кристаллов. В настоящее время показано, что соотношение Al/Ga = 2/3 позволяет получать сцинтилляторы с наиболее высокими значениями светового выхода [2]. Примесные ионы определяют оптические свойства в области прозрачности кристаллов, а также люминесцентные свойства кристаллов. Исследования беспримесных кристаллов представляют интерес, так как в этом случае устраняется влияние, оказываемое примесными ионами на свойства кристаллов, в частности, на спектральную зависимость коэффициента поглощения в области края фундаментального поглощения, что не позволяет достоверно определить ширину запрещенной зоны. Настоящая работа посвящена исследованиям структурных, оптических и люминесцентных свойств ряда беспримесных смешанных кристаллов $Gd_3Al_xGa_{5-x}O_{12}$ ($x = 0,1,2,3$).

С использованием метода рентгенофазового анализа определены фазовый состав кристаллов и параметры решетки беспримесных гранатов. Распределение замещаемых атомов по узлам определено с использованием метода Ритвельда. С использованием двух подходов проведена оценка ширины запрещенной зоны в $Gd_3Al_xGa_{5-x}O_{12}$. В первом случае проводился анализ спектров возбуждения люминесценции в области края фундаментального поглощения. Второй подход, использованный для оценки ширины запрещенной зоны, состоял в анализе температурной зависимости края фундаментального поглощения. Показано, что температурное поведение края фундаментального поглощения исследованных кристаллов не может быть корректно описано формулой Урбаха. Сделано предположение, что это связано со вкладом эффекта как динамического разупорядочения, так и статического разупорядочения структуры вследствие статистического распределения катионов замещения между узлами решетки с тетраэдрической и октаэдрической координацией. Сделана попытка аппроксимации с использованием модифицированной формулы Урбаха, учитывающей как статический, так и динамический беспорядок структуры.

Проведены исследования влияния изменения относительной концентрации катионов замещения алюминия и галлия на люминесцентные свойства кристаллов $\text{Gd}_3\text{Al}_x\text{Ga}_{5-x}\text{O}_{12}$. Показано отсутствие собственного экситонного свечения гранатов в температурном диапазоне 5-300 К. При этом в спектрах люминесценции зарегистрированы узкие линии, связанные с электронными переходами $^6\text{P}_J - ^8\text{S}_{7/2}$, $^6\text{G}_J - ^6\text{P}_J$ и $^6\text{G}_J - ^6\text{I}_J$ 4f-4f в ионах Gd^{3+} . Проведен анализ спектров возбуждения люминесценции в области фундаментального поглощения, показано, что перенос энергии на центры свечения Gd^{3+} осуществляется преимущественно через промежуточный этап формирования экситонных состояний. Измерения спектров возбуждения и люминесценции проводились с использованием уникальной установки в канале синхротронного излучения FinEstBEAMs лаборатории MAX IV (Лунд, Швеция).

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований №20-02-00688.

Список литературы

1. Lecoq P. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 809 (2016) 130.
2. Korzhik M. et al. // Cryst. Res. Technol. 54 (2019) 1800172.

Frequency shift of the magnetic resonance at the spin exchange collisions between K and Li atoms.

Kartoshkin V. A.¹

¹Ioffe Institute

e-mail: victor.kart@mail.ioffe.ru

One of the processes occurring in the collision of spin polarized alkali atoms is the process of spin exchange. This process is characterized by the exchange of polarization between the colliding particles. The result of this process is both an exchange of polarization between the colliding particles and a shift of the magnetic resonance frequency of the atoms. In this paper, we will consider the process of spin exchange between polarized potassium atoms and lithium atoms and calculate the shift of the magnetic resonance frequency of lithium atoms.

Evolution of density matrix of lithium atoms in a mixture of lithium and potassium atoms in the ground state at the optical orientation of atoms in an absorption cell with a buffer gas is due to the following processes: collisions between lithium atoms, collisions between lithium and potassium atoms, depolarizing collisions between lithium atoms and buffer gas atoms (or molecules), diffusion of lithium atoms and the influence of a constant magnetic field [1].

It is shown that the main processes in the experiment on the optical orientation of atoms are collisions of lithium atoms with each other and with potassium atoms, which affect the frequency shift of magnetic resonance.

Thus, we calculated the frequency shift of the magnetic resonance of lithium atoms at the conditions of the optical orientation of potassium atoms. In the collision of alkali atoms with electron spins $S = 1/2$, a dimer is formed with a total spin $S = 1$ (triplet state) or $S = 0$ (singlet state). In order to calculate the shifts of the magnetic resonance frequency due to the spin exchange, we need to know the values of the complex cross sections of the spin exchange (primarily their imaginary parts) for the following pairs of atoms: Li-Li, Li-K. To calculate the frequency shifts of interest to us, we used the interaction potentials from [2] (Li-K) and [3-5] (K-K).

Список литературы

1. Окуневич А И *Оптика и спектр* 1995 **79** 718
2. E. Tiemann, H. Knöckel, P. Kowalczyk, W. Jastrzebski et al *Phys. Rev.* 2009 **A 79** 042716
3. Amiot C *J. Molec. Spectroscopy*. 1991 **146** 370
4. Amiot C, Verges J, and Fellows C *J. Chem. Phys.* 1995 **103** 3350
5. Ahmed E, Lyyra A M Xie F et al *J. Molec. Spectroscopy* 2005 **234** 41

О временной задержке сигнала при использовании пучка Гаусса

Галинский М. К., Румянцев В.В., Фёдоров С.А.

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

e-mail: fenix102030405@gmail.com

Пучки Гаусса являются одними из самых часто применяемых в лазерной технике [1]. Обычно в свободном пространстве время прихода сигнала вычисляется, исходя из предположения, что скорость передачи сигнала с использованием пучка Гаусса равна скорости света. Однако, в работах [2-4] показано, что групповая скорость такого пучка не равна скорости света. Из данных работы [4] видно, что в области вблизи перетяжки и до расстояния порядка длины Рэлея вдоль распространения пучка, групповая скорость такого сигнала меньше световой. При этом отклонение скорости передачи сигнала от световой зависит, от частоты и радиуса пучка. Рассматривая распространение сигнала вдоль оси пучка, видно, что время, необходимое для достижения сигналом детектора отличается от

такого для плоской волны на величину $\delta t = \frac{z_R}{\omega a} \arctan(z/a)$, где c - скорость света,

ω - частота, z - пройденное сигналом расстояние,

$$a = \sqrt{z_R^2 - \frac{c}{\omega} z_R} \text{ - вещественный параметр,}$$

$$z_R = \frac{\omega w_0^2}{2c} \text{ - длина Рэлея, } w_0 \text{ - радиус пучка.}$$

Таким образом параметр a зависит только от частоты и радиуса пучка.

Можно показать, что групповая скорость пучка Гаусса стремится к световой при удалении от перетяжки [4], и что существует максимальная задержка сигнала, зависящая от частоты и радиуса пучка. То есть, на расстоянии от детектора $z \gg a$, величина временной задержки приблизительно равна $\delta t \approx \pi z_R / 2\omega a$.

Для оценки порядка этой величины использованы характеристики лазера, примененного в работе [5]: длина волны $\lambda = 632.8$ нм, радиус пучка $w_0 = 2$ мкм. Тогда максимальная временная задержка будет равна 0.529 фс, что соответствует пространственному отставанию от плоской волны, распространяющейся со световой скоростью, на 158.6 нм.

Полученные результаты применимы в информационных технологиях и лабораторных исследованиях, в частности, в фемтосекундной оптике.

Список литературы

1. Levy U. Mathematics of vectorial Gaussian beams / U. Levy, Y. Silberberg, N. Davidson // *Advances in Optics and Photonics*. – 2019. – Vol. 11, № 4. – P. 828-891.
2. Vasnetsov M.V. Group velocity of Gaussian beams / M.V. Vasnetsov, V.A. Pas'ko // *Ukr. J. Phys.* – 2009. – Vol. 54, № 1-2. – P. 50-52.
3. Bouchard F. Observation of subluminal twisted light in vacuum / F. Bouchard, J. Harris, H. Mand, R.W. Boyd, E. Karimi // *Optica*. – 2016. – Vol. 3, № 4. – P. 351-354.
4. Галинский М.К. Групповая скорость света в оптически линейной и изотропной среде / М.К. Галинский, В.В. Румянцев // *Проблемы искусственного интеллекта*. – 2018. Т. 10, № 3. – С. 14-22.
5. Bareza N.D. Subluminal group velocity and dispersion of Laguerre Gauss beams in free space / N.D. Bareza, N.Hermosa // *Sci. Rep.* – 2016. – Vol. 6. – P. 26842.

Трубчатые топологические светло-темные и темные лазерные СОЛИТОНЫ

Розанов Н. Н.¹, Веретеннов Н.А.¹, Федоров С.В.²,

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: nnrosanov@mail.ru

В работах [1–3] на основе двумерных вихревых солитонов в лазере с насыщающимся поглощением построено и исследовано семейство локализованных по всем трем пространственным измерениям солитонов с различной топологией, в том числе узловых. В настоящем сообщении демонстрируется набор формируемых сходным образом топологических (вихревых) солитонов трубчатого типа, распределение поля в которых локализовано в трубчатой области.

Исходным служит обобщенное уравнение Гинзбурга-Ландау для медленно меняющейся огибающей электрической напряженности поля E (линейная поляризация излучения) в среде с частотной дисперсией, линейными потерями излучения и насыщающимся усилением и поглощением. Более полно изученные пространственные двумерные солитоны в широкоапертурном лазере с насыщающимся поглощением в приближении среднего поля характеризуются комплексной огибающей $A(x,y)\exp(-i\omega t)$, причем вещественная частота ω служит собственным значением задачи (x и y – поперечные координаты и t – время). В безрезонаторной схеме с теми же параметрами среды можно преобразовать двумерную структуру в трубчатую, положив в бегущей вдоль оси z с групповой скоростью системе координат огибающую равной $A(x,y)\exp(-iKz-i\omega t)$. Из сравнения с двумерной задачей следует, что $K = \omega$ при $W = 0$. Показано, что таким образом получается семейство трубчатых структур с параметром W , варьируемым в конечном интервале значений и в этом интервале с хорошей точностью выполняется соотношение $K = \omega + W^2$ оно следует из теории возмущений по W . Линейный анализ полученных решений показывает, что во всем интервале их существования сохраняется устойчивость относительно малых возмущений (в условиях устойчивости порождающего двумерного солитона).

Если среда заключена в резонатор конечной длины, то сплошной спектр решений (по спектральному параметру W) сменяется дискретным. Численное моделирование показывает, что общем случае наблюдается скручивание трубчатой структуры за счет ее изгибов.

Представленные выше структуры в неограниченной среде можно назвать светло-темными, поскольку поле локализовано в поперечных направлениях, но не локализовано в продольном. Аналогичные трубчатые структуры получены для собственно темных солитонов, на периферии которых интенсивность излучения стремится не к нулевому, а некоторому постоянному положительному значению. Последнее не совпадает, а несколько меньше интенсивности поперечно-однородного режима и зависит от топологического заряда солитона. При этом наблюдаются режимы с одной или двумя сцепленными винтовыми линиями дислокаций волнового фронта излучения, на которых электрическая напряженность поля обращается в 0 (аналог ДНК-структуры). Хотя «идеальные» темные солитоны характеризуются бесконечно большой энергией, они представляют практический интерес, поскольку существуют в значительно более широкой области параметров, чем светлые или светлотемные солитоны [4]. Обсуждаются также дополнительные особенности топологического характера, возникающие при учете поляризационной структуры лазерного излучения, что существенно обогащает набор топологических лазерных солитонов.

Анализ топологических солитонных структур поддержан грантом РФФ 18-12-00075. Обобщение свойств лазерных солитонов с различной геометрической размерностью поддержано грантом РФФИ 19-12-50174.

Список литературы

1. N. A. Veretenov, S. V. Fedorov, N. N. Rosanov "Topological Vortex and Knotted Dissipative Optical 3D Solitons Generated by 2D Vortex Solitons." *Phys. Rev. Lett.* 119, 263901 (2017).
2. S. V. Fedorov, N. A. Veretenov, N. N. Rosanov. "Irreversible Hysteresis of Internal Structure of Tangle Dissipative Optical Solitons." *Phys. Rev. Lett.* 122 (2), 023903 (2019).
3. Н.А. Веретеннов, Н.Н. Розанов, С.В. Федоров. «Лазерные солитоны: топологические и квантовые эффекты.» УФН (2021). DOI: 10.3367/UFNe.2020.11.038869
4. Ю.С. Кившарь, Г.П. Агравал. Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам. М.: Физматлит, 2005.

Оптическое детектирование магнитного резонанса в наночастицах карбида кремния гексагонального политипа

Лихачев К. В.^{1,2}, Бреев И.Д.², Нагалюк С.С.², Анкудинов А.В.², Анисимов А.Н.²

¹ИТМО

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kirill128.1998@gmail.com

В последнее десятилетие активно развивается новое направление физики твердого тела по управлению спиновым состоянием парамагнитных центров в полупроводниках при комнатной температуре. Были продемонстрированы возможности оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР) при комнатной температуре для нескольких семейств спиновых центров в SiC. Преимуществами таких систем помимо рабочего температурного диапазона являются высокие времена когерентности, яркая люминесценции и спиновое выстраивание при оптической накачке, которые позволяют регистрировать магнитных резонанс для счетного количества спиновых центров вплоть до одного [1].

Нанокристаллы SiC, обладающие спиновыми центрами, могут быть использованы в качестве сенсоров магнитного поля. Такие частицы, закрепленные на острие зонда атомно-силового микроскопа (АСМ), могут стать сверхчувствительными датчиками, позволяющими построить картину распределения магнитного поля с нанометрическим пространственным разрешением. Изменения локального магнитного поля детектируется путем оптического контроля парамагнитного резонансного перехода. Ранее в качестве подобных сенсоров были использованы наночастицы алмаза с азотно-вакансионными центрами [2].

В работе были исследованы наночастицы SiC гексагонального поли типа. Политип наночастиц SiC определялся с помощью метода комбинационного рассеяния света (КРС). В результате облучения электронами наночастиц были созданы спиновые центры, в частности вакансии кремния (VSi-центры) со спином $S = 3/2$. Получены карты пространственного распределения фотолюминесценции наночастиц нанесенных на прозрачную подложку. Получены спектры ОДМР вакансий кремния (VSi-центры) со спином $S = 3/2$ в одиночных наночастицах с использованием конфокальной оптической схемы. Проведена оценка применимости нанокристаллов SiC, содержащих VSi-центры, для использования в качестве квантовых сенсоров слабых температурных и магнитных полей, размещенных на зонде АСМ микроскопа.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №20-52-76010 ЭРА_т.

Список литературы

1. Солтамов В. А. и др. Точечные дефекты в карбиде кремния как перспективная основа для спектроскопии одиночных дефектов с контролируемыми квантовыми состояниями при комнатной температуре // Физика твердого тела. – 2015. – Т. 57. – №. 5. – С. 877-885.
2. Degen C. L. Scanning magnetic field microscope with a diamond single-spin sensor // Applied Physics Letters. – 2008. – Т. 92. – №. 24. – С. 243111.

Разработка методики количественного сравнения светимости самосветящихся кристаллов - основных элементов источника малого тока

Мягих М. К., Дементьев П.А., Заморянская М.В.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: maxim.mjagkih@gmail.com

Многие современные электронные устройства (чаще всего - микропроцессоры и модули памяти) требуют не только основного источника энергии в виде питания от сети или ёмких аккумуляторных батарей, но и постоянного питания от источников слабого тока (таких как малые химические источники питания). Основной проблемой использования химических источников энергии является их относительная недолговечность (не более 10-15 лет), что приводит к необходимости их регулярной замены на протяжении всего времени функционирования электронного устройства. При использовании электронных устройств в условиях ограниченной доступности (космос, Арктика и т.п.) желательно использование батареек со сроком службы до 50 лет.

Перспективным вариантом решения данной проблемы является разработка источника энергии на основе «самосветящегося» кристалла и фотоэлектрического преобразователя.

Самосветящийся кристалл – это эффективный сцинтиллятор, активированный альфа-радиоактивным изотопом, например Am^{241} или Pu^{238} . Самосвечение кристалла обусловлено распадом радиоактивного изотопа. В связи с тем, что время полураспада для данных изотопов составляет 480 и 87 лет соответственно, это устройство способно вырабатывать электрическую энергию в течение длительного времени, которое может составлять 50 – 100 лет. Предлагаемая технология также учитывает требования безопасности, предъявляемые к устройствам, содержащим радиоактивные вещества, так как активный изотоп распределен по объему рабочего кристалла и не встречается в устройстве в высоких концентрациях.

Целью работы является разработка методики измерения и сравнения светимости слабосветящихся образцов на количественном уровне, а также сборка испытательного стенда для проведения измерений и сравнения светимости различных выращенных самосветящихся кристаллов.

Методика сравнения светимости различных образцов основана на учете спектров их излучений. Также в ней учтены приборные функции устройств, использованных для проведения измерений спектров и фототока, вызываемого данными образцами.

С целью проведения измерений светимости слабосветящихся образцов была разработана и изготовлена специальная установка. Она представляет собой светонепроницаемый бокс, внутри которого на оптическом рельсе установлен держатель образца и детектор оптического излучения на основе кремниевого фотодиода. Между образцом «самосветящегося» кристалла и детектором установлена отклоняющаяся заслонка для измерения темнового сигнала.

Планируется дальнейшее использование собранной установки и разработанной методики для измерения светимости других самосветящихся кристаллов, а также свечения кристаллов-сцинтилляторов, вызванного внешним радиоактивным излучением.

Список литературы

1. Zabrodskii V V, Aruev P N, Ber B Y, Kazantsev D Y, Gorokhov A N, Nikolaev A V, Filimonov V V, Shvarts M Z and Sherstnev E V 2019 *J. Tech. Phys. Letters* 45 1226
2. Martin G, Muray K, Réti I, Diós J and Schanda J 1990 *J. Measurement* 8 84

Спектральный анализ биоматериалов из ювенильного дентина

Шипко С. С.¹, Тимченко Е.В.¹, Тимченко П.Е.¹, Волова Л.Т.², Фролов О.О.¹, Власов М.Ю.²

¹Самарский университет

²Самарский государственный медицинский университет

e-mail: s.shipko567@gmail.com

В настоящее время применяется большое количество биоматериалов для остеогенеза в хирургической стоматологии. Однако, анализ современной литературы показывает, что все они имеют определенные недостатки и не существует однозначного мнения по поводу их эффективности. Качество биоматериалов определяется полной регенерацией костной ткани и обеспечивается созданием оптимальных условий для регенераторных процессов, таких как отсутствие реакции иммунологического отторжения, способность к биодеградации [1]. В качестве доступной альтернативы брeфоматрикса́м могут быть использованы биоматериалы на основе ювенильного дентина, который предположительно должен быть менее отторгаемым клетками реципиента по сравнению с брeфоматрикса́ми.

Исследование и оценка биоматериалов, полученных из ювенильного дентина, является актуальной задачей, т.к. качество производимого биоматериала напрямую влияет на его приживляемость.

Объектами исследований являлся дентин, полученный из здоровых ювенильных зубов (моляров, клыков и резцов) предварительно механически обработанных. Каждый образец был разрезан на 2 равные части и далее поделен на две группы, в соответствии с этапами их обработки: 1 группа – минерализованные биоматериалы из ювенильного дентина; 2 группа – деминерализованные биоматериалы из ювенильного дентина. Деминерализация осуществлялась в растворе соляной кислоты 1,2 степени нормальности.

В качестве основного метода оценки биоматериалов на основе ювенильного дентина был использован метод спектроскопии комбинационного рассеяния, реализуемый с помощью экспериментального стенда, включающий в себя рамановский пробник RPB-785 (фокусное расстояние 7,5 мм), совмещенный с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.0RB-04 (мощность до 500 мВт, длина волны $784,7 \pm 0,05$ нм) и высокоразрешающий цифровой спектрометр Shamrock sr-303i, обеспечивающий спектральное разрешение 0,15 нм, со встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE (спектральный диапазон 200-1200 нм) [2]. Анализ спектров осуществлялся в программной среде MagicPlotPro, а также с помощью метода дискриминантного анализа (LDA) в программе IBMSPSS Statistics.

В результате проведенных исследований были установлены основные спектральные отличия деминерализованных биоматериалов из ювенильного дентина по сравнению с минерализованными. Показано, что в процессе деминерализации разрушаются минеральные компоненты, о чем свидетельствует значительное уменьшение интенсивности линий 956 см^{-1} (PO_4^{3-} гидроксиапатита) и 1070 см^{-1} ($\nu_1 \text{CO}_3^{2-}$), а также сохраняются органические компоненты о чем свидетельствует наличие линий 854 см^{-1} (Hydroxyproline $\nu(\text{C}-\text{C})$ stretch), 1242 см^{-1} (Амид III), 1665 см^{-1} (Amide I).

Список литературы

1. Бажутова И.В., Сравнительный анализ применения остеопластических материалов при хирургическом лечении больных пародонтитом, Автореферат диссертации на соискании ученой степени кандидата медицинских наук, Москва, 126, 2006
2. Timchenko E.V., Timchenko P.E., Pisareva E.V. etc., Optical analysis of bone tissue by Raman spectroscopy in experimental osteoporosis and its correction using allogeneic hydroxyapatite, Journal of Optical Technology 2020, Vol. 87. Issue 3, 161-167, 2020

Исследования липидного состава минерального компонента компактной костной ткани с помощью оптического метода

Самигуллин Р. Т.¹, П.Е. Тимченко¹, Е. В. Тимченко¹, Е.В. Писарева¹, М. Ю. Власов², О. О. Фролов¹, Л. Т. Волова², Д.А. Романова¹, С.С. Сергеева¹, А.Ю. Ларина¹

¹Самарский университет

²Самарский государственный медицинский университет

e-mail: samigullin.ravil2015@yandex.ru

Обеспечение полной регенерации костной ткани в области дефектных участков кости, несмотря на накопленные знания в этом вопросе и широкому спектру применяемых биоматериалов, – одна из острейших проблем регенеративной медицины [1]. С

увеличением востребованности в поиске биологически совместимых материалов, удовлетворяющих критериям стандартов, предъявляемых к активным имплантируемым медицинским изделиям, появилась необходимость в оценке качественного и количественного состава минерального компонента кости (МКК), изготовленного по технологии «Лиопласт»® (ТУ-9398-001-01963143-2004). Известно, что липиды участвуют в механизме минерализации костной ткани, их снижение указывает на активную минерализацию, так как они связывают белки и минералы.[2], а скорость репаративного остеогенеза в области костного дефекта напрямую зависит от свойств и качества МКК [3]. Из этого следует, что успешный результат профилактики и лечения заболеваний, связанных с потерей костной массы, зависит от аллогенных свойств вещества, липидного состава и качества производства МКК. В процессе получения МКК необходим постоянный мониторинг контроля качества материала с оценкой его органической и липидной составляющей.

Объектами исследования являлись группы образцов МКК, изготовленных по технологии «Лиопласт»® из компактной костной ткани коровы. Образцы разделены на 2 большие группы: полученные из фильтрованных и нефилтрированных растворов после деминерализации костной ткани животных. В качестве основного метода анализа МКК был использован метод спектроскопии комбинационного рассеяния, реализуемый с помощью экспериментального стенда, включающий в себя рамановский пробник RPB-785 (фокусное расстояние 7,5 мм), совмещенный с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.0RB-04 (мощность до 500 мВт, длина волны $784,7 \pm 0,05$ нм) и высокоразрешающий цифровой спектрометр Shamrock sr-303i, обеспечивающий спектральное разрешение 0,15 нм, со встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE (спектральный диапазон 200-1200 нм). [4]. Спектры снимали в трех различных точках и усреднялись с помощью пакета программного обеспечения «Wolfram mathematica».

В результате проведенных исследований установлены основные спектральные отличия образцов МКК, изготовленных по технологии «Лиопласт»® в процессе их очистки и фильтрации. Проведен хемометрический анализ спектров комбинационного рассеяния образцов МКК, полученных при различных условиях деминерализации костной ткани, фильтрации растворов и времени очистки. Установлено, что основные различия проявляются в линиях комбинационного рассеяния 1449 см^{-1} (Lipids and proteins) и 1745 см^{-1} (Phospholipids (C=O)). Данные линии связаны с особенностями липидного состава МКК. В образцах МКК, полученных из фильтрованных растворов, значительно уменьшалась интенсивность этих линий, в сравнении с образцами из нефилтрированных растворов. Была выявлена прямая зависимость между временем деминерализации и интенсивностью линий липидов.

Список литературы

1. Pereira H.F., Cengiz I.F., Silva F.S., Reis R.L., Oliveira J.M. Scaffolds and coatings for bone regeneration // J. Mater. Sci. Mater. Med., 2020, V.31(3):27. doi: 10.1007/s10856-020-06364-y.
2. Weiner S., Troub W., Wagner H.D. Lamellar bone: structure-function relations // J.Struct.Biol., 1999, № 126, P. 241-255
3. Федорова М.З., Надеждин С.В., Павлов Н.А., Зубарева Е.В. Исследование остеоиндуктивных и osteoconductive свойств костнопластических материалов на основе гидроксиапатита и коллагена // Нанотехнологии и охрана здоровья. - 2010, №1. – С.42-46.
4. P. E. Timchenko, E. V. Timchenko, E. V. Pisareva, M. Yu. Vlasov, L. T. Volova, O. O. Frolov, and A. R. Kalimullina, Experimental studies of hydroxyapatite by Raman spectroscopy // J. Opt. Technol. 2018, 85, 130-135

Спектроскопия комбинационного рассеяния для оценки структурных изменений твердых тканей зубов после офисного отбеливания

Козлова Т. В.¹, Тимченко Е.В.¹, Тимченко П.Е.¹, Фролов О.О.¹, Магсумова О.А.², Волова Л.Т.²,
Постников М.А.², Полканова В.А.², Оруджов Н.М.²

¹Самарский университет

²Самарский государственный медицинский университет

e-mail: tvknnt@yandex.ru

Лечение измененных в цвете зубов является актуальной проблемой современной эстетической стоматологии. Одним из неинвазивных способов её решения является процедура отбеливания зубов. Однако, наряду с положительными эффектами, данная процедура сопровождается изменением минерального состава ротовой жидкости, структурной организации эмали зубов, динамики микроциркуляции пульпы и возникновением повышенной чувствительности зубов. [1,2] В связи с этим разрабатываются новые методики оценки состояния твердых тканей зубов после отбеливания.

В качестве объектов исследований были использованы удаленные по ортодонтическим показаниям зубы человека. Все образцы были разделены на 2 группы (исследовались твердые ткани зубов): 1 группа – эмаль и дентин зубов до отбеливания, 2 группа – эмаль и дентин зубов после отбеливания. Отбеливание зубов проводилось химическим методом с использованием системы Opalescence Xtra BOOST с содержанием перекиси водорода 40%.

Одним из методов оценки влияния отбеливания на структуру эмали зубов может быть использован метод спектроскопии комбинационного рассеяния, который реализован с помощью экспериментального стенда, подробно описанного в работе [3]. Деконволюция спектров методом подбора спектрального контура и хеометрический анализ позволяют провести расширенный компонентный качественный анализ спектров комбинационного рассеяния тканей зубов после отбеливания. Метод моделирования спектрального контура для повышения информативности спектров был реализован в программной среде MagicPlotPro 2.7.2, где было произведено разложение спектра на линии, описываемые функцией Гаусса. Полученные в ходе исследования результаты были проанализированы в программной среде SPSS Statistics 19, а также проведен хеометрический анализ результатов с помощью метода Уилкса (Wilks).

В результате проведенных исследований установлены изменения спектров эмали и дентина на волновых числах 1426 см^{-1} (Lipids and proteins) и 956 см^{-1} (v1 P–O symmetric stretch (PO_4^{3-})).

Показано, что процесс отбеливания вызывает структурные изменения в эмали и дентине зубов, связанные с уменьшением органических компонентов зубов по отношению к минеральным компонентам.

Список литературы

1. Ю.Л. Орехова, М.О. Новак, А. А. Петров, Е.А. Ивахненко Изучение влияния клинического отбеливания на твердые ткани и пульпу зубов //Стоматолог. Минск. – 2020. – №. 1. – С. 52-59.
2. О.А. Магсумова, Е.А. Рыскина, М. А. Постников, Т.М. Ткач, В.А. Полканова Изменение чувствительности твердых тканей зубов после проведения

процедуры офисного отбеливания зубов // Институт стоматологии - 2020 - №3(88) - С.62-63

3. Timchenko E., Timchenko P., Volova L. etc. Raman Spectroscopy of Changes in the Tissues of Teeth with Periodontitis // DIAGNOSTICS 2020. — Vol. 10. Issue 11. № 11.

Разработка методов оптического просветления пигментированной кожи человека *in vivo*

Серебрякова И. А.¹, Сурков Ю.И.^{1,2}, Лазарева Е. Н.^{1,2}, Юссуф А. А.¹, Башкатов А.Н.^{1,2},
Генина Э.А.^{1,2}, Тучин В. В.^{1,2,3}

¹СГУ им. Н. Г. Чернышевского

²Томский государственный университет

³Институт проблем точной механики и управления РАН

e-mail: s.izabell2014@gmail.com

Многочисленные работы, посвященные анализу взаимодействия оптического излучения с биологическими тканями, физических и физиологических механизмов оптического просветления, направленные на развитие оптических медицинских технологий визуализации, диагностики различных заболеваний и дозиметрии лазерного излучения остаются актуальными в настоящее время. [1–4]

Количественная оценка оптических параметров кожи дает возможность получать объективную информацию о содержании и пространственном распределении в ней хромофоров и успешно использовать ее для диагностики различных кожных заболеваний, в том числе меланомы, оценки эффективности лечения и др.

Процесс взаимодействия оптического излучения с биотканями обусловлен поглощением хромофорами и рассеянием на структурных компонентах ткани. Простым и удобным способом повышения глубины и качества визуализации неоднородностей в биотканях, точности локализации хромофоров и количественной оценки их содержания с помощью оптических методов является оптическое просветление биоткани. [5,6]

Основными задачами данного исследования являются: оценка содержания меланина в коже, определение глубины проникновения оптического излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов в кожу с различной степенью пигментации, разработка метода оптического просветления сильнопигментированной кожи человека.

Для разработки метода оценки содержания меланина и определения глубины проникновения оптического излучения в кожу использовались двухслойные оптические фантомы, содержащие желатин, гемоглобин и различные концентрации меланина.

Оптические параметры фантомов измерялись с помощью спектрофотометра с интегрирующей сферой UV-3600 (Shimadzu, Япония) и многоканальных спектрометров USB4000 и NIR Quest (Ocean Optics, США) в спектральном диапазоне 300-2500 нм. Коэффициенты поглощения, рассеяния, транспортный коэффициент рассеяния, а также коэффициент анизотропии рассеяния опухолевых тканей рассчитывались с помощью инверсного метода добавления-удвоения [7].

Исследования оптического просветления кожи человека *in vivo* проводились на коже тыльной стороны кисти руки шести добровольцев в возрасте 20 - 26 лет, трое из которых имели II фототип (слабая пигментация) и трое – VI фототип (сильная пигментация) кожи согласно шкале Фитцпатрика [8].

В качестве оптических просветляющих агентов (ОПА) использовались 70% водный раствор глицерина с 5% раствором ДМСО и олеиновая кислота. Обработка участка кожи в эксперименте осуществлялась одним из пяти способов: 1 – нанесение ОПА на интактную кожу; 2 – микродермабразия в течение 1 минуты, а затем нанесение ОПА; 3 – сонофорез с ОПА (пятикратное воздействие в течение 1 минуты с перерывом на 4 минуты общей длительностью 25 мин); 4 – комплексное действие микродермабразии, ОПА и сонофореза. Каждый способ обработки исследовался на двух участках кожи каждого из добровольцев. Мониторинг состояния кожи проводился с помощью оптического когерентного томографа (ОКТ) SpectralRadar OCT System OCP930SR 022 (Thorlabs Inc., США) с центральной длиной волны источника излучения $930 \text{ нм} \pm 5 \text{ нм}$. ОКТ сигнал регистрировался от интактной кожи и затем каждые 5 минут в течение 30 минут в процессе воздействия ОПА.

В результате исследования проведена оценка содержания меланина в коже и определена глубина проникновения оптического излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов в кожу с различной степенью пигментации, а также получены значения скорости и эффективности оптического просветления слабо и сильно пигментированной кожи человека *in vivo*. Наибольший эффект достигнут при использовании мультимодального метода повышения проницаемости эпидермиса «MOUSE» (Microdermabrasion, Oleic acid, UltraSound Effect).

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-52-56005.

Список литературы

1. Genina EA, Surkov YI, Serebryakova IA, Bashkatov AN, Tuchin VV, Zharov VP. Rapid Ultrasound Optical Clearing of Human Light and Dark Skin [2020 Apr 20]. IEEE Trans Med Imaging. 39 (10), 3198 -3206 (2020);
2. D.K. Tuchina, I.G. Meerovich, O.A. Sindeeva, V. V. Zherdeva, A. P. Savitsky, A. A. Bogdanov Jr, V. V. Tuchin, Magnetic resonance contrast agents in optical clearing: Prospects for multimodal tissue imaging. J. Biophotonics 13(11), e201960249 (2020);
3. G. R. Musina, I. N. Dolganova, N. V. Chernomyrdin, A. A. Gavdush, V. E. Ulitko, O. P. Cherkasova, D. K. Tuchina, P. V. Nikitin, A. I. Alekseeva, N. V. Bal, G. A. Koman-din, V. N. Kurlov, V. V. Tuchin, K. I. Zaytsev, Optimal hyperosmotic agents for tissue immersion optical clearing in terahertz biophotonics, J. Biophotonics. 13(12), e202000297 (2020);
4. Q. Lin, E.N. Lazareva, V.I. Kochubey, Y. Duan, V.V. Tuchin, Kinetics of optical clearing of human skin studied in vivo using portable Raman spectroscopy, Laser Physics Letters 17 (10), 105601(2020).
5. Rakotomanga P., Soussen Ch., Khairallah G., Amouroux M., Zaytsev S., Genina E., Chen H., Delconte A., Daul Ch., Tuchin V., and Blondel W. Source separation approach for the analysis of spatially resolved multiply excited autofluorescence spectra during optical clearing of ex vivo skin // Biomedical Optics Express, Vol. 10, No. 7, P. 3410-3424, 2019
6. Sdobnov A.Yu., Lademann J., Darvin M.E., Tuchin V.V. Methods for optical skin clearing in molecular optical imaging in dermatology // Biochemistry (Moscow), Vol. 84(Suppl. 1), P. S144-S158, 2019
7. Bashkatov, A. N., Genina, E. A., Kochubey, V. I. and Tuchin, V. V., «Optical properties of human skin, subcutaneous and mucous tissues in the wavelength range from 400 to 2000 nm,» Journal of Physics, D, Applied Physics 38, 2543-2555 (2005).

8. <https://www.arpana.gov.au/sites/g/files/net3086/f/legacy/pubs/RadiationProtection/FitzpatrickSkinType.pdf>. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. Fitzpatrick skin phototype. Обращение к ресурсу 28.03.2020

Лауэ дифракция рентгеновских микропучков в многослойных структурах

Пунегов В. И.¹

¹Физико-математический институт ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

e-mail: vpunegov@dm.komisc.ru

Элементы многослойной рентгеновской оптики широко используется в установках синхротронного излучения для транспортировки рентгеновских пучков, фокусировки излучения, в EUV литографии и в астрономии. Такие многослойные структуры (МС) в основном относятся к отражателям скользящего рентгеновского излучения. Для фокусировки жестких рентгеновских лучей (РЛ) предложено создать многослойные Лауэ линзы (МЛЛ) [1]. Теоретические основы фокусировки МЛЛ представлены в [2]. Изготовление МЛЛ является достаточно сложной проблемой, поэтому первым шагом в этом направлении является изучение Лауэ дифракции в МС с постоянным периодом [3]. В данной работе рассмотрена теория Лауэ дифракции рентгеновских микропучков в МС с использованием формализма, разработанного в [4,5]. Впервые получены рекуррентные соотношения, описывающие Лауэ дифракцию в неоднородных по глубине МС. Изучено влияние секционированной глубины, дефектов и неоднородного распределения периода МС на маятниковый эффект и кривые качания РЛ. Поскольку наиболее информационным методом исследования структур является картографирование интенсивности рассеяния РЛ в обратном пространстве [6], разработан алгоритм применительно к МС. Выполнено численное моделирование Лауэ дифракции в МС W/Si и Mo/Si. Показано, что определение секционированных глубин на основе периода интерференционных осцилляций экспериментальных кривых качания [3] не всегда является правильным.

Список литературы

1. Maser J. et al. Multilayer Laue lenses as high-resolution x-ray optics. // Proc. SPIE 2004. V. 5539. P. 185.
2. Пунегов В.И. Влияние рассогласования толщин слоев на фокусировку рентгеновских лучей многослойными Лауэ линзами. // Письма в ЖЭТФ. 2020. том. 111. С. 448.
3. Kang, H. C. et al. High-efficiency diffractive x-ray optics from sectioned multilayers. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. P. 151109.
4. Punegov V.I. et al. Applications of dynamical theory of X-ray diffraction by perfect crystals to reciprocal space mapping. // J. Appl. Cryst. 2017. V. 50. P. 1256.
5. Punegov V. I., Karpov A.V. X-ray microbeam diffraction in a crystal. // Acta Cryst. A. 2021. V. 77. P. 117
6. Пунегов В.И. Высокора разрешающая рентгеновская дифракция в кристаллических структурах с квантовыми точками. // УФН. 2015. том. 185. С. 449.

Нестационарные голографические токи в кристалле β -Ga₂O₃ на длине волны света $\lambda=457$ nm

Брюшинин М. А.¹, Соколов И.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: mb@mail.ioffe.ru

Исследователи и разработчики элементной базы на основе широкозонных полупроводников рассматривают моноклинный кристалл β -Ga₂O₃ в качестве материала для создания устройств силовой электроники и детекторов коротковолнового оптического излучения [1,2]. Изучение оптоэлектронных характеристик данных детекторов сводится в основном к измерению отклика на амплитудно-модулированный свет. В данной работе исследуются свойства кристалла с точки зрения возможности создания адаптивных фотоприемников, использующих эффект нестационарных голографических токов для детектирования фазо- и частотно-модулированных оптических сигналов. Эффект нестационарных голографических токов заключается в возникновении переменного электрического тока в образце, освещаемом колеблющейся интерференционной картиной. Ток появляется вследствие периодических смещений решеток свободных носителей и поля пространственного заряда [3].

В работе осуществлено возбуждение нестационарных голографических токов, как для диффузионного, так и для дрейфового режима записи на длине волны $\lambda=457$ nm. По фазе детектируемого сигнала установлен электронный тип проводимости материала. Изучение зависимостей амплитуды сигнала от частоты фазовой модуляции и от пространственной частоты интерференционной картины позволило определить величины фотопроводимости и диффузионной длины электронов для двух ориентаций кристалла: $\sigma_0=2.3 \times 10^{-9} \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ и $L_D=200$ nm для направления [100]; $\sigma_0=1.6 \times 10^{-9} \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ и $L_D=230$ nm для направления [010]. В данном кристалле нами обнаружена поляризационная зависимость амплитуды нестационарного голографического тока, которая, по всей видимости, обусловлена соответствующей зависимостью квантового выхода фотопроводимости.

В экспериментах с внешним постоянным электрическим полем обнаружено резонансное увеличение амплитуды сигнала. Данный эффект объясняется возбуждением волн пространственной перезарядки ловушек, имеющих необычное дисперсионное соотношение $\omega_r \propto K^{-1}$.

Кристалл продемонстрировал относительно невысокую спектральную чувствительность на данной длине волны: $R^\omega = 3.8 \times 10^{-7} \text{ A/W}$. Тем не менее, заметный уровень нестационарного голографического тока в сочетании с равномерной амплитудно-частотной характеристикой позволяют говорить о перспективности данного материала при создании адаптивных фотоприемников оптических фазо- и частотно-модулированных сигналов, работающих в коротковолновой части спектра.

Список литературы

1. S.I. Stepanov, V.I. Nikolaev, V.E. Bougrov, and A.E. Romanov, *Rev. Adv. Mater. Sci.* **44**, 63-86 (2016).
2. S.J. Pearton, J. Yang, P.H. Cary IV, F. Ren, J. Kim, M.J. Tadjer, and M.A. Mastro, *Appl. Phys. Rev.* **5**(1), 011301 (2018).
3. I.A. Sokolov and M.A. Bryushinin, *Optically induced space-charge gratings in wide-bandgap semiconductors: techniques and applications* (Nova Science Publishers, Inc., 2017).

Исследование центров окраски в радиационно-модифицированных алмазах

Козлова М. В.¹, Хомич А. А.², Хмельницкий Р. А.³, Аверин А. А.⁴, Ковалев А. И.⁵, Хомич А. В.², Ральченко В. Г.⁶

¹МГУ им. М. В. Ломоносова

²ИРЭ РАН

³ФИАН

⁴ИФХЭ

⁵БГУ

⁶ИОФ РАН

e-mail: marija-kozlova@yandex.ru

Алмазные материалы с фотоактивными центрами окраски имеют при комнатной температуре яркую и стабильную фотолюминесценцию (ФЛ) с высокой квантовой эффективностью, короткими излучательными временами жизни и узкими линиями. Центры окраски в алмазе [1] являются одной из наиболее перспективных платформ для создания однофотонных источников и спиновых кубитов, являющихся ключевыми элементами в функционирующих при комнатной температуре системах квантовой обработки и передачи информации, квантовой метрологии и детектирования, а отсутствие цитотоксичности делают алмаз с центрами окраски привлекательным объектом для применения в качестве биомаркеров. Наряду с легированием из газовой фазы [2] или из шихты [3], ионная имплантация либо облучение и последующий отжиг – одна из стандартных процедур для формирования центров окраски в алмазе [4].

Одним из наиболее перспективных центров окраски в алмазе для практического применения считается кремниево-вакансионный комплекс (SiV-центр) [1], который сохраняет узкую бесфонную линию (БФЛ) в спектрах люминесценции даже при 500 К и одновременно обладает низким фактором Хуана-Риса, характеризующим вклад БФЛ в спектр излучения центра окраски. В работе впервые исследовано поведение спектров ФЛ SiV-центра с БФЛ на 738 нм в широком диапазоне радиационного повреждения. Измерения спектров ФЛ проводились с нуклеативной стороны на осажденных из газовой фазы на кремниевых подложках алмазах, облученных быстрыми реакторными нейтронами с флюенсом от 10^{18} до 2×10^{20} см⁻² и отожженных в вакууме при температурах от 200 до 1700 °С. Показано, что облучение быстрыми нейтронами приводит к генерации высокой концентрации собственных дефектов, увеличению параметра кристаллической решетки и возникновению механических напряжений в алмазе. В зависимости от флюенса нейтронов и температуры последующего отжига исследована кинетика восстановления формы и интенсивности БФЛ центра 738 нм, а также процессы формирования центра N19 с БФЛ на 580 нм [5].

В работе также исследованы гелий-содержащие центры окраски в алмазе, проявляющиеся в спектрах ФЛ интенсивными узкими (ширина на полувысоте ~2 нм) БФЛ на 536 и 560 нм (HR1 и HR2 – от Helium Related). Измерения проводились на пластинах природных алмазов, в которые было выполнено десять циклов имплантации ионов гелия [6] с набором энергий и доз, обеспечивающих однородное радиационное повреждение в слое толщиной 670 нм с суммарной дозой [He] 5×10^{16} см⁻². Обнаружено, что в спектрах ФЛ природного алмаза типа 2a (беспримесного) после отжигов в диапазоне 600-900 °С помимо полос HR1 и HR2 присутствуют ещё, по меньшей мере, две серии слабоинтенсивных узких полос ФЛ, ранее не регистрировавшихся в спектрах люминесценции алмазов. Установлено, что полосы HR1 и HR2 имеют составную природу и представляют собой каждая

суперпозицию по меньшей мере трех полос лоренцевой формы. По данным температурной зависимости спектров ФЛ определена энергия активации температурного гашения полос HR1 и HR2, которая составила 150 мэВ. Выполнен анализ спектральной формы фоновых крыльев у полос HR1 и HR2 и предложены вероятные структуры гелийсодержащих центров в алмазе. Обсуждаются перспективы использования центра окраски с БФЛ на 536 и 560 нм для задач квантовой оптики, биомаркеров и локальной термометрии.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 20-72-00122, РФФИ № 19-52-04008 и БелРФФИ № F19RM-054.

Список литературы

1. Bradac C., Gao W., Forneris J., Trusheim M. E., Aharonovich I., Quantum nanophotonics with group IV defects in diamond, *Nature Communications*, vol. 10, 5625, 2019;
2. Bolshakov A. P., Ralchenko V. G., Sedov V. S., Khomich A. A., et al., Photoluminescence of SiV centers in single crystal CVD diamond in situ doped with Si from silane, *Physica Status Solidi (a)*, vol. 8, no. 1, 2525-2532, 2015;
3. Ekimov E. A., Kondrin M. V., Krivobok V. S., Khomich A. A., et al., Effect of Si, Ge and Sn dopant elements on structure and photoluminescence of nano- and microdiamonds synthesized from organic compounds, *Diamond and Related Materials*, vol. 93, 75-83, 2019;
4. Zaitsev A. M., Moe K. S., Wang W., Defect transformations in nitrogen-doped CVD diamond during irradiation and annealing, *Diamond and Related Materials*, vol. 88, 237, 2018;
5. Khomich A. A., Khmelnitskii R. A., Poklonskaya O. N., Averin A. A., et al., Photoluminescence spectra of the 580-nm center in irradiated diamonds, *Journal of Applied Spectroscopy*, vol. 86, no. 4, 597-605, 2019;
6. Khmelnitsky R. A., Dravin V. A., Tal A. A., Khomich A. A., et al., Mechanical stresses and amorphization of ion-implanted diamond, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, vol. 304, 5-10, 2013;

Исследование структурных превращений в облученных быстрыми нейтронами алмазах методами спектроскопии электронного спинового резонанса и комбинационного рассеяния света

Поклонская О. Н.¹, Лапчук Н. М.¹, Хомич А. А.², Вyrко С. А.¹, Олешкевич А. Н.¹, Хомич А. В.², Поклонский Н. А.¹

¹БГУ, Минск

²ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

e-mail: poklonski@tut.by

Алмаз является перспективным рабочим веществом детекторов потоков ионов и элементарных частиц, а также электромагнитных ионизирующих излучений. Применение алмаза в полупроводниковой спинтронике и биомедицине только начинается.

В лабораторных условиях алмаз является метастабильной фазой углерода и при радиационном повреждении (РП) выше порога графитизации может трансформироваться в

более стабильную графитоподобную фазу, при этом атомы углерода изменяют гибридизацию волновых функций с sp^3 на sp^2 (и даже частью на sp^1). РП с дозами (флюенсами), превышающими критические, и последующий высокотемпературный отжиг – оптимальный метод формирования алмаз-графитовых гетероструктур, включающих изолирующие, полупроводниковые и полуметаллические слои для создания элементов сенсорики и микроэлектромеханических систем [1]. Интересны также свойства углеродных материалов со смешанной sp^2/sp^3 -гибридизацией, в том числе аморфизованные; такие материалы могут обладать магнитными свойствами [2]. Облучение быстрыми нейтронами и последующий восстанавливающий отжиг (в течение 1 ч при фиксированной температуре) позволяют в широких пределах управлять соотношением sp^2/sp^3 в алмазе. При этом интерес представляют как процессы графитизации при РП выше критического уровня, так и восстановление аморфизованной алмазной кристаллической структуры при докритическом уровне ее разупорядочения.

В работе использованы эффективные методики исследования структурных дефектов в различных углеродных материалах: спектроскопия электронного спинового резонанса (ЭСР) и комбинационного рассеяния света (КРС). Представлены результаты исследований зависимости формы линии ЭСР и спектров КРС природных и осажденных из газовой фазы (CVD – chemical vapor deposition) алмазов, облученных быстрыми нейтронами с флюенсами от 10^{19} до 10^{21} см $^{-2}$ и последовательно отожженных при температурах вплоть до 1650 °С. Показано, что при такой высокой степени РП происходит практически полная аморфизация кристаллической решетки алмаза с длиной когерентности фононов, не превышающей единиц нанометров [3], что в соответствии с эффектом конфайнмента фононов приводит к появлению в спектрах КРС особенностей, соответствующих частотам фононов в особых точках зоны Бриллюэна и к уширению полос в спектрах ЭСР. Детально исследованы трансформации структуры РП алмаза в результате последовательных термических отжигов. Установлена корреляция между спектрами КРС и синхронными изменениями значений основных параметров спектров ЭСР – шириной линии, величиной g -фактора и параметром асимметрии формы сигнала. В образцах алмаза, облученных быстрыми нейтронами с флюенсами, превышающими критический уровень РП, и отожженными при температурах 1000 °С и выше, наблюдались линии ЭСР формы Дайсона, что свидетельствует о возникновении в образцах микроволновой электрической проводимости. По данным спектроскопии КРС определены характерные размеры графитовых кластеров, формирующихся в РП алмазе в результате высокотемпературных отжигов.

В спектрах ЭСР CVD алмазов, облученных быстрыми нейтронами с докритическим уровнем РП, обнаружено и исследовано проявление парамагнитного гистерезиса, наблюдавшегося при сканировании магнитного поля в прямом и обратном направлениях. Ранее подобный эффект квазиферромагнетизма (такой термин употребляется для описания магнитного гистерезиса в полупроводниковых материалах, не содержащих магнитных примесей [4]) наблюдался нами в природных алмазах, имплантированных ионами водорода или дейтерия [5-6]. Наличие квазиферромагнетизма в РП алмазе свидетельствует об упорядочении скоплений нескомпенсированных электронных спинов. В облученных нейтронами CVD алмазах данный эффект объяснен формированием локальных скоплений водородсодержащих парамагнитных центров в объеме алмазных кристаллитов за счет выбивания нейтронами атомов водорода [7], находящихся в необлученных поликристаллических CVD алмазах на межкристаллитных границах.

Работа выполнена при поддержке грантов БРФФИ № Ф21РМ-137, РФФИ № 19-52-04008 и РНФ № 20-72-00122.

Список литературы

1. Borisov A.M., Kazakov V.A., Mashkova E.S., Ovchinnikov M.A., Grigoriev S.N., Suminov I.V., The potential of high-fluence ion irradiation for processing and recovery of diamond tools, *Coatings*, vol. 10, 1243, 2020.
2. Sakai Y., Chelikowsky J.R., Cohen M.L., Magnetism in amorphous carbon, *Phys. Rev. Materials*, vol. 2, 074403, 2018.
3. Khomich A.A., Khmel'nitsky R.A., Khomich A.V., Probing the nanostructure of neutron-irradiated diamond using Raman spectroscopy, *Nanomaterials*, vol. 10, 1166, 2020.
4. Dubroca T., Hack J., Hummel R.E., Angerhofer A., Quasiferromagnetism in semiconductors, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, 182504, 2006.
5. Khomich A.V., Poklonskii N.A., Lapchuk N.M., Khmel'nitskii R.A., Dravin V.A., Munkhtsetseg S., Optical and paramagnetic properties of natural diamonds implanted with hydrogen ions, *J. Appl. Spectr.*, vol. 74, 537-543, 2007.
6. Khomich A.V., Khmel'nitsky R.A., Poklonski N.A., Lapchuk N.M., Khomich A.A., Dravin V.A., Poklonskaya O.N., Ashkinazi E.E., Vlasov I.I., Zavedeev E.V., Ralchenko V.G., Optical and paramagnetic properties of polycrystalline CVD-diamonds implanted with deuterium ions, *J. Appl. Spectr.*, vol. 79, 600-609, 2012.
7. Khomich A.A., Dzeraviaha A.N., Poklonskaya O.N., Khomich A.V., Khmel'nitsky R.A., Poklonski N.A., Ralchenko V.G., Effect of neutron irradiation on the hydrogen state in CVD diamond films, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1135, 012019, 2018.

Применение рентген – флуоресцентного анализа для идентификации красочных пигментов русских икон XVI – XIX веков.

Васильева А. В.¹, Парфенов В. А.¹, Соснова Н. С.¹

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: *anastasiastu@mail.ru*

Данная работа посвящена применению метода рентген – флуоресцентного анализа (РФА) в области сохранения и реставрации культурного наследия. Перед тем, как приступить к процессу реставрации памятника искусства, необходимо провести диагностические исследования, которые по сложившейся в России практике опираются в основном на многолетний опыт работы экспертов – реставраторов и искусствоведов, а приборные методы контроля стали использоваться только в последние годы. В то же время во всем мире неразрушающие оптико–электронные методы диагностики активно развиваются и широко используются в музейной работе[1], благодаря тому, что они являются неинвазивными и не требуют пробоподготовки. В настоящее время одним из основных методов исследования объектов культурного наследия является метод РФА. Он основан на детектировании излучения флуоресценции атомов неорганических веществ, которое возникает при взаимодействии рентгеновского излучения с веществом. В результате получают РФА – спектры, показывающие элементный состав различных веществ. Информация о химическом составе веществ, использовавшихся при создании предмета искусства, дает сведения о времени его происхождения, о модификациях, которые могли с ним происходить, и о подлинности объекта [2 - 4].

В данной работе метод РФА был использован для идентификации пигментов красок древнерусских икон из собрания государственных музеев Северо-Западного региона России. В результате проведенных экспериментов удалось идентифицировать основные красные и зеленые пигменты, использовавшиеся при написании русских икон XVI-XVII веков из Пскова и Новгорода. Полученные РФА – данные помогут систематизировать информацию о пигментах, характерных для различных временных периодов и школ иконописи, что позволит создать базу данных РФА – спектров, которая станет важным информационным ресурсом для специалистов – реставраторов в ходе работ по реставрации икон. Важным результатом работы является то, что в экспериментах были выявлены группы пигментов, идентификация которых с помощью РФА оказалась затруднительной, например, пигменты, имитирующие позолоту, или охры. Эти пигменты требуют дополнительных исследований и поиска альтернативных методов диагностики, позволяющих идентифицировать примеси в них, в том числе органические, что даст более полную информацию об их происхождении и свойствах.

Кроме того, при помощи комплексной методики, основанной на использовании метода РФА и компьютерного анализа цифровых оптических изображений, была исследована картина из частной коллекции, которая предположительно являлась произведением русского художника Боголюбова Алексея Петровича (1824 – 1896). В результате обнаружилось, что картина не принадлежит руке данного художника, а, следовательно, является подделкой.

Список литературы

1. Chen Zhao, Yiwen Zhang, Chong-Chen Wang, Miaole Hou & Aiqun Li Recent progress in instrumental techniques for architectural heritage materials//Heritage Science 7, Article number: 36 (2019)
2. N. Gao, K. Janssens In book: XRay Spectrometry: Recent Technological Advances. Eds. K. Tsuji, J. Injuk and R. Van Grieken. – Chichester: Wiley & Sons, pp. 89–110 (2004)
3. Thea C.Moran, Alan D.Kaye, Aravinda Rao, Franklin Rivera Bueno The roles of X rays and other types of electromagnetic radiation in evaluating paintings for forgery and restoration// Journal of Forensic Radiology and Imaging 5, pp. 38–46, (2016)
4. А. Г. Ревенко, В. А. Ревенко Применение рентгеноспектрального метода анализа для исследования материалов культурного наследия (Обзор)//Методы и объекты химического анализа, 2 (1), с. 4 – 29, (2007)

Переключаемые суперрезонансные состояния в метаповерхностях на основе материалов с фазовой памятью

Кутузова А. А.¹

¹Университет ИТМО

e-mail: ych16002@gmail.com

Исследование высокочастотных резонансных состояний позволяет найти решение задачи об эффективном удержании электромагнитных волн в среде, что имеет большой прикладной потенциал для создания сенсоров, лазеров, модуляторов и других нелинейных устройств. В настоящее время большое внимание уделяется изучению связанных состояний в континууме (ССК), являющихся идеальными резонансами, в которых

отсутствуют потери на излучение. Теоретически показано, что идеальных резонансов в конечных структурах не существует, однако в реальных системах ССК все-таки могут существовать в форме так называемых суперрезонансных состояний, имеющих высокую, хотя и конечную добротность [1]. Метаповерхности на основе высокоиндексных материалов могут поддерживать устойчивые ССК, обусловленные резонансами Ми, возникающие в отдельных структурных элементах [2]. Отметим, что для многих устройств фотоники требуются элементы, оптические свойства которых можно изменять обратимым образом в широких пределах [3]. Большой интерес для использования фотоники связан с композитными материалами на основе соединений Ge-Sb-Te (GST). При комнатной температуре GST могут находиться в двух фазах, - кристаллической и метастабильной аморфной, - с существенно отличающимися значениями диэлектрической проницаемости. Так наиболее изученное соединение $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в инфракрасном диапазоне длин волн демонстрирует модуляцию диэлектрической проницаемости от 15 (аморфная фаза) до 35 (кристаллическая). При этом современные технологии позволяют переключать фазу GST за сверхкороткие времена, в том числе при помощи фемтосекундных лазерных импульсов. Использование соединений семейства GST, которые так же называют материалами с фазовой памятью, открывает большие перспективы для применения в современных устройствах. Как известно, метаматериальные свойства появляются у структуры при достижении диэлектрической проницаемости структурного элемента некоторого критического значения [4]. Скачек диэлектрической проницаемости GST позволяет переводить структуру в режим метаповерхности, поддерживающей ССК, обусловленные резонансами Ми на отдельных структурных элементах, то есть включать и выключать суперрезонансное состояние.

Ранее мы изучали цепочку из кремниевых цилиндров с круглым сечением, которая поддерживает суперрезонансные моды [5]. В данной работе мы рассматриваем метаповерхность, состоящую из параллельных наноблоков с квадратным сечением размером $50 \times 50 \text{ нм}^2$ и периодом решетки $a=1 \text{ мкм}$. Такая структура, изготовленная из композитного материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, поддерживает ССК на длине волны порядка 2 мкм, на которой поглощение материала низкое. В отличие от цилиндрических структурных элементов, которые позволяют описать систему аналитически, метаповерхности из наноблоков с квадратным профилем представляют собой систему с технологически доступной конфигурацией для литографических методов изготовления. Мы исследуем переключение суперрезонансной моды при изменении фазы GST. Физику данной трансформации удобно описывать при плавном переходе значений диэлектрической проницаемости от $\epsilon=35$ (кристаллическая фаза) до $\epsilon=15$ (аморфная фаза), хотя в реальной системе изменение фазы GST происходит скачком. Было обнаружено, что изначально суперрезонансная мода соответствует узкому пику в спектре пропускания. По мере уменьшения диэлектрической проницаемости пик смещается в высокочастотную область, а его добротность уменьшается. При достижении диэлектрической проницаемости критического значения структура перестает работать как метаповерхность. В результате пик исчезает, что соответствует пересечению частоты пика низкочастотной границы первого порядка дифракции на периодической структуре. То есть данная мода может покидать структуру посредством брэгговской дифракции.

Таким образом, было показано, что использование материалов с фазовой памятью позволяет создавать структуры в которых наблюдаются переключаемые высокодобротные суперрезонансные состояния, поддерживаемые в режиме метаповерхности.

Список литературы

1. Han S. et al. All-Dielectric Active Terahertz Photonics Driven by Bound States in the Continuum // *Advanced Materials*. – 2019. – Т. 31. – №. 37. – С. 1901921.
2. Kodigala A. et al. Lasing action from photonic bound states in continuum // *Nature*. – 2017. – Т. 541. – №. 7636. – С. 196-199.
3. Makarov S. V. et al. Light-induced tuning and reconfiguration of nanophotonic structures // *Laser & Photonics Reviews*. – 2017. – Т. 11. – №. 5. – С. 1700108.
4. Li S. V., Kivshar Y. S., Rybin M. V. Toward silicon-based metamaterials // *ACS Photonics*. – 2018. – Т. 5. – №. 12. – С. 4751-4757.
5. Kutuzova A. A., Rybin M. V. Bound states in the continuum in dielectric waveguides of finite size // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1697. – №. 1. – С. 012159.

Влияние легирования Sc^{3+} на микроструктуру и прозрачность керамики $(\text{Y}, \text{Er})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$

Жмыхов В. Ю.¹, Добрецова Е.А.¹, Кузнецов С.В.¹, Хмельницкий Р.А.², Чикулина И.С.³, Никова М.С.³, Тарала В.А.³, Вакалов Д.С.³, Пырклов Ю.Н.¹, Серегин В.Ф.¹, Цветков В.Б.¹

¹ИОФ РАН

²ФИАН

³СКФУ

e-mail: Vadimzhmykhov56@gmail.com

Иттрий-алюминиевый гранат, легированный редкоземельными элементами, RE^{3+} : $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (RE^{3+} : ИАГ), хорошо известен как активная среда для высокоомощных лазеров. Изначально прозрачная керамика была разработана для замены монокристаллов, что возможно благодаря их высокой производительности и контролю формы, особенно для образцов с дисковой геометрией. Поры, границы зерен и примеси являются источниками рассеяния света. Они играют важную роль в оптических потерях и прозрачности керамики. Как правило, пористая керамика не отличается высокой прозрачностью. Мы синтезировали керамики $(\text{Y}_{0.5}\text{Er}_{0.5})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (Er^{3+} : ИАГ) и $(\text{Y}_{0.5}\text{Er}_{0.5})_3(\text{Al}_{0.8}\text{Sc}_{0.2})_5\text{O}_{12}$ (Er^{3+} : ИСАГ) и исследовали их микроструктуру и пропускание в зависимости от присутствия иона Sc^{3+} . Замена Al^{3+} легирующим ионом Sc^{3+} может увеличивать параметры решетки и, как следствие, межатомное расстояние между активаторами Er^{3+} . Это позволяет снизить концентрационное тушение люминесценции и улучшить оптические свойства керамики. Керамики $(\text{Y}_{0.5}\text{Er}_{0.5})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (Er^{3+} : ИАГ) и $(\text{Y}_{0.5}\text{Er}_{0.5})_3(\text{Al}_{0.8}\text{Sc}_{0.2})_5\text{O}_{12}$ (Er^{3+} : ИСАГ) были синтезированы по методике, опубликованной ранее [1]. Порошки-прекурсоры были синтезированы методом обратного осаждения хлоридов металлов ($\text{MeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, где Me - Al, Sc, Y, Er) в охлажденный 25% -ный водный раствор аммиака путем распыления. Порошки дезагрегированного оксигидрата прокаливали при 1200 °С в течение двух часов в высокотемпературной печи. Кроме того, часть из них прокалили при 1600 °С до полного фазового равновесия чтобы исключить примесные фазы. ТЭОС использовали в качестве спекающей добавки при измельчении порошка. Затем керамические порошки подвергались одноосному прессованию с последующим холодным изостатическим прессованием и спеканием в вакуумной печи при 1760-1780 °С в течение десяти часов. После вакуумного спекания все образцы были подвергнуты прокаливанию на воздухе и отполированы с двух сторон. Микроструктуру керамических поверхностей исследовали с помощью

сканирующей электронной микроскопии. Спектры пропускания керамики Er^{3+} : ИАГ и Er^{3+} : ИСАГ при комнатной температуре были измерены на спектрофотометре Shimadzu UW-3101PC. С помощью СЭМ были получены микрофотографии керамики Er^{3+} : ИАГ (S_1) и Er^{3+} : ИСАГ(S_2). Er^{3+} : ИАГ включает множество пор, которые могут быть центрами рассеяния. Поверхность керамики Er^{3+} : ИСАГ (S_2) имеет однородную текстуру, количество пор значительно уменьшается. Следовательно, керамический образец S_2 имеет более совершенную микроструктуру и более высокое оптическое пропускание. Необходимо провести специальное исследование, чтобы найти оптимальное содержание Sc^{3+} и минимизировать влияние обоих факторов одновременно.

Список литературы

1. F. Malyavin, V. Tarala, S. Kuznetsov, A. Kravtsov, I. Chikulina, M. Shama, E. Medyanik, V. Ziryakov, E. Evtushenko, D. Vakalov, "Influence of the ceramic powder morphology and forming conditions on the optical transmittance of YAG: Yb ceramics," *Ceram. Intern.* 45, 4418 (2019).

Инженерия дефектов в облученных быстрыми нейтронами синтетических алмазах

Ковалев А. И.¹, Хмельницкий Р. А.², Хомич А. А.³, Попович А. Ф.³, Хомич А. В.³, Ральченко В. Г.⁴

¹БГУ, Минск

²Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН

³ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

⁴ИОФ им А.М. Прохорова РАН

e-mail: KovalevAI@bsu.by

Дальнейшие перспективы алмаза в науке и технике определяются как совершенствованием технологии получения структурно-совершенного, т. е. сверхчистого, алмаза, так и развитием методов инженерии дефектов, позволяющих получать материалы с управляемыми свойствами. Из-за сверхплотной алмазной решетки традиционные методы, такие как легирование в процессе синтеза и диффузия примесей при высокотемпературных отжигах, в алмазе не всегда эффективны. Рекордная твердость и химическая стойкость алмаза также создают серьезные проблемы при его послеростовой обработке. В то же время ни один из элементов не дает такого разнообразия электронной структуры, кристаллографических форм и физико-химических свойств, как углерод, благодаря его способности образовывать sp^3 , sp^2 и sp -связи в различных структурных комбинациях. Ионная имплантация и облучение быстрыми нейтронами являются эффективными методами инженерии дефектов в алмазах. Наши исследования спектров комбинационного рассеяния света [1-5] показали, что при высоком уровне радиационного повреждения в структуре алмаза происходит формирование нескольких комплексов собственных дефектов, проявляющихся в спектрах комбинационного рассеяния ионно-имплантированных или облученных быстрыми нейтронами природных и CVD алмазов в виде интенсивных узких полос в диапазоне от 1350 до 1850 см^{-1} .

В настоящей работе исследованы спектры ИК поглощения и теплопроводность осажденных из газовой фазы (CVD) нелегированных (содержание примесного азота замещения не более единиц ppm) облученных быстрыми реакторными нейтронами алмазов

(флюенс нейтронов от 1×10^{18} до 2×10^{20} см⁻²). Измерения проводились на Фурье-спектрометрах PerkinElmer Spectrum 100 Optica и Bruker 70v в диапазоне от 400 до 22000 см⁻¹ при комнатной температуре. В зависимости от степени исходного радиационного повреждения и температуры последующего отжига (от 200 до 1600 °С) изучены интенсивности, спектральное положение и ширины на полувысоте более 30 характерных колебательных и электронно-колебательных полос, регистрирующихся в спектрах ИК поглощения. Теплопроводность измерялась флэш-методом, основанном на измерении времени распространения тепловой волны, созданной импульсом ИАГ:Nd лазера, от одной стороны алмазной CVD пластины до противоположной. Установлено, что для ряда полос существует пороговый уровень радиационного повреждения, необходимый для формирования соответствующих комплексов дефектов. Большинство полос ИК поглощения ранее в спектрах алмазов не регистрировались [6], что объясняется высоким уровнем радиационного повреждения исследовавшихся в данной работе алмазов. Для наиболее интенсивных полос в спектрах ИК поглощения определены температурные интервалы их формирования и отжига. Это, в сочетании с соответствующими зависимостями положения максимумов полос, а также данными теоретических расчетов колебательных спектров дефектов в алмазах [7-9] позволило сделать предварительные выводы о природе и структуре комплексов собственных радиационных дефектов, формирующихся в облученных быстрыми нейтронами алмазах при высоких допороговых уровнях радиационного повреждения. В работе также проанализированы закономерности трансформаций формы полосы одно- и двухфоновного поглощения, а также теплопроводности в зависимости от величины флюенса быстрых нейтронов и температуры последующего высокотемпературного отжига.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 20-72-00122, РФФИ № 19-52-04008 и БРФФИ № Ф21РМ-137.

Список литературы

1. Poklonskaya O.N., Khomich A.A., Raman scattering in a diamond crystal implanted by high-energy nickel ions, *J. Appl. Spectr.*, vol. 80, 715-720, 2013.
2. Poklonskaya O.N., Vyko S.A., Khomich A.A., Averin A.A., Khomich A.V., Khmelnskiy R.A., Poklonski N.A., Raman scattering in natural diamond crystals implanted with high-energy ions and irradiated with fast neutrons, *J. Appl. Spectr.*, vol. 81, 969-977, 2015.
3. Khomich A.V., Khmelnskiy R.A., Hu X.J., Khomich A.A., Popovich A.F., Vlasov I.I., Dravin V.A., Chen Y.G., Karkin A.E., Ralchenko V.G., Radiation damage effects on optical, electrical, and thermophysical properties of CVD diamond films, *J. Appl. Spectr.*, vol. 80, 707-714, 2013.
4. Khomich A.A., Averin A.A., Poklonskaya O.N., Bokova-Sirosh S.N., Dzeraviha A.N., Khmelnskiy R.A., Vlasov I.I., Shenderova O., Poklonski N.A., Khomich A.V., Features of the 1640 cm⁻¹ band in the Raman spectra of radiation-damaged and nano-sized diamonds, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1400, 044017, 2019.
5. Khomich A.A., Khmelnskiy R.A., Khomich A.V., Probing the nanostructure of neutron-irradiated diamond using Raman spectroscopy, *Nanomaterials*, vol. 10, 1166, 2020.
6. Dischler B., *Handbook of Spectral Lines in Diamond*. Vol. 1. Tables and Interpretations, Berlin: Springer, 2012, xi+467 p.
7. Goss J.P., Coomer B.J., Jones R., Shaw T.D., Briddon P.R., Rayson M., Öberg S., Self-interstitial aggregation in diamond, *Phys. Rev. B*, vol. 63, 195208, 2001.
8. Salustro S., Erba A., Zicovich-Wilson C.M., Noël Y., Maschio L., Dovesi R., Infrared and Raman spectroscopic features of the self-interstitial defect in diamond from exact-

- exchange hybrid DFT calculations, Phys. Chem. Chem. Phys., vol. 18, 21288-21295, 2016.
9. Sansone G., Salustro S., Noël Y., Maschio L., Mackrodt W.C., Dovesi R., Looking for sp^2 carbon atoms in diamond: a quantum mechanical study of interacting vacancies, Theor. Chem. Acc., vol. 137, 29, 2018.

Генерация оптического вихря с управляемым знаком топологического заряда в мультигеликоидальном оптическом волокне

Баршак Е. В.¹, Алексеев К.Н.¹, Викулин Д.В.¹, Лапин Б.П.¹, Яворский М.А.¹

¹КФУ имени В.И. Вернадского

e-mail: lena.barshak@gmail.com

Уникальные свойства оптических вихрей (ОВ) обуславливают значительный интерес к таким пучкам как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях. Представляя собой винтовые дислокации волнового фронта с неопределенностью фазы и специфическим распределением интенсивности, ОВ нашли применение в области манипулирования микрочастицами, в микроскопии и геномной инженерии, астрофизике и др. [1]. Особенное практическое значение имеет способность ОВ переносить орбитальный угловой момент (ОУМ) [2], что открывает новые возможности использования ОВ в информационных технологиях. В настоящее время пучки, обладающие ОУМ, справедливо считаются перспективными переносчиками информации, поскольку основанные на ОУМ технологии имеют весомые преимущества в сравнении с традиционными способами кодирования данных. Так, ОУМ-мультиплексирование позволяет существенно увеличить пропускную способность канала связи [3], и, кроме того, обеспечить принципиально новый уровень надежности защиты данных [4].

Для полноценной реализации потенциала ОВ в информационных технологиях требуется всестороннее исследование ряда вопросов, связанных с передачей данных, генерацией пучков с ОУМ, а также управлением ОУМ оптических полей. Предыдущие исследования продемонстрировали перспективы использования оптических волокон различных типов [3, 5-6] для решения подобных задач. Такой подход несет в себе все существенные преимущества чисто волоконных методов, позволяя на практике снизить влияние шумовых эффектов и потери мощности излучения при сопряжении чисто волоконных элементов друг с другом, а также обеспечить высокую энергетическую эффективность и стабильность преобразования оптического пучка в волокне. В данной работе устанавливается возможность оптоволоконной генерации ОВ с целым ОУМ на фотон и управления топологическим зарядом (и ОУМ) линейно-поляризованного ОВ в мультигеликоидальном оптическом волокне.

Пусть мультигеликоидальное волокно настроено на определенный резонансный режим, в котором моды представлены суперпозицией циркулярно-поляризованных ОВ с топологическими зарядами $\pm |\ell|$. Если на вход такого волокна подается гибридная ЕН-мода, то на определенной длине волокна ее энергия полностью переходит в энергию линейно-поляризованного ОВ с топологическим зарядом $+|\ell|$. Если на входе возбуждается НЕ-мода, тогда в волокне заданной длины генерируется линейно-поляризованный ОВ с

топологическим зарядом $-|\ell|$. Таким образом, знак топологического заряда ОВ на выходе мультигеликоидального волокна определяется структурой входной гибридной моды. Получена зависимость ОУМ поля, возникающего в результате возбуждения НЕ- и ЕН-моды на входе мультигеликоидального волокна, от длины последнего. Показано, что входной оптический пучок с нулевым ОУМ на определенной длине волокна трансформируется в линейно-поляризованный ОВ с хорошо определенным ОУМ, знак которого определяется типом входной гибридной моды. Полученные результаты актуальны в области исследований методов генерации и управления оптическими пучками с ОУМ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект No. 20-12-00291) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект No. 20-47-910001).

Список литературы

1. Y. Shen, X. Wang, X. Zhenwei, C. Min, X. Fu, Q. Liu, M. Gong, and X. Yuan, Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities, *Light.Sci.Appl.* 8, 90, 2019.
2. A. M. Yao and M. J. Padgett, Orbital angular momentum: origins, behavior and applications, *Adv. Opt. Photon.* 3, 161, 2011.
3. N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A. E. Willner, S. Ramachandran, Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers, *Science* 340, 1545-1548, 2013.
4. S. Franke-Arnold, S. Barnett, E. Yao, J. Leach, J. Courtial, M. Padgett, Uncertainty principle for angular position and angular momentum, *New Journal of Physics* 6, 103, 2004.
5. E. V. Barshak, C. N. Alexeyev, B. P. Lapin and M. A. Yavorsky, Twisted anisotropic fibers for robust orbital-angular-momentum-based information transmission, *Phys. Rev. A* 91, 033833, 2015.
6. M. A. Yavorsky, E. V. Barshak, D. V. Vikulin, and C. N. Alexeyev, Spin-dependent OAM flipping in multihelical optical fibres, *J. Opt.* 20, 115601, 2018.

Влияние облучения аргонном на структурные и спектральные характеристики 4H-SiC фотоприемников

Калинина Е. В.¹, Кудояров М.Ф.¹, Никитина И.П.¹, Дементьева Е.В.¹, Забродский В.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: evk@mail.ioffe.ru

Современное развитие космонавтики, изучение атмосферы планет и их спутников, исследование межзвездного и межпланетного пространства, проявляют интерес к регистрации УФ излучения (200-400 нм). Эффективное наблюдение УФ излучения возможно только с борта ракет и космических аппаратов из космоса с его повышенной радиационной активностью. Работа в "экстремальных" условиях требует применения фотоприемников радиационно-стойких и "видимо-слепых".

4H-SiC является одним из перспективных п/п для создания эффективных фотоприемников УФ излучения. Ширина запрещенной зоны 4H-SiC 3.23 эВ, обеспечивающая нечувствительность к видимому и ИК-излучению, исключает необходимость использования УФ светофильтров. Низкие значения генерационных токов и высокая теплопроводность

материала исключают необходимость принудительного охлаждения приборов. Радиационная стойкость различных приборов на основе 4H-SiC исследовалась при облучении электронами, нейтронами и протонами и подтверждена их высокая радиационная стойкость. Самостоятельный интерес представляют исследования радиационной стойкости УФ детекторов при облучении тяжелыми ионами, поскольку оно моделирует структурные повреждения в полупроводниках, создаваемых фрагментами ядерного деления. Показана высокая радиационная стойкость 4H-SiC приборов при облучении ионами Kr, Xe, Bi [1,2]. Недавно показана дееспособность приборов с барьерами Шоттки Cr/4H-SiC после облучения ионами Ag флюенсом $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ [3]. В работе представлены результаты облучения УФ детекторов Cr/4H-SiC ионами Ag при дальнейшем наборе флюенсов.

В спектральном диапазоне 200-400 нм исследовались Cr/4H-SiC УФ фотоприемники, создаваемые термовакuumным напылением Cr толщиной 7-10 нм диаметром 8 мм на CVD слое толщиной 5 мкм с концентрацией носителей заряда $N_d - N_a = (1-50) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, выращенных на подложках 4H-SiC с $N_d - N_a = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Структуры облучались 2 раза ионами Ag с энергией 53 МэВ суммарным флюенсом $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Согласно расчетам по программе SRIM, пробег ионов Ag с энергией 53 МэВ в 4H-SiC составляет ~10 мм и можно считать распределение радиационных дефектов однородным по толщине CVD слоя.

После первого облучения ионами Ag флюенсом $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ преобладающими компонентами структуры становились две локализованные области с отрицательной деформацией, т.е. пересыщенных вакансиями. Кластеры вакансионного типа и дефекты линейного типа между ними являлись стоками для простых дефектов. Наблюдаемый эффект геттерирования обеспечивал значения квантовой эффективности Cr/4H-SiC фотоприемников на уровне исходных образцов 0.67%. При этом, согласно измерениям катодолуминесценции (CL), наблюдалась трансформация дефектной полосы 2.2 эВ в исходном материале в широкий спектр с максимумом 2.6 эВ – комплекс вакансионной природы центр D_1 . Некоторые из радиационных дефектов играли роль компенсирующих центров, на что указывало увеличение дифференциального сопротивления структур в ~ 10 раз.

После второго облучения ионами Ag суммарным флюенсом $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ наблюдалось разрушение кластеров, обогащенных вакансиями, являющихся характерной особенностью структуры 4H-SiC после первого облучения. Интенсивность отражения X-ray со стороны меньших углов становится сравнимой с таковой со стороны больших углов, что свидетельствует об образовании значительного количества межузельных атомов. Наблюдалось дальнейшее увеличение дифференциального сопротивления структур. Однако, согласно измерениям CL, дефектный спектр 2.6 эВ полностью совпадал со спектром, наблюдаемым после первого облучения Cr/4H-SiC детекторов ионами Ag флюенсом $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. В спектрах фотопроводимости наблюдалось уменьшение интенсивности после второго облучения. Полученные данные могут свидетельствовать о том, что дефектный центр 2.6 эВ не вносит заметного вклада в компенсацию проводимости CVD слоя, а уменьшение интенсивности фотопроводимости определяется введением других дефектных центров, которые появляются в результате распада кластеров, обогащенных вакансиями.

Список литературы

1. D.M. Martin, H. Kortegaard Nielsen, P. Leveque, A. Hallen. Appl. Phys. Lett., 84 (10), 1704 (2004).
2. Е.В. Калинина, Н.А. Чучава, Е.В. Богданова, А.М. Стрельчук, Д.Б. Шустов, М.В. Заморянская, В.А. Скуратов. ФТП 48 (2), 167 (2014).

3. Е.В. Калинина, М.Ф. Кудояров, И.П. Никитина, Е.В. Иванова, В.В. Забродский. ФТП 54 (11), 1244 (2020).

Анализ тонкой структуры спектров рентгеновского поглощения за L_3 -краем лантана в стеклах системы La_2O_3 - Nb_2O_5 - B_2O_3 .

Ермакова А. М.¹, Алексеев Р.О.², Шахгильдян Г.Ю.², Сигаев В.Н.², Тригуб А.Л.³, Велигжанин А.А.³, Сухарина Г.Б.¹, Авакян Л.А.¹, Бугаев Л.А.¹

¹ЮФУ

²РХТУ им. Менделеева

³Курчатовский институт

e-mail: ermakova.alexandra.bk@mail.ru

Боратные стекла системы La_2O_3 - Nb_2O_5 - B_2O_3 (LNB) используются для создания материалов с очень высоким значением показателя преломления и с относительно малой плотностью. Они необходимы для решения задач в оптическом приборостроении, электротехнике, биомедицине и других отраслях [1]. Изучение структуры боратных стекол позволит установить ее влияние на оптические свойства материала и разработать состав с наилучшими показателями преломления и плотности.

В данной работе рассмотрены 4 образца с одинаковой концентрацией оксида лантана (22.5%), но с различным содержанием оксида ниобия (от 5% до 30%) и оксида бора (от 72.5% до 47.5%).

Спектры рентгеновского поглощения L_3 -края лантана в образцах LNB были измерены на станции «Структурное материаловедение» Курчатовского источника синхротронного излучения [2]. Теоретическое моделирование спектров XANES было выполнено с использованием метода конечных разностей, реализованного в программном комплексе FDM-NES [3]. На основе проведенного анализа спектров рентгеновского поглощения определено наиболее вероятное ближнее окружение атомов лантана в трехкомпонентных стеклах системы LNB. Установлена тенденция изменения ближнего окружения в зависимости от увеличения в составе образцов LNB оксида ниобия до 30%. Выполнена оценка межатомных расстояний La-O и La-Nb.

Список литературы

1. Bengisu M. Borate glasses for scientific and industrial applications: a review //Journal of materials science. – 2016. – Т. 51. – №. 5. – С. 2199-2242.
2. Chernyshov A. A., Veligzhanin A. A., Zubavichus Y. V. Structural Materials Science end-station at the Kurchatov Synchrotron Radiation Source: Recent instrumentation upgrades and experimental results //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2009. – Т. 603. – №. 1-2. – С. 95-98.
3. Joly Y. X-ray absorption near-edge structure calculations beyond the muffin-tin approximation //Physical Review B. – 2001. – Т. 63. – №. 12. – С. 125120.

Определение профиля показателя преломления и топографии поверхности оптически гладких объектов с помощью интерференции оптических вихрей

Соколенко Б. В.¹, Шостка Н.В.¹, Полетаев Д.А.¹,

¹КФУ им. В. И. Вернадского

e-mail: simplexx.87@gmail.com

Феномен оптических сингулярных пучков и особенностей их распространения исследуется многими научными группами с момента их представления в фундаментальной работе Дж. Ная и М. Берри [1]. Наиболее востребованными прикладными направлениями сингулярной оптики стали системы оптической связи [2], микроскопия и профилометрия [3], оптическое манипулирование [4]. Благодаря уникальной особенности – геликоидальному волновому фронту, оптические вихри в интерференционной микроскопии [5] находят применение в качестве зондирующего пучка, что позволяет повысить точность измерений, например, локальной толщины и показателя преломления прозрачных сред [6]. Новые подходы к созданию пространственно-структурированных вихревых оптических полей и массивов сингулярных пучков в задачах микроскопии отражены в ряде работ последних лет [6, 7], задача которых увеличить число одновременных измерений в нескольких точках. Актуальной задачей сегодня при исследовании микро-оптических элементов неизвестной толщины или с искривленной поверхностью является поиск алгоритмов отделения показателя преломления от длины оптического пути. В наших предыдущих работах исследовалась возможность анализа фазовой задержки пучка, вносимой изотропной оптически гладкой пластинкой при изменении геометрии ее поверхности [8]. Анализ эволюции распределения интенсивности поля суперпозиции сингулярных пучков в объектном и опорном плече интерферометра позволил сделать заключение о достаточно высокой степени чувствительности и разрешения при определении изменения фазы до единиц нанометров при использовании He-Ne лазера с длиной волны 632 нм.

В данной работе предложен способ расширения функционала ранее предложенной оптической схемы [9] и возможностей анализа на ее основе полей суперпозиции массива оптических вихрей с единичным и разным по знаку топологическим зарядом с целью развязки показателя преломления и геометрии исследуемого образца. Профиль распределения показателя преломления объекта может быть извлечен из разности оптического хода между прошедшей и отраженной от поверхностей волн, при этом предварительные сведения о топографии поверхности могут отсутствовать.

В экспериментальной части работы нами исследуется процесс одновременного отражения и сквозного прохождения симметричных массивов 3х3 оптических вихрей через исследуемый объект – стеклянную подложку с нанесенной пленкой алюминия. Прошедшие и отраженные пучки интерферируют с соответствующими опорными пучками, топологический заряд вихрей в которых противоположен по знаку относительно знака вихрей в предметных пучках. Одновременная регистрация интерференционных картин для прошедших и отраженных пучков в виде вращающихся максимумов «двулепестковых» полей позволяет с помощью программы постобработки определить угол и направление вращения картины суперпозиции с последующим извлечением фазового сдвига и, как следствие, разделения вклада геометрии образца и показателя преломления среды в оптическую разность хода.

К каждому пучку в массиве применяется одинаковый процесс оценки угла: используя отдельные пиксели высокоскоростной камеры (120 кадров в секунду) в качестве точечных

детекторов, фиксируется распределение яркости в виде 8-ми битной градации с последующим вычислением положения максимумов интенсивности. Результат извлечения фазового сдвига по предложенной схеме позволяет достичь вертикального разрешения до 8 нм с экспериментально различным поворотом «двулепестковых» полей до 3 градусов для источника He-Ne лазера с $\lambda = 632,8$ нм и менее 5 нм для источников с более короткой длиной волны.

Полная карта рельефа формируется в данной схеме путем пошагового сканирования в плоскости (x, y) массивом из девяти зондирующих лучей одновременно. Используя держатель образца с поперечным перемещением, можно исследовать и визуализировать всю поверхность без ограничения линейных размеров, а получение профилограммы может быть обеспечено одним проходом вдоль выбранного направления.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант 20-72-00065)

Список литературы

1. Nye, J. F. and Berry, M. V., "Dislocations in Wave Trains," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 336, 165–190 (1974).
2. Halilov, S., Ilyasova, A., Rubass, A., and Pogrebnaya, A., "Multiplexing and demultiplexing of the complex signal in the singular beams propagating in a few-mode optical fibers: An experiment," *Journal of Physics: Conference Series* 737(1) (2016)
3. Vicidomini, G., Bianchini, P., and Diaspro, A., "STED super-resolved microscopy," *Nature Methods* 15(3), 173–182 (2018).
4. Serrano-Trujillo, A. and Anderson, M. E., "Surface profilometry using vortex beams generated with a spatial light modulator," *Optics Communications* 427, 557–562 (2018).
5. Marrugo, A. G., Gao, F., and Zhang, S., "State-of-the-art active optical techniques for three-dimensional surface metrology: a review," *Journal of the Optical Society of America A* 37(9), B60 (2020).
6. Bouchal, P., Strbáková, L., Dostál, Z., and Bouchal, Z., "Vortex topographic microscopy for full-field reference-free imaging and testing," *Optics Express* 25(18), 21428 (2017).
7. Popiolek-Masajada, A., Masajada, J., and Szatkowski, M., "Internal scanning method as unique imaging method of optical vortex scanning microscope," *Optics and Lasers in Engineering* 105, 201–208 (2018).
8. Sokolenko, B., Shostka, N., Karakchieva, O., Volyar, A., and Poletayev, D., "Determination of microrelief of the sample by singular beams superposition," *Computer Optics* 43, 741–746 (2019).
9. Sokolenko B., Shostka N., Poletaev D., «On the features of the interference of a set of single charged optical vortices for non-contact surface roughness analysis,» *Proc. SPIE 11525, SPIE Future Sensing Technologies*, 1152529 (2020)

Экспериментальное исследование влияния мощности лазерного излучения на коэффициент отражения германия и кремния на длине волны 355 нм

Каплунов И. А.¹, Железнов В. Ю.², Малинский Т. В.², Рогалин В. Е.²

¹ТвГУ

²ИЭЭ РАН

e-mail: kaplunov.ia@tversu.ru

Лазерное излучение широко применяется для обработки полупроводников, однако при проведении работ необходимо учитывать коэффициент отражения полупроводника в течение лазерного импульса. Лазерное излучение, поглощаясь в кристалле, передает энергию электронам валентной зоны, переводя их в зону проводимости, что приводит к образованию значительного количества неравновесных электронно-дырочных пар и приводит к повышению коэффициента отражения. Известно явление так называемого плазменного резонанса в полупроводниках, когда при концентрации носителей $10^{20} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$ коэффициент отражения может приближаться к 95 – 98 %.

При воздействии мощного короткого лазерного импульса помимо генерации неравновесных носителей путем поглощения фотонов, происходит и термическая генерация носителей за счет нагрева поверхностного слоя. Одновременно происходит интенсивная диффузия неравновесных носителей вглубь кристалла.

Теоретический расчет этого процесса с учетом профиля лазерного импульса является сложной многопараметрической задачей, и экспериментальные исследования позволяют упростить получение оптических характеристик материала.

В работе исследовалось отражение излучения мощного импульсно-периодического наносекундного УФ лазера от поверхности монокристаллов германия и кремния. Использовался Nd:YAG лазер (3-я гармоника, с длиной волны $\lambda = 355 \text{ нм}$, длительностью импульса $\tau = 10 \text{ нс}$ и энергией до 8 мДж) и соответствующая экспериментальная установка [1].

В качестве образцов использовались полированные монокристаллы германия n - типа с удельным сопротивлением $47 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и монокристаллы кремния p – типа, $1 \text{ кОм}\cdot\text{см}$.

Порог оптического пробоя, сопровождаемый появлением кратера на поверхности и плазменным факелом перед поверхностью образцов, на исследуемых кристаллах возникал при $E = 1,2 - 1,3 \text{ Дж/см}^2$. Однако уже при $E \geq 0,1 \text{ Дж/см}^2$ на поверхности образцов возникали допороговые повреждения, искажающие результаты измерений [2, 3].

Измерения коэффициента отражения излучения проводились в диапазоне плотностей энергии $0,01 \div 1,2 \text{ Дж/см}^2$. В этих условиях удалось зафиксировать рост коэффициента отражения в 1,5 – 2 раза.

Работа выполнена с использованием ресурсов Центра коллективного пользования Тверского государственного университета в рамках государственного задания по научной деятельности (№ 0057-2019-0005, № 0817-2020-0007).

Список литературы

1. Железнов Ю. А., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Токарев В. Н., Хасая Р. Р., Хомич Ю. В., Ямщиков В. А., Экспериментальная установка для прямого лазерного микро- и наноструктурирования поверхности твердых тел, Успехи прикладной физики, том. 2(3), 311-316, 2014.

2. Железнов В. Ю., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Рогалин В. Е., Филин С. А., Хомич Ю. В., Ямщиков В. А., Каплунов И. А., Иванова А. И., Лазерное травление германия воздействием мощного ультрафиолетового импульса, X Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 79-80, 2021.
3. Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Рогалин В. Е., Хомич Ю. В., Ямщиков В. А., Каплунов И. А., Иванова А. И., Модификация поверхности кремния при воздействии излучения наносекундного ультрафиолетового лазера, Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, вып. 12, 628-636, 2020. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.628

Оптоакустические эффекты в композитах прозрачная матрица – наночастицы металлов при наличии остаточной пористости

Звеков А. А.¹, А.В. Каленский¹, А.С. Зверев¹, Помесячная Е.С.¹

¹КемГУ

e-mail: zvekova@gmail.com

Оптоакустическая спектроскопия является востребованным инструментом исследования оптических характеристик нестандартных объектов обладающих очень высокой или крайне низкой оптической плотностью. К важным частным случаям систем, к которым применяется оптоакустическая спектроскопия, относятся композиты на основе прозрачной матрицы и наночастиц металлов, например, композиты на основе пентаэритрита тетранитрата и гексогена и наночастиц металлов [1]. Поры могут оказывать влияние на оптоакустический сигнал, выступая в качестве центров рассеяния излучения и областей легко сжимаемой части матрицы. Цель работы: формулировка и исследование модели оптоакустического сигнала в композите прозрачная матрица – наночастицы металлов с учетом остаточной пористости для определения роли пор в изменении его параметров.

В рамках одномерного уравнения переноса монохроматического излучения в полупространстве с френелевской границей рассчитана зависимость показателей поглощения и рассеяния излучения в композите гексоген – наночастицы алюминия от концентрации пор. В предположении, что поры меньше наночастиц, и наночастицы заполняют поры, последние не влияют при малых концентрациях. В противоположном пределе показатель рассеяния линейно возрастает при увеличении концентрации пор. В результате в области высоких концентраций пор увеличиваются эффективный показатель поглощения и коэффициент диффузного отражения. Разработана модель изменения давления в малом объеме композита при нагреве наночастиц с учетом пор. Модель основана на гипотезе механического квазиравновесия [2] и расчетом давления в порах в рамках уравнения Ван-дер-Ваальса без слагаемого, связанного с притяжением молекул, пренебрежимо малого при комнатной температуре. Данное приближение приводит к квадратному уравнению для давления при заданном распределении температуры. Рассчитана кинетика изменения давления в малом объеме композита с учетом пор в изохорном приближении, производная по времени которой выступает в качестве функции источников для расчета оптоакустического сигнала методом бегущей волны [3]. Показано, что поры вносят демпфирующий эффект, приводящий к уменьшению предельного давления и амплитуды функции источников. Рассчитанные оптоакустические сигналы при наличии пор имеют меньшую амплитуду по

сравнению со случаем отсутствия пор, при этом показатель поглощения, оцениваемый по оптоакустическому сигналу, согласуется с распределением поглощенной энергии, которое получается при решении уравнения переноса излучения.

Таким образом, наличие пор не искажает определение показателя поглощения, но может усложнять измерения из-за уменьшения амплитуды сигнала.

Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ МД-3502.2021.1.2.

Список литературы

1. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Звеков А.А., Никитин А.П., Каленский А.В. Особенности лазерного инициирования композитов на основе тэна с включениями ультрадисперсных частиц алюминия // Физика горения и взрыва, том 52, 104-110, 2016.
2. Ананьева М.В., Звеков А.А., Каленский А.В., Адуев Б.П. Методика моделирования оптоакустических сигналов, иницируемых в композитах прозрачная матрица - наночастицы металлов // Известия высших учебных заведений. Физика, том 62, 138-147, 2019.
3. Гусев В. Э., Карабутов А. А. Лазерная оптоакустика - М.: Наука, 1991, 304 с.

Исследование характера распределения тепловых полей при лазерном воздействии на поверхность алюминиевых пластин, ориентированных под различными углами

Фролов К. А.¹, Люхтер А.Б.¹, Кочуев Д.А.¹, Чкалов Р.В.¹

¹ВлГУ

e-mail: frolov@laser33.ru

Лазерная сварка металлов большой толщины является важной задачей для многих отраслей промышленности. Несмотря на появление мощных лазерных систем проблема недостаточной мощности лазерного излучения до сих пор актуальна. Компенсировать недостаток мощности можно путем использования комбинированных источников воздействия [1], использования сканатора в оптической головке [2], путем многопроходного воздействия [3]. В настоящей работе будет рассмотрено влияние разделки кромок на распределение тепла при воздействии лазерного излучения при многопроходной обработке. При распространении лазерного излучения в каналах, наблюдается эффект самоканализации, таким образом планируется использовать данный эффект прогрева материала на максимальную глубину.

Целью данного исследования является подбор оптимального угла между свариваемыми поверхностями, обеспечивающем распределения теплового поля от лазерного излучения на максимальную глубину.

Эксперимент проводился с использованием тонких алюминиевых пластин размером 160x40x2 мм. Алюминиевые пластины ориентировались торцом к источнику лазерного излучения с длиной волны 1.06 мкм. В процессе проведения работ варьируемым параметром было изменение угла наклона кромок в диапазоне 0-4 градуса, также изменение рабочего отрезка оптической системы в диапазоне -10 ... +30 мм от фокальной плоскости, фокусное расстояние составляет 200 мм. Выбранная мощность лазерного излучения составляла 65 Вт, время излучения – 5 с. Проводилось измерение тепловых полей поверхности пластин с помощью тепловизера работающего на длине волны 5-8 мкм. Тыльная

поверхность пластин покрывалась светопоглощающим покрытием для снижения отражательной способности. Также были проведены эксперименты с нанесением светопоглощающего покрытия непосредственно на поверхности, подверженные лазерному излучению.

По результатам данных исследований было установлено:

- угол наклона кромок пластин относительно друг друга влияет на распределение тепловых полей и равномерность прогрева заготовок.

- использование светопоглощающего покрытия способствует поглощению лазерного излучения, что приводит к более равномерному распределению тепла по поверхности изделия, однако необходимо изучить его влияние на смачиваемость кромок при оплавлении поверхности материала, поро- и трещинообразование в получаемых швах.

Список литературы

1. Junqiang Wang, Jianmin Han, Joseph P. Domblesky, Zhiyong Yang, Yingxin Zhao & Qiang Zhang (2016) Development of a new combined heat source model for welding based on a polynomial curve fit of the experimental fusion line. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume 87, pages 1985–1997
2. Пат. US5199020, МПК G11B, G02B, H04N. Optical head using an optical scanner / Young W. KimSeung T. JungKeun C. Kim; заявитель и патентообладатель Samsung Electronics Co Ltd
3. Miikka Karhu, Veli Kujanpää (2015) Defocusing techniques for multi-pass laser welding of austenitic stainless steel. 15th Nordic Laser Materials Processing Conference, Nolamp 15, 25-27 August 2015, Lappeenranta, Finland.

Исследование катодолюминесцентных свойств тантало-ниобата гадолиния, активированного редкоземельными ионами

Гусев Г.А.¹, Маслобоева С.М.², Заморянская М.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²ИХТРЭМС КНЦ РАН

e-mail: ggusev@mail.ioffe.ru

Разработка и исследование новых материалов, эффективно преобразующих высокоэнергетическое излучение в свет видимого диапазона – актуальная задача. Подобные материалы, называемые сцинтилляторами, широко применяются в медицине, науке, геологии как основа датчиков ионизирующего излучения [1-2].

Тантало-ниобаты гадолиния, обладающие интенсивной собственной люминесценцией, высокой плотностью и способностью поглощать частицы с высокой энергией – перспективные сцинтилляторы [3]. Для получения оксидного материала с увеличенным световыходом широко применяется активация различными редкоземельными ионами (РЗИ) (например, Eu, Tb).

В настоящее время, для синтеза тантало-ниобатов применяются такие основные методы, как твердофазный синтез и метод Чохральского [4]. Приведенные способы отличаются довольно длительным отжигом при температурах от 1400 °С. В данной работе исследуются образцы $Gd(Nb_xTa_{1-x})O_4$, активированные редкоземельными ионами, выращенные жидкофазным методом. Используемый метод отличается довольно короткой фазой финального отжига (несколько часов) при температурах до 1400 °С. Такой синтез позволяет более точно следовать заданному соотношению компонентов за счет гомогенизации

смеси на молекулярном уровне [3]. Цель работы – определить оптимальную концентрацию редкоземельного иона в твердом растворе тантало-ниобата гадолиния для максимальной интенсивности люминесценции.

Исследования выполнялись такими методами, как рентгенодифракционный анализ (РДФА), рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) и локальная катодолуминесценция (КЛ).

В данной работе были определены фазовые и элементные составы исследованных материалов. Были получены спектры катодолуминесценции тантало-ниобатов гадолиния, с различной концентрацией активатора-РЗИ. На основании катодолуминесцентных исследований сделан вывод об оптимальном содержании редкоземельных ионов в матрице для максимальной интенсивности люминесценции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90088. Работа была выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Материаловедение и диагностика в передовых технологиях” при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (идентификатор проекта RFMEFI62119X0021).

Список литературы

1. M. Nikl, Scintillation detectors for x-rays, Meas. Sci. Technol. 17, R37, 2006.
2. T. Yanagida, Inorganic scintillating materials and scintillation detectors, Proc. Jpn. Acad. B, 94, 75-97, 2018.
3. G.A. Gusev, S.M. Masloboeva, M.V. Zamoryanskaya, The study of gadolinium tantalum niobate ($Gd(Nb_xTa_{1-x})O_4$) by local cathodoluminescence technique. J. Phys. Conf. Ser., 1697, 012154, 2020.
4. O.V. Voloshyna, I.A. Boiaryntseva, V.N. Baumer, A.I. Ivanov, M.V. Korjik, O.T. Sidletskiy, New, dense, and fast scintillators based on rare-earth tantalum-niobates, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A., 764, 227-231, 2014.

Исследование спектральных свойств калиево-алюмо-боратного стекла с нанокристаллами $CuCl - CuBr$

Бабкина А. Н.¹, Зырянова К.С.¹, Егорова Я.Б.¹, Гаврилов Р.Р.¹, Моногарова А.А.¹

¹ИТМО

e-mail: babkina.anastasya@bk.ru

Боросиликатные стекла с нанокристаллами хлорида меди известны своими фотохромными свойствами [1]. Однако за последнее десятилетие нанокристаллы галогенидов меди были успешно выделены еще во фторфосфатной [2] и калиево-алюмо-боратной стеклообразных матрицах [3].

В качестве объекта исследования в работе было выбрано калиево-алюмо-боратное стекло, в котором были получены нанокристаллы $CuCl$, $CuBr$ и $CuCl - CuBr$ путем ввода добавок: 3 Cu_2O и 3,3 $NaCl$ (состав 1), 2,98 KBr (состав 3), 2,48 $NaCl - 2,24 KBr$ (состав 2) мас.% соответственно. Синтез производился в лабораторных условиях в электрической печи «нижней» загрузки при температуре $1350^\circ C$ в корундовом тигле с перемешиванием расплава платиновой мешалкой в течение 1 часа. После синтеза проводилась изотермическая обработка образцов стекла при температурах выше температуры стеклования ($T_g=390^\circ C$) для выделения в матрице стекла нанокристаллов галогенидом меди.

Спектры поглощения образцов стекол регистрировались на двухлучевом спектрофотометре Lambda 650 диапазоне 200 – 900 нм при температуре кипения жидкого азота. Спектры люминесценции и возбуждения люминесценции при комнатной температуре регистрировались с помощью однолучевого спектрофлуориметра LS – 55 (Perkin Elmer) в диапазоне 200 – 400 нм с возможностью изменения длины волны возбуждающего излучения также при температуре кипения жидкого азота.

На спектрах поглощения исходных стекол можно выделить две области – одновалентной и двухвалентной меди. Область интенсивного поглощения одновалентной меди лежит в диапазоне 200 – 360 нм, а область высокого пропускания двухвалентной меди – 380 – 900 нм. После изотермической обработки на спектрах всех стекол наблюдалось появление интенсивных полос поглощения в области 370 – 410 нм, которые связаны с выделением нанокристаллов галогенидов меди. Для состава 1 эти полосы располагались в области 370–390 нм, что совпадает с положением поглощения нанокристаллов хлорида меди [4]. Для состава 2 полосы располагались в области 390–410 нм, что характерно для поглощения нанокристаллов бромида меди [5]. Для состава 3 положение полос было промежуточным. Эти результаты соотносятся с вводимыми в состав стекла добавками. Из этого можно сделать вывод, что в составе 3 одновременно выделились кристаллы бромида и хлорида меди. Однако, не ясно, выделились ли они как отдельные нанокристаллы или их структура была неким образом перемешана.

На основании спектральных данных был произведен расчет среднего размера ансамбля нанокристаллов галогенидов меди по методу, предложенному в работе [6]. Было получено, что в составах 1 и 2 размер нанокристаллов увеличивается от 8 до 11 нм при увеличении температуры термообработки от 390 до 450°C. Для состава 3 был произведен расчет составов как с параметрами для хлорида меди, так и бромида меди. Расчет показал, что, используя параметры хлорида меди, размеры кристаллов варьируются около 30 нм, что в рамках нашего эксперимента маловероятно. Используя параметры бромида меди, размер кристаллов изменялся от 6 до 8 нм.

Проведенные исследования методом дифракции рентгеновских лучей показали, что галогениды меди относятся к одной кристаллической группе и имеют практически идентичные элементарные ячейки. Таким образом, используя РФА можно определить средний размер ансамбля нанокристаллов, но сказать, какие это кристаллы: бромид или хлорид меди – достаточно сложно.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что вид иона галогена в нанокристаллах галогенидов меди сильнее всего определяет именно спектральные и оптические свойства материалов нежели структурные.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых № МК-4235.2021.1.3.

Список литературы

1. Голубков В.В., Исследование фазовых изменений в галоидомедных фотохромных стеклах, ФХС, том 8, № 4, 416–421, 1982
2. Бабкина А.Н., Спектральные свойства галоидомедных нанокристаллов в стеклах фтор-фосфатной матрицы, ОиС, том 119, № 2, 255–260, 2015
3. Голубков В.В., Выделение наноразмерных нанокристаллов CuCl и CuBr в калиевоалюмосиликатных стеклах, ФХС, том 38, № 3, 303–319, 2012
4. Goldmann A., Band Structure and Optical Properties of Tetrahedrally Coordinated Cu- and Ag-Halides, Phys. Stat. Sol., том 81, № 9, 9–47, 1977
5. Goldmann A., Density of valence states of CuCl, CuBr, CuI, and AgI, Phys. Rev. B, том 10, № 10, 4388–4402, 1974

6. Эфрос А.Л., Межзонное поглощение света в полупроводниковом шаре, ФТП, том 16, № 7, 1209–1214, 1982

Исследование сенсibilизации европия тербием в кубическом диоксиде циркония

Шакирова А. А.^{1,2}, Гусев Г.А.¹, Заморянская М.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Университет ИТМО

e-mail: azaliya.s@inbox.ru

Поиск эффективных люминофоров, преобразующих высокоэнергетическое излучение в видимый свет, является актуальной задачей. Эти материалы применяются в качестве детекторов ионизирующего излучения [1].

Кубический диоксид циркония (ZrO_2), активированный редкоземельными ионами (РЗИ) является одним из таких перспективных люминофоров. ZrO_2 обладает высокой механической прочностью, химической и радиационной стойкостью. Кубическая структура диоксида циркония нестабильна при комнатной температуре. Но при добавлении оксида иттрия Y_2O_3 кубическая фаза ZrO_2 стабилизируется [2].

Согласно опубликованным данным, интенсивность красной люминесценции трехвалентного иона европия в ZrO_2 относительно слабая [3]. Для увеличения интенсивности люминесценции европия можно его сенсibilизировать другим редкоземельным ионом. Хорошо известно, что ион европия можно сенсibilизировать трехвалентным ионом тербия [4].

Цель работы – исследовать люминесцентные свойства кубического диоксида циркония, активированного европием, тербием и европием/тербием. Исследовать процесс сенсibilизации европия тербием в ZrO_2 .

Для исследования сенсibilизации проводилось изучение люминесцентных свойств керамики, полученной методом со-осаждения. Состав исследованных образцов: $(Zr_{0.82}Y_{0.09}Eu_{0.09})O_{1.91}$, $(Zr_{0.82}Y_{0.09}Tb_{0.09})O_{1.91}$, $(Zr_{0.82}Y_{0.09}Eu_{0.045}Tb_{0.045})O_{1.91}$.

Исследования элементного состава материалов проводили методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), люминесцентные свойства и динамику затухания – методом локальной катодолуминесценции (КЛ).

В результате работы был определен элементный состав образцов, получены спектры КЛ всех исследованных образцов. Были получены времена затухания при исследовании динамики затухания различных излучательных переходов РЗИ. Также, изучены зависимости интенсивности люминесценции от плотности возбуждения. В образце, содержащем два различных вида редкоземельных ионов, интенсивность излучения европия выше, время затухания для Tb ниже, а насыщение интенсивности полосы излучения Eu наступает раньше, чем в образцах, содержащем только один вид РЗИ. Таким образом, в образце $(Zr_{0.82}Y_{0.09}Eu_{0.045}Tb_{0.045})O_{1.91}$ показан процесс передачи энергии между тербием и европием, что приводит к увеличению световыхода европия. Однако, для применения стабилизированного диоксида циркония в качестве люминофора требуется дальнейшее исследование способов увеличения световыхода. Одним из направлений исследования будет поиск оптимального содержания сенсibilизатора (иона тербия).

Список литературы

1. T. Yanagida, Inorganic scintillating materials and scintillation detectors, Proc. Jpn. Acad. B, 94, 75-97, 2018.
2. E.V. Ivanova, V.A. Kravets, K.N. Orekhova, G.A. Gusev, T.B. Popova, M.A. Yagovkina, O.G. Bogdanova, B.E. Burakov, M.V. Zamoryanskaya, Properties of Eu^{3+} -doped zirconia ceramics synthesized under spherical shock waves and vacuum annealing, J. Alloys Compd., 808, 151778, 2019.
3. L. Huangqing, W. Lingling, C. Shuguang, Z. Bingsuo, P. Zhiwei, Effect of annealing temperature on luminescence of Eu^{3+} ions doped nanocrystal zirconia, Appl. Surf. Sci., 253, 3872–3876, 2007.
4. Z. Yahiaouia, M.A. Hassairia, M. Dammaka, E. Cavalli, F. Mezzadri. Tunable luminescence and energy transfer properties in $\text{YPO}_4:\text{Tb}^{3+}, \text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ phosphors, J. Lumin., 194, 96-101, 2018.

Выращивание объемных кристаллов оксида галлия из расплава методом Чохральского в кислородосодержащей атмосфере

Панов Д. Ю.¹, Спиридонов В.А.¹, Закгейм Д.А.¹, Кремлева А.В.¹, Смирнов А.М.¹, Бауман Д.А.¹, Романов А.Е.¹, Бугров В.Е.¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

e-mail: dmitriipnv@gmail.com

В настоящее время во всем мире наблюдается большой интерес к разработке новых полупроводниковых материалов. Одним из таких перспективных материалов является оксид галлия ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$). На сегодняшний день $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ уже успешно используется во многих приложениях, например, в МОП-транзисторах с напряжением пробоя выше 1000 В [1], проводящих прозрачных подложках для эпитаксии оптоэлектронных структур на основе III-нитридов [2]. Это становится возможным благодаря уникальным физическим свойствам $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, таким как широкая запрещенная зона (~4,8 эВ), высокое напряжение пробоя (>8 МВ/см), относительно высокая подвижность электронов (~150 см²/Вс) [3,4] и прозрачность в видимом и УФ спектральных диапазонах [5-7].

В отличие от других широкозонных полупроводников (GaN, AlN, SiC), $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ можно относительно легко получать в виде объемного кристалла. Для получения объемного монокристаллического $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ используются следующие методы: метод Чохральского (CZ) [5-7], метод Степанова (EFG) [8] и метод зонной плавки [9]. Также стоит отметить, что процесс роста $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ из расплава осложняется возможностью химического разложения расплава в инертной атмосфере. Расплав Ga_2O_3 может разлагаться на двухвалентный оксид галлия, одновалентный оксид и, наконец, металлический галлий ($\text{Ga}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{GaO} \rightarrow \text{Ga}_2\text{O} \rightarrow \text{Ga}$ и O_2). В результате металлический галлий может образовывать интерметаллические сплавы (Ir-Ga) с элементами ростового оборудования (тигли, формообразователь (метод EFG), держатель затравочного кристалла).

В данной работе для получения объемного кристалла $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ использовалась ростовая установка НИКА-3 с индукционным нагревом тигля, которая позволяет получать кристаллы методами Чохральского и Степанова. В качестве исходного материала использовался порошок оксида галлия (5N). Для получения расплава использовался иридиевый тигель. Все образцы синтезировались в замкнутой системе с постоянной атмосферой. В

качестве атмосферы использовались углекислый газ (CO_2), газ аргон (Ar) и кислород (O_2) в разных соотношениях.

Путем скалывания образцов по плоскости спайности были получены плоскопараллельные образцы толщиной 1 мм и исследованы их оптические свойства. По исследованным оптическим свойствам были сделаны выводы по выбору необходимой атмосферы роста для кристаллов $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$. По экспериментальному спектру поглощения была оценена ширина запрещенной зоны, которая составила около 4,7 эВ. Также было оценено качество получаемых кристаллов с помощью рентгеноструктурного анализа.

В работе рассмотрены возможности практического применения материала. Исследовано и показано влияние ростовых сред на возможность и качество получения кристалла оксида галлия. Исследованы оптические свойства полученных образцов и исследовано качество кристаллов с помощью рентгеноструктурного анализа.

Список литературы

1. Hu Z., Nomoto K., Li W., Tanen N., Sasaki K., Kuramata A., Nakamura T., Jena T., and Xing H. G. // IEEE Electron Device Lett. 2018. V.39, P.869.
2. Villora E.G. et al. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ and single-crystal phosphors for high-brightness white LEDs and LDs, and $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ potential for next generation of power devices. // Oxide-based Materials and Devices V. – International Society for Optics and Photonics, 2014. – T. 8987. – C. 89871U.
3. Pearton S J, Yang J, Cary P H, Ren F, Kim J, Tadjer M J and Mastro M A 2018 Applied Physics Reviews 5 011301
4. Stepanov S I, Nikolaev V I, Bougrov V E and Romanov A E 2016 Rev.Adv.Mater.Sci. 44 63–86
5. Galazka Z 2018 Semicond. Sci. Technol. 33 113001
6. Zakgeim D.A., Panov D.I., Spiridonov V.A., Kremleva A.V., Smirnov A.M., Bauman D.A., Romanov A.E., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E. Volume gallium oxide crystals grown from melt by the Czochralski method in an oxygen-containing atmosphere // Technical Physics Letters - 2020, Vol. 46, No. 11, pp. 1144-1146
7. Panov D.I., Spiridonov V.A., Zakgeim D.A., Kremleva A.V., Bauman D.A., Romanov A.E., Bougrov V.E. Growth technology and characterization of bulk crystalline gallium oxide // Journal of Physics: Conference Series - 2020, Vol. 1695, No. 1, pp. 012024
8. Kuramata A., Koshi K., Watanabe S., Yamaoka Yu, Masui T., and Yamakoshi S. // Japanese Journal of Applied Physics. 2016. V.55. P.1202A2. DOI: 10.7567/JJAP.55.1202A2
9. Hossain E., Kulkarni R., Mondal R., Guddolian S., Azizur Rahman A., Thamizhavel A., and Bhattacharya A. // ECS Journal of Solid State Science and Technology. 2019. V.8. N.7.

Решетки разности населенностей, создаваемые в квантовых системах с помощью предельно коротких световых импульсов, не перекрывающихся в среде

Архипов Р. М.^{1,2}, Архипов М.В.¹, Розанов Н.Н.²,

¹СПбГУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: arkhipovrostislav@gmail.com

Для создания решеток населенностей в резонансной среде в традиционном подходе используется интерференция длинных квазимонохроматических пучков, перекрывающихся в среде [1]. В случае предельно коротких световых импульсов (ПКИ) с длительностью порядка периода колебаний световой волны данный метод не применим в виду малой длительности импульсов. В последние годы достигнут большой прогресс в получении ПКИ с длительностью в аттосекундном диапазоне [2] и ТГц импульсов фемтосекундной длительности [3]. Однако ПКИ за счет Раби-осцилляций атомной инверсии способны быстро менять населенности атомных уровней за времена порядка длительности импульсов. А последовательность таких импульсов, не перекрывающихся в среде, может создавать в среде светоиндуцированные решетки населенностей, даже когда импульсы одно- временно не пересекаются в веществе [4-6].

В докладе разбирается возможность создания и сверхбыстрого управления решетками населенностей с помощью последовательности ПКИ в резонансной среде в подобной ситуации. Показано, что субцикловые униполярные импульсы с ненулевой электрической площадью (интеграл от напряженности электрического поля по времени) способны более эффективно воздействовать на атомные системы, чем одноцикловые и многоцикловые биполярные с нулевой площадью.

Работа поддержана грантом РНФ 19-72-00012 (исследование возможности создания решеток населенностей) и грантом РФФИ 19-02-00312 (изучение роли электрической площади во взаимодействии импульсов излучения с атомными средами).

Список литературы

1. H. J. Eichler, P. Günter, D.W. Pohl, »Laser-Induced Dynamic Gratings«. Berlin, Heidelberg, NY., Tokyo: Springer-Verlag, 1981.
2. F. Krausz, M. Ivanov, »Attosecond physics», Rev. Mod. Phys. 2009. V. 81. P. 163.
3. J. A. Fülöp, S. Tzortzakis, and T. Kampfrath, "Laser-driven strong-field terahertz sources", Adv. Opt. Mater. 8, 1900681 (2020).
4. R.M. Arkhipov, A.V. Pakhomov, M.V. Arkhipov, I. Babushkin, A. Demircan, U. Morgner, N.N. Rosanov, "Population density gratings induced by few-cycle optical pulses in a resonant medium", Sci. Rep. V. 7. N 1. P. 12467 (2017).
5. R.M. Arkhipov, A.V. Pakhomov, M.V. Arkhipov, I. Babushkin, A. Demircan, U. Morgner, N.N. Rosanov, "Population difference gratings created on vibrational transitions by nonoverlapping subcycle THz pulses", Sci. Rep. V. 11. Article Number 1961 (2021).
6. Р.М. Архипов, М.В. Архипов, А.В. Пахомов, Ю.М. Артемьев, Н.Н. Розанов, "Решетки населенностей, создаваемые в газе атомов водорода с помощью ультрафиолетовых аттосекундных импульсов", Опт. Спектр. Т. 129(5), С. 657 (2021).

Цифровой метод измерения хаотической спекл картины лазерного излучения

Акимова Я. Е.¹, Брещко М. В.¹, Егоров Ю. А.¹, Воляр А. В.¹

¹КФУ им. В. И. Вернадского

e-mail: Ak1mova.yana@yandex.ru

Лазерные пучки, распространяясь через матовое стекло, турбулентную среду, мутную жидкость, а также многомодовое волокно или отражаясь от поверхности кожи, испытывают существенные амплитудные и фазовые искажения, формируя хаотичную спекл картину [1]. Анализ такого хаотичного волнового поля связан с многочисленными препятствиями и требует, как специальных дорогостоящих устройств, так и особых методов обработки данных [2-4]. В настоящей работе предлагается применить один из таких методов для изучения спеклов, сравнимых с лазерным излучением прошедшим через матовое стекло или отраженным от кожного покрова. Стоит отметить, что спеклы возникают вследствие интерференции света, рассеиваемого отдельными шероховатостями такой поверхности. Их пространственно-временное распределение характеризуется амплитудой и фазой, а временное характеризуется пространственной упорядоченностью – когерентностью. В зависимости от типа возмущения спекл будет обладать различной пространственной структурой (комбинация амплитуд и фаз рассеянного света) и средним продольным размером спекла [5]. С точки зрения топологии волнового фронта и сингулярной оптики, спекл картины также привлекли значительное внимание, поскольку было показано, что его нули интенсивности соответствуют оптическим вихрям, а спеклы, в целом, комбинированным сингулярным пучкам [6]. В ряде работ [7-12] мы показали теоретически и экспериментально возможность измерения пространственных характеристик (амплитуды и начальные фазы) сложных световых полей с помощью моментов интенсивности высших порядков без разрушения микроструктуры светового поля в реальном масштабе времени. Метод моментов интенсивности был ранее известен и частично применялся для анализа сложных световых полей. Выражение для моментов интенсивности определяется как

$$\Phi_{p,q} = \frac{\oint_R M_{p,q} \cdot I(x,y)}{\oint_R I(x,y)} \quad (1),$$

где $M_{p,q}$ - функция моментов, $I_{x,y}$ - распределение интенсивности, p,q - целые числа.

Сам же комбинированный пучок (распределение интенсивности) мы можем представить в виде суммы парциальных составляющих - функции с определёнными амплитудами

$I(x,y) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_{m,n}^2$. Но, важно отметить здесь то, что правую часть выражения для мо-

ментов [1] мы можем рассчитать, а левую измерить на эксперименте. Анализируя амплитуды и фазы парциальных пучков мы можем, с одной стороны, восстановить структуру такого пучка, а с другой управлять им.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 20-37-90066, №20-47-910002 теоретические результаты, грант № 19-29-01233 результаты моделирования, грант № 20-37-90068 экспериментальные исследования).

Список литературы

1. Franson, M. Laser speckle and applications in optics / M. Franson. – London: Academic Press Inc., 1979. – 174 p.
2. Čižmár, T. In situ wavefront correction and its application to micromanipulation / T. Čižmár, M. Mazilu, K. Dholakia // Nature photonics. – 2010. – Vol. 4. – P. 388-394.
3. Plöschner, M. Seeing through chaos in multimode fibres / M. Plöschner, T. Tyc, T. Čižmár // Nature photonics. – 2015. – Vol. 9. – P. 529–535.
4. Kirilenko, M.S. Simulation of optical signals propagation in a random media / M.S. Kirilenko, S.N. Khonina // Proceeding International Conference Information Technology and Nanotechnology. – 2016. – P. 55-65.
5. Зимняков, Д.А. Исследование статистических свойств частично-развитых спекл-полей применительно к диагностике структурных изменений кожи человека / Д. А. Зимняков, В. В. Тучин, С. Р. Утц // Оптика и спектроскопия. -1994. - №5.С. 13-16.
6. M. Berry and M. Dennis, “Phase singularities in isotropic random waves,” Proc. R. Soc. Lond. A 456, 2059–2079 (2000).
7. Volyar, A., Bretsko, M., Akimova, Y.A., Egorov, Y.U. Measurement of the vortex spectrum in a vortex-beam array without cuts and gluing of the wavefront (2018) Optics Letters, 43 (22), pp. 5635-5638.
8. Volyar, A., Bretsko, M., Akimova, Y., Egorov, Y. Measurement of the vortex and orbital angular momentum spectra with a single cylindrical lens (2019) Applied Optics, 58 (21), pp. 5748-5755.
9. Volyar, A., Bretsko, M., Akimova, Y.A., Egorov, Y.U. Vortex avalanche in the perturbed singular beams (2019) Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision, 36 (6), pp. 1064-1071.
10. Volyar, A., Bretsko, M., Akimova, Y.A., Egorov, Y. Orbital angular momentum and informational entropy in perturbed vortex beams (2019) Optics Letters, 44 (23), pp. 5687-5690.
11. Volyar, A.V., Bretsko, M.V., Akimova, Y.E., Egorov, Y.A. Beyond the light intensity or intensity moments and measurements of the vortex spectrum in complex light beams (2018) Computer Optics, 42 (5), pp. 736-743.
12. Volyar, A.V., Bretsko, M.V., Akimova, Y.E., Egorov, Y.A. Avalanche instability of the orbital angular momentum higher order optical vortices (2019) Computer Optics, 43 (1), pp. 14-24.

Исследование изменений оптических и термических свойств кожи человека при ультразвуковом воздействии *in vivo*

Сурков Ю. И.¹, И.А. Серебрякова^{1,2}, А.Н. Башкатов^{1,2}, Э.А. Генина^{1,2}, В.В. Тучин^{1,2,3}

¹СГУ им. Н. Г. Чернышевского

²Томский государственный университет

³Институт проблем точной механики и управления РАН

e-mail: surkov9898@gmail.com

Интерес к применению оптических методов для диагностики и терапии различных заболеваний постоянно растет в связи с их достаточно высокой точностью, эффективностью и безопасностью для пациента.

В связи с тем, что доставка излучения к области исследования или воздействия через поверхностные ткани, к числу которых относится и кожа, связана с большими потерями, из-за многократного рассеяния излучения, увеличение прозрачности этих биотканей остается актуальной проблемой. Перспективным методом решения проблемы является оптическое просветление биологических тканей [1,2].

Для эффективного изменения рассеивающих свойств биотканей применяют, в частности, гипертонические растворы жидкостей, называемые оптическими просветляющими агентами (ОПА) [1, 2].

Транэпидермальная доставка лекарственных препаратов и ОПА привлекает большое внимание исследователей, значительное число работ посвящено разработке методов преодоления эпидермального барьера, который препятствует свободной диффузии препаратов с поверхности кожи в ее более глубокие слои. Для увеличения проницаемости эпидермиса для ОПА используются различные физические подходы, в том числе ультразвуковое воздействие (УЗ) [2].

Широкое применение техники сонофореза для увеличения скорости и глубины проникновения ОПА в кожу требует изучения его воздействия не только на поверхностный слой эпидермиса, но и на более глубокие слои биотканей [3].

При изучении действия УЗ на биоткани наблюдались: нагрев облучаемого участка, тенденция к выравниванию концентраций растворённых веществ вне и внутри клетки, тисотропный и тиксотропный эффекты [4]. Однако влияние различных параметров УЗ воздействия на оптические и термические характеристики кожи недостаточно исследовано.

Объектом исследования служила кожа тыльной стороны кисти четырёх добровольцев обоих полов в возрасте 19 - 22 лет.

Для определения влияния УЗ облучения на оптические свойства кожи человека облучение тыльной стороны кисти УЗ проводилось в течение 30 минут через каждые 5 минут по 1 минуте. Сканирование исследуемого участка кожи проводилось каждые пять минут в течение одного часа с помощью оптического когерентного томографа, работающего на центральной длине волны 930 ± 5 нм. Таким образом, общее время наблюдения составляло 60 минут, 30 минут с периодическим сонофорезом и 30 минут без каких-либо дополнительных воздействий.

Мониторинг термических характеристик ладони человека проводился с помощью тепловизионной камеры с внутренней стороны кисти в течение 5 минут: во время УЗ облучения тыльной стороны кисти в течение минуты и еще 4 минуты после. Для определения влияния кровотока в области УЗ облучения на нагрев кожи проводилась серия экспериментов с искусственной окклюзией и без неё.

Разработана математическая модель взаимодействия УЗ излучения с многослойной структурой биологической ткани (ткани ладони человека в области III и IV пястных костей).

На основе проведенного анализа влияния УЗ воздействия на многослойную систему тканей в области кисти с точки зрения теплового воздействия на биоткани получены рекомендуемые значения параметров для УЗ просветления кожи. Результаты ОКТ мониторинга свидетельствуют о статистически значимом повышении прозрачности кожи при УЗ облучении, сохраняющейся на более чем 30 минут.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-52-56005.

Список литературы

1. *Costantini I., Cicchi R., Silvestri L., Vanzi F., and Pavone F. S.* In-vivo and ex-vivo optical clearing methods for biological tissues: review // *Biomed. Opt. Express*, 2019, vol. 10, no. 10, pp. 5251-5267.

2. Genina E.A., Bashkatov A.N., Sinichkin Yu.P., Yanina I.Yu., Tuchin V.V. Optical Clearing of Tissues: Benefits for Biology, Medical Diagnostics and Phototherapy // Chapter 10 in: Handbook on Optical Biomedical Diagnostics, Vol. 2: Methods, 2nd ed., Valery V. Tuchin, Bellingham, Washington: SPIE Press, 2016, pp. 565-937.
3. Polat B. E., Hart D., Langer R., and Blankschtein D. Ultrasound-mediated transdermal drug delivery: mechanisms, scope, and emerging trends // J. Control. Release, 2011, vol. 152, no. 3, pp. 330-348.
4. Акопян В.Б. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами. // М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2005. - 224 с.

Острая фокусировка света круговой поляризации, ограниченного полукруглой апертурой

Зайцев В. Д.¹, Стафеев С.С.^{1,2}, Котляр В.В.^{1,2}

¹Самарский университет

²ИСОИ РАН

e-mail: zaicev-vlad@yandex.ru

Острая фокусировка лазерного излучения получила в настоящее время широкое распространение из-за уникальных свойств формируемых фокусных пятен. В частности, можно получать фокусные пятна с размерами меньше скалярного дифракционного предела [1], фокусы с большой глубиной – оптические иглы [2,3], световые туннели [4,5], цепочки фокусов [6–8] и т.д.

Большая часть работ по острой фокусировке (например, ранее отмеченные [1–8]) посвящена изучению острой фокусировки цилиндрических векторных пучков (ЦВП). Поляризация в каждой точке ЦВП линейна, однако ее направление меняется непрерывно, совершая один или несколько оборотов при изменении азимутального угла от 0 до 2π . Обычно поляризация в ЦВП совершает только один оборот – это радиально-поляризованные пучки, в которых поляризация направлена вдоль радиуса, или азимутально-поляризованные пучки, в которых она, соответственно, направлена перпендикулярно радиусу. Однако используемая поляризация при острой фокусировке не ограничена применением только ЦВП.

В данной работе моделировалась фокусировка плоской волны с круговой поляризацией (длина волны 532 нм) объективом с числовой апертурой $NA=0,95$. Волновой фронт считался плоским. При интегрировании по формулам Ричардса-Вольфа полукруглая апертура задавалась путем ограничения азимутального угла от 0 до π .

$$U(\rho, \psi, z) = -\frac{if}{\lambda} \int_0^{\alpha_{\max}} \int_0^{\pi} B(\theta, \varphi) T(\theta) P(\theta, \varphi) \times \\ \times \exp[ik[\rho \sin\theta \cos(\varphi - \psi) + z \cos\theta]] \sin\theta d\theta d\varphi$$

где $U(\rho, \psi, z)$ – напряжённость электрического или магнитного поля, $B(\theta, \varphi)$ – электрическое или магнитное поле на входе широкоапертурной системы в координатах выходного зрачка (θ – полярный угол, φ – азимутальный), $T(\theta)$ – функция аподизации линзы, f – фокусное расстояние, $k=2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны (в моделировании считалась равной 532 нм), $\alpha_{\max}$ – максимальный полярный угол, определяемый числовой апертурой линзы ($NA = \sin\alpha_{\max}$), $\mathbf{P}(\theta, \varphi)$ – вектор поляризации, для напряжённости электрического и магнитного полей имеющий вид:

$$P(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} 1 + \cos^2 \varphi (\cos \theta - 1) \\ \sin \varphi \cos \varphi (\cos \theta - 1) \\ -\sin \theta \cos \varphi \end{bmatrix} a(\theta, \varphi) + \begin{bmatrix} \sin \varphi \cos \varphi (\cos \theta - 1) \\ 1 + \sin^2 \varphi (\cos \theta - 1) \\ -\sin \theta \sin \varphi \end{bmatrix} b(\theta, \varphi)$$

где $a(\theta, \varphi)$ и $b(\theta, \varphi)$ – функции, описывающие состояние поляризации x - и y - компонент напряжённости фокусируемого пучка.

Было показано, что при фокусировке света с правой и левой круговой поляризацией фокусное пятно получается эллиптическим – вытянутым вдоль оси y , и в зависимости от направления поляризации его центр смещается примерно, на 0,05 мкм в разные стороны вдоль оси x . Так же было показано, что рядом с фокусным пятном расположена область обратного потока (на расстоянии 0,25 мкм от центра). В зависимости от направления поляризации она расположена или справа или слева от фокусного пятна. Таким образом, по смещению пятна в фокусе можно определять состояние поляризации падающего излучения.

Список литературы

1. R. Dorn, S. Quabis, and G. Leuchs, «Sharper Focus for a Radially Polarized Light Beam,» Phys. Rev. Lett. 91, 233901 (2003).
2. T. Grosjean and I. Gauthier, «Longitudinally polarized electric and magnetic optical nano-needles of ultra high lengths,» Opt. Commun. 294, 333–337 (2013).
3. J. Guan, J. Lin, C. Chen, Y. Ma, J. Tan, and P. Jin, «Transversely polarized sub-diffraction optical needle with ultra-long depth of focus,» Opt. Commun. 404, 118–123 (2017).
4. Y. Yu, H. Huang, M. Zhou, and Q. Zhan, «Engineering of multi-segmented light tunnel and flat-top focus with designed axial lengths and gaps,» Opt. Commun. 407, 398–401 (2018).
5. C. Zheng, S. Su, H. Zang, Z. Ji, Y. Tian, S. Chen, K. Mu, L. Wei, Q. Fan, C. Wang, X. Zhu, C. Xie, L. Cao, and E. Liang, «Characterization of the focusing performance of axial line-focused spiral zone plates,» Appl. Opt. 57, 3802–3807 (2018).
6. J. Lin, R. Chen, P. Jin, M. Cada, and Y. Ma, «Generation of longitudinally polarized optical chain by 4π focusing system,» Opt. Commun. 340, 69–73 (2015).
7. Y. Yu and Q. Zhan, «Generation of uniform three-dimensional optical chain with controllable characteristics,» J. Opt. 17, 105606 (2015).
8. Z. Xiaoqiang, C. Ruishan, and W. Anting, «Focusing properties of cylindrical vector vortex beams,» Opt. Commun. 414, 10–15 (2018).

Совмещение магнитно-резонансной и флуоресцентной томографии, как метод регистрации молекулярных событий *in vivo*.

Соловьев И. Д.¹, Коновалов А.Б.², Власов В.В.², Богданов А.А.¹, Тучин В.В.^{3,4,5},
Савицкий А.П.¹

¹ФИЦ Биотехнологии РАН

²РФЯЦ ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина

³СГУ им. Н.Г. Чернышевского

⁴НИ ТГУ

⁵ИПТМУ РАН

e-mail: i.solovyev@fbras.ru

Одна из проблем оптической флуоресцентной томографии при наблюдении за мечеными объектами *in vivo* – привязка флуоресцентного изображения к анатомии и морфологии организма. Определение параметров флуоресцентного сигнала позволяет судить о молекулярных событиях, происходящих с меткой. В то же время магнитно-резонансная томография (МРТ) позволяет с высоким разрешением получить изображения строения исследуемого живого объекта. С развитием приборостроения МРТ появились относительно доступные МРТ томографы на постоянных магнитах, имеющие разрешение десятки доли миллиметров и требующие меньшие затраты для поддержания их работы по сравнению с приборами на основе сверхпроводящих магнитов. Совмещение магнитно-резонансной и флуоресцентной томографии позволит привязать молекулярные события к их локации в организме и использовать для новых доклинических исследований.

В данной работе выполнялось прототипирование волоконного зонда для одновременной регистрации МРТ и флуоресцентного сигнала для оптической реконструкции области свечения. Предполагается, что зонд должен фиксироваться на теле мыши внутри катушки магниторезонансного томографа. Оптоволоконный зонд должен представлять из себя параллелепипед, на грани которого, прилегающей к телу, закреплены волоконные выходы, половина которых будет использоваться для возбуждения флуоресценции с помощью импульсного лазера, вторая часть будет использоваться для регистрации эмиссии с пикосекундным временным разрешением. Для определения необходимых параметров волоконного зонда, таких как расстояния между волокнами и диаметр кора, были созданы прототипы, регистрирующие флуоресцентный сигнал фантома с флуоресцентной меткой, имитирующему ткань животного. На основании полученных данных при сканировании фантома была проведена верификация ранее разработанного алгоритма реконструкции флуоресцентного изображения с параметрами флуоресценции [1]. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, мегагрант 14.W03.31.0023.

Список литературы

1. Konovalov A.B., Vlasov V.V. A new method for separate reconstruction of fluorophore absorption and fluorescence lifetime in time domain: first results of a numerical experiment, Proc. SPIE 11457, 1145703 (2020).

Исследование трансформации оптических вихревых пучков при фокусировке зонными пластинками

Савельева А. А.¹, Козлова Е.С.¹, Котляр В.В.²

¹Самарский университет

e-mail: lexis2450@gmail.com

Вихревые лазерные пучки получили довольно широкий спектр применения в различных областях. Их используют в оптических коммуникациях [1], при создании оптических пинцетов [2], в квантовых вычислениях [3] и криптографии [4]. Формирование оптических вихрей (ОВ) довольно нетривиальная задача. Для ее решения можно использовать различные оптические элементы, такие как аксиконы [5], голограммы [6], жидкие

кристаллы [7] и фазовые спиральные пластинки (ФСП) [8]. ФСП представляют собой дифракционные оптические элементы (ДОЭ) с непрерывным рельефом. Основным недостатком ФСП является сложность в изготовлении. Для генерации ОВ так же может быть использован пространственный модулятор света [9]. Еще один способ внедрения топологического заряда (ТЗ) - это бинарные спиральные зонные пластинки (СЗП), которые могут быть фазовые или же амплитудные [10]. И те и другие могут формировать вихревые поля с заданными характеристиками, при этом их изготовление является более простой задачей, чем, к примеру, фазовых спиральных пластинок [11].

В данной работе представлено исследование трансформации оптических пучков при их фокусировке обычной зонной пластинкой (ЗП) и СЗП из кварцевого стекла. Целью исследования является оценка возможности использования СЗП для одновременного формирования и фокусировки оптического вихря. Для расчета шаблона ЗП были выбраны следующие параметры: $l = 0,532$ мкм, $f = 1$, $P = 27$ (общее количество зон эквивалентное 13 кольцам). Линейно поляризованный гауссов пучок с длиной волны $\lambda = 532$ нм, радиусом перетяжки $w = 8$ нм и внедренным в него топологическим зарядом $m = 3$ был выбран в качестве падающего излучения. При расчетах использовались следующие параметры сетки: шаги по поперечным и продольной координатам составили $\Delta x = \Delta y = 15$ нм. Шаг по псевдо-времени ct был выбран равным $\Delta(ct) = 7$ нм в соответствии с условием Куранта. В ходе анализа результатов моделирования производилось усреднение поля по 10 периодам. Также рассматривалась СЗП с ТЗ $m = 3$, максимальным радиусом $R = 4$ мкм и фокусным расстоянием $l = 532$ нм. Гауссов пучок с длиной волны $\lambda = 532$ нм, радиусом перетяжки $w = 4$ мкм и линейной поляризацией рассматривался как падающее излучение. Параметры сетки были аналогичными, как и для ЗП.

Результаты моделирования для ЗП показали, что распределение интенсивности поля имеет кольцевую структуру, при этом основной вклад в формирование поля дают компоненты E_x и E_z . Форма распределения компоненты S_z подтверждает наличие обратного потока энергии, окруженного областью прямого потока, таким образом форма обратного потока энергии имеет трубчатую структуру [12]. Результаты моделирования для ЗП показали, что в фокусе формируется три пика. Основной вклад в формирование поля также дают компоненты E_x и E_z . Форма распределения компоненты S_z повторяет форму распределения интенсивности.

Так как в фокусе для рассматриваемых элементов было получено разное распределение, для СЗП были рассчитаны поля в дальней зоне. В результате были получены распределения интенсивности в поперечной плоскости на расстояниях 5 мкм, 15 мкм и 23 мкм от рельефа СЗП. Результаты показали, что сформированные в ближней зоне пики все еще сохраняются на расстоянии 5 мкм, но по мере удаления от СЗП совмещаются и на расстоянии 15 мкм образуют кольцо, аналогичное кольцу, полученному при фокусировке ОВ обычной ЗП, а на расстоянии 23 мкм формируют пятно. Полученные результаты подтверждают возможность использования СЗП для формирования и фокусировки оптических вихрей.

Список литературы

1. Djordjevic I. B., Arabaci M., LDPC-coded orbital angular momentum (OAM) modulation for free-space optical communication, *Opt. Express*. – 2010. – V. 18. – P. 24722–24728.
2. Bhebhe N., Williams P. A. C., Rosales-Guzman C., Rodriguez-Fajardo V., Forbes A., On-demand vector holographic optical tweezers, *SPIE*. – 2019. – V. 11083(1108307), <https://doi.org/10.1117/12.2528709>.

3. Hong Y., Wang Z., Ding D., Yu B., Ultraslow vortex four-wave mixing via multiphoton quantum interference, *Optics Express*. – 2019. – V. 27. – P. 29863-29874, <https://doi.org/10.1364/OE.27.029863>.
4. Sit A., Fickler R., Alsaiahi F., Bouchard F., Larocque H., Gregg P., Yan L., Boyd R. W., Ramachandran S., Karimi E., Quantum cryptography with structured photons through a vortex fiber, *Optic Letters*. – 2018. – V. 43(17). – P. 4108-4111, <https://doi.org/10.1364/OL.43.004108>.
5. Banerjee J., Rayb M., Unconventional generation of optical vortex beam using axicon pair and a birefringent lens: Validation of plasmonic excitation, *Appl. Phys. Lett.* – 2017. – V. 110(181105), <https://doi.org/10.1063/1.4982875>.
6. Аксенов В. П., Венедиктов В. Ю., Севрюгин А. А., Турсунов И. М., Формирование оптических вихрей с помощью голограмм с асимметричным профилем штриха, *Оптика и спектроскопия*. – 2018. – Т. 124(2), DOI: 10.21883/OS.2018.02.45535.185-17.
7. Kitamura K., Kitazawa M., Noda S., Generation of optical vortex beam by surface-processed photonic-crystal surface-emitting lasers, *Optics Express*. – 2019. – V. 27(2). – P. 1045-1050, <https://doi.org/10.1364/OE.27.001045>.
8. Moh K. J., Yuan X.-C., Tang D. Y., Cheong W. C., Zhang L. S., Generation of femtosecond optical vortices using a single refractive optical element, *Applied Physics Letters*. – 2006. – V. 88(091103), <https://doi.org/10.1063/1.2178507>.
9. Pal S. K., Senthilkumaran P., Synthesis of Stokes vortices, *Optics Letters*. – 2019. – V. 44(1). – P. 130-133, <https://doi.org/10.1364/OL.44.000130>.
10. Котляр, В. В., Ковалев А. А., Козлова Е. С., Порфирьев А. П., Спиральная фазовая пластинка со множеством центров сингулярности, *Компьютерная оптика*. – 2020. – Т. 44(6). – С. 901-908. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-774.
11. Козлова Е. С., Исследование влияния параметров амплитудных спиральных зонных пластинок на формируемый обратный поток энергии, *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 6. – С. 1093-1097. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1093-1097.
12. Stafeev S. S., Kotlyar V. V., Nalimov A. G., Kozlova E. S., The nonvortex inverse propagation of energy in a tightly focused highorder cylindrical vector beam, *IEEE Photonics J.* – 2019. – V. 11(4). – P. 2921669, DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2921669.

Волоконно-оптический датчик для продолжительного мониторинга радиационной обстановки в зонах с высокой дозой экспозиционного излучения

Дмитриева Д. С.¹, Давыдов В.В.^{2,3}, Пилипова В.М.¹, Дудкин В.И.¹, Рудь В.Ю.^{3,4}

¹СПбГУТ

²СПбПУ

³Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии

⁴ФТИ им. А.Ф.Иоффе

e-mail: emilylitov@gmail.com

На сегодняшний день очень большое распространение получили научные и промышленные предприятия, работа которых основана на использовании радиоактивных

материалов [1,2]. Повсеместное строительство подобных объектов привело к увеличению количества утечек радиации в почву и воду. В случае таких утечек часто происходят ситуации, когда экранирование, выстроенное вокруг радиационно-опасных объектов, не предотвращает выход радиоактивного излучения за пределы защитной зоны [2]. В результате в местах утечек происходят техногенные катастрофы, последствия которых редко возможно полностью устранить. Именно поэтому основной задачей современной физики является разработка прибора, с помощью которого можно осуществить дистанционный контроль радиационной обстановки на расстоянии более 10 км в автоматическом режиме.

Для проведения подобных измерений отлично подходят волоконно-оптические датчики. Существующие в данный момент волоконно-оптические датчики, работающие на основе измерения изменения поляризации лазерного излучения под действием γ -излучения, плохо подходят для измерения радиационной обстановки в случае, если экспозиционная доза облучения изменяется на несколько порядков за короткий промежуток времени. Датчики на основе измерения поляризации способны измерять падение мощности лазерного излучения на 0.05 дБ. У подобных приборов есть еще один существенный минус: при больших экспозиционных дозах облучения лазерное излучение полностью затухает и датчики прекращают свою работу на долгое время, так как время релаксации оптического волокна составляет более 10^6 с [3-5]. В некоторых случаях, если воздействие было слишком долгим или доза была слишком большой, оптическое волокно не восстанавливается до исходного состояния (происходит разрушение структуры волокна). В таких случаях волоконно-оптические датчики становятся полностью непригодными для дальнейшей работы. Из-за таких существенных недостатков волоконно-оптических датчиков, работающих на основе измерения изменения поляризации, в настоящее время крайне актуальна разработка новых моделей.

В предыдущих экспериментах [3-5] нами был разработан метод по контролю времени релаксации оптического волокна, подвергшегося влиянию γ -излучения. Использование предложенного метода позволяло значительно ускорить релаксационный процесс, в определенных случаях время восстановления оптического волокна к исходным параметрам составляло около 100 с [3-5].

Проведенные исследования [3-5] позволяют предложить использовать в качестве датчика оптическое волокно длиной 100 м с сердцевинной $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ с различной степенью легирования. Как и в проведенных ранее экспериментах, для восстановления прозрачности оптического волокна используется дополнительное лазерное излучение с длиной волны $\lambda=1310$ нм. На рис. 1 представлены результаты измерений уровня радиационно-наведенных потерь в датчике при изменении экспозиционной дозы облучения от 0.1 до 1000 Гр.

Анализ представленных результатов показывает, что чувствительность данного оптического волокна находится в прямой зависимости от процента легирования. Это позволяет использовать датчик для фиксирования уменьшения мощности лазерного излучения на выходе волоконно-оптической линии связи на 0.2 дБ.

Анализ полученных результатов подтверждает возможность использования разработанного датчика для мониторинга и контроля радиационной обстановки. Повышенная чувствительность датчика позволяет контролировать изменение радиационного фона вблизи объектов, использующих в своей работе радиоактивные материалы.

Список литературы

1. Davydov, R., Antonov, V., Makeev, S., Batov, Y., Dudkin, V., Myazin, N. New high-speed system for controlling the parameters of a nuclear reactor in a nuclear power plant. E3S Web of Conferences, vol. 140, pp. 02001, 2019.

2. Davydov, R., Antonov, V., Angelina, M. Parameter Control System for a Nuclear Power Plant Based on Fiber-Optic Sensors and Communication Lines. Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2019, стр. 42–45, 8906791, 2019
3. Dmitrieva, D., Pilipova, V., Andreeva, E., Dudkin, V., Davydov, V. Method for determination of negative influence to γ - radiation on fiber optic information transmission systems. Proceedings of ITNT 2020 - 6th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology, 9253348, 2020
4. Dmitrieva D, Pilipova V, Dudkin V and Rud V. Journal of Physics: Conference Series 1697(1) 012145, 2020
5. Dmitrieva D, Pilipova V, Davydov V and Valiullin L. Journal of Physics: Conference Series 1695(1) 012130, 2020

Исследование и контроль модового состава микроструктурированного волокна

Пчелкин Г. А.^{1,2}, Фадеев В.Б.¹, Демидов В.В.², Давыдов В.В.^{1,3}

¹СПбПУ

²АО НПО ГОИ им. С.И. Вавилова

³Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии

e-mail: beegrig@mail.ru

Работа посвящена изучению построения микроструктурированного волокна и контроля модового состава и дефектов оптических волокон. Развитие науки и технологий неразрывно связано с увеличением объемов передаваемой информации. Среди наземных сетей связи наибольшими преимуществами обладают волоконно-оптические линии (ВОЛС). Необходимо отметить, что ВОЛС входят также в системы сотовых и спутниковых линий связи, выполняя в их составе важную функцию. Основной проблемой при модернизации ВОЛС, является предел по скорости и объему передаваемых данных по одомодовому волокну, как на магистральных, так на локальных линиях связи. Технологии спектрального уплотнения в каналах связи достигли своего предела, дальнейшее уплотнение приводит к потере информации или резкому увеличению затухания сигнала при передаче. Использование многомодового волокна в магистральных линиях связи связано с большими трудностями по обеспечению режима термостабилизации, использование которого на больших расстояниях не всегда оправдано. Поэтому проводятся различные разработки и исследования для решения этой задачи.

Технология изготовления микроструктурированного волокна с заданным модовым составом заключается в выборе внутренней структуры, которая собирается с помощью капилляров и далее вставляется в кварцевую трубу для дальнейшей вытяжки. Далее стекловолокна с концентрическими двулучепреломляющие или неконцентрическими сердцевинами скручивают на высокой скорости при прохождении сквозь миниатюрную печь в вытягивающей установке. Для контроля модового состава и дефектов в оптических волокне разработана экспериментальный стенд.

Перед изготовлением волокна выполняется численный расчет его модовых характеристик. Расчет был выполнен в программе COMSOL Multiphysics для следующих параметров волокна с смещенной сердцевиной: количество порядков отверстий круглого сечения – 4; шаг структуры (расстояние между соседними отверстиями) – 11 мкм; диаметр

отверстия – 5,5-8,8 мкм (отношение диаметра отверстия к шагу структуры – 0,65-0,70); внешний диаметр волокна – 125 мкм; длина волны лазерного излучения $\lambda = 1550$ нм. Полученные теоретические расчеты показывают большие возможности данной структуры оптического волокна, что характеризуется диапазоном значения $0,65 \leq k < 0,70$, благодаря чему световод рассматриваемой конструкции поддерживает распространение трех пространственных мод (LP_{01} , LP_{11} , LP_{21}). Необходимо отметить, что пространственные моды LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} имеют схожее поперечное распределение интенсивности излучения. Поэтому при суммировании на фотоприемники передаваемых оптических сигналов получается наиболее стабильный результат (на картине распределения поля должно быть четкое кольцо).

Результаты исследований выявили зависимости модового состава от вращения заготовки. Полученные данные смогли показать что собранная нами схема способна определять модовый состав и вихревые поля в различных микроструктурированных волокнах. Дальнейшее развитие данной схемы будет идти в сторону упрощения и увеличение точности измерений. Если рассматривать получившейся результат можно заметить зависимость количества мод, которые мы видим, от скорости вращения заготовки на метр длины волокна. В дальнейшем планируется оптимизировать работу по выбору внутренней структуры, закрученности и давления, что должно привести в улучшению результата, так как на данный момент четких трех мод получено не было.

Список литературы

1. Grebenikova, N. Remote control of the quality and safety of the production of liquid products with using fiber-optic communication lines of the Internet // Grebenikova, N., Davydov, V., Moroz, A., Bylina, M., Kuzmin, M./ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 497(1). – P. 012109.
2. Burdin, V.A. New silica laser-optimized multimode optical fibers with extremely enlarged 100- μ m core diameter for gigabit onboard and industrial networks // Burdin, V.A., Dashkov, M.V., Demidov, V.V., Zhukov, A.E., Bourdine, A.V. / Fibers. - 2020. – Vol. 8(3). P. 18.

Развитие спектроскопии нагрева ядерных спинов в объемных кристаллах n-GaAs

Литвяк В. М.¹, Чербунин Р.В.¹, Калевич В.К.^{1,2}, Кавокин К.В.¹

¹Лаборатория оптики спина им. И. Н. Уральцева

²ФТИ им. А. Ф. Иоффе,

e-mail: valiok.ok@gmail.com

Ядра решётки большинства полупроводников обладают ненулевыми магнитными моментами, которые взаимодействуют между собой через диполь-дипольное взаимодействие и слабо взаимодействуют с колебаниями решетки. В арсениде галлия скорости диполь-дипольного и спин-решеточного взаимодействий ядер могут отличаться на шесть порядков [1]. Такое сильное различие позволяет понижать температуру ядерной спиновой системы (ЯСС) до нескольких микрокельвин, когда сам кристалл находится при температуре жидкого гелия. Понизить температуру ЯСС возможно методом оптического охлаждения с последующим адиабатическим размагничиванием вплоть до поля, которое создают ядерные спины друг на друге. Такое поле называется локальным полем B_L и оно

ограничивает величину спиновой температуры, до которой возможно охладить ЯСС. Для GaAs $B_L = 1.45$ Гс. Наличие квадрупольного взаимодействия в образце приводит к расщеплению спиновых уровней ядер Ga и As на два кramerсовых дублета, каждый из которых имеет уширение порядка энергии спина ядра в B_L . При этом минимально возможная спиновая температура теперь определяется энергией расщепления на эти дублеты, которая может в разы превышать энергию диполь-дипольного взаимодействия.

В данной работе мы развили методику спектроскопии отогрева ядерных спинов, которая ранее была предложена в работах [1,2]. А именно, мы реализовали измерения спектров поглощения ядерных спинов в четырёх взаимных ориентациях переменного и статического магнитных полей. Так, у нас есть две параллельные ориентации: переменное и статическое поля параллельны друг другу и параллельны лучу накачки, либо они параллельны друг другу, но перпендикулярны лучу накачки. Также возможны две поперечные геометрии: статическое поле параллельно лучу накачки, а переменное поле направлено перпендикулярно ему или наоборот, статическое поле направлено перпендикулярно лучу, а переменное поле параллельно ему. При этом наличие двух параллельных ориентаций переменного и статического полей является необходимым для определения вида квадрупольного взаимодействия, хотя в экспериментах по детектированию сигнала ЯМР параллельные геометрии не используются из-за быстрого спада поглощения с ростом статического поля. Наш эксперимент состоит из нескольких этапов, каждый из которых мы контролируем путем измерения степени поляризации фотолюминесценции. Вначале происходит оптическое охлаждение ЯСС в продольном магнитном поле и адиабатическое размагничивание, затем прикладывается переменное магнитное поле, вследствие чего температура ядерных спинов повышается, на последнем этапе измеряется изменение спиновой температуры, которое связано с коэффициентом поглощения. Изменяя частоту переменного поля, мы получаем спектры поглощения.

Мы измерили спектры поглощения ядерных спинов в четырех ориентациях статического и переменного магнитных полей. В каждой из ориентаций наблюдалась своя эволюция пиков поглощения с увеличением статического магнитного поля. Для объяснения различия поведения спектров в зависимости от магнитного поля нами была разработана теоретическая модель, позволяющая определять частоты переходов между ядерными спиновыми уровнями. Энергии этих переходов различны для каждой из четырех ориентаций и зависят от типа и величины квадрупольного взаимодействия. Сравнение расчетных спектров поглощения с зарегистрированными экспериментально позволило нам выяснить, что в части исследованных образцов причиной квадрупольного взаимодействия является электрическое поле, вызванное градиентом концентрации основных носителей в кристаллах n-GaAs.

Развитая нами методика спектроскопии отогрева ядерных спинов позволяет измерять спектры поглощения в нулевом и слабых магнитных полях и из их анализа выявлять виды квадрупольных взаимодействий в образцах, вызванные различными типами деформации либо внутренним электрическим полем.

Авторы благодарны Санкт-Петербургскому государственному университету за грант № 73031758 и Российскому Фонду Фундаментальных исследований за гранты № 19-52-12043 и № 19-32-90084.

Список литературы

1. Оптическая ориентация, под ред. Захарченя Б.П., Майер Ф., глава 5, 1989 г.
2. Калевич В. К., Флейшер В. Г., Известия АН СССР, серия физическая, том. 47, 2294-2298, 1983 г.

Способ создания фазовых ДОЭ для гиперспектральной аппаратуры

Фомченков С. А.¹

¹ИСОИ РАН — филиал ФНИЦ Кристаллография и фотоника РАН

e-mail: s.a.fom@mail.ru

Наибольшую популярность в оптических системах сегодня завоевали дифракционные оптические элементы (ДОЭ). Дифракционные решетки, использующие явление дифракции и соответственно лучше устраняющие хроматические aberrации, по сравнению с линзами и другими оптическими элементами стали неотъемлемой частью оптических схем для гиперспектральной аппаратуры. Существует два типа дифракционных решеток амплитудные и фазовые. Амплитудные решетки имеют существенно меньшую эффективность, в сравнение с фазовыми решетками, в которых решетка имеет пилообразную или двухуровневую форму, так как перекрывают часть падающего света [1].

Подобные фазовые структуры создаются локальным удалением объема кварцевого стекла через защитную маску. В качестве масок обычно используются стойкие и защитные покрытия с высокой селективностью травления по отношению к кварцевому стеклу.

Существует большое количество способов создания микрорельефа фазовых ДОЭ. Самыми применяемыми за счет своих свойств и допустимых параметров травления в настоящее время являются плазмохимическое травление (ПХТ) и жидкостное травление. Однако, ПХТ является весьма сложным этапом изготовления ДОЭ, требующим наличия дорогостоящего оборудования, специалистов и обладающим высокой трудоемкостью и необходимостью больших временных затрат [2], по сравнению с жидкостным травлением.

Поэтому в данной работе было проведено экспериментальное исследование способа создания фазовых ДОЭ для гиперспектральных оптических схем с помощью жидкостного травления. Фазовые ДОЭ для гиперспектральной аппаратуры в частном случае [3] представляет собой одномерную фазовую решетку в кварцевой подложке с периодом $d=10$ мкм и скважностью $q=0,5$ и глубиной травления h рассчитанной для средней длины волны диапазона оборудования, в частности от 400 до 1000 нм. В таком случае h , с учетом характерного показателя преломления кварца в видимом диапазоне $n=1,46$ составит порядка 760 нм.

С целью создания микрорельефа на поверхности подложки с помощью установки магнетронного напыления на очищенную поверхность кварцевой подложки наносилась пленка Cr толщиной 50 нм. Далее в пленке, с помощью прямой лазерной записи сфокусированным лазерным излучением, формировалась топологическая картина будущей маски для жидкостного травления, за счет термохимического окисления пленки хрома. В данной работе, также было рассмотрено формирования масок для последующего жидкостного травления с помощью фоторезиста.

После формирования маски одним из предложенных способов необходимо было произвести жидкостное травление кварцевой подложки на заданную глубину в 760 нм, тем самым сформировав бинарную фазовую решетку. Для этого были исследованы различные химические растворы, позволяющие селективно травить кварц через маску оксида хрома или фоторезиста.

В ходе исследований были установлены наиболее эффективные растворы, позволяющие осуществлять процесс травления кварца с наибольшей скоростью, при этом сохраняющие низкую шероховатость протравленной поверхности и структуру фазового ДОЭ.

Одним из наиболее эффективных растворов оказался раствор, состоящий из плавиковой кислоты, аммония-церия азотнокислого, аммония йодистого и дистиллированной воды. Далее с целью оптимизации процессов травления и улучшения качества получаемых элементов были исследованы и оптимизированы параметры раствора и установлены дополнительные факторы влияющие на процесс жидкостного травления.

В результате проделанных исследований был установлен оптимальный раствор для жидкостного травления, позволяющий создавать фазовые ДОО, не уступающие по качеству элементам, изготовленным с помощью ПХТ. При этом существенно снижены материальные и трудозатраты, а также удалось на порядок уменьшить необходимое время на изготовление, без потери качества.

В итоге в работе представлены и исследованы изготовленные ДОО с помощью предложенного способа, показана их высокая эффективность и применимость в оптических схемах для гиперспектральной аппаратуры.

Список литературы

1. Технология создания ДОО. / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, В.А. Соيفер, Г.В. Успенев // Методы компьютерной оптики / под ред. В.А. Соифера, М., 2000. – С. 239 – 310.
2. Волков А.В., Казанский Н.Л., Колпаков В.А. Расчет скорости плазмохимического травления кварца. – Компьютерная оптика. – Вып. 21, 2001. – С. 121 – 125.
3. Скиданов Р.В., Бланк В.А. Двухдиапазонная дифракционная решётка для спектрометра на основе схемы Оффнера// Компьютерная оптика. — 2016. — Т. 40. № 6. — С. 968–971.

Восстановление структуры спиральных пучков за счет цифровой регистрации пространственных характеристик света

Брецько М. В.¹, Акимова Я. Е.¹, Егоров Ю. А.¹, Воляр А. В.¹

¹КФУ им. В. И. Вернадского

e-mail: bretscko.mihail@yandex.ru

Спиральные пучки света привлекают внимание исследователей из различных областей физики и техники не только благодаря их структурной устойчивости, но и их способности переносить без искажений контуры изображений в свободном пространстве, несмотря на то, что они содержат множество стандартных вихревых пучков [1].

В данной работе показана возможность восстановления интенсивности спирального пучка света в виде формы пятиугольной звезды после разрушения ее структуры, за счет модуляции случайных фазовых добавок к пучкам Эрмита-Гаусса, которые образуют структуру пучка. Анализ проводился посредством цифрового измерения спектра амплитуд и фаз собственных мод, и на их основе показана возможность восстановления структуры такого пучка. Для построения спирального пучка с заданным распределением интенсивности в виде пятиугольной звезды мы воспользовались вычислениями, приведенными в [2]. В качестве случайных фазовых возмущений использовался SLM-модулятор (EXULUS-4K1/M) на экран которого помещалась фазовая голографическая решетка со случайными распределением фазы. Спектры мод измерялись в фокальной плоскости сферической линзы посредством анализа распределения интенсивности спирального пучка с

модовыми числами (n, l) с помощью моментов интенсивности [3], представленных в форме:

$$J_{p,q} = \frac{\oint_{R^2} M_{p,q} \cdot I(x, y)}{J_{0,0}},$$

где $M_{p,q}$ - функция моментов, $J_{0,0} = I(x, y)$ - интенсивность спирального пучка. Функция моментов принимает вид:

$$M_{p,q} = H_p(\sqrt{2}x) \cdot H_q(\sqrt{2}y).$$

Моменты интенсивности содержат амплитуды $C_{2n+1-k,k}^2$ и разности фаз β_k пучков Эрмита-Гаусса, и для их нахождения требуется провести $2(l+1)$ вычислений и составить соответствующую систему линейных уравнений [4]. Зная исходные спектры амплитуд и фаз спирального пучка, мы можем восстановить его исходную структуру. Степень восстановления исходного пучка составляет $\eta = 0.9$.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-37-90066, № 20-47-910002 - теоретические результаты, грант № 19-29-01233 - результаты моделирования, грант № 20-37-90068 - эксперимент).

Список литературы

1. Abramochkin E. Beam transformations and non-transformed beams / E. Abramochkin, V. Volostnikov // Optics Comm. 1991. V. 83. No. 1–2. P. 123 – 135.
2. Абрамочкин Е. Г. Современная оптика гауссовых пучков / Е. Г. Абрамочкин, В. Г. Волостников. – Москва: Физматлит, 2010. – 184 с.
3. Volyar A. Measurement of the vortex spectrum in a vortex-beam array without cuts and gluing of the wavefront / A. Volyar, M. Bretsko, Ya. Akimova, Yu. Egorov // Opt. Lett. 2018. V. 43(22): P. 5635 – 5638.
4. Volyar A. Fine structure of perturbed Laguerre–Gaussian beams: Hermite–Gaussian mode spectra and topological charge / A. Volyar, E. Abramochkin, Yu. Egorov, M. Bretsko, Ya. Akimova // Applied Optics. – 2020. – Vol. 59. P. 7680 – 87.

Анализ резкости интерфейсов в короткопериодных сверхрешетках GaN/AlN с использованием данных спектроскопии комбинационного рассеяния света

Давыдов В. Ю.¹, Рогинский Е.М.¹, Китаев Ю.Э.¹, Смирнов А.Н.¹, Елисеев И.А.¹, Родин С.Н.¹,
Заварин Е.Е.¹, Лундин В.В.¹, Нечаев Д.В.¹, Жмерик В.Н.¹, Смирнов М.Б.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбГУ

e-mail: Valery.Davydov@mail.ioffe.ru

Функционирование современных оптоэлектронных и электронных приборов на основе квантоворазмерных гетероструктур в системе материалов (Al,Ga)N критическим образом зависит от качества интерфейсов между различными слоями [1,2]. Разработка

новых неразрушающих методов диагностики резкости интерфейсов таких структур является весьма актуальной задачей.

В работе экспериментально и теоретически исследовались короткопериодные сверхрешетки (СР) $(\text{GaN})_m/(\text{AlN})_n$ (где m, n – количество монослоев: $m=2,4,6,8$; $n=4,6,8$), выращенные методом плазменно-активированной молекулярно-лучевой эпитаксии (РА МВЕ) и методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (MOVPE). При использовании РА МВЕ СР были выращены в металл-обогащенных условиях при низких температурах роста 690–700°C [3]. Это обеспечило двумерный рост обоих слоев в СР за счет образования на поверхности двойного адслоя из атомов III группы. Кроме того, низкие температуры ведут к кинетическому подавлению эффекта сегрегации Ga, возникающем на верхнем интерфейсе квантовых ям GaN/AlN в случае более высоких температур роста, из-за разной энергии связи атомов Ga и Al с азотом. Резкость интерфейсов обеспечивалась также высокой скоростью переключения пучков Ga и Al ($<0.3\text{с}$), падающих на подложку в режиме молекулярного пучка при сверхнизких рабочих давлениях ($<2 \cdot 10^{-5}$ Торр) азота. СР со слоями одинаковой толщины были также выращены методом MOVPE в горизонтальном реакторе при температуре 1050°C на подложке Al_2O_3 (0001) с предварительно нанесенными буферными слоями: один слой AlN или двойной слой AlN–GaN.

Экспериментально СР исследовались методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). Теоретически, с помощью расчетов *ab initio* в рамках теории функционала плотности (DFT) были изучены структурные и динамические свойства СР с резким интерфейсом и построены спектры КРС. Моделирование динамики кристаллической решетки СР с размытым интерфейсом было выполнено в рамках эмпирической модели, основанной на атом-атомных потенциалах в приближении жестких ионов [4]. Если размытый интерфейс представить как твердый раствор с профилированной концентрацией катионов, то для моделирования динамики такой гетерогенной слоистой структуры можно применить модель изомещений случайных элементов [5]. Потенциал модели, использованной в исследовании, включал члены, соответствующие кулоновскому взаимодействию и парным короткодействующим взаимодействиям отталкивания, описанным в рамках схемы Борна-Кармана. Интенсивности спектров КРС рассчитывались в рамках модели поляризуемой связи [4]. Параметры этой эмпирической модели были получены с учетом результатов *ab initio* расчетов. С использованием такой модели были смоделированы спектры КРС СР $(\text{GaN})_m/(\text{AlN})_n$ ($m=2,4,6,8$; $n=4,6,8$) с разной шириной границы раздела между слоями. Сравнение этих спектров со спектрами для СР с резким интерфейсом выявило сильные отличия для свернутых $A(\text{LO})$ фононов. Так, например, в случае СР $(\text{GaN})_8/(\text{AlN})_8$ с резким интерфейсом в спектрах должно наблюдаться два интенсивных пика, соответствующих модам $A(\text{LO})\text{-GaN}$ и $A(\text{LO})\text{-AlN}$, и шесть пиков значительно меньшей интенсивности [6]. Увеличение ширины границы раздела между слоями ведет к резкому изменению интенсивностей пиков $A(\text{LO})$ фононов в спектрах. Интенсивности основных пиков $A(\text{LO})\text{-GaN}$ и $A(\text{LO})\text{-AlN}$ уменьшаются, а интенсивности других пиков (соответствующих конфинментным фононам) возрастают. При этом наиболее заметное увеличение характерно для мод в области частот $A(\text{LO})\text{-AlN}$. Аналогичные изменения наблюдаются и в спектрах остальных изученных СР в условиях размытого интерфейса.

Наблюдаемые особенности в спектрах КРС СР выращенных методом РА МВЕ очень хорошо согласуются с предсказаниями теории для структур с резким интерфейсом, а для СР выращенных методом MOVPE они указывают на различную степень размытия интерфейса. Таким образом, результаты выполненных комплексных исследований могут быть успешно использованы при разработке технологий формирования структурно-совершенных короткопериодных СР GaN/AlN.

Список литературы

1. Beeler, M.; Trichas, E.; Monroy, E. III-nitride semiconductors for intersubband optoelectronics: A review. *Semicond. Sci. Technol.* **2013**, *28*, 074022, <https://doi.org/10.1088/0268-1242/28/7/074022>.
2. Gačević, Ž.; Eljarrat, A.; Peiró, F.; Calleja, E. Insight into high-reflectivity AlN/GaN Bragg reflectors with spontaneously formed (Al,Ga)N transient layers at the interfaces. *J. Appl. Phys.* **2013**, *113*, 183106, <https://doi.org/10.1063/1.4805054>.
3. Jmerik, V.N.; Nechaev, D.V.; Ivanov, S.V. Kinetics of metal-rich PA molecular beam epitaxy of AlGaIn heterostructures for mid-UV photonics, in: M. Henini (Ed.), *Molecular Beam Epitaxy: from Research to Mass Production*, second ed., Elsevier Inc., **2018**, pp. 135–179, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812136-8.00008-6>.
4. Smirnov, M.B.; Karpov, S.V.; Davydov, V.Yu.; Smirnov, A.N.; Zavarin, E.E.; Lundin, V.V. Vibrational spectra of AlN/GaN superlattices: Theory and experiment. *Phys. Sol. State* **2005**, *47*, 742–753, <https://doi.org/10.1134/1.1913991>.
5. Grille, H.; Schnittler, Ch.; Bechstedt, F. Phonons in ternary group-III nitride alloys. *Phys. Rev. B* **2000**, *61*, 6091–6105, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.6091>.
6. Davydov, V.; Roginskii, E.; Kitaev, Yu.; Smirnov, A.; Elisseyev, I.; Nechaev, D.; Jmerik, V.; Smirnov, M. Phonons in Short-Period GaN/AlN Superlattices: Group-Theoretical Analysis, *Ab initio* Calculations, and Raman Spectra. *Nanomaterials* **2021**, *11*, 286, <https://doi.org/10.3390/nano11020286>.

Исследование спектрально-люминесцентных свойств наноразмерных кристаллов ортованадатов иттрия и диоксида циркония, легированных ионами Tm^{3+} , Ho^{3+} , Yb^{3+}

Хрущалина С. А., Рябочкина П.А., Юрлов И.А.

МГУ им. Н. П. Огарёва

e-mail: anabel-2005@yandex.ru

Наноразмерные частицы, легированные редкоземельными (РЗ) ионами, привлекают активный интерес исследователей и обладают широкими возможностями практического применения. Возбуждение лазерным излучением в полосы поглощения РЗ ионов, как и в случае объемных соединений, приводит к возникновению в наночастицах люминесценции соответствующих РЗ-ионов. Существуют также публикации, свидетельствующие о проявлении диэлектрическими наночастицами с РЗ ионами свойств, не характерных для объемных кристаллов аналогичного состава. Одним из примеров подобного поведения является возникновение в наночастицах широкополосного «белого» излучения при возбуждении интенсивным лазерным излучением в полосы поглощения РЗ ионов [1-5]. Несмотря на большое число работ, посвященных данному явлению, мнения исследователей касаясь природы и механизмов возникновения являются различными. Нами также проводились исследования особенностей «белого» излучения в различных наноразмерных соединениях, легированных ионами Er^{3+} и Yb^{3+} [2-4], в ходе которых было установлено, что описанное излучение является тепловым. Согласно предложенному нами механизму, столь значительный нагрев наночастиц обусловлен взаимодействием свободных электронов с фононами кристаллической решетки. В свою очередь, появление свободных электронов в зоне проводимости является следствием процессов миграции электронного

возбуждения по РЗ-ионам и кооперативного взаимодействия данных ионов с дефектами решетки.

Поскольку причиной возникновения «белого» излучения в наночастицах при возбуждении лазерным излучением является их нагрев до высоких температур, нами было сделано предположение о возможности практического использования данного эффекта, например, в дерматологии для удаления новообразований [4, 5]. В настоящее время для увеличения теплового эффекта при контактном воздействии излучения ближней ИК-области спектра на биологическую ткань предлагается модификация торца волокна, подразумевающая включение в его состав сильно поглощающих примесей [6, 7]. Предварительное покрытие биоткани наночастицами, способными интенсивно нагреваться под действием лазерного излучения, может увеличивать тепловой эффект при бесконтактном воздействии излучения и не потребует модификации оптического волокна. Кроме того, предлагаемый нами способ позволит снизить мощность подводимого лазерного излучения (~1-2 Вт) и, следовательно, стоимость операции. Проведенные нами предварительные эксперименты *in-vitro* и *in-vivo* подтвердили, что воздействие лазерного излучения с длиной волны 970 нм и мощностью ~1 Вт на биологическую ткань, предварительно покрытую Yb-содержащими наночастицами, приводит к более выраженному тепловому эффекту, чем без применения наночастиц [5].

В связи с этим, представляло интерес дальнейшее уточнение особенностей и механизма возникновения «белого» излучения в наночастицах, легированных РЗ-ионами, а также подбор условий воздействия и составов, наиболее подходящих для предложенного нам применения.

В настоящей работе представлены результаты исследования спектрально-люминесцентных характеристик наноразмерных диэлектрических частиц ортованадатов иттрия и диоксида циркония, легированных ионами Ho^{3+} , Tm^{3+} , Yb^{3+} при возбуждении лазерным излучением видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра (460, 532, 808, 980, 1900 нм) с различными значениями плотности мощности. Определены параметры возбуждения для различных РЗ ионов, обеспечивающих условия нагрева наночастиц (скорость и температура нагрева, мощность и длина волны возбуждения, концентрация РЗ-ионов), оптимальные для усиления теплового действия лазерного излучения на биологическую ткань.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-5500.2021.1.2).

Список литературы

1. Marciniak L., Strek W., Hreniak D., Y. Guyot, Temperature of broadband anti-Stokes white emission in $\text{LiYbP}_4\text{O}_{12}:\text{Er}$ nanocrystals, *Appl. Phys. Lett.*, V. 105, 173113, 2014.
2. Redmond S. M., Rand S. C., Oliveira S. L., Bistable emission of a black-body radiator, *Appl. Phys. Lett.*, V. 85, 5517, 2004.
3. Tabanlı S., Cinkay Yilmaz H., Bilir G., Erdem M., Eryurek G., Di Bartolo B., Collins J., Broadband, White Light Emission from Doped and Undoped Insulators, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, V. 7, R3199- R3210, 2018.
4. Khrushchalina S.A., Ryabochkina P.A., Zharkov M.N., Kyashkin V.M., Tabachkova N.Yu., Yurlov I.A., Broadband emission from Er-contained yttrium orthophosphate and orthovanadate nanopowders excited by near infrared radiation, *J. Lumin.*, V. 205, 560–567, 2019.
5. Ryabochkina P.A., Khrushchalina S.A., Kyashkin V.M., Vanetsev A.S., Gaitko O.M., Tabachkova N.Yu., Features of the interaction of near-infrared laser radiation with Yb-doped dielectric nanoparticles, *JETP Letters*, V. 103(12), 743–751, 2016.

6. Ryabochkina P.A., Khrushchalina S.A., Yurlov I.A., Egorysheva A.V., Atanova A.V., Veselova V.O., Kyashkin V.M., Blackbody emission from CaF_2 and ZrO_2 nanosized dielectric particles doped with Er^{3+} ions, RSC Adv., 10, 26288, 2020.
7. Хрущалина С.А., Рябочкина П.А., Беляев А.Н., Бушукина О.С., Юрлов И.А., Дворянчикова М.А., Кузнецова О.А., Использование наноразмерных диэлектрических частиц, легированных ионами Yb^{3+} , для усиления теплового эффекта при воздействии на биоткань лазерным излучением ближней ИК-области спектра, Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение : прогр. и материалы 17-й Междунар. науч. конф.-шк., Саранск, 18–21 сен. 2018 г. / редкол.: К. Н. Нищев (отв. ред.) [и др.]. – Саранск : Изд-во Мордов.ун-та, 2018. – с. 148.
8. Belikov A.V., Gelfond M.L., Shatilova K.V., Sosenkova S.A., Lazareva A.A., 980 nm diode laser with automatic power control mode for dermatological applications, Proc. of SPIE-OSA Biomedical Optics, V. 9542, 95420J (1-12), 2015.
9. Wollina U., Three hundred patients treated with ultrapulsed 980 nm diode laser for skin disorders, Indian J. Dermatol., V. 61(5), 540–544, 2016.

Спектроскопия КРС, ИК поглощения и ФЛ нитрида алюминия, легированного бериллием.

Яковлева В. В.^{1,2}, Бреев И.Д.¹, Анисимов А.Н.¹, Нагалюк С.С.¹, Мохов Е.Н.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: valya_yakovleva_1999@mail.ru

Нитрид алюминия (AlN) является полупроводником с экстремально широкой запрещенной зоной ($E_g = 6.1$ эВ) [1]. Недавние исследования монокристаллического AlN, легированного Be посредством высокотемпературной диффузии из паровой фазы, показали, что Be формирует глубокие уровни акцепторного типа [2,3]. Это может быть использовано для компенсации неконтролируемых примесных центров n-типа, легирующих AlN в ходе роста, таких как кислород и кремний [4], что необходимо для получения монокристаллов AlN с экстремально высоким удельным сопротивлением.

Были проанализированы образцы, изготовленные пластин AlN. Из них 3 образца содержали Be, введенный путем диффузии, один из которых был облучен электронами. Два образца, не содержащие примеси Be, были использованы в качестве эталонов, один из них также был облучен электронами.

Образцы AlN были исследованы методом комбинационного рассеяния света (КРС) в области $180\text{--}1500\text{ см}^{-1}$. Наблюдалось, что при легировании Be и облучении электронами происходит уширение пика КРС E2 (high). Был сделан вывод, что легированный Be кристалл AlN медленнее теряет кристаллическое качество при облучении. Таким образом Be является геттером радиационных дефектов, что приводит к минимизации нарушений в решетке, по сравнению с кристаллами, не содержащими примесей, что в свою очередь повышает радиационную стойкость AlN.

Было проведено исследование серии из 5 образцов AlN методом спектроскопии инфракрасного поглощения света с использованием ИК фурье-спектрометра PerkinElmer Spectrum 100. Поглощение наблюдалось в диапазоне $950\text{--}3200\text{ см}^{-1}$. Наибольший интерес

в нашем исследовании представляют линии в диапазоне $1700\text{--}1800\text{ см}^{-1}$. Они проявляются только при легировании Be кристаллов AlN.

Для 5 образцов AlN были проведены исследования фотолюминесценции (ФЛ) под ультрафиолетовым возбуждением светодиодной лампой M365LP1-C1 (Thorlabs) и сбором света с использованием конфокального оптического микроскопа Spectra (NT-MDT SI). Линии 2.40, 2.51 и 2.73 эВ появляются при легировании Be образцов AlN, при этом линии 2.51 и 2.73 эВ относят соответственно к переходам валентная зона — V_{Al}^{2-} и V_{Al}^{3-} — зона проводимости. Появление этих линий может свидетельствовать об увеличении концентрации собственных дефектов, таких как V_{Al} . При этом образцы AlN, легированные Be, имеют намного менее интенсивную люминесценцию линий 1.56, 1.85 и 1.98 эВ, что может свидетельствовать о разрушении комплексов $V_{\text{Al}}\text{--O}_\text{N}$ [5].

Следующий этап исследования будет включать рост и исследование кристаллов AlN, легированных Li. Исследование выполнено при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-02-00649.

Список литературы

1. J.Y. Tsao et al, Adv. Electron.Mater., 4, 1600501 (2018)
2. V.A. Soltamov et al, Appl. Phys. Lett., 113, 082104 (2018)
3. E.N. Mokhov et al, Semiconductors, 54 (3), 278 (2020)
4. V.A. Soltamov et al, Appl. Magn. Reson., 44, 1139 (2013)
5. И.Д. Бреев и др., Физика и техника полупроводников, том 55, вып. 3, стр. 251-5 (2021)

Потоки энергии в остром фокусе оптических вихрей

Стафеев С. С.^{1,2}, Котляр В. В.^{1,2}

¹ИСОИ РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

²Самарский университет

e-mail: sergey.stafeev@gmail.com

Эффект обратного потока энергии известен в оптике давно [1-5]. Он заключается в том, что при фокусировке пучков с фазовой или поляризационной сингулярностью в фокусе наблюдаются области, в которых направление вектора Пойнтинга противоположно направлению распространения пучка [6].

В нашей работе мы исследовали острую фокусировку оптических вихрей с топологическим зарядом равным двум и левой круговой поляризацией. Моделирование в работе проводилось с помощью формул Ричардса-Вольфа, считалось, что свет с длиной волны 0,532 мкм фокусировался апланатическим объективом с числовой апертурой $NA=0,95$. Было показано, что в остром фокусе проекция вектора Пойнтинга на оптическую ось принимает в точке фокуса отрицательные значения. Ранее в работе [7] Бекшаев показал, что вектор Пойнтинга является суммой двух векторов: потока спина и потока орбитальной энергии. Нами было продемонстрировано, что найденный обратный поток энергии обусловлен тем, что проекция потока спина на оптическую ось отрицательна и превышает по абсолютной величине аналогичную проекцию орбитального потока энергии, которая всегда будет положительной. Также было показано, что в области фокуса поперечный поток энергии и спиновый угловой момент вращаются в разные стороны.

Список литературы

1. Ignatowsky V.S., Diffraction by a lens having arbitrary opening, Trans. Opt. Inst. Petrogr., vol. 1, 4, 1920.
2. Richards B., Wolf E., Electromagnetic Diffraction in Optical Systems. II. Structure of the Image Field in an Aplanatic System, Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci., vol. 253, 358–379, 1959.
3. Karman G.P., Beijersbergen M.W., van Duijl A., Woerdman J.P., Creation and annihilation of phase singularities in a focal field, Opt. Lett., vol. 22, 1503–1505, 1997.
4. Berry M.V., Wave dislocation reactions in non-paraxial gaussian beams, J. Mod. Opt., vol. 45, 1845–1858, 1998.
5. Vasetsov M.V., Gorshkov V.N., Marienko I.G., Soskin M.S., Wavefront motion in the vicinity of a phase dislocation: “optical vortex” Opt. Spec-trosc., vol. 88, 260–265 2000.
6. Kotlyar V.V., Stafeyev S.S., Nalimov A.G., Energy backflow in the focus of a light beam with phase or polarization singularity, Phys. Rev. A, vol. 99, 033840, 2019.
7. Bekshaev A.Y., Subwavelength particles in an inhomogeneous light field: optical forces associated with the spin and orbital energy flows, J. Opt.,vol. 15, 044004, 2013.

Выжигание провалов в спектрах ОДМР в изотопно-модифицированном карбиде кремния

Вейшторт И. П.¹, Бреев И.Д.², Баранов П.Г.², Анисимов А.Н.²

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: igorveyshtort@gmail.com

Оптически адресуемый, управляемый микроволнами и сохраняющий квантовую когерентность даже при комнатной температуре электронный спин V-центра в SiC может использоваться в качестве магнитного датчика. Дальнейшее повышение чувствительности возможно при использовании импульсных методов ОДМР и выборе оптимального материала карбида кремния с пониженной концентрацией парамагнитных дефектов и измененным содержанием изотопов ^{29}Si и ^{13}C с ядерными магнитными моментами [1]. Для этого необходимо провести исследование влияние концентрации собственных изотопов ^{29}Si и ^{13}C на спиновые свойства ансамбля V-центров в 6H-SiC [2]. Проведена оценка полуширины линий оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) в 3-х изотопно модифицированных кристаллах карбида кремния (SiC). С помощью метода 2-х частотной ОДМР спектроскопии вакансии кремния (V-центры) проанализированы спиновые пакеты V-центров, связанных сверхтонким взаимодействием с изотопами ^{13}C и ^{29}Si . Эксперименты выполнены при комнатной температуре. Проведенные эксперименты позволяют оценить возможность динамической поляризации собственных ядер SiC через спиновую поляризацию V-центров.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 19-52-12058-ННИО_а.

Список литературы

1. «Сканирующий оптический квантовый магнитометр, основанный на явлении выжигания провалов» А.Н. Анисимов, Р.А. Бабунц, И.Д. Бреев, А.П. Бундакова,

- И.В. Ильин, М.В. Музафарова, П.Г. Баранов Письма в ЖТФ 45, вып. 10, 22-26 (2019).
2. Experimental characterization of spin-3/2 silicon vacancy centers in 6H-SiC H. Singh, A.N. Anisimov, S.S. Nagalyuk, E.N. Mokhov, P.G. Baranov, D. Suter. *Phys. Rev. B* **101**, iss. 13, #134110 (2020)

Разработка ГКР-активных наноструктур на основе массива наностержней ZnO и Ag наночастиц для детектирования веществ малых концентраций

Новиков Д. В.¹, Громов Д. Г.¹, Малахов Н.¹, Савицкий А. И.¹, Дубков С. В.¹, Тарасов А. М.¹, Еганова Е.²

¹МИЭТ

²Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН

e-mail: tororo@bk.ru

Эффект гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР) известен ещё с 80-х годов 20-го века [1]. Данный эффект обеспечивает многократное усиление сигнала комбинационного рассеяния света на молекулах исследуемого вещества, что позволяет фиксировать сверхмалые концентрации аналита вплоть до единичных молекул на поверхности сенсора. Для достижения подобного эффекта применяются наночастицы металлов – как правило Cu, Ag, Au - или полупроводников с высокой проводимостью.

Наиболее часто для практических нужд изготавливают планарные ГКР-сенсоры, состоящие из диэлектрической подложки покрытой дисперсной плёнкой металлических наночастиц. Подобные структуры обладают средним коэффициентом усиления в районе 10^5 - 10^8 , однако имеют серьёзный недостаток связанный с эффектом «коффейного кольца», когда большая часть анализируемого вещества из нанесённой капли концентрируется по периметру, образуя тонкое кольцо, и сильно снижает поверхностную концентрацию на остальной площади [2, 3]. Из-за этого становится крайне трудно установить зависимость между первоначальной объёмной и исследуемой поверхностной концентрацией вещества. Для решения данной проблемы и повышения коэффициента усиления применяются трёхмерные ГКР-структуры.

В данной работе для создания трёхмерного каркаса применялся массив наностержней ZnO. Синтез массива осуществлялся с использованием гидротермального метода, обладающего рядом преимуществ для массового производства ГКР-сенсоров: технологическая простота, безопасность, невысокая стоимость, возможность управления параметрами массива. Синтез проводился 30 минут при 80 °С с применением 0,4 М гидроксида натрия и 0,01 М шестиводного нитрата цинка. После окончания процесса синтеза и сушки в вытяжном шкафу на полученном каркасе ZnO методом вакуум-термического испарения с последующей термообработкой формировался массив наночастиц серебра. Расстояние между испарителем и поверхностью образца составляло 20 см, весовая порция серебра - 6 мг. Отжиг полученных структур проводился в вакууме при температуре 300 °С в течение 30 минут.

Полученные трёхмерные ГКР-сенсоры были исследованы при помощи РЭМ. Латеральный размер наностержней ZnO в массиве варьировался в диапазоне 30-60 нм, а длина - 1-1,5 мкм. Полученные наночастицы Ag имели диаметр 50-70 нм.

В работе методом спектроскопии комбинационного рассеяния света были проведены исследования растворов Родамина-Б мкМ и нМ концентраций, наносимых дозатором ЭКОХИМ в виде капель объемом 3 мкл. Для этих целей использовался рамановский спектрометр LabRAM HR Evolution (Horiba production) с дифракционной решеткой 600 мм⁻¹. Измерения проводились при комнатной температуре на длинах волн лазера 514 и 633 нм. В результате проведенных исследований были установлены коэффициенты усиления сформированных трехмерных ГКР-сенсоров (ZnO/Ag НЧ) для двух длин волн возбуждающего излучения, а также зависимости характера и интенсивностей КРС-спектра от мощности излучения.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2020-2022 гг. соглашением FSMR-2020-0018.

Список литературы

1. A.Otto J.Billmann J.Eickmans U.Ertürk C.Pettenkofer, Physikalisches Institut III, Universität Düsseldorf, D — 4000 Düsseldorf 1. Fed. Rep. of Germany, Received 24 November 1983, Available online 18 September 2002
2. Lan Meng, Song Hu, Chaoji Xu, Xiangfu Wang, Heng Li, Xiaohong Yan, Surface enhanced Raman effect on CVD growth of WS₂ film, Chemical Physics Letters, Volume 707, Pages 71-74, 2018.
3. Tapan Kumar Pradhan, Pradipta Kumar Panigrahi, Deposition pattern of interacting droplets, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Volume 482, Pages 562-567, 2015.

Синхронная модуляция накачки в Yb волоконных лазерах: особенности импульсной генерации

Корель И.И.¹, Ньюшков Б.Н.^{1,2}, Кутищева А.Ю.¹, Смирнов С.В.², Иваненко А.В.²

¹Новосибирский государственный технический университет

²Новосибирский государственный университет

e-mail: korel@corp.nstu.ru

В различных типах лазеров [1-4] синхронная накачка рассматривается как эффективный способ активной синхронизации мод излучения. Однако, формирование с помощью подобного метода импульсов и последовательностей импульсов в волоконных лазерах с усилением на основе вынужденного излучения не в полной мере изучено. Такое исследование интересно, например, с точки зрения создания новых полностью волоконных, простых в реализации высокоэнергетических импульсных лазерных источников, альтернативных наносекундным сверхдлинным волоконным лазерам с синхронизацией мод [5,6].

Работа посвящена теоретическому и экспериментальному поиску режимов формирования регулярных последовательностей наносекундных импульсов за счет синхронной модуляции накачки в Yb волоконных лазерах. Численное описание формирования импульсов при синхронной модуляции накачки опирается на теоретическую модель эффективно двухуровневой активной среды [7]. Рассматриваются различные типы модуляции и возможности укорочения лазерных импульсов. Показано, что даже микросекундная гармоническая модуляция с малым индексом (до 0.5) способна формировать регулярные наносекундные импульсные последовательности. Получены первые результаты,

свидетельствующие о возможностях дальнейшего укорочения импульсов, в зависимости от параметров синхронной модуляции накачки.

Список литературы

1. D.S. Peter, P. Beaud et al, Opt. Lett. 16, 405-407, 1991
2. E. Granados, H.M. Pask, and D.J. Spence, Opt. Express, 17, 569-574, 2009
3. B.N. Nyushkov, S.M. Kobtsev et al, J. Opt. Soc. Am. B, 35, 2582-2587, 2018
4. S. Kobtsev, A. Ivanenko et al, Opt. Express, 26, 29867-29872, 2018
5. B.N. Nyushkov, A.V. Ivanenko et al, Laser Phys. Lett. 9, 59-67, 2012
6. N.A. Koliada, B.N. Nyushkov et al, Quantum Electron, 43, 95-98, 2013
7. S.K. Turitsyn, A.E. Bednyakova et al., Opt. Express, 19, 8394-8405, 2011

Исследование воздействия механических напряжений в области интерфейса в гетероструктурах AlN/SiC на спиновые свойства V_{Si} -центров.

Бреев И. Д.¹, В.В. Яковлева¹, К.В. Лихачев^{1,2}, Е.Н. Мохов¹, С.С. Нагалюк¹, П.Г. Баранов¹,
А.Н. Анисимов¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ²ИТМО

e-mail: breev.ilia.d@mail.ioffe.ru

В последние годы, исследование широкозонных полупроводниковых гетероструктур (AlN, SiC) с разными показателями преломления представляют интерес для приборов силовой электроники, и фотонных кристаллов в ультрафиолетовом спектральном диапазоне. Для таких исследований крайне важно понимать свойства интерфейсов материалов, выращенных с использованием разных методов. Также следует отметить, что в кристаллах SiC можно создать спиновые кубиты, в частности вакансии кремния и дивакансии, которыми можно когерентно управлять при комнатной температуре, они проявляют долгие времена когерентности в диапазоне мс, однофотонное излучение с узкими нуль-фонными линиями, и демонстрируют высокий потенциал для интеграции в электронные и фотонные системы.

В нашей работе мы провели исследования гетероструктур AlN/4H-SiC и AlN/6H-SiC методами спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) с микронным пространственным разрешением с использованием конфокальной оптической схемы и возбуждение лазером 532 нм. По сдвигу пиков КРС, было обнаружено возникновение механических напряжений на интерфейсе в диапазоне от $-0,75$ до $-1,05$ ГПа в слое 4H-SiC для гетероструктуры 4H-SiC/AlN с толщинами слоев 242/228 мкм, и около $-0,8$ ГПа в слое 6H-SiC для гетероструктуры 6H-SiC/AlN с толщинами слоев 420/253 мкм, в обоих случаях, локализованных в области 10 мкм [1]. Также была исследована гетероструктура 4H-SiC/AlN с толщиной слоев 25/383 мкм, в ней слой SiC напряжен полностью с кристаллическими напряжениями на свободной поверхности и интерфейсе около $-0,7$ и $-1,6$ ГПа, соответственно.

Исследуемые гетероструктуры были облучены электронами с энергией 2 МэВ с потоком 10^{18} е/см² и исследованы методом оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР) с разверткой радиочастоты и амплитудной модуляцией радиочастоты. Был обнаружен сдвиг резонансной линии ОДМР V_{Si} -центров в 6H-SiC. Мы связываем это сдвиг

линии ОДМР с кристаллическими напряжениями в слое SiC. Сдвиг линии составляет порядка 1,5 МГц для центров V1/V3 и 1 МГц для центров V2 [2].

Список литературы

1. Breev I.D. et al, Journal of Applied Physics 129(5):055304
2. Breev I.D. et al, "Stress-controlled zero-field spin splitting in silicon carbide", arXiv:2012.07588

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Индукцированные электронные явления в кристаллах перспективного для оптоэлектроники полупроводника p-GaSe

Бабаева Р. Ф.

АГЭУ, Азербайджан

e-mail: babaeva-rena@yandex.ru

Монокристаллы слоистого соединения *p-GaSe* привлекает внимание как перспективные материалы для создания различного типа оптоэлектронных устройств в области всего видимого и значительной части ближнего ИК-диапазона оптического спектра. Поэтому представляет актуальность выявление новых электронных свойств и возможностей практического применения этого полупроводника. Исходя из того, что изучение электронных явлений, индуцированных при комбинированном возбуждении полупроводника различными внешними воздействиями, является одним из мощных способов для выявления их новых свойств и возможностей практического применения [1], в данной работе исследован комплекс индуцированных примесных явлений в чистых (с удельными сопротивлениями $\rho_{77} \approx 3 \cdot 10^4 \div 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при $T \approx 77 \text{ K}$) и легированных эрбием с $N_{Er} = 10^{-5} \div 10^{-1} \text{ ат.}\%$ кристаллах *p-GaSe* при различных условиях.

Измерения проводились при $T \approx 77 \div 300 \text{ K}$, напряженности электрического поля $E \approx 10^1 \div 2.5 \cdot 10^3 \text{ В/см}$, длины волны $\lambda \approx 0.30 \div 2.00 \text{ мкм}$ и интенсивности $I \approx 5 \cdot 10^0 \div 5 \cdot 10^2 \text{ Лк}$ света, ток через образец и падающий на него световой поток были направлены перпендикулярно естественным слоям кристалла.

Установлено, что в области $T \leq 240 \div 250 \text{ K}$ при электрических напряжениях (U), больше напряжения перехода статической ВАХ на первый квадратичный участок (U_{1-2}) [2] на спектре фотопроводимости помимо собственной, наблюдается и примесная полоса; на кривых температурной зависимости темнового тока появляется примесный пик, а на ВАХ начиная с напряжения полного заполнения ловушек ($U_{пл}$) [2] - спонтанные пульсации темнового тока.

При слабых освещенностях величина примесной фотопроводимости ($\frac{I_c}{I_T}$, где i_T и i_c - стационарные значения тока в темноте и при воздействии света, соответственно) и положение максимума ее спектра (λ_M) зависят от ρ_{77} и N_{Er} в образцах чистых и легированных кристаллов, соответственно. В образцах чистых кристаллов с ростом ρ_{77} значение $\Delta i_{пл}$ монотонно увеличивается, а λ_M - плавно смещается в сторону более длинных волн; в образцах легированных кристаллов значения λ_M и $\Delta i_{пл}$ с ростом N_{Er} меняются немонотонно.

В чистых с $\rho_{77} \geq 6 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и легированных с $N_{Er} \leq 10^{-2} \text{ ат.}\%$ образцах кристаллов, при $U_{1-2} \leq U \leq U_{пл}$ с ростом U значения Δi_T и λ_M , а также высота примесного пика (Δi_T) на кривых $i_T(T)$ немонотонно меняются. При $U_{пл} < U$ с ростом U интенсивность спонтанных пульсаций увеличивается, а примесная фотопроводимость и пик на кривых $i_T(T)$ постепенно исчезают. Значение Δi_T и частота спонтанных пульсаций тока (f) зависят от длины образца ($l_{об}$), инжектирующей способности контактов, T , величин ρ_{77} и N_{Er} . С уменьшением $l_{об}$ и повышением инжектирующей способности контактов значения Δi_T и f – увеличиваются, при повышении T – пульсации темнового тока постепенно исчезают.

Показано, что все эти три явления индуцированы инжекцией и непосредственно обусловлены с перезарядкой существующих в р-GaSe уровней прилипания с глубиной $\varepsilon \approx \varepsilon_v + 0.42 \text{ эВ}$ и плотностью $N \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ инжектированными дырками, а для объяснения обнаруженных их в высокоомных чистых и легированных $N_{Er} \leq 10^{-2} \text{ ат.}\%$ кристаллах особенностей, необходимо учитывать также наличие случайных макроскопических дефектов в исследуемых образцах [3]. На основе легированных эрбием с $10^{-2} \leq N_{Er} \leq 10^{-1} \text{ ат.}\%$ кристаллов р-GaSe можно создать фотоприемники света для ближней ИК-области оптического спектра с высокостабильными, воспроизводимыми параметрами и управляемой электрическим полем чувствительностью.

Список литературы

1. Воробьев Л.Е., Данилов С.Н., Зегря Г.Г., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А., Ясиевич И.Н., Берегулин Е.В. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и размерно-квантовых структурах. Санкт-Петербург: Наука, 2001. 248 с.
2. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973. 416 с.
3. Шик А.Я. // ЖЭТФ. 1972. Т. 15. С. 408-410.

Исследование характеристик светодиодов на основе InGaN/GaN квантовых ям при кратковременных электрических воздействиях, сопровождающихся джоулевым разогревом

Иванов А. М.¹, Клочков А.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: alexandr.ivanov@mail.ioffe.ru

Светодиодные структуры с квантовыми ямами на основе нитридных материалов нашли широкое применение в различных отраслях: в медицине, биологии, промышленном производстве, включая создание твердотельных источников освещения белым светом. Механизмы старения GaN светодиодов и лазеров и возможности их нейтрализации вызывают широкий исследовательский интерес.

В настоящее время большинство исследователей считает, что деградация GaN светодиодов в процессе эксплуатации связана с изменениями концентрации легирующих примесей и образованием точечных дефектов, ответственных за безизлучательную рекомбинацию. В долговременной деградации важную роль играет миграция примесей, таких как N и Mg в активную область.

Высокая плотность дефектов обуславливает увеличенный уровень токового шума. По измерениям его мощности и спектрального состава прогнозируют надежность светоизлучающих структур.

Целью этой работы являлось исследование изменений параметров светодиодов с квантовыми ямами InGaN/GaN при кратковременных воздействиях (не более 3-х часов) токами (от 60 до 190 мА) при прямом смещении, существенно превосходящими номинальные и приводящими к одновременному джоулеву разогреву.

Ранее было известно о росте внешней квантовой эффективности при кратковременных токовых воздействиях [1]. Кроме того, возрастание мощности оптического излучения наблюдалось на начальных этапах в экспериментах по деградации GaN светодиодов [2,3].

Эксперименты проводились на синих и УФ светодиодах фирмы Nichia с InGaN/GaN квантовыми ямами и с номинальными токами 20 мА. Для исследования изменения параметров светодиодов была использована последовательность коротких тестов по воздействию токами при прямом смещении. После каждой стадии электрического воздействия измерялись вольтамперные зависимости и внешняя квантовая эффективность.

Результаты показали, что в УФ светодиодах воздействие токами 80 мА / 1.2 h и 120 мА / 3 h привело к росту внешней квантовой эффективности на 19% при номинальном токе, с незначительным ростом порогового тока. В синих светодиодах воздействие токами менее 150 мА не вызывали существенных изменений внешней квантовой эффективности. И только при токах 150–170 мА, сопровождающихся перегревом активной области > 100 °С произошли изменения эффективности – с максимальным ее возрастанием на 21% при номинальном токе и одновременным ростом в 5 и более раз спектральной плотности низкочастотного токового шума по сравнению с исходным светодиодом.

Проведенные исследования показали изменения характеристик светодиодов (уменьшение рабочего напряжения при номинальном токе, возрастание интенсивности излучения и внешней квантовой эффективности). Это связано с ростом концентрации дырок и увеличением проводимости р-области. Одновременно растет концентрация дефектов в активной области и в барьерах. Этим ростом обусловлено увеличение туннельного тока (trap-assisted tunneling (TAT), hopping) через потенциальные барьеры к активной области [4,5], который играет заметную роль в нитридных светодиодах. Изменения в спектре дефектов под воздействием тока и джоулева нагрева вызывают уменьшение концентрации центров с более глубокими уровнями и проявление более мелких транспортных центров [6], чей вклад в безизлучательную рекомбинацию слабее. Одновременно с ростом эффективности в синих светодиодах наблюдался рост плотности низкочастотного шума, связанный с неравномерностью прохождения тока и формированием новых дефектов.

Список литературы

1. Н.И. Бочкарева и др. ФТП 47 (1), 129 (2013).
2. C.G. Moe et al. Appl. Phys. Lett. 96, 213512 (2010).
3. Z. Ma et al. Solid-State Electron. 156, 92 (2019).
4. Н.И. Бочкарева, Ю.Г. Шретер. ФТП 52 (7), 796 (2018).
5. N.I. Bockhareva et al. J. Phys.: Conf. Ser. 1697, 012203 (2020).
6. Н.И. Бочкарева и др. Письма в ЖТФ 42 (22), 1 (2016).

Исследование радиофотонной линии передачи на основе фотодетектора с высоким фототоком

Таценко И. Ю.¹, Иванов А. В.², Устинов А. Б.¹

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

²АО «НИИ «Полус» им. М. Ф. Стельмаха»

e-mail: abitur.tatsenko@mail.ru

В последние годы радиофотоника стала актуальным направлением развития науки и техники. В частности, большой научный и практический интерес представляет разработка и исследование радиофотонных линий передачи [1,2]. Помимо непосредственной передачи радиосигнала такие линии передачи можно использовать в устройствах генерации сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов [3], сканирующих приемниках [4], для оптического усиления [5] и др.

Целью настоящей работы являлось исследование радиофотонной линии передачи на основе фотодетектора с высоким фототоком, а также исследование зависимости потерь СВЧ-сигнала от мощности оптического излучения.

Радиофотонная линия передачи (РФЛП) состоит из лазера, электрооптического модулятора, оптоволоконной линии задержки и фотодетектора. За счет использования одномодового оптоволокна достигаются низкие потери оптического излучения с длиной волны порядка 1550 нм. В эксперименте СВЧ-выход фотодетектора был нагружен на сопротивление 50 Ом, равное его волновому сопротивлению. Верхняя граничная частота составляла 12 ГГц.

В первой части эксперимента исследовались характеристики фотодетектора при немодулированном излучении. Были получены зависимости фототока и фотонапряжения фотодетектора от мощности излучения лазера. Результаты эксперимента показали, что при увеличении падающей мощности немодулированного оптического излучения до 60 мВт происходил линейный рост фототока и фотонапряжения. При дальнейшем увеличении оптической мощности наблюдался переход в насыщение. Исходя из зависимости фототока была определена чувствительность фотодетектора на линейном участке при непрерывном оптическом излучении. Она составила 0.8 А/Вт.

Затем проводилось экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик РФЛП при модуляции оптической несущей СВЧ-радиосигналом. Эксперименты проводились с модулятором Маха-Цендера имеющим полуволновое напряжение $V_{\pi}=1.6$ В, верхнюю граничную частоту 30 ГГц и оптические потери в максимуме коэффициента передачи 4.5 дБ. Номинальная мощность лазера равнялась 100 мВт, а длина оптоволоконной линии задержки составляла 2 км.

Проведенные измерения показали, что увеличение мощности излучения лазера до 100 мВт позволяет уменьшить потери СВЧ-сигнала в линии передачи примерно до 10 дБ. Исходя из экспериментальных данных, с увеличением частоты от 0 до 12 ГГц чувствительность фотодетектора снижалась от 0.8 до 0.56 А/Вт. Учитывая, что коэффициент передачи электрооптического модулятора в диапазоне 0-12 ГГц практически не зависел от частоты, была получена приближенная частотная зависимость чувствительности фотодетектора.

Работа частично поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект "Госзадание", грант № FSEE-2020-0005).

Список литературы

1. Ackerman E. I. et. al. «Signal-to-Noise Performance of Two Analog Photonic Links using Different Noise Reduction Techniques», IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Honolulu, Hawaii. p. 51, (2007)
2. Петров А. Н. и др. «Повышение коэффициента передачи радиочастотной волоконно-оптической линии за счет управления рабочей точкой внешнего модулятора», ЖТФ, 85, С. 131, (2015)
3. Устинов А.Б., Никитин А.А., Калиникос Б.А. «Электронно-перестраиваемый спин-волновой оптоэлектронный генератор сверхвысокочастотных сигналов», ЖТФ, 85, С. 136-140, (2015)
4. Ghelfi P. et. al. «A Fully Photonics-Based Coherent Radar System», Nature, 507, p. 341, (2014)
5. Muniz A. L. M. et. al. «All-Optical RF Amplification toward Gpbs Communications and Millimeter-Waves Applications», Microwave and Opt. Tech. Lett., 59, p. 2185, (2017)

Вертикально-излучающий лазер на основе сверхрешетки InGaAs/InGaAlAs, спектрального диапазона 1310 нм

Рочас С. С.¹, Карачинский Л.Я.¹, Бабичев А.В.¹, Новиков И.И.¹, Гладышев А.Г.¹, Колодезный Е.С.¹, Блохин С.А.², Егоров А.Ю.¹

¹ИТМО

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: stanislav_rochas@itmo.ru

Вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) спектрального диапазона 1.3 мкм являются перспективными лазерными источниками для информационно-телекоммуникационных систем связи, в том числе для различных гибридных плат с оптическими межсоединениями и устройств радиофотоники на основе кремния (silicon photonics) [1]. Оптимизация активной области – среды, которая отвечает за усиление оптического излучения, всегда была основой прогресса в области развития полупроводниковых лазеров. Недавно нами было показано, что использование сверхрешетки InGaAs/InGaAlAs в качестве активной области в ВИЛ может дать преимущество и заменить активные области ВИЛ на основе гетероструктур с сильнонапряженными квантовыми ямами, и увеличить дифференциальное усиление устройства [2]. Использование метода спекания пластин (wafer fusion) [3,4] позволяет эффективно совмещать плюсы активной области на основе InP и РБО с высоким коэффициентом отражения на основе материалов AlGaAs/GaAs, устраняя недостатки ВИЛ, выращенных за один эпитаксиальный процесс на основе InGaAsP/InP [5], что открывает широкие перспективы для создания надежных ВИЛ со скоростью 10 Гбит/с.

В настоящей работе приведены результаты исследования характеристик ВИЛ спектрального диапазона 1.3 мкм с активной областью на основе сверхрешетки InGaAs/InGaAlAs. Структура ВИЛ была изготовлена двойным спеканием пластин верхнего и нижнего РБО AlGaAs/GaAs, выращенными на подложках GaAs, с пластиной оптического микрорезонатора InAlGaAs/InP, выращенной на подложке InP. Активная область была выполнена на основе 24-х периодной сверхрешетки InGaAs/InGaAlAs с толщинами слоев 0.8 нм/2 нм. Выбор толщин слоев сверхрешетки обусловлен управляемым смещением пика фотолюминесценции излучения активной области в область 1280 нм [6]. Метод

молекулярно-пучковой эпитаксии использовался на всех этапах эпитаксиального синтеза. Захороненный туннельный переход с глубиной травления 25 нм был выполнен в виде последовательности слоев n^{++} -InGaAs/ p^{++} -InGaAs/ p^{++} -InGaAlAs [3], что позволило обеспечить пороговый ток ВИЛ на уровне 1.25 мА при диаметре токовой апертуры 5 мкм. Благодаря относительно низким внутренним потерям дифференциальная квантовая эффективность лазеров достигала 70%. В совокупности с малым последовательным сопротивлением это позволило получить значение максимальной выходной оптической мощности более 6 мВт (при токе 15 мА). Малосигнальный частотный анализ позволил оценить предельное быстродействие разработанных ВИЛ на уровне 6 ГГц. В режиме амплитудной модуляции большим сигналом ВИЛ демонстрируют стабильную работу на скорости 10 Гбит/с при температуре 20 °С, токе смещения 10 мА и амплитуде модуляции 0,7 В. При дальнейшем увеличении скорости передачи данных происходит резкое уменьшение высоты глаза, однако глазковые диаграммы все еще остаются открытыми вплоть до скоростей 15-16 Гбит/с.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской федерации, проект тематики научных исследований № 2019-1442

Список литературы

1. Bimberg D., Larsson A., Joel A. Industry VCSELs // *Compd. Semicond.* – 2014. – Т. 1. – С. 22-26.
2. Karachinsky L. Y. et al. Optical Gain in Laser Heterostructures with an Active Area Based on an InGaAs/InGaAlAs Superlattice // *Optics and Spectroscopy.* – 2019. – Т. 127. – №. 6. – С. 1053-1056.
3. Blokhin S. A. et al. A Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser for the 1.55- μ m Spectral Range with Tunnel Junction Based on n^{++} -InGaAs/ p^{++} -InGaAs/ p^{++} -InAlGaAs Layers // *Technical Physics Letters.* – 2020. – Т. 46. – №. 9. – С. 854-858.
4. Syrbu A. et al. 1.5-mW single-mode operation of wafer-fused 1550-nm VCSELs // *IEEE Photonics Technology Letters.* – 2004. – Т. 16. – №. 5. – С. 1230-1232.
5. Park M. R. et al. All-epitaxial InAlGaAs-InP VCSELs in the 1.3-1.6- μ m wavelength range for CWDM band applications // *IEEE photonics technology letters.* – 2006. – Т. 18. – №. 16. – С. 1717-1719.
6. Rochas S. S. et al. The Influence of the Parameters of a Short-Period InGaAs/InGaAlAs Superlattice on Photoluminescence Efficiency // *Technical Physics Letters.* – 2020. – Т. 46. – №. 11. – С. 1128-1131.

Неохлаждаемые Air-Bridge фотоприемники на основе двойных InAs/InAsSbP гетероструктур

Пивоварова А.А.¹, Куницына Е.В.¹, Андреев И.А.¹, Коновалов Г.Г.¹, Слипченко С.О.¹,
Пихтин Н.А.¹, Ильинская Н.Д.¹, Яковлев Ю.П.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: pivovarova.antonina@gmail.com

В настоящее время задачи оптоэлектроники требуют создания быстродействующих фотоприемников для регистрации импульсного излучения в спектральном диапазоне 1.5-4.0 мкм. Данный диапазон представляет значительный интерес для диодно-лазерной спектроскопии газов и молекул, лазерной дальнометрии и локации, а также для медицины и

экологии [1, 2]. Нами были созданы и исследованы неохлаждаемые p-i-n InAs/InAsSbP фотоприемники, работающие в диапазоне длин волн 1.5–3.8 мкм.

Двойные гетероструктуры InAs/InAsSbP выращивались методом ЖФЭ на подложке p-InAs с ориентацией (100). Нелегированный активный слой n-InAs, толщиной 1.0 мкм, был заключен между широкозонными слоями p-InAsSbP и n-InAsSbP с содержанием фосфора 0.40 и шириной запрещенной зоны $E_g = 0.57$ эВ при $T = 300$ К. Слой p-InAsSbP легировался оловом, n-InAsSbP – цинком.

Приборы на основе выращенных гетероструктур создавались методом фотолитографии, жидкостного химического травления, вакуумного напыления и электрохимического осаждения металлических покрытий. Фотоприемники имели конструкцию Air-Bridge, в которой контактная площадка вынесена за пределы фоточувствительной мезы и связана с ней воздушным мостиковым контактом. С одной стороны, данная конструкция позволяет уменьшить площадь p-n перехода, и соответственно, ёмкость фотоприемника, что приводит к увеличению его быстродействия. С другой стороны, при таком подходе уменьшение площади фоточувствительной площадки приводит к менее значительным потерям в обнаружительной способности фотоприемника, поскольку фоточувствительная область не затенена фронтальной контактной площадкой.

Фоточувствительная площадка InAs/InAsSbP фотодиодов была выполнена в форме круга диаметром 50 мкм. Контактная площадка размером 100x100 мкм располагалась на опорной изолированной мезаструктуре. Воздушный металлический мостик, соединяющий контактную и фоточувствительную мезы, имел толщину около 3 мкм. Аналогичная конструкция была нами реализована для фотоприемников на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb, работающих в области спектра 1.2–2.4 мкм [3].

Теоретическая оценка быстродействия полученных фотодиодов была проведена по данным вольт-фарадных характеристик. Ёмкость фотодиодов составляла $C=17.3$ пФ при $U=0$ В и $C=5.7$ пФ при $U=-0.6$ В.

Проведено исследование быстродействия (времени фотоотклика) InAs/InAsSbP фотодиодов вблизи коротковолновой границы их чувствительности с помощью InP лазера с длиной волны излучения 1.55 мкм и апертурой 100 мкм. Осциллограммы фотоотклика InAs/InAsSbP фотоприемника при засветке импульсным лазерным излучением показали, что быстродействие фотодиода (время фотоотклика) составляет $t=250\text{--}400$ пс, что коррелирует со значениями, рассчитанными по вольт-фарадным характеристикам.

Показано, что созданные InAs/InAsSbP фотоприемники обладают достаточно высоким быстродействием и могут быть использованы для регистрации лазерных импульсов в диапазоне длин волн 1.5–3.8 мкм.

Список литературы

1. Е.В. Степанов. Диодная лазерная спектроскопия и анализ молекул-биомаркеров, М., Физматлит, 2009.
2. K. Kincade, Free-space optics builds invisible bridges, Laser Focus World, 39(12), 69-72, 2003.
3. И.А. Андреев, О.Ю. Серебrenникова, Г.С. Соколовский, В.В. Дюделев, Н.Д. Ильинская, Г.Г. Коновалов, Е.В. Куницына, Ю.П. Яковлев, Быстродействующие фотодиоды для средней инфракрасной области спектра 1.2–2.4 мкм на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с полосой пропускания 2–5 ГГц, ФТП, 47, 1009-1115, 2013.

Технология диффузии Zn для лавинных фотодиодов InP-InGaAs

Андрюшкин В. В.¹, Карачинский Л.Я.¹, Бабичев А.В.¹, Новиков И.И.¹, Гладышев А.Г.¹, Колодезный Е.С.¹, Малеев Н.А.², Хвостиков В.П.², Бер Б.Я.², Кузьменков А.Г.³, Кижаяев С.С.⁴, Бугров В.Е.¹

¹Университет ИТМО

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

³НТЦ Микроэлектроники РАН

⁴ООО «ЛЕД Микросенсор НТ»

e-mail: vvandriushkin@itmo.ru

Процесс диффузии цинка широко используется для создания лавинных фотодиодов (ЛФД) на основе гетероструктур InP-InGaAs, в том числе приемников одиночных фотонов телекоммуникационного диапазона [1]. Профили распределения электрически активных примесей существенно влияют на основные характеристики ЛФД, в частности определяют параметры краевого пробоя. Скорость диффузии цинка достаточно высока, а коэффициент диффузии сильно зависит не только от температуры, но и от концентрации легирующей примеси [2]. В связи с этим прецизионный контроль глубины диффузии и профиля концентрации легирующей примеси являются ключевыми элементами технологии для реализации ЛФД с требуемыми параметрами. К числу актуальных проблем технологии диффузии Zn в слой InP относятся относительно низкие значения предельной концентрации дырок, что усложняет формирование омических контактов, и сложность сохранения качества поверхности InP в процессе диффузии. Возможное решение состоит в проведении диффузии через дополнительный тонкий поверхностный слой InGaAs [3], однако особенности процесса диффузии в таких структурах изучены недостаточно.

В рамках разработки технологии изготовления планарных InP-InGaAs ЛФД, были выполнены исследования особенностей диффузии Zn в эпитаксиальные структуры InP и InGaAs/InP, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках полуизолирующего InP. Диффузия Zn проводилась с использованием двух технологических установок: (1) резистивно нагреваемый кварцевый реактор с помещенным внутри твердотельным источником паров Zn и водородом либо азотом в качестве газа-носителя; (2) реактор MOCVD с водородом в качестве газа-носителя, диэтилом цинка (DEZn) использовался в качестве источника Zn, а для предотвращения деградации поверхности InGaAs в реактор подавался поток арсина. В обоих случаях температура проведения диффузионного процесса составляла 450-500°C. На этапе предварительных исследований поверхность образцов не защищалась какой-либо маской, а после проведения диффузии все образцы подвергались активационному отжигу в кварцевом реакторе в потоке особо чистого азота при температуре 450-460°C, время нагрева около 10 мин, время выдержки на температурной «полке» - 5 мин. Профили распределения атомов Zn, Ga, As, P и In после проведения диффузии исследовались методом вторичной ионной масс-спектрометрии (SIMS), а профили распределения концентрации электрически активной примеси р-типа после диффузии и активационного отжига - методом электрохимического вольт-емкостного профилирования (ECV).

Было установлено, что в слоях InGaAs достигается высокая концентрация электрически активной примеси р-типа $((3...4) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3})$, что важно для формирования р-контактов с низким сопротивлением. Значения глубины диффузионного фронта, в зависимости от температуры и времени процесса, составляют от 2,5 до 3,5 мкм. При этом уровень легирования слоев InGaAs и InP отличается примерно на порядок, что хорошо коррелирует с

разным предельным уровнем внедрения Zn. Была предварительно исследована возможность проведения повторной диффузии и достигнута глубина внедрения Zn около 4 мкм при сохранении уровня легирования в поверхностном слое InGaAs. Дальнейшие шаги исследований будут направлены на построение адекватной модели диффузии Zn в структурах InGaAs/InP и исследования двумерного распределения профиля легирования диффузии Zn через окна в маске диэлектрика.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект тематики научных исследований № 2019-1442.

Список литературы

1. A.Tosi, NIR SPAD and fast-gating circuits, 1st SPAD Sensor Workshop – ISSW 2018, LesDiablerets, Feb.26, 2018;
2. K. Vanhollebeke et al., J. Electron. Mat., vol.30, no.8, 951-959 (2001);
3. D. D’Agostono et al., Optics Express, vol.23, no.19, 25143-25157 (2015);

Исследование оптической бистабильности в кремниевых микрокольцевых резонаторах

Рябцев И. А.¹, Никитин А. А.¹, Кондрашов А. В.¹, Витько В. В.¹, Зарецкая Г. А.¹, Ершов А. А.¹, Конкин Д. А.², Коколов А. А.², Бабак Л. И.² и Устинов А. Б.¹

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

²ТУСУР

e-mail: ryabcev.ilya@gmail.com

Дисперсионная бистабильность в кремниевых микрокольцевых резонаторах (МКР) находит применение для создания различных нелинейных компонентов интегральных оптических схем, таких как оптические переключатели [1] и оптические запоминающие устройства [2]. Основными нелинейными эффектами в кремниевых МКР на телекоммуникационной длине волны 1,55 мкм являются двухфотонное поглощение и термооптический эффект [3, 4]. В результате двухфотонного поглощения происходит генерация свободных носителей заряда, которые обеспечивают дополнительное затухание оптического излучения и изменение дисперсионных свойств среды, а именно уменьшение ее показателя преломления. С другой стороны, поглощение излучения сопровождается увеличением температуры волноведущей среды, что приводит к увеличению ее показателя преломления [3]. В работе [4] дисперсионная бистабильность в кремниевых МКР, обусловленная генерацией свободных носителей в результате двухфотонного поглощения, исследовалась в импульсном режиме. Длительность импульсов выбиралась большей времени жизни свободных носителей (единицы наносекунд) и меньшей времени рассеяния тепла (единицы пикосекунд).

В настоящей работе сообщается о наблюдении дисперсионной бистабильности в кремниевом МКР при непрерывной накачке. Исследуемая структура представляет собой кремниевое кольцо, симметрично связанное с прямыми входным и выходным волноводами. Она изготовлена по технологии кремний-на-изоляторе SG25PIC компании INP [5]. Диаметр кольца составляет 256 мкм, зазор между кольцом и прямыми входным и выходным волноводами – 250 нм.

В ходе линейных измерений были определены следующие параметры МКР: 1) вносимые потери на ввод и вывод излучения между волокнами для квази-ТЕ моды составляют

11.6 дБ; 2) термооптический коэффициент – $1.97 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$; 3) область свободной дисперсии – 88.8 ГГц; 4) коэффициент связи по мощности – 0.036; 5) потери на распространение составляют 12.8 дБ/см. Последние два параметра соответствуют нагруженной добротности резонатора, равной 45000.

На следующем этапе были измерены нелинейные передаточные характеристики, которые демонстрировали эффект нелинейного сдвига резонансной частоты при увеличении мощности оптического излучения лазера, а также уменьшение коэффициента передачи. Результаты показали, что при увеличении входной мощности от 0.023 мВт до 10 мВт резонансная частота смещается вверх на 20 ГГц, а коэффициент передачи уменьшается на 6 дБ по сравнению с линейными передаточными характеристиками. Также в ходе экспериментального исследования были измерены зависимости выходной мощности от мощности на входе в кремниевый МКР на частоте отстройки 7 ГГц. Измеренная характеристика представляла собой петлю гистерезиса шириной 10 мВт.

Для объяснения полученных результатов была разработана оригинальная теория для моделирования нелинейных передаточных характеристик. Она учитывает как линейные, так и нелинейные потери и дисперсионные свойства волноведущей среды МКР. Предлагаемое теоретическое объяснение экспериментальных результатов подтверждает доминирующую роль эффектов, связанных со свободными носителями в формировании частотных характеристик передачи исследуемого кремниевого МКР при непрерывной накачке. Результаты численного моделирования с высокой точностью совпадают с измеренными передаточными характеристиками.

Исследования, выполненные в СПбГЭТУ «ЛЭТИ», были поддержаны Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FSEE-2020-0005).

Список литературы

1. Notomi M., et al., «Optical bistable switching action of Si high-Q photonic-crystal nanocavities», Opt. Express, Vol. 13, №7, pp. 2678, (2005)
2. Liu L., et al., «An ultra-small, low-power, all-optical flip-flop memory on a silicon chip», Nat. Photon, vol. 4, №3, pp. 182–187, (2010)
3. Eichler H. J., et al., «Optical nonlinearity and bistability in silicon», Phys. Physica Status Solidi (b), Vol. 150, №2, pp. 705-718, (1988)
4. Xu Q., Lipson M., «Carrier-induced optical bistability in silicon ring resonators», Opt. Lett., Vol. 31, №3, pp. 341-343, (2006)
5. IHP – innovations for high performance microelectronics, 2020, <https://www.ihp-microelectronics.com/en/services/mpw-prototyping/sigec-bicmostechnologies.html/>. (Accessed 11 February 2021)

Особенности формирования волноводных структур в градиентном ниобате лития

Галуцкий В. В.¹, Пузановский К.В.¹, Строганова Е.В.¹, Шмаргилов С.А.¹

¹КубГУ

e-mail: galutskiy17v@mail.ru

При создании условий накопления нелинейно-оптического воздействия и преобразования оптического сигнала существенную роль играют волноводные структуры, обеспечивающие распространение сигналов с наименьшим затуханием при наличии

волноводного эффекта. Поэтому обеспечение условий режима фазового квазисинхронизма, при котором меняется направление передачи энергии между взаимодействующими волнами, за счет изменения знака поляризации нелинейно-оптической среды, позволяет достичь эффективной генерации второй гармоники, в том числе, от источников с относительно малой пиковой мощностью излучения. С другой стороны, наличие градиента величины согласования фазовых скоростей сигнала могут приводить к изменению реализации режимов работы фотонных и оптоэлектронных устройств.

Для разработки макета фотонных и оптоэлектронных устройств на основе градиентного LiNbO_3 были проведены комплексные исследования по установлению закономерностей формирования в нем волноводов. Использовались образцы, вырезанные из градиентного LiNbO_3 , ориентированные определенным образом. С помощью вакуумного термического нанесения и экспонирования комплексом безмасковой фотолитографии μPG101 получались подложки из LiNbO_3 , покрытые Al- маскирующим слоем, в котором формировался рисунок в виде полос толщиной 10 мкм, представляющих потенциальные волноводы четырех видов: канальный волновод, Y-разветвитель, X-разветвитель, интерферометр Маха-Цендера. При формировании волноводов использовался метод ионного обмена (протон-замещения).

Проведена серия опытов по подбору технологических режимов для изготовления поверхностных волноводов в пластинах LiNbO_3 , вырезанных перпендикулярно оси С из кристалла с градиентом состава по основным компонентам. Процесс ионного обмена выполнялся по алгоритму, основанному на известных в литературе методе [1,2]. Адаптация метода к пластинам, вырезанным из градиентного кристалла LiNbO_3 , состояла из подбора технологических режимов для трех этапов: нагрев рабочей области до высокой температуры, выдержка, охлаждение до комнатной температуры.

Экспериментально подобраны технологические режимы изготовления заглубленных волноводов с шириной полос 10 мкм в градиентном LiNbO_3 . После проведения постобменного отжига полученных образцов в течение 3-4 часов при температуре 250-300°C в кислородной атмосфере, были получены образцы градиентного LiNbO_3 с реализованной волноводной структурой шириной 15 мкм, состоящей из канальных волноводов, Y- и X-разветвителей, а также с топологией, соответствующей топологии интерферометра Маха-Цендера. Заключительным этапом являлась визуализация и анализ полученных волноводных структур, который подтвердил наличие волноводов толщиной 15 мкм.

Изменение показателя преломления за счет протонного обмена и последующего отжига пластин градиентного ниобата лития, составляет несколько сотых единиц. В соответствии с уравнением Сельмеера, изменение показателя преломления для пластины градиентного LiNbO_3 с изменением по процентному составу Li_2O составу с 45,75 до 52 составляет для необыкновенного луча с 2,1381 до 2,1369 для длины волны 1064 нм при $T=300$ К. Соотношение изменений показателя преломления при протонном обмене и изменением за счет концентрационного профиля по основным компонентам $\Delta n = 0,0012$ (при изменении состава практически в диапазоне существования фазы LiNbO_3 от конгруэнтного до стехиометрического) свидетельствует о принципиальной возможности формирования волноводов в градиентном LiNbO_3 и сохранении при этом градиента по основным компонентам состава кристалла в волноводном канале.

В результате комплекса исследований были установлены закономерности по формированию волноводных каналов в пластинах градиентного LiNbO_3 . Работа выполнена при поддержке проекта госзадания FZEN-2020-0022.

Список литературы

1. Korkishko Y. N. *et al.*, Characterization of α -phase soft proton-exchanged LiNbO₃ optical waveguides, Journal of the Optical Society of America A, v. 18, 1186 – 1191, 2001.
2. Korkishko Y. N. *et al.*, Structural phase diagram of Hx/Li1-xNbO₃ waveguides: The correlation between optical and structural properties, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, v. 2, 187 – 196, 1996.

Конструктивно-технологические особенности формирования металлических волноводов, контактных площадок и сварных соединений на подложках LiTaO₃

Коняев И. В.¹, Бородин И.И.¹, Бормонтов Е.Н.²,

¹АО Научно-исследовательский институт электронной техники

²Воронежский государственный университет

e-mail: www.450_asd@mail.ru

Подложки монокристаллического LiTaO₃ получили широкое применение при изготовлении таких изделий функциональной электроники, как фильтры на поверхностных и объемных акустических волнах, запоминающие устройства с высокой плотностью записи, оптических волноводы, датчики электрического поля [1].

Классическая технология изготовления канальных волноводов, хорошо зарекомендовавшая себя для LiNbO₃, основана на диффузии предварительно осажденного металла. Однако он имеет низкую стойкость к излучению, так как воздействие света в видимом диапазоне приводит к появлению в нем дефектов. LiTaO₃ является значительно более стойким, с порогом повреждений на два порядка выше по плотности энергии излучения. Однако подход с диффузией для танталата лития налагает дополнительные сложности из-за низкой температуры Кюри (610 °С). Так при проведении высокотемпературной диффузии (T=950÷1100 °С) требуется дополнительная поляризация образцов [2]. Альтернативным методом является применение плазмохимического травления с последующим заполнением канавок металлом.

В работе рассмотрена технология получения канальных оптических волноводов на основе Ti, сформированных после предварительного вытравливания профиля в подложках LiTaO₃ в плазме на основе SF₆. Для улучшения адгезионных характеристик на границе Ti-LiTaO₃ проводилась предварительная обработка подложек в кислородной плазме. Нанесение металла проводилось методом магнетронного распыления в инертной среде Ag при давлении 0,5 Па. Для создания заполненных металлом полостей делалась фотолитография с использованием негативного фоторезиста. Профили полученных структур анализировались на растровом электронном микроскопе.

Для формирования контактных площадок (КП) применялась традиционная тонкопленочной технологии нанесения металла. Качество контакта диэлектрик/металл играет важную роль в надежности микросварного соединения. Для разварки контактных площадок на полуавтоматической установке микросварки Delvotec 5630 применялась Al проволока марки АК0,9ПМ-50 диаметром 50 мкм. Серьезной проблемой является качество поверхности контактных площадок. Поверхностные загрязнения и структура алюминиевой пленки существенным образом влияют на адгезию. Наибольшее влияние оказывают

адсорбированные атомы фтора, органические загрязнения, а также окисление алюминия. Освежение поверхности в плазме $\text{SF}_6 + \text{O}_2$ позволяет улучшить качество микросварного соединения. Анализ микросварных соединений КП методом «клин-клин» показал хорошие результаты. Прочность определялась натяжением проволоки до разрушения. Полученное значение для используемой проволоки составило 23-25 Гс. Анализ места разрыва показывает его локализацию на шейке сварной точки, что свидетельствует о хорошей сварке и адгезии полученной структуры к подложке LiTaO_3 .

Список литературы

1. Hashimoto, K. Optimum Leaky-SAW Cut of LiTaO_3 for Minimized Insertion Loss Devices / K. Hashimoto, M. Yamaguchi, S. Mineyoshi, O. Kawachi, M. Ueda and G. Endoh // IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – 1997. – P. 245-254.
2. Атучин, В.В. Исследование оптических волноводов, полученных диффузией титана в LiTaO_3 / В.В. Атучин, К.К. Зилинг, Д.П. Шипилова // Квантовая электроника. – 1984. – Т. 11. – № 5. – С. 994–998.

Разработка растяжимого гибкого синего светодиода на основе массива GaN/InGaN ННК

Кочетков Ф. М.¹, Неплох В.В.^{1,2}, Мухангали С.¹, Масталиева В.А.¹, Мухин М.С.¹, Мухин И.С.¹

¹СПБАУ РАН

²СПбПУ

e-mail: azemerat@rambler.ru

Гибкие оптоэлектронные структуры являются предполагаемой базой для современных носимых электронных устройств. На сегодняшний день наиболее развитая и коммерчески успешная технология гибких устройств основана на органических материалах. Производство органических светоизлучающих диодов (organic light-emitting diodes, OLED) является относительно недорогим и масштабируемым при этом характеризуется относительно низкой эффективностью электролюминесценции. Однако органические оптоэлектронные устройства уступают неорганическим полупроводниковым материалам по стабильности, энергоэффективности, а также квантовой эффективности, особенно в синей и красной областях оптического диапазона. Более того используемые в таких устройствах электрические контакты сильно ограничивают механические возможности структуры. В частности, в настоящий момент не представлены растяжимые излучающего устройства.

Исследуемая в данной работе светоизлучающая диодная структура (СИД) представляет собой массив нитевидных нанокристаллов GaN/InGaN (ННК) с p-i-n профилем легирования, выращенных методом осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы (МОГФЭ), имеющая линию люминесценции в синем спектральном диапазоне (455 нм). Данный массив был инкапсулирован в полимерную матрицу полидиметилсилоксана (ПДМС) методом гравитационной накрутки [1-2]. Электрическим прозрачным контактом к данной структуре выступали одностенные углеродные нанотрубки (УНТ) с прозрачностью 80%. Далее мембрана ННК/ПДМС механически отделялись от ростовой подложки микротомным лезвием.

Исследования показали, что, несмотря на эластичность и прочность УНТ, при растяжении мембраны с ННК на 10% наблюдался спад проводимости на 40%, что негативно

влияет на энергоэффективность СИДа. Низкая проводимость оставалась и в релаксированном состоянии, и постепенно увеличивалась при каждом последующем растяжении СИДа. Предположительно, данный эффект связан с нарушением перколяции в массиве УНТ.

Решением данной проблемы является предварительное растяжение мембраны, на которую затем размещаются контакты из УНТ [3]. Эксперименты показали, что для таких контактов к мембранам при растяжении на 10% падение проводимости УНТ составляло всего ~5% и оставалось постоянным в последующих итерациях, что позволило создавать эффективные растягиваемые светоизлучающие структуры.

Созданные СИД на основе ПДМС мембран, InGaN ННК и предрастянутых контактов из УНТ исследовались методами электролюминесценции (ЭЛ), фотолюминесценции (ФЛ), а также катодолуминесценции (КЛ). Также с помощью интегрирующей сферы была измерена оптическая прозрачность растяжимого гибкого СИДа, которая составила 43%.

Список литературы

1. V.V. Neplokh, F. M. Kochetkov, K. V. Deriabin, V. V. Fedorov, A. D. Bolshakov, I. E. Eliseev, V. Yu. Mikhailovskii, D. A. Ilatovskii, D. V. Krasnikov, M. Tchernycheva, G. Cirlin, A. G. Nasibulin, I. S. Mukhin and R. M. Islamova. «Modified silicone rubbers for fabrication and contacting of flexible suspended membranes of n-/p-GaP nanowires with single-walled carbon nanotube transparent contact», J. Mater. Chem. C, 2020
2. Kochetkov F. M. , Neplokh V., Fedorov V. V., Bolshakov A. D., Sharov V. A., Eliseev I. E., Tchernycheva M., Cirlin G. E., Nasibulin A. G., Islamova R. M., Mukhin I.
3. S. «Fabrication and electrical study of large area free-standing membrane with embedded GaP NWs for future flexible optoelectronic devices», Nanotechnology, 2020
4. Grigorii Drozdov, Igor Ostanin, Hao Xu, Yuezhou Wang, Traian Dumitrică, Artem Grebenko, Alexey P. Tsapenko, Yuriy Gladush, Georgy Ermolaev, Valentyn S. Volkov, Sebastian Eibl Ulrich Rüde and Albert G. Nasibulin «Densification of single-walled carbon nanotube films: Mesoscopic distinct element method simulations and experimental validation», J. Appl. Phys. 128, 2020

Лабораторный макет установки беспроводной оптической подводной связи с квантовым распределением ключей

Мирошникова Н. Е.¹, Титовец П.А.¹, Казанцев С.Ю.¹, Подгорный А.А.¹,

¹МТУСИ

e-mail: n.e.miroshnikova@mtuci.ru

В настоящее время значительное внимание уделяется подводным исследованиям, ведется поиск и добыча полезных ископаемых, расположенных на дне морей и океана. В связи с этим все актуальней становится проблема обеспечения высокоскоростного канала связи под водой [1]. Анализ последних экспериментальных работ и ряда специализированных обзоров [2, 3] дает все основания полагать, что в ближайшее время начнется широкое использование систем беспроводной оптической подводной связи (БОПС), что связано в первую очередь с развитием элементной базы (появлением недорогих и надежных лазерных источников, излучающих в окне прозрачности воды и высокоэффективных приемников излучения). Для оценки характеристик канала БОПС, широко применяются

методы численного моделирования, однако некоторые методы, либо не учитывают многие особенности распространения оптического излучения под водой, либо содержат большое количество слабо обусловленных параметров, значения которых известны с большой погрешностью [4]. Значительные сложности также возникают при верификации результатов моделирования квантового канала подводной связи, основанного на технологии квантового распределения ключей [5, 6]. Поэтому в МТУСИ для изучения технологии оптических коммуникаций в жидких средах был создан экспериментальный стенд, на котором проводилось сравнение численных моделей канала БОПС с результатами экспериментов.

Основная цель данной работы являлась экспериментальная верификация разработанной ранее численной модели канала БОПС [7], а также исследование, разработанных оптоэлектронных и электрооптических модулей для передачи радиосигналов любой модуляции через подводный оптический канал. Предварительные эксперименты проводились на горизонтальной секции стенда длиной 4.5 м, использовалась водопроводная вода. Результаты экспериментов согласуются с предсказаниями основных потерь в канале БОПС, что позволяет сделать вывод, что разработанная нами компактная система позволит обеспечить оптическую связь на расстояниях до 100 м.

В докладе представлено подробное описание лабораторного стенда, его возможностей для исследований оптической связи и технологии квантового распределения ключа в водной среде различного состава. Теоретически и экспериментально исследован бюджет связи и уровень помех, возникающих в оптическом подводном канале, которые приводят к ограничению скорости квантового распределения ключей через водную среду. В докладе проведен анализ современных достижений и проблем в области создания систем защищенной от прослушивания оптической подводной связи. Рассмотрены основные ключевые технологии, необходимые для квантового распределения ключей в условиях водной среды.

Список литературы

1. Kaushal H., Kaddoum G. Underwater optical wireless communication //IEEE access. – 2016. – Т. 4. – С. 1518-1547.
2. Schirripa Spagnolo G., Cozzella L., Leccese F. Underwater optical wireless communications: Overview //Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 8. – С. 2261.
3. Душин С. В. и др. Тенденции и перспективы развития беспроводной подводной связи //DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов, Т. 10, №. 2,11-18. 020. –
4. Geldard C. T., Thompson J., Popoola W. O. An overview of underwater optical wireless channel modelling techniques //2019 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD). – IEEE, 1-4,2019.
5. Tarantino S. et al. Feasibility study of quantum communications in aquatic scenarios //Optik,2020,Т. 216., 164-639.
6. Zhao S. et al. Experimental investigation of quantum key distribution over a water channel //Applied optics, Т. 58, №. 14,3902-3907, 2019.
7. Miroshnikova N.E., Petruchin G.S., Sherbakov A.V. and Titovec P.A., «A Statistical Model Of The Propagation Of Optical Radiation In The Hydrosphere,» 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Svetlogorsk, Russia, 1-6, 2020.

Фотоприемники на основе $\text{InAsSb}_{0.22}$ для спектральной области 3-5 мкм

Климов А. А.¹, Кунков Р. Э.¹, Лухмырина Т.С.¹, Матвеев Б.А.¹, Ременный М.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: a.klimov@mail.ioffe.ru

Фотоприемники, работающие в средней ИК области спектра (3-5 мкм) применяются в приборах тепловидения, тепlopеленгации, системах дистанционного зондирования Земли, оптических газоанализаторах и в низкотемпературных пирометрах. Используемые на практике фотодиоды (ФД) имеют ряд недостатков, основными из которых являются невозможность реализации флип-чип конструкции с широкой спектральной характеристикой фоточувствительности без удаления подложки (ФД на основе InSb [1]), а также высокая стоимость и ограничения на размер коммерчески доступных подложек (ФД на основе HgCdTe [2]).

Одним из альтернативных, активно развиваемых в последнее время подходов, является использование гетероструктур с фоточувствительной областью из твердого раствора InAsSb , выращиваемых на подложке InAs , в которых при вводе излучения через подложку получена длинноволновая граница фото чувствительности от 4 мкм ($x=0.08$, $T=77$ К, [3]) до 12 мкм ($x=0.4$, $T=295$ К, [4]), а также коротковолновая граница фоточувствительности от 2.2 до 3 мкм (77 К) [5].

Данная работа посвящена созданию и исследованию высокоэффективных ФД флип-чип конструкции с широким спектром фотоответа от 3 до 5 мкм ($\lambda_{0.1}=5.5$ мкм (77 К), 7.5 мкм (300 К)) на основе гетероструктуры $\text{N-InAsSbP/InAsSb}_{0.22}/\text{P-InAsSbP}$.

В работе, исследуются спектральные характеристики электролюминесценции и фоточувствительности, вольт-амперные характеристики в широком интервале температур, обсуждается влияние геометрии чипов в протяженных многоэлементных фотоприемниках на параметры чувствительности. Показано, что разработка фотоприемников с фоточувствительной областью на основе твердого раствора $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ в области составов $x=0.22$ – перспективна для создания быстродействующих матричных фотоприемников большой размерности с квантовой эффективностью близкой к предельно возможной ($QE=0.65$), работающих в широком интервале температур в спектральной области 3-5 мкм.

Список литературы

1. A. Rogalski, *Infrared and Terahertz Detectors (Third Edition)*, CRC Press, 2019
2. A. Rogalski, *Antimonide-based Infrared Detectors*, SPIE PRESS, 2017
3. Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Н.Г. Карпухина, А.А. Лавров, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стус, А.А. Усикова. Фотодиодная линейка 1×64 на основе двойной гетероструктуры $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}_{0.92}\text{Sb}_{0.08}/n^+\text{-InAs}$, ФТП, 50 (5), стр. 657-662 (2016)
4. A.A. Klimov, R.E. Kunkov, A.A. Lavrov, N.M. Lebedeva, T.C. Lukhmyrina, B.A. Matveev, M.A. Remennyi; «LWIR $\text{InAs}_{0.6}\text{Sb}_{0.4}$ photodiodes grown onto $n\text{-InAs}$ substrates», *Journal of Physics: Conference Series*, in press
5. Brunkov P.N. Il`inskaya N.D., Karandashev S.A., Lavrov A.A., Matveev B.A., Remennyi M.A., Stus` N.M., Usikova A.A., « $\text{InAsSbP/InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}/\text{InAs}$ DH photodiodes ($\lambda_{0.1} = 5.2$ um, 300 K) operating in the 77-353 K temperature range», *Infrared Phys. Technol.*, v.73, pp.: 232-237 (2015)

Плазменная полупроводниковая антенна

Титовец П. А.¹, Н.Н. Богачев^{1,2}, А.С. Брусенцев¹, С.Г. Догаев¹, С.Ю. Казанцев^{1,3}, А.И. Сатарева¹

¹МТУСИ

²ИОФ РАН

³Московский политех

e-mail: paveltitovec@mail.ru

Известно, что использование плазменных антенн [1,2], а также применение метаматериалов, с изменяемыми электромагнитными характеристиками [3] позволяет существенно улучшить функциональные свойства радиотехнических и телекоммуникационных устройств. Обычно, в качестве плазменных антенн использовалась газоразрядная плазма, получаемая при пробое газовых промежутков при пониженном давлении [2], либо плазма оптического пробоя воздушных промежутков, формируемая с помощью мощных лазеров [4]. При распространении в воздухе мощных фемтосекундных лазерных импульсов возникают плазменные филаменты, которые могут быть использованы для передачи энергии СВЧ-пучков [5]. Однако высокая цена лазерных установок и их низкая эффективность затрудняет практическое использование лазерных плазменных каналов, создаваемых в атмосферном воздухе. Альтернативный подход был предложен в работах [6, 7], где была показана эффективность использования лазерной плазменной полупроводниковой антенны для передачи СВЧ сигналов в спектральном диапазоне 6-7 GHz. Фотопроводящая плазма формировалась в передающей антенне при облучении Ge лазерным ИК диодом [6], либо волоконным лазером [7]. Целью настоящей работы являлось исследование возможности применения подобной фотопроводящей полупроводниковой антенны на основе Ge и GaAs для приема информационных сигналов в полосе частот используемой в сотовой связи и спутниковой навигации.

Эксперименты выполнялись на установке аналогичной той, что была использована в [7], но в этих исследованиях полупроводниковая антенна являлась приемной. В качестве приемника радиосигнала, аналогично [8] использовался измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения «ОБЗОР-304/1», либо Satellite Multi-functional Handheld Meter Twinkler SF-620S. Излучение от лазерного или светодиодного источника видимого света, направлялось на антенну, представляющую собой тонкую пластину из полупроводника, к которой крепились с помощью омических контактов металлические проводники. При облучении на полупроводнике формировалась прямоугольная область засветки до омических контактов. Также был исследован варианты: 1) полупроводниковая пластина посредством омического контакта припаивалась к разъему коаксиального кабеля, который подключался к приемнику радиосигналов; 2) вместо полупроводниковой пластинки припаивался фоторезистор MLG5506. Для получения полупроводниковой плазмы в Ge использовались матрицы светодиодов, общая мощность которых могла достигать 3 Вт. При проведении экспериментов с пластинками из GaAs и фоторезистором MLG5506 применялся синий диодный лазер, излучающий на $\lambda=450$ nm с максимальной мощностью до 2.5 W. Изменение температуры полупроводниковой антенны в процессе лазерного воздействия контролировалась с помощью тепловизионной камеры Seek Thermal.

Была исследована возможность применения полупроводниковой плазмы, формируемой излучением матрицы светодиодов в пластинах Ge и синим лазерным диодом в GaAs для создания плазменных приемных антенн. Получены зависимости амплитуды принимаемого радиосигнала в диапазоне 0.0003-3.2 ГГц от мощности засветки. Нами было также исследовано влияние мощности лазерного излучения на коэффициент передачи S11

полупроводниковой антенны из GaAs, Ge. Кроме этого в диапазоне 00.0003–3.2 ГГц получены зависимости коэффициентов стоячей волны по напряжению (КСВН) и полного сопротивления от плотности облучения полупроводниковых пластин и фоторезистора. Показано, что эффективность приема полезного сигнала при формировании в кристаллах GaAs и Ge плазменной антенны может быть увеличена в несколько раз, а использование фоторезистора в контуре антенны позволяет с помощью лазера управлять согласованием антенны с радиоприемным трактом. Предложена концепция создания конфигурируемых плазменных фотопроводящих антенн, которая может быть перспективна для применения в системах космической связи.

Список литературы

1. Kumar Alexeff, I., Anderson, T., Parameswaran, S., Pradeep, E. P., Hulloli, J., & Hulloli, P. (2006). Experimental and theoretical results with plasma antennas. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 34(2), 166-172.
2. Гусейн-заде Н. Г. и др. Физические принципы работы плазменных антенн //Радиотехника и электроника. – 2011. – Т. 56. – №. 10. – С. 1216-1220.
3. Вендик И. Б., Вендик О. Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор) //Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – №. 1. – С. 3-28.
4. Колпаков В.И., Норинский Л.В. Каналирование электромагнитного излучения динамическими плазменными дифракционными решетками //Письма в ЖТФ. – 1992. – Т. 18. – №. 12. – С. 55-59.
5. Богатов Н. А. и др. Каналирование СВЧ излучения по двухпроводной линии, содержащей плазменный филамент, создаваемый интенсивными фемтосекундными лазерными импульсами в воздухе //Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39. – №. 10. – С. 985-988.
6. Богачев Н. Н. и др. Полупроводниковые плазменные антенны, формируемые лазерным излучением //Письма в ЖТФ. – 2019. – Т. 45. – №. 24. – С. 6-9.
7. Bogachev N. N. et al. Plasma antennas formed in a Ge crystal under laser irradiation //XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications. – International Society for Optics and Photonics, 2019. – Т. 11322. – С. 113221P.
8. Казанцев С. Ю., Титовец П. А., Брусенцев А. С. и др. Рамочная антенна с лазерным управлением //Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2021. – Т. 12. – № 1. – С. 36-47.

Особенности технологии спекания для источников излучения ближнего ИК-диапазона

Рочас С. С.¹, Новиков И.И.¹, Бабичев А.В.¹, Воропаев К.О.², Егоров А.Ю.¹

¹ Университет ИТМО

² АО «ОКБ-Планета»

e-mail: rochas.stanislav@gmail.com

На сегодняшний день существуют разнообразные методы соединения полупроводниковых пластин, которые в общем виде можно разделить на прямую технологию и технологию с промежуточным слоем. Использование промежуточного слоя нашло свое применение в КМОП-технологиях и гибридной интеграции в кремниевой фотонике [1], однако

для создания лазерных структур ближнего ИК диапазона на основе систем материалов АЗВ5 такой подход не является оптимальным ввиду образования огромных потерь внутри резонатора как в результате поглощения света на промежуточных металлических слоях и рассеяния на неровностях, так и в результате сдвига резонансной длины волны. Прямая технология соединения пластин включает в себя метод молекулярного соединения пластин (далее спекание пластин от англ. wafer fusion), подходящее как для соединения кремния, так и для материалов АЗВ5 таких как GaAs и InP [2]. В его основе лежит высокотемпературный отжиг пластин при определенной ориентации друг относительно друга и при значительном приложенном давлении. Для успешного межмолекулярного соединения пластин силами Ван-дер-Ваальса необходимо устранить воздушные полости между ними, для чего за счет предварительной подготовки с поверхности пластин необходимо удалить органические загрязнения и окислы.

Нами было осуществлено сухое спекание эпитаксиальных слоев GaAs и InP, GaAs и InGaAsP, выращенных на подложках GaAs, InP методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Для спекания применялась установка соединения пластин EVG 510 с использованием пневматического пресса в условиях высокого вакуума, давление составляло 10^{-6} мбар, температура 600 °С, контактное усилие 7 кН в течение 30 мин. Поскольку при быстром охлаждении возможно разрушение спекаемых пластин, а из-за существенной разницы в коэффициенте теплового расширения GaAs и InP спеченная структура претерпевает упругие деформации, нами был выбран медленный режим остывания образца со скоростью охлаждения не превышающей 10 °С/мин. Спекание при более низких температурах (350 °С) в вакууме возможно, однако вероятность расслоения спеченной пластины велика [3].

Анализ полученных методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) - изображений интерфейсов спекания слоев GaAs/InP указал на большое число светлых участков на границе спекания как со стороны InP, так и со стороны GaAs, обусловленных, по всей видимости, внедрением вакансий/пор и образованием аморфного слоя с различными типами оксидов АЗВ5. Толщина интерфейса спекания GaAs/InP составила порядка 1-3 нм. Последующая оптимизация предварительной подготовки поверхностей пластин в кислородной плазме и травителях HCl : H₂O и HF : H₂O с увеличением температуры предварительного поверхностного отжига позволила обеспечить высокую планарность границ и однородность по толщине в области интерфейса спекания и, соответственно, значительно уменьшить число светлых участков ПЭМ-изображения на границе спекания. При анализе ПЭМ-изображений разориентации решеток GaAs и InP в плоскости изображения (110), параллельной интерфейсу спекания, не было выявлено. Сравнительно с интерфейсом спекания GaAs/InP, интерфейс спекания GaAs/InGaAsP имел меньшую толщину (1–2 нм) и анализ ПЭМ-изображений данного интерфейса свидетельствовал об отсутствии воздушных полостей и следов протяженных дефектов в области спекания. В случае же образования светлых участков толщина интерфейса спекания увеличивалась до 5–8 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90198.

Список литературы

1. Alexe M., Gösele U. (ed.). Wafer bonding: applications and technology. – Springer Science & Business Media, 2013. – Т. 75.
2. Tanabe K., Watanabe K., Arakawa Y. III-V/Si hybrid photonic devices by direct fusion bonding // Scientific reports. – 2012. – Т. 2. – №. 1. – С. 1-6.
3. Xie S. et al. Low-temperature direct wafer bonding of GaAs/InP // Superlattices and Microstructures. – 2009. – Т. 45. – №. 2. – С. 47-53.

Модель деградации InGaN/GaN светодиода при токовых испытаниях с учетом неоднородного распределения концентрации дефектов в гетероструктуре

Фролов И. В.^{1,2}, Радаев О.А.¹, Ходаков А.М.¹, Сергеев В.А.^{1,2}

¹УФирЭ им.В.А.Котельникова РАН

²УЛГТУ

e-mail: ilya-frolov88@mail.ru

Разработана модель деградации мощности оптического излучения InGaN/GaN светодиода при испытаниях под действием прямого тока, учитывающая неоднородное распределение концентрации дефектов в гетероструктуре. Согласно модели, основным процессом, вызывающим спад оптической мощности светодиода, является диффузия атомов примеси Mg из барьерного р-слоя гетероструктуры в активную область, которые образуют центры безызлучательной рекомбинации [1]. Светодиод представляется как совокупность двух параллельно включенных диодов с размерами площадей активных областей S_1 и S_2 и средними концентрациями дефектов N_1 и N_2 ($N_2 > N_1$) в этих областях [2]. В качестве параметра модели используется коэффициент $K_s = S_2/S_1$, показывающий, во сколько раз доля площади активной области светодиода с высокой концентрацией дефектов отличается от доли площади активной области с низкой концентрацией дефектов. Математическая модель включает в себя уравнение баланса, составленное на основании ABC модели рекомбинации носителей заряда для нахождения концентрации неравновесных носителей в областях S_1 и S_2 гетероструктуры, и уравнение диффузии примесных атомов. Диффузионная задача решается численным методом конечных элементов с помощью моделирующей среды Comsol Multiphysics.

Согласно результатам моделирования, темп деградации оптической мощности излучения светодиода существенно зависит от степени неоднородности профиля распределения концентрации: в процессе испытаний мощность излучения быстрее падает у светодиодов с большим значением параметра K_s . Для представленных расчетных вариантов увеличение параметра K_s от 0.3 до 0.8 приводит к сокращению времени деградации оптической мощности в 4 раза.

Выполнена экспериментальная апробация модели. Для этого проведены ускоренные испытания под действием тока повышенной плотности в течение 500 ч группы коммерческих светодиодов зеленого свечения фирмы Oasistek с различной степенью неоднородности профиля распределения концентрации дефектов. Измерения профиля распределения концентрации дефектов и оценка степени его неоднородности проводились способом, представленным в [3]. Показано, что экспериментальные результаты качественно согласуются с результатами теоретических расчетов.

Предложенная модель позволяет прогнозировать темп деградации InGaN светодиодов с различной степенью неоднородности профиля распределения концентрации дефектов и будет использована при разработке методики отбраковки дефектных и потенциально ненадежных светодиодов, склонных к ранней деградации, с учетом различия в степени неоднородности состава гетероструктуры.

Исследование выполнено в рамках государственного задания при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-00562 А.

Список литературы

1. Сергеев В. А., Ходаков А. М., Фролов И. В., Модель деградации InGaN/GaN светодиода при токовых испытаниях с учетом неоднородного распределения температуры и плотности тока в гетероструктуре, РЭНСИТ, т. 12, №3, 329–334, 2020.
2. Ходаков А. М., Фролов И. В., Сергеев В. А. Модель деградации InGaN/GaN светодиода с учетом неоднородности распределения дефектов в гетероструктуре // Радиоэлектронная техника: межвузов. сб. науч. тр. – Ульяновск: УЛГТУ, 2020. – С. 66–70.
3. Frolov I. V., Radaev O. A., Sergeev V. A., Change of the defects density distribution profile over the area of the InGaN/GaN light-emitting heterostructures during current tests, Journal of Physics: Conference Series, V. 1697, 012165, 2020.

Исследования GaAs фотопреобразователей с InAs квантовыми объектами при мощном подзонном облучении

Паньчак А. Н.¹, Минтаиров С. А.¹, Минтаиров М. А.¹, Салий Р. А.¹, Калюжный Н. А.¹, Нахимович М. В.¹ и Шварц М. З¹.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: a.panchak@mail.ioffe.ru

Одно из актуальных направлений в развитии физики и технологии - использование квантовых объектов (КО) в полупроводниковых структурах и приборах на их основе, в частности в фотопреобразователях (ФП) излучений. Их применение позволяет тонко манипулировать световыми потоками, а также генерацией и рекомбинацией неравновесных носителей заряда. Встраивание КО в активную область ФП расширяет их спектральную чувствительность в длинноволновую область. Поглощение подзонных фотонов в этом случае происходит через локализованные уровни в запрещенной зоне основного материала [1]. Фотогенерированные электроны используют их как ступеньку для перехода из валентной зоны в зону проводимости, давая вклад в фототок.

Технология встраивания InAs КО в активную область GaAs на практике может быть применена при производстве трехпереходных GaInP/GaAs/Ge ФП. Так за счет расширения спектральной чувствительности среднего субэлемента часть длинноволнового излучения будет поглощаться в нем, а не в Ge субэlemente исходно имеющим превышение по фототоку. Токогенерация в GaAs субэlemente возрастает, с ожидаемым увеличением эффективности фотоэлектрического преобразования солнечного излучения. Практически наблюдаемый прирост фототока в образцах составляет до 0,07 мА/см² в пересчете на один слой InAs квантовых объектов при облучении ФП солнечным излучением ~100 мВт/см² [2].

Использование многопереходных высокоэффективных ФП в модулях концентраторами солнечного излучения предполагает их работу при подводимой оптической мощности более 50 Вт/см² (кратность концентрирования 500 и более). Поэтому исследования фотоэлектрических характеристик ФП со встроенными квантовыми объектами в режимах высоких и сверхвысоких облученностей представляют интерес с физической и прикладной точек зрения.

Ранее этот вопрос рассматривался с теоретической точки зрения [3]. Был исследован разогрев активной области основного материала GaAs за счет термализации

неравновесных носителей заряда, сгенерированных в InAs КО. Установлено, что разогрев за счет поглощения света в квантовых точках невозможен из-за ограниченного количества локализованных энергетических уровней. В тонких (так называемых «смачивающих») слоях такого ограничения нет, а при высокоинтенсивном облучении возможен заметный разогрев активной области, что будет оказывать влияние на регистрируемые характеристики ФП.

Настоящая работа посвящена практическому исследованию фотоотклика GaAs ФП с InAs квантовыми объектами (тонкими слоями и квантовыми точками) в активной области при высокоинтенсивном облучении. Для более точного определения факторов, влияющих на фотоэлектрические параметры исследуемой структуры, использовались лазеры с длиной волны излучения настроенной на полосу поглощения основного материала GaAs или квантовых объектов. Непосредственное селективное световое воздействие на квантовые объекты позволило установить зависимость эффективности токогенерации встроенных квантовых объектов от мощности подводимого излучения, а также выявить термодинамическое влияние мощной монохроматической лазерной засветки на фотоэлектрические параметры исследуемых структур и ФП.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-70070

Список литературы

1. A. Martí, L. Cuadra, A. Luque «Quantum dot intermediate band solar cell» in: Proc. 28th IEEE Photovoltaics Specialists Conference, IEEE, New York, 2000, pp. 940-943
2. N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, R.A. Salii, A.M. Nadochiy, A.S. Payusov, P.N. Brunkov, V.N. Nevedomsky, M.Z. Shvarts, A. Marti, V.M. Andreev, A. Luque, Increasing the quantum efficiency of InAs/GaAs QD arrays for solar cells grown by MOVPE without using strain-balance technology, Prog Photovoltaics, 24, 1261-1271, 2016
3. A N Panchak, S A Mintairov, M A Mintairov, R A Salii, N A Kalyuzhnyy, M V Nakhimovich and M Z Shvarts, Photovoltaic converters with quantum objects under laser flux of subband photons, J. Phys.: Conf. Ser. 1697 012189, 2020

Исследование энергетических возможностей AlGaInN светодиодов в режиме больших импульсных токов

Иванов А. Е.^{1,2}, Черняков А.Е.¹

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

²НТЦ Микроэлектроники РАН

e-mail: a-e-ivano-v@yandex.ru

Новые применения AlInGaN светодиодов за пределами светотехники, например, в системах VLC (LiFi) или для накачки твердотельных лазеров, требуют импульсные режимы работы с достижением предельно возможной мощности (энергии) излучения в импульсе. В то же время главный «ограничитель» выходной оптической мощности нитридных светодиодов – эффект “efficiency droop” [1] исследовался в многочисленных работах преимущественно в условиях постоянного (или квазипостоянного) тока, используемого в осветительных приборах

Целью данной работы являлось выяснение предельных энергетических возможностей мощных AlInGaN светодиодов (СД) вертикальной конструкции Semileds EV-B40A, площадью $\sim 1 \text{ мм}^2$, и причин, их лимитирующих, при работе излучателей в режиме микросекундных импульсов при сверхвысоких токах – до 70 А ($j \sim 7 \text{ кА/см}^2$)

Были проанализированы зависимости мощности и спектров излучения от тока, а также аналогичные зависимости для ближнего поля излучения: мэппинг спектрального, токового и температурного распределения по площади излучающего кристалла.

Импульсный режим питания СД обеспечивался с помощью генератора прямоугольных импульсов Agilent 8114A и усилителя PicoLAS LDP-V 80-100 V3.3. Оптическая мощность и спектральные характеристики регистрировались комплексом «OL 770-LED High-speed LED Test and Measurement System».

Картина ближнего поля собственной электролюминесценции (ЭЛ) включала как распределение интенсивности излучения, так и спектра излучения в зависимости от положения (координаты) излучающей точки на поверхности кристалла. ЭЛ СД регистрировалось в оптическом микроскопе Mitutoyo, оснащённым спектрометром Avantes AvaSpec-2048. Оптическая система и входная апертура спектрометра обеспечила пространственное разрешение $\sim 30 \text{ мкм}$. Картина ближнего поля ЭЛ, отображающая интенсивность и спектр излучения (в частности, коротковолновый сдвиг) в данной точке излучающей поверхности, позволяет оценить плотность тока в данной точке в зависимости от уровня возбуждения.

Проведенный анализ зависимостей мощности и внешнего квантового выхода в рамках ABC-модели [2] в совокупности с анализом картины ближнего поля выявил следующее. До определённых, относительно небольших плотностей токов ($< 70 \text{ А/см}^2$) падение внешнего квантового выхода с током удовлетворительно описывается падением внутреннего квантового выхода из расчета по ABC – модели. Затем, при дальнейшем росте тока, существенную роль начинает играть шнурование тока (current crowding) вблизи контактных площадок, что приводит к падению коэффициента вывода излучения. Показано, что при больших рабочих токах становится некорректным построение мощностных зависимостей от средней плотности тока по кристаллу для интерпретации физических механизмов инжекции и рекомбинации. Для различных токов была произведена оценка распределения плотности тока по площади кристалла между n-контактами ($d = 240 \text{ мкм}$) по величине коротковолнового смещения пиковой длины волны. При этом для максимального тока $I = 70 \text{ А}$ разница в плотности вблизи контакта и в середине между контактами составила не менее порядка.

Список литературы

1. J.Cho, E. F. Schubert, J.Kim. Efficiency droop in light-emitting diodes: Challenges and countermeasures. *Laser Photonics Rev.* 7, No. 3, 408–421 (2013)
2. S. Yu. Karpov. ABC -Model for Interpretation of Internal Quantum Efficiency and Its Droop in III-Nitride LEDs: A Review. *Opt. Quantum Electron.* 47, No 6, 1293-1303 (2015)

Проверка в безэховой камере диаграммы направленности активной фазированной антенной решетки в дальней зоне с помощью использования волоконно-оптической системы.

Мороз А. В.¹

¹СПбПУ

e-mail: moroz.com3844@gmail.com

В современном мире постоянно расширяется круг задач, для решения которых применяются радиолокационные станции (РЛС). Среди широкого класса используемых РЛС особое место занимают станции, в которых применяются активные фазированные антенные решетки (АФАР) [1, 2]. В большинстве случаев АФАР размещаются на подвижных объектах с ограничениями по движению в пространстве. Это не позволяет проводить сканирование (механическое) АФАР в горизонтальной и вертикальной плоскости в больших диапазонах (угол места и азимутальный угол в последних моделях можно изменять не более чем на 10°). Основное сканирование АФАР в пространстве осуществляется за счет изменения положения направления диаграммы направленности, которая формируется подачей управляющих сигналов на приемопередающие элементы антенны. Поэтому для РЛС воздушного базирования с АФАР, работающими в режиме обзора, очень важна точность определения диаграммы направленности, особенно в дальней зоне. Дальняя зона РЛС имеет множество определений, для активной фазированной антенной решетки наиболее целесообразно использовать следующее соотношение [2, 3]: $r_0 \gg (2L^2)/\lambda$, где r_0 – расстояние до объекта, L – расстояние между крайними префокусирующими элементами антенны, λ – длина волны излучения. Необходимо отметить, что в дальней зоне угловое распределение поля несущественно зависит от изменения расстояния до антенны.

В большинстве находящихся в эксплуатации АФАР дальняя зона соответствует расстоянию более 300 м. Это создает большие проблемы при настройке и тестировании антенны в безэховой камере (БЭК). Использование БЭК для проверки АФАР позволяет выявить различные дефекты как в конструкции самой антенны, так и в излучательных элементах и системах монтажа. Это позволяет после устранения данных дефектов провести оптимальную настройку антенны для получения максимальной чувствительности при различных режимах сканирования. Современные конструкции БЭК имеют размеры не более 200 м в длину и ширину. Чем больше габариты БЭК, тем дороже её эксплуатация и стоимость изготовления, поэтому стандартный размер БЭК – 20 x 15 м. Это создает сложности с проведением исследований диаграммы направленности антенны в дальней зоне.

Для решения этой задачи нами предлагается следующий метод имитации проверки диаграммы направленности АФАР в дальней зоне. Тестирование проводится в безэховой камере с использованием широконаправленной рупорной антенны, расположенной на расстоянии l , кратном r_0 , от излучающей антенны. Так как значение r_0 изменяется по причине изменения длины волны СВЧ излучения, наши исследования проводятся на расстоянии $l=1$ м.

При работе на таком расстоянии передающие тракты очень сложно защитить от наводок, вызванных большой излучательной мощностью АФАР. Большая мощность необходима, чтобы оценить уровень боковых лепестков и ширину диаграммы направленности. Искращения, возникающие при передаче сигнала приемной антенны из БЭК к оборудованию обработки измерений, не позволяют правильно оценить работоспособность АФАР.

Для решения этой задачи нами была разработана волоконно-оптическая система передачи, позволяющая передавать сигнал из БЭК к измерительной аппаратуре через зону

сложной электромагнитной обстановки (в БЭК только один вход для всех коммутационных систем и питающих напряжений, в том числе высоковольтных).

Полученные результаты показали, что результирующая диаграмма направленности, снятая на расстоянии метра с использованием широконаправленной рупорной антенны, аналогична диаграмме направленности, измеренной на большом расстоянии (в дальней зоне) от АФАР на полигоне. Использование волоконно-оптической системы передачи предотвращает появление искажений при передаче сигнала из безэховой камеры к аппаратуре для последующей обработки, что позволяет выявлять дефекты, которые невозможно установить при использовании фидерных трактов для передачи СВЧ сигнала.

Список литературы

1. Moroz A. V., Davydov R. V., Davydov V. V. A New Scheme for Transmitting Heterodyne Signals Based on a Fiber-Optical Transmission System for Receiving Antenna Devices of Radar Stations and Communication Systems, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), Vol. 11660 LNCS, 710-718, 2019
2. Савельев И. К., Кагановский В. Э., Волоконно-оптическая система передачи информации для тестирования активных фазированных антенных решеток в безэховой камере, Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2017»
3. Волобоев В.П., Клименко В. П., Лосев В. Д., Радиолокационная станция воздушного (морского) базирования, работающая в динамически сложных внешних условиях, Математическое машиностроение и системы, № 4, 131 – 142, 2005

Конструкция инжекционного источника одиночных фотонов спектрального диапазона 1.3 мкм на основе вертикального микрорезонатора с внутрирезонаторными контактами и оптическими оксидными апертурами

Блохин С. А.¹, М.А. Бобров¹, Н.А. Малеев¹, А.А. Блохин², А.П. Васильев², А.Г. Кузьменков², V.A. Shchukin^{3,4}, N.N. Ledentsov⁴, S. Reitzenstein³, В.М. Устинов²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²НТЦ Микроэлектроники РАН

³Technische Universität Berlin, Germany

⁴VI Systems GmbH, Germany

e-mail: grey.nabat@gmail.com

В последние годы к проблеме создания истинных квантовых источников света с неклассической статистикой излучения на основе изолированной квантовой системы, в виде полупроводниковой InAs квантовой точке (КТ), приковано большое внимание. Одним из ключевых параметров микрорезонатора источника одиночных фотонов (ИОФ) является эффективность вывода фотонов (ЭВФ) и фактор Парселла (F_p). В настоящее время для КТ ИОФ спектрального диапазона 0.9 мкм экспериментально продемонстрирована возможность достижения ЭВФ=74±4% и $F_p=5.8\pm0.2$ в конструкции цилиндрического вертикального микрорезонатора с оптической накачкой [1] и ЭВФ=61±11% и $F_p=3.2\pm0.4$ в конструкции цилиндрического вертикального микрорезонатора с инжекционной накачкой [2]. Однако для КТ ИОФ спектрального диапазона 1.3 мкм достижения более скромные:

показана лишь возможность достижения $\text{ЭВФ}=36\pm 5\%$ и $F_p=4.4\pm 0.5$ в конструкции фотонного кристалла с оптической накачкой [3]. В этой связи разработка перспективных конструкций ИОФ спектрального диапазона 1.3 мкм представляется крайне актуальной задачей.

Реализация инжекционных ИОФ спектрального диапазона 1.3 мкм сопряжена с проблемой поглощения на свободных носителях в сильнолегированных слоях и падением проводимости слоев при криогенных температурах. В настоящей работе приведены результаты численного моделирования конструкций ИОФ спектрального диапазона 1.3 мкм с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контактные слои (ВРК-слои). Отличительной особенностью такого типа конструкций является требование формирования цилиндрического микрорезонатора только в верхнем распределенном брэгговском отражателе (РБО). В этом случае слабое ограничение моды в поперечном направлении приводит к огромной утечке через боковые стенки и ограничивает общую эффективность $\text{ЭВФ}\sim 40\%$ и падению F_p в 3.5-4 раза по сравнению с базовой конструкцией полупроводникового цилиндрического вертикального микрорезонатора ($\text{ЭВФ}\sim 90\%$ и $F_p\sim 14$ для 1λ-резонатора). Частичное решение проблемы связано с применением высококонтрастных РБО, которые позволяют подавить утечку излучения вниз и частично перенаправить излучение из резонатора вверх. Ключевым моментом является расширение резонатора с 1λ до 3λ и введение четырех оптических апертур на основе оксидных апертурных слоев. Расположение оптических апертур в минимумах электромагнитного поля (ЭМ) оптической моды не оказывает существенного влияния на распределение ЭМ поля моды в резонаторе и боковая утечка излучения по-прежнему велика ($\text{ЭВФ}\sim 56\%$ и $F_p\sim 3$). С другой стороны, расположение оптических апертур в максимумах ЭМ поля моды позволяет усилить оптическое ограничение в поперечном направлении, что с учетом меньшего объема моды ведет к росту F_p до ~ 20 . Однако, при этом сильное рассеяние света на оптических апертурах ограничивает ЭВФ на уровне 55%. При промежуточном положении оптических апертур удастся достичь оптимума: снизить боковую утечку излучения и реализовать ЭВФ более 70%, а также одновременно обеспечить высокий уровень F_p ($\sim 12-15$). Более того, благодаря существенному перераспределению ЭМ поля моды в резонаторе наблюдается заужение диаграммы направленности излучения, что позволяет повысить ЭВФ в апертурном угле $\text{NA}=0.12$ более чем в 2.5-раза по сравнению с базовой конструкцией цилиндрического микрорезонатора.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) совместно с Немецким научно-исследовательским сообществом (ННИО) в рамках научного проекта РФФИ №20–52–12006 и проекта ННИО Re2974/24–1.

Список литературы

1. Unsleber S., He Yu–M., S Gerhardt., Maier S., C Lu h.–Y., Pan J.–W., Gregersen N., Kamp M., Schneider Ch., Höfling S., Highly indistinguishable on–demand resonance fluorescence photons from a deterministic quantum dot micropillar device with 74% extraction efficiency, *Opt. Express* 24(8), 8539–8546 (2016)
2. Schlehahn A., A Thoma., Munnelly P., Kamp M., Höfling S., Heindel T., Schneider C., Reitzenstein S., An electrically driven cavity–enhanced source of indistinguishable photons with 61% overall efficiency, *APL Photonics* 1(1), 011301 (2016)
3. Kim Je–H., Cai T., Richardson Ch.J.K., Leavitt R.P., Waks E., Two–photon interference from a bright single–photon source at telecom wavelengths, *Optica* 3 (6), 577–584 (2016)

Исследование влияния прорастающих дислокаций на характеристики фотодиодных гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}/\text{AlN}$ с высоким содержанием Al ($x>0.6$), выращенных на различных темплейтах

Буренина Д. С.¹, Нечаев Д.В.¹, Семенов А.Н.¹, Ратников В.В.¹, Жмерик В.Н.¹, Нагорный А.В.²,
Ржеуцкий Н.В.², Луценко Е.В.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Институт физики им. А.Н. Степанова Белорусской академии наук

e-mail: dsburenina@gmail.com

Гетероструктуры на основе твердых растворов AlGaIn , с шириной запрещенной зоны, варьируемой от 3.4 до 6.1 эВ, являются основой оптоэлектронных приборов для ультрафиолетового (УФ) диапазона с длиной волны 210-365 нм. В частности, солнечно-слепые УФ-фотодиоды с рабочей длиной волны менее 300 нм позволяют с высокой чувствительностью детектировать различные источники УФ-излучения, что необходимо для развития УФ-спектроскопии, УФ-оптической связи и др. В таких фотодиодах используются n -легированные слои $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}$ с высоким содержанием Al ($x \geq 0.6$) и буферные слои AlN , которые выращиваются, как правило, на подложках c -сапфира с высокой прозрачностью в УФ-диапазоне и химической/радиационной стойкостью. Однако, большое кристаллографическое рассогласование между c - Al_2O_3 и AlN (-11.7%) обуславливает в гетероструктурах высокую концентрацию прорастающих дислокаций, распространяющихся вплоть до верхних активных областей фотодиодных структур и через которые протекают токи утечки, резко снижающие характеристики приборов [1].

В настоящей работе исследовались дефекты в фотодиодных гетероструктурах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}/\text{AlN}$, с высоким содержанием Al ($x>0.6$), которые выращивались с помощью плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии (ПА МПЭ) либо на подложках c - Al_2O_3 [2], либо на AlN/c - Al_2O_3 темплейтах, предварительно выращенных с помощью газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МО). Для роста AlGaIn слоев в гетероструктурах использовались температурно-модулированная эпитаксия, что позволило избежать образования микрокапельной металлической фазы на поверхности слоев, несмотря на металл-обогащенные условия и относительно низкие температуры подложки (690-700°C). Для оценки количества дефектов использовались два стандартных метода. В первом методе на основе рентгенодифракционного анализа концентрации винтовых и краевых прорастающих дислокаций определялись из полуширин кривых качания симметричных и кососимметричных рефлексов соответственно. В другом - металлографическом методе, дислокации выявлялись с помощью химического травления поверхности в H_3PO_4 при температуре 160°C в течении 15 секунд, которое приводит к образованию в местах выхода дислокаций на поверхность гексагональных ямок травления, легко наблюдаемых в оптическом и/или атомарно-силовом микроскопах. На основе гетероструктур $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}/\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}:\text{Si}/\text{AlN}$, выращенных в одинаковых условиях как на ПА МПЭ- AlN буферных слоях, так и на ГФЭ МО темплейтах были изготовлены фотодиоды Шоттки.

Рентгенодифракционный анализ буферных слоев AlN показал, что плотности прорастающих винтовых и краевых дислокаций в AlN -темплейтах равнялись $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ и $1.3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$, соответственно, в то время как в буферных слоях ПА МПЭ- AlN эти значения составили $6.3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ и $7.3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Однако, если для ГФЭ МО-темплейтов

металлографический метод в целом подтвердил значения концентраций, установленные рентгенодифракционным методом, то для слоев ПА МПЭ-AlN было обнаружено отсутствие каких-либо признаков травления поверхности. В качестве возможной причины этого впервые обнаруженного явления обсуждаются особенности роста AlGaIn слоев в металл-обогащенных условиях при низких температурах подложки, приводящих к формированию поверхностных бислоев атомов третьей группы и сплошному покрытию поверхности без образования локальных ямок в местах выхода дислокаций.

В работе также рассматриваются особенности токов утечек в обоих типах фотодиодных структурах. Было обнаружено, что токи утечки в диодах на ПА МПЭ буферных слоях в два раза ниже значений, наблюдавшихся для аналогичных структур, выращенных на ГФЭ МО темплейтах. Это указывает на неоднозначную связь между током утечки через фотодиодную структуру и плотностью дислокаций в ней. Более того, этот вывод подтверждается более высокой чувствительностью (до 50 мА/Вт) в фотодиодах Шоттки на ПА МПЭ буферных слоях по сравнению с максимальным значением чувствительности 24 мА/Вт, наблюдавшимся для фотодиодов на ГФЭ-темплейтах.

Работа частично поддержана РФФИ (№ 21-52-50004).

Список литературы

1. Michael W. Moseley, Andrew A. Allerman, Mary H. Crawford, Jonathan J. Wierer, Michael L. Smith, and Andrew M. Armstrong // Detection and modeling of leakage current in AlGaIn-based deep ultraviolet lightemitting diodes // J. Appl. Phys. 117, 095301 (2015).
2. V.N. Jmerik, D.V. Nechaev, S.V. Ivanov, Kinetics of metal-rich PA molecular beam epitaxy of AlGaIn heterostructures for mid-UV photonics, in: M. Henini (Ed.), Molecular Beam Epitaxy: from Research to Mass Production, second ed., Elsevier Inc., 2018, pp. 135–179.

Повышение фоточувствительности солнечно-слепых фотокатодов AlGaIn:Mg за счёт введения варизонной активной области

Николаева А. В.¹, Д.В. Нечаев, В.Н. Жмерик

¹СПбПУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: nikolaeva5.av@edu.spbstu.ru

В настоящее время активно разрабатываются фотоприемные устройства для практически важного «солнечно-слепого» ультрафиолетового (УФ) спектрального диапазона ($\lambda < 290$ нм), среди которых значимое место занимают солнечно-слепые фотокатоды (ФК) с отрицательным электронным сродством на основе нитридов III группы. Эти материалы обладают высокой химической, тепловой и радиационной стойкостью, а также возможностью прецизионного контроля длинноволновой границы фоточувствительности ФК за счет варьирования состава слоев тройных соединений $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, используемых в активных областях. Однако, квантовая эффективность ФК существенно снижается при переходе от видимого к солнечно-слепому диапазону, что обусловлено, в первую очередь, сложностью *p*-легирования слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N:Mg}$ с высоким содержанием Al ($x > 0.4$) из-за возрастания энергии активации *p*-примеси Mg. Кроме того, нитридные соединения, как

правило, характеризуются низкими диффузионными длинами свободного пробега электронов $l_e=50-100$ нм [1], что связано с наличием сильного рассеяния электронов в тройных соединениях $Al_xGa_{1-x}N$ в диапазоне $0.4 < x < 0.9$ [2]. Кроме того, для изготовления ФК на основе $AlGaN/AlN$ гетероструктур с засветкой через подложку в качестве последних используются, как правило, гетероподложки $c-Al_2O_3$ с большим рассогласованием относительно AlN (-11.7%). Это приводит к высокой плотности прорастающих дислокаций (до $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$), обуславливающих дополнительное уменьшение значений l_e .

В работе проведен теоретический анализ влияния на квантовую эффективность ФК основных параметров их активной области, включая l_e , а также толщину активной области. Было установлено, что в существующих ФК вследствие влияния различных дефектов, ограничивающих высокие значения l_e , оптимальное значение толщины активной области, как правило, не достигается, и эффективность поглощения внешнего УФ сигнала в активных слоях снижается до 50-70%. Показано, что использование в конструкции ФК варизонных слоев $Al_xGa_{1-x}N:Mg$ с линейно изменяющимся составом приводит к введению постоянного электрического поля, ускоряющего электроны к эмитирующей поверхности. Для учета этого эффекта в расчетах использовалась дрейфовая и диффузионная длина, что привело к увеличению эффективной толщины активной области. Показано, что в результате повышения эффективности поглощения внешнего УФ излучения, квантовая эффективность ФК может быть увеличена более чем в 2 раза.

Для проверки расчетов с помощью метода плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии были выращены гетероструктуры $AlGaN:Mg/AlN/c-Al_2O_3$. Для роста буферных слоев AlN (~ 2 мкм) последовательно использовались эпитаксия с повышенной миграцией адатомов и метод метал-модулированной эпитаксии AlN в слабых Al -обогащенных условиях ($Al/N \sim 1.05$), что привело к снижению прорастающих дислокаций до значений $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Верхние активные слои $AlGaN:Mg$ были выращены при непрерывной подаче ростовых потоков Al , Ga и активированного азота в Ga -обогащенных условиях при температуре подложки $\sim 700^\circ\text{C}$. Это позволило прецизионно управлять составом тройного соединения за счет варьирования только потока Al при других неизменных условиях. Исследовались структуры ФК с с верхним активным $Al_xGa_{1-x}N:Mg$ слоем как с постоянным, так и переменным ($0.4 < x < 0.8$) содержанием Al . Отрицательное электронное сродство поверхностей выращенных ФК достигалось после напыления на них в сверхвысоковакуумных условиях слоев $Cs-O$. В результате было получено, что структуры ФК с переменным содержанием Al в $AlGaN:Mg$ активных слоях, изменявшимся в соответствии с нашими расчетами, характеризуются наличием электрического поля ~ 20 кВ/см. Это обеспечивает для них максимальную фоточувствительность 27 мА/Вт на длине волны 226 нм, в то время как фоточувствительность стандартного ФК с постоянным содержанием Al в активной области составляла 14 мА/Вт на длине волны 280 нм [3]. Полученные результаты хорошо согласуются с проведенными теоретическими расчетами.

Список литературы

1. G. Hao, J. Liu, S. Ke, Appl. Opt. 56(35) (2017) 9757-9761.
2. M.E. Coltrin, R.J. Kaplar J. Appl. Phys. 121, (2017) 055706.
3. N. Atanov, Y. Davydov, V. Glagolev, V. Tereshchenko, D. Nechaev, S. Ivanov, V. Jmerik IEEE Transactions on Nuclear Science 67(7), (2020) 1760 – 1764.

Исследование дефектов в структурах на основе гетероперехода BP/Si

Максимова А. А.^{1,2}, Баранов А.И.¹, Гудовских А.С.^{1,2}, Уваров А.В.¹

¹СПБАУ РАН

²СПБГЭТУ (ЛЭТИ)

e-mail: deer.blackgreen@yandex.ru

Для эффективного функционирования любых солнечных элементов необходимо разделить фотогенерированные электроны и дырки и собрать их на противоположных контактах. В большинстве c-Si солнечных элементов этого достигают путем диффузии легирующих веществ противоположной полярности на противоположные поверхности пластины, которые создают области очень высокой проводимости только для одного из двух носителей. Несмотря на доказанную эффективность, такой подход может ограничивать производительность из-за оптоэлектронных потерь и технологических несовершенств. Эти проблемы мотивировали исследования альтернативных подходов, при которых селективные материалы или структуры осаждаются на поверхность пластины c-Si.

Впервые селективные контакты были использованы в кремниевых гетеропереходных солнечных элементах (HET-Si). Структура HET-Si, содержит очень тонкий слой гидрогенизированного аморфного кремния (a-Si:H), обеспечивающий хорошую химическую пассивацию поверхности c-Si, и слоя легированного a-Si:H, n-типа или p-типа, для контактной селективности извлечения электронов или дырок соответственно. Однако проводимость a-Si:H, даже при сильном легировании, недостаточна для обеспечения хорошего латерального потока зарядов, поэтому элементы HET-Si также требуют нанесения слоя оксида индия-олова (ITO).

В данной статье предлагается исследовать новый подход, основанный на использовании фосфидов элементов III группы, которые обладают высоким потенциалом для применения в качестве селективных контактов к кремнию. Например, фосфид бора (BP) имеет запрещенную зону ($E_g > 2$ эВ) значительно больше, чем c-Si и выше, чем a-Si:H, которая ограничивает поглощение солнечного спектра в этих слоях, что способствует увеличению тока короткого замыкания по сравнению с использованием a-Si:H. С другой стороны, отрицательный (-0.3 ± 0.1 эВ) разрыв валентных зон (ΔE_v) для границы раздела BP/Si [1] обеспечивают необходимую селективность, что делает его отличным кандидатом в качестве селективного дырочного контакта, не требуя дополнительного слоя ITO [2].

Фосфидные слои могут быть выращены методом плазмохимического осаждения (PECVD). Это надежный, промышленный метод, который позволяет выращивать пленки электронного качества при низкой температуре на больших площадях. Однако, для слоев BP согласно [3] синтез затруднителен из-за разницы в реакционной способности B и P, что возможно обуславливает отсутствие сообщений о разработке низкотемпературной технологии формирования BP. Для решения этой проблемы было предложено использовать подход атомно-слоевого плазмохимического осаждения (PE-ALD), в котором разложение прекурсоров атомов B и P разнесены во времени.

Однако эффективность работы солнечных элементов на основе гетероструктур BP/Si в первую очередь будет определяться качеством границы раздела, в частности, концентрацией дефектов, которые могут образовываться в приповерхностной области кремния в процессе осаждения слоя BP за счет воздействия плазмы, используемой для разложения прекурсоров. Таким образом, в данной работе будут представлены результаты исследований свойств гетероинтерфейса BP/Si. Исследования проводились с помощью

спектроскопии полной проводимости, представляющей собой измерение зависимостей емкости и проводимости от частоты и температуры. Этот метод успешно применяется как для характеристики дефектов в объеме полупроводниковых слоев, так и для оценки плотности поверхностных состояний на границе раздела гетеропереходов. В работе использовался модифицированный метод спектроскопии полной проводимости с использованием напряжения смещения, позволяющий разделить отклики дефектов в слоях от откликов с поверхностных состояний, а также определить пространственное расположение детектируемых дефектов.

Список литературы

1. King, Sean & French, Marc & Jaehnig, M. & Kuhn, Markus & Xu, Guanghai. (2012). Valence band offset at a-B:H and a-BP:H/Si interfaces. ECS Journal of Solid State Science and Technology. 1. P250-P253. 10.1149/2.007206jss
2. Гудовских А.С., Кудряшов Д.А., Баранов А.И., Уваров А.В., Морозов И.А. Формирование селективного контакта BP/Si с помощью низкотемпературного плазмохимического осаждения // Письма в ЖТФ, 2021, том 47, вып. 2 Стр. 49-51. DOI: 10.21883/PJTf.2021.02.50547.18556
3. Woo, Katherine & Lee, Kathleen & Kovnir, Kirill. (2016). BP: Synthesis and properties of boron phosphide. Materials Research Express. 3. 074003. 10.1088/2053-1591/3/7/074003

Светоизлучающие p-i-n GaP/GaPAs ННК инкапсулированные в гибкую мембрану из полидиметилсилоксана

Мухангали С.М.¹, Неплох В.В.^{1,2}, Кочетков Ф.М.¹, Моисеев Э.И.¹, Мирошниченко А.С.^{1,4},
Дерябин К.В.⁴, Насибулин А.Г.³, Исламова Р.М.⁴, Мухин И.С.¹

¹Алфёровский университет

²СПбПУ

³Сколтех

⁴СПбГУ

e-mail: sungat15004@gmail.com

Востребованность гибкой оптоэлектроники растет с каждым годом. Для производства гибких экранов телевизоров и смартфонов, а также источников света чаще используют органические светодиоды (OLED), которые, на первый взгляд, имеют низкую цену и относительно дешевы в производстве. Однако, данные светодиоды имеют относительно низкую квантовую эффективность (EQE 2-30%), люминесценцию (около 10^2 - 10^4 кд/м²) и ограниченный срок службы [1,2]. Неорганические светодиоды, основанные на тонкопленочной технологии, имеют более высокие характеристики яркости и срока службы, но их перенос на гибкий носитель сильно осложнен, поскольку требует трудоемких операций травления, структурирования и отделения от ростовой подложки. Применение массивов нитевидных нанокристаллов (ННК), внедренных в гибкий полимер, является одним из перспективных путей решения данной проблемы, так как объединяет эффективность неорганических материалов и простоту изготовления гибких устройств [2].

В данной работе представлен метод изготовления массивов полупроводниковых A_3B_5 ННК, инкапсулированных в гибкую полимерную мембрану из полидиметилсилоксана. ННК GaP/GaPAs с аксиальной p-i-n структурой были синтезированы в установке

молекулярно – пучковой эпитаксии. Далее массив ННК на ростовой подложке инкапсулировался в силиконовую мембрану авторским методом нанесения в центрифуге с подвешенными стаканами (англ. ‘swinging-bucket centrifuge’), после чего проводилось травление мембраны в плазме из смеси газов O_2/CF_4 для вскрытия вершин ННК, что обеспечивало последующее нанесение проводящих, прозрачных контактов из углеродных одностенных нанотрубок, полученных аэрозольным химическим методом. На последнем технологическом этапе проводилось отделение мембраны от подложки срезанием металлическим лезвием и формирование второго контакта из нанотрубок. Для характеристики полученных функциональных мембран с ННК проводилось измерение вольт-амперных характеристик, а также спектров электролюминесценции светонизлучающей структуры.

Таким образом в данной работе продемонстрированы гибкие светодиодные структуры на массивах вертикальных ННК GaP/GaPAs в силиконовой матрице, излучающие в красном спектральном диапазоне (670 нм). Разработанные методы могут быть напрямую применены для создания гибких полноцветных дисплеев.

Список литературы

1. weblink: <https://www.oled-info.com/oled-devices/mobile-phones> last accessed 18/02/2021
2. Dai, X., Messanvi, A., Zhang, H., Durand, C., Eymery, J., Bougerol, C., ... & Tchernycheva, M. (2015). Flexible light-emitting diodes based on vertical nitride nanowires. *Nano letters*, 15(10), 6958-6964.
3. Neplokh, V., Kochetkov, F. M., Deriabin, K. V., Fedorov, V. V., Bolshakov, A. D., Eliseev, I. E., ... & Islamova, R. M. (2020). Modified silicone rubber for fabrication and contacting of flexible suspended membranes of n-/p-GaP nanowires with a single-walled carbon nanotube transparent contact. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(11), 3764-3772.

Исследования шумовых характеристик вертикально-излучающих лазеров с ромбовидной токовой апертурой для применений в атомных магнетометрах на парах Cs^{133}

Бобров М. А.¹, С.А. Блохин¹, Н.А. Малеев¹, А.А. Блохин², А.П. Васильев², А.Г. Кузьменков², В.М. Устинов², И.И. Новиков³, Л.Я. Карачинский³

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе

² НТЦ Микроэлектроники Российской академии наук

³ ООО «Коннектор Оптикс»

e-mail: bobrov.mikh@gmail.com

Компактные атомные магнетометры находят широкое применение в геофизической аппаратуре [1] и перспективных системах магнитоэнцефалографии головного мозга [2]. Ключевым компонентами таких устройств являются инъекционные одночастотные источники лазерного излучения и миниатюрные газовые ячейки с парами щелочных металлов (например, ^{133}Cs). К источнику лазерного излучения предъявляются специфические требования: одночастотное излучение с узким спектром (менее 100 МГц), фиксированное направление поляризации, температурная стабильность характеристик и возможность прецизионной токовой настройки на используемую спектральную линию. Широкие перспективы для использования в качестве таких источников имеют вертикально-

вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ). Ранее нами разработаны и исследованы ВИЛ спектрального диапазона 894 нм с внутриврезонаторными контактами и ромбовидной селективно окисленной токовой апертурой (ВК-ВИЛ), обеспечивающие выходную оптическую мощность более 1 мВт и ширину линии излучения менее 60 МГц в рабочем диапазоне токов при температурах до 75°C [3-4]. В настоящей работе представлены результаты исследований шумовых характеристик разработанных ВК-ВИЛ спектрального диапазона 894 нм и проведена оценка возможности их применения в компактных атомных магнетометрах.

Уровень амплитудных и фазовых шумов лазера существенно влияют на предельную вариационную чувствительность атомного магнетометра. При этом классическая однолучевая схема атомного магнетометра более чувствительна к стабильности поляризации лазерного излучения в отличие от атомных магнетометров, реализованных на базе двухлучевых схем. Были проведены измерения частотной зависимости относительной интенсивности шума (relative intensity, RIN) для ВК-ВИЛ, в том числе с селекцией поляризации излучения, падающего на фотодетектор (ФД). При рабочем токе лазера 2 мА и падающей на ФД мощности 0.8 мВт достигается уровень шумов RIN менее -140 дБ/Гц на частоте отстройки 10 кГц. В режиме селекции поляризации наблюдается увеличение уровня шумов RIN до -128 дБ/Гц, что, по-видимому, связано с дрожанием плоскости поляризации выходного излучения лазера. Исследования уровня шумов RIN на частоте отстройки 60 кГц от мощности излучения, падающего на ФД, показали падение от -125 дБ/Гц при мощности 0.1 мВт до -148 дБ/Гц при мощности 1 мВт. Для оценки достижимой вариационной чувствительности атомного магнетометра, реализуемого на базе исследованных ВК-ВИЛ, использованы параметры компактной кубической ($5 \times 5 \times 5$ мм³) газовой ячейкой с парами ¹³³Cs, имеющей ширину линии магнитного резонанса 1 кГц. При рабочей частоте 10 кГц атомный магнетометр, реализованный на базе однолучевой схемы, потенциально может иметь предельную вариационную чувствительность ~ 115 фТ/Гц^{1/2}, а при использовании двухлучевой схемы предельная вариационная чувствительность улучшается до уровня ~ 30 фТ/Гц^{1/2}. Полученные результаты подтверждают, что разработанные ВК-ВИЛ спектрального диапазона 894 нм потенциально пригодны для применения в компактных атомных магнетометрах на ячейках с парами Cs¹³³.

Список литературы

1. Kitching J., Chip-scale atomic devices, *Appl. Phys. Rev.*, 5 (3), 031302, 2018
2. Boto E. et al., Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system, *Nature* 555, 657–661, 2018
3. Bobrov M.A. et al., Mechanism of the polarization control in intracavity-contacted VCSEL with rhomboidal oxide current aperture, *Journal of Physics: Conference Series* 741(1), 012078, 2016
4. Blokhin S.A. et al., Vertical-cavity surface-emitting lasers with intracavity contacts and a rhomboidal current aperture for compact atomic clocks, *Quantum Electronics* 49(2), 187, 2019

Разработка высокоточной системы идентификации сложнокompонентных озоноразрушающих веществ

Тюрикова Е. П.¹, Кустикова М.А.¹, Фахртдинова С.З.¹

¹ИТМО

e-mail: ek.tyurikova@yandex.ru

В докладе рассмотрены оптические методы анализа состава озоноразрушающих веществ (ОРВ). Объектом исследования являются хладагенты, относящиеся к ОРВ по озоноразрушающему потенциалу (ОРП) согласно Монреальскому протоколу. Под хладагентами понимают химические соединения, выступающие в качестве рабочего вещества в технике кондиционирования и охлаждения. В настоящее время на законодательном уровне запрещен ряд хладагентов, относящихся к группам хлорфторуглеродов (ХФУ) и гидрохлорфторуглеродов (ГХФУ). Однако, существует ряд хладагентов, которые представлены в виде смесей различных соединений, в том числе ХФУ и ГХФУ. Необходимость идентификации подобных примесей и компонентов закреплена на государственном уровне.

Изучены и сравнены методы абсорбционной спектроскопии, хромато-масс-спектрометрии и рамановской спектроскопии. Приведены сравнительные характеристики существующих систем газового и жидкостного анализа состава веществ. Был сделан вывод, что наибольшей селективностью и точностью обладают рамановские спектральные приборы [2]. Однако на мировом рынке отсутствуют узкоспециализированные приборы анализа хладагентов. Было предложено разработать лабораторный макет системы идентификации РВ для составления библиотеки рамановских спектров хладагентов.

В докладе рассмотрены принципы построения оптико-электронной системы идентификации хладагентов. Было предложено разработать схему с включением 2 источников излучения - лазеров на длинах волн 532 нм и 785 нм. Были подобраны оптимальные мощности лазеров 200 мВт для исключения термолiza, ионизации и диссоциации молекул хладагентов. В качестве приемника излучения было предложено использовать спектрометр с рабочим диапазоном 500-1000 нм. Система включает в себя набор фильтров, соответствующих длинам волн лазеров и систему пробоотбора. Данные со спектрометра передаются на персональный компьютер с целью обработки и сравнения со спектральной базой хладагентов.

Работа выполнена в рамках темы НИР № 620159 «Разработка и исследование принципов построения цифрового анализатора фреонов» при поддержке Университета ИТМО.

Список литературы

1. Цветков О.Б., Бараненко А.В., Лаптев Ю.А., Сапожников С.З., Ховалыг Д.М., Пятаков Г.Л., Озобезопасные хладагенты, Холодильная техника и кондиционирование, № 3, 98-111, 2014
2. Chubchenko I.K., Vitkin V.V., Popov E.E., Polishchuk A.V., Loiko P.A., Raman Spectroscopy of the Pentad of Isotopically-Enriched Methane $^{13}\text{CH}_4$, Proceedings - International Conference Laser Optics 2020, ICLO 2020, pp. 9285805, 2020

Газонаполненные ячейки с парами щелочных металлов, изготовленные с использованием технологий МЭМС

Казакин А. Н.¹, Клейманов Р.В.¹, Комаревцев И.М.¹, Кондратьева А.С.¹, Эннс Я.Б.¹, Шашкин А.В.², Глуховской А.В.³

¹СПбПУ

²НПО ГОИ

³IMPT, Ганновер, Германия

e-mail: kazakin75@gmail.com

Ячейки поглощения, содержащие пары щелочных металлов, являются ключевыми элементами квантовых магнитометров, стандартов частоты (КСЧ) и других современных квантовых устройств, находящих применение в спектроскопии, в телекоммуникационной и навигационной технике [1]. Развитие технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС) и технологий вертикально-излучающих полупроводниковых лазеров (VCSEL) сделало возможным создание миниатюрных атомных часов, работа которых основана на эффекте когерентного пленения населенностей [2,3].

Современные МЭМС ячейки для КСЧ состоят из двух вытравленных в кремнии полостей объемом несколько кубических миллиметров, соединенных узкими фильтрующими каналами [2]. Сверху и снизу полости и каналы герметично закрыты прозрачными боросиликатными стеклами, термомеханически совместимыми с кремнием. Одна из полостей служит для заполнения ячейки источником щелочных паров, содержащим металл-восстановитель и соль щелочного металла. Другая полость служит камерой поглощения и содержит только пары щелочного металла (¹³³Cs, ⁸⁵Rb или ⁸⁷Rb) и инертный буферный газ, обеспечивая оптическое поглощение на длине волны, соответствующей линии D1 щелочного атома. Фильтрующие каналы необходимы для предотвращения попадания в рабочую полость посторонних частиц от источника щелочных паров [4]. Ключевые особенности технологии МЭМС ячеек – сквозное травление кремния и вакуумплотная герметизация ячейки в соответствующей атмосфере [5]. Для изготовления ячеек описанной конструкции преимущественно используется дорогостоящая технология плазмохимического травления, поскольку анизотропным щелочным травлением кремния затруднительно формировать компактные трехмерные объекты сложной топологии из-за их чрезмерного растравливания со стороны внешних углов маски. Выбор способа и технологических режимов герметизации ячеек ограничен температурой деградации используемого источника щелочных паров.

Данная работа посвящена разработке и реализации групповой технологии изготовления МЭМС ячеек, содержащих пары изотопов рубидия-87 или цезия-133 в атмосфере неона. Двухкамерная ячейка с размерами 6 x 6 x 0,6 мм, содержащая объемные полости, соединенные каналами шириной 200 мкм, была реализована в едином цикле щелочного травления кремния. Для устранения эффекта перетравливания фильтрационных каналов использовались компенсационные элементы на углах нитридной маски и специальная методика травления.

Источником щелочных паров являлись микротаблетки, изготовленные по технологии спекания порошков титана с бихроматами рубидия или цезия. Анализ поверхности и определение компонентного состава микротаблеток проводился на растровом электронном микроскопе SUPRA 55VP с приставкой для элементного микроанализа INCA WAVE. На основании этих данных был рассчитан минимальный объем микротаблетки, нагрев которого ИК лазером гарантированно обеспечивал реакцию восстановления цезия (рубидия)

и давление его паров в рабочей полости, необходимое для работы ячейки в качестве КСЧ (10^{-5} - 10^{-4} Торр).

Герметизация ячеек проводилась методом анодной сварки кремниевых и стеклянных пластин. Для выбора материала оптических окон были проведены измерения оптического пропускания и температурной зависимости электропроводности различных боросиликатных стекол. Использование стекла ЛК5, имеющего повышенную ионную проводимость по сравнению с классическими для МЭМС стеклами Pyrex 7740 и Borofloat 33, позволило проводить герметизацию ячеек при рекордно низких температурах, порядка 250 °С.

Работоспособность изготовленных по разработанной технологии ячеек была подтверждена соответствующими электрофизическими испытаниями по методикам, описанным в работах [2,3]. Рассчитанная по результатам проведенных экспериментов нестабильность частоты за 1 с для КСЧ на основе ячеек с ^{87}Rb (Ne, 200 Торр) составила 10^{-10} , для ячеек с ^{133}Cs (Ne, 300 Торр) – $2,5 \times 10^{-11}$.

Данная работа была выполнена в Санкт-Петербургском Политехническом Университете Петра Великого и поддержана грантом Российского Научного Фонда № 20-19-00146.

Список литературы

1. Kitching J., Chip-scale atomic devices, *Appl. Phys. Rev.*, vol. 5, 031302, 2018.
2. Ermak S.V., et al., Microfabricated cells for chip-scale atomic clock based on coherent population trapping: fabrication and investigation, *St. Petersburg Polytech. Univ. J. Phys. Math.*, vol. 1, pp. 37–41, 2015.
3. Bobrov M.A., et al., Effect of coherent population trapping in a compact microfabricated Cs gas cell pumped by intra-cavity contacted VCSELs with rhomboidal oxide current aperture, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1400, 077014, 2019.
4. Knapkiewicz P., Technological assessment of MEMS alkali vapor cells for atomic references, *Micromachines*, vol. 10, 25, 2019.
5. Hasegawa M., et al., Microfabrication of cesium vapor cells with buffer gas for MEMS atomic clocks, *Sensors and Actuators A*, vol. 167, pp. 594–601, 2011.

Оптические и структурные свойства эпитаксиальных слоев InAsSb, выращенных на подложке InAs

Семакова А. А.¹, Смирнов А.М.¹, Мынбаев К.Д.^{1,2}, Баженов Н.Л.²

¹ИТМО

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: antonina.semakova@itmo.ru

Светодиоды на основе гетероструктур с активной областью $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, работающие в среднем инфракрасном диапазоне (длина волны $\lambda=3\text{--}5$ мкм), где находятся основные полосы поглощения углеводородов, широко востребованы в устройствах для газового анализа, контроля технологических процессов, медицинской диагностики и т.п. [1]. Одной из актуальных задач, стоящих перед разработчиками таких приборов, является повышение их эффективности. При разработке длинноволновых ($\lambda > 5$ мкм) источников излучения вследствие увеличения содержания сурьмы в эпитаксиальном слое $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ данная задача осложняется ростом рассогласования по параметру кристаллической решетки наращиваемого твердого раствора InAsSb относительно соответствующего параметра подложки InAs. Среди прочего, это может привести к появлению особенностей на

гетероинтерфейсе и, как следствие, к возникновению интерфейсных каналов рекомбинации носителей, снижающих эффективность межзонной рекомбинации.

В настоящей работе мы сообщаем об исследовании оптических и структурных свойств эпитаксиальных слоев (ЭС) $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ с мольной долей InSb от 0 до 0.166, выращенных на подложках InAs , легированных серой до концентрации электронов $n=2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, и предназначенных для формирования светодиодных структур. ЭС были выращены в компании Microsensor Technology, LLC (Санкт-Петербург, Россия) методом газовой эпитаксии с использованием металлоорганических соединений. Толщина ЭС составляла от 0.4 до 1 мкм, слои были номинально не легированы и имели электронный тип проводимости. Исследовалась фотолюминесценция (ФЛ) слоев при температуре 100 К при возбуждении полупроводниковым лазером с длиной волны 1.03 мкм и регистрации охлаждаемым фотоприемником на основе InSb . Также было проведено исследование рентгеновской дифракции (РД) на слоях с помощью рентгеновской установки ДРОН-8 в щелевой конфигурации с острофокусной трубкой БСВ-29 с медным анодом и сцинтилляционным детектором NaI(Tl) .

Результаты исследования РД показали последовательное увеличение полуширины кривой качания дифракции ЭС по мере увеличения мольной доли InSb от 0 до 0.166, – с 2' для чистого InAs до 25' для твердого раствора $\text{InAs}_{0.844}\text{Sb}_{0.166}$, что ожидаемо соответствовало ухудшению кристаллического качества материала. Полуширина полосы ФЛ ЭС InAs при 100 К составила 23 мэВ, определенное из спектра значение «оптической» ширины запрещенной зоны соответствовало номинальной E_g для чистого арсенида индия. Полуширины полос ФЛ ЭС $\text{InAs}_{0.86}\text{Sb}_{0.14}$ и $\text{InAs}_{0.844}\text{Sb}_{0.166}$ при 100 К были близки и составили ~40 мэВ, однако при этом для ЭС $\text{InAs}_{0.86}\text{Sb}_{0.14}$, в отличие от $\text{InAs}_{0.844}\text{Sb}_{0.166}$, положение спектра ФЛ, по которому определялось значение «оптической» ширины запрещенной зоны не соответствовало номинальной E_g твердого раствора. Были также исследованы РД и ФЛ структуры, представлявшей собой ЭС $\text{Ga}_{0.236}\text{In}_{0.764}\text{As}_{0.774}\text{Sb}_{0.226}$, выращенный на подложке $n\text{-InAs}$; для этого образца излучательные переходы были идентифицированы как переходы, вызванные рекомбинацией носителей на гетероинтерфейсе «слой–подложка». В работе проводится сопоставление полученных ФЛ и РД результатов с данными по исследованию электролюминесценции структур, использующих подобные ЭС в качестве «активных» (светоизлучающих) слоев.

Список литературы

1. Ting D., Soibel A., Khoshakhlagh A., Keo S., Rafol B., Fisher A., Pepper B., Luong E., Hill C., Guhapala S., Advances in III-V semiconductor infrared absorbers and detectors, Inf. Phys. Technol., 97, 210-216, 2019

Проявление универсальности в температурных зависимостях поверхностной диффузии молекулярных жидкостей

Галимзянов Б. Н.¹, Мокшин А. В.¹, Яруллин Д. Т.¹,

¹КФУ

e-mail: bulatgnmail@gmail.com

Кристаллизация представляет собой типичный фазовый переход первого рода, временной масштаб которого определяется такими характеристиками, как скорость зародышеобразования, скорость роста и кинетический фактор скорости g^+ , также называемый скоростью присоединения [1]. Среди этих скоростных характеристик кинетический фактор скорости представляет особый интерес по ряду причин [2]. Прежде всего, эта величина является основным входным параметром для многих теорий зародышеобразования и роста. Во-вторых, кинетический фактор скорости g^+ учитывает присоединение частиц (атомов, молекул) к зародышу формирующейся (кристаллической) фазы. Следовательно, оценка g^+ может быть необходима для определения формы зародыша в случае его анизотропного роста. В-третьих, нет экспериментальных методов прямого измерения коэффициента скорости g^+ . Один из используемых способов эмпирической оценки этой величины - отождествление g^+ с экспериментально измеренным коэффициентом диффузии, коэффициентом вязкости и другими соответствующими кинетическими параметрами. Более корректная температурная зависимость g^+ может быть получена из экспериментальных данных для поверхностной диффузии D_s .

В этой работе мы определяем коэффициент скорости $g^+(T)$ для трех модельных атомистических кристаллизующихся систем: объемная бинарная жидкость Леннарда-Джонса, объемная жидкость Дзугутова и модельная жидкость в виде тонкой пленки. Отметим, что величина $g^+(T)$ для рассматриваемых систем определяется непосредственно из траекторий роста зародышей, рассчитанных на основе результатов молекулярно-динамического моделирования. При этом никаких приближений для определения $g^+(T)$ не применялось. Абсолютную температурную шкалу мы заменяем на приведенную температурную шкалу, предложенную нами ранее в работе [3]. Мы сравниваем наши результаты с доступными экспериментальными данными, полученными для молекулярных жидкостей [4].

Мы показываем, что скорость присоединения частиц g^+ как функция приведенной температуры подчиняется единому степенному закону масштабирования [5]. Этот сценарий подтверждается результатами моделирования для модельных атомистических систем (кристаллизующиеся объемные жидкости и жидкие тонкие пленки) и имеющимися экспериментальными данными. Мы обнаружили, что показатель степени этого единого закона масштабирования связан с мерой стеклообразующей способности системы.

Результаты настоящего исследования расширяют идею единого описания скоростных характеристик зарождения кристаллов и кинетики роста с помощью масштабных соотношений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-12-00022.

Список литературы

1. Kelton K. F., Greer A. L. Nucleation in Condensed Matter (Elsevier, Amsterdam, 2010)
2. Song H., Sun Y., Zhang F., Wang C. Z., Ho K. M., Mendelev M. I., Overcoming the Time Limitation in Molecular Dynamics Simulation of Crystal Nucleation: A Persistent-Embryo Approach, *Phys. Rev. Mater.*, 2, 023401, 2018
3. Mokshin A. V., Galimzyanov B. N., Scaling law for crystal nucleation time in glasses, *J. Chem. Phys.*, 142, 104502, 2015
4. Huang C., Ruan S., Cai T., Yu L., Effect of molecular size and hydrogen bonding on three surface-facilitated processes in molecular glasses: Surface diffusion, surface crystal growth, and formation of stable glasses by vapor deposition, *J. Phys. Chem. B*, 121, 9463, 2017
5. Mokshin A. V., Galimzyanov B. N., Yarullin D. T., Unified scaling law for rate factor of crystallization kinetics, *Eur. Phys. J. Special Topics*, 229, 427-432 (2020)

Investigation of the influence of switching tests on the surface characteristics of coatings of magnetically controlled contacts

Баскакова А. В.¹, Логинов Д.С., Литвинов В.Г., Холомина Т.А., Рыбин Н.Б.

¹РГРТУ им. В.Ф. Уткина

e-mail: anna_bas97@mail.ru

The lower sensitivity limits of electronic devices are usually determined by current and voltage noise. The useful signal may become unavailable if the noise level in the instrument is too high, this situation limits dynamic range of the operating characteristics. Meanwhile, low-frequency noises caused by current or voltage fluctuations provide information about the features of the internal structure of an electronic device.

Instrument diagnostics based on low-frequency noise spectra is a tool that allows you to predict the service life of electronic components. The features of the low-frequency noise spectra provide information about the state of the system and the processes occurring in it.

Frequency dependence of the power spectral density (PSD) LF noise is characterized by a change of the slope of the curves at low frequencies. At frequencies up to 1 Hz, the frequency dependence of the PSD noise obeys the law $1/f^\beta$. The β index in the work was determined by approximating the dependence of the PSD of low-frequency noise on the frequency.

The aim of this work is to study the communication features of the structure of the contact spots on the surface of magnetically operated contacts (batch of 10 reed) with parameter β , the ratio of low-frequency slope of the LF phase noise. Experimental study of characteristics of magnetically operated contacts were carried out according to the following schedule: measuring PSD LF noise source samples and mathematical processing of the obtained results; artificial wear contacts through multiple switching in different modes; measuring PSD LF noise artificially worn magnetic contacts, mathematical processing of the results; investigation of the surface of the contact material using SEM microscopy.

Dependency analysis characterizing the communication area of contact spots (build-up) on the electrode with the coefficient β , which varied in our experiments in the range of 0.5-3, indicates that the variation of the square spots on the anode for reed switches without coverage, which amounted to $14.2 \mu\text{m}^2$, wider than for reed coated Au-Ru (variation area spots made up $4.98 \mu\text{m}^2$). Conducting a patch test as a whole preserves an overall trend of dependencies. Based on these data, it can be concluded that reed switches with Au-Ru coating are characterized by higher reliability and stable performance.

According to [1], an increase in the concentration of mechanical stresses in conducting films leads to an increase in the value of the coefficient β . The analysis of the dependences that characterize the relationship between the average diameters of growths on the electrodes with the coefficient β for reed switches with Au-Ru coating and without coating showed that the samples of reed switches with Au-Ru coating have a larger variation of the values of the coefficient β (the variation β for coated samples was 1.7, for uncoated samples – 0.44), which is explained by a large range of internal mechanical stresses. Based on the results obtained, it can be concluded that the nature of the occurrence of low-frequency noise and the features of the spectral characteristics are associated with fluctuations in the electron concentration in the conductive coatings of the reed switch electrodes. Their manifestation correlates with the occurrence of large mechanical stresses on the surface of samples in accordance with the vacancy model of G. P. Zhigalsky [2, 3].

Список литературы

1. Zhigal'skii G P, in AIP Conf. Proc. 285 «Noise in Physical Systems and 1/f Fluct.» (St. Louis, New York, 1993) p. 81
2. Жигальский Г.П. Шумы вида 1/f и нелинейные эффекты в тонких металлических плёнках //УФН. 1997. Т. 167. № 6. С. 623-647.
3. Жигальский Г. П. Неравновесный 1/f-шум в проводящих пленках и контактах//УФН. 2003. Т. 173, № 5. С. 465–490.

Полевая десорбционная диагностика углеродных наноструктур на поверхности иридия и рения

Павлов В. Г.¹, Бернацкий Д.П.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: vpavlov.ms@mail.ioffe.ru

Создание углеродного покрытия на поверхности металла необходимо для решения ряда технических и научных задач. В частности, покрытие металлических полевых электронных эмиттеров углеродом значительно улучшает стабильность их работы. Однако, определение формы, структуры и толщины углеродных плёнок представляет определённые трудности. В задачу работы входило исследование возможности использования полевой десорбции щелочных металлов и полевой десорбционной микроскопии для диагностики углеродных образований на металлической поверхности.

В качестве материалов подложек использовались иридий и рений. Эти металлы не образуют химических соединений с углеродом. Иридий практически не растворяет углерод в объеме, рений образует с углеродом твердые растворы. Образцы из иридия и рения в виде острия с радиусом вершины порядка 500 нм изготавливались из проволок методом электрохимического травления. В камере полевого эмиссионного микроскопа в вакууме

при температуре 2300 К происходила очистка и формирование монокристаллической вершины острия. Углеродное покрытие создавалось разложением молекул бензола на поверхности образцов при температуре 1700 К.

Для получения полевых десорбционных изображений использовался цезий. Атомы цезия обладают малым потенциалом ионизации и, соответственно, меньшим значением напряженности электрического поля, необходимого для десорбции.

В зависимости от времени экспозиции в парах бензола на квазисферической кристаллической поверхности эмиттера образовывались углеродные пленки, состоящие из одного или нескольких слоёв графена. При адсорбции атомов цезия на поверхность эмиттера происходит образование поверхностного слоя и интеркалирование графитовых наноструктур в случае их образования. Во время полевой десорбции это проявляется в появлении двух фаз десорбции (поверхностного цезия и цезия из интеркалированного состояния). После нагревания эмиттера до температуры, приводящей к десорбции цезия с поверхности, проявлялась только одна фаза полевой десорбции, связанная с интеркалированными атомами цезия между слоями графена в многослойных пленках и между графеном и поверхностью металла.

Покадровый анализ видео съемки процесса полевой десорбции выявлял неоднородности пленки и обнаружил разную кинетику десорбции цезия с металлической поверхности и с поверхности, на которой образовались графитовые наноструктуры. В случае металлической поверхности при полевой десорбции наблюдается одна лавинообразная вспышка поверхностного цезия с поверхности эмиттера. При наличии графитовых наноструктур на поверхности эмиттера наблюдаются непрерывная полевая десорбция цезия (в виде ионов) и лавинообразные вспышки (импульсы ионного тока) с областей поверхности, где расположены графитовые наноструктуры. Неоднородность многослойных пленок на поверхности рения проявлялась в последовательных вспышках ионного тока с определенных областей пленки при увеличении напряжения. Такое поведение полевой десорбции указывает на неоднородную толщину пленки (разное локальное количество слоев графена).

Таким образом, выявлены закономерности формирования полевых десорбционных изображений различных углеродных наноструктур, в частности, однослойного и многослойного графена на поверхности полевого эмиттера, позволяющие проводить диагностику поверхности после науглероживания и контролировать однородность получаемого покрытия.

Молекулярная подвижность в объеме и приповерхностных нанослоях сверхвысокомолекулярного полиэтилена

Siklitsky V.I.¹, Gladkov A.¹, Lebedev D.¹, Marikhin V.¹, Myasnikova L.¹, Solov'eva O.¹,
Ivan'kova E.².

¹Ioffe Institute, Russia

²Institute of Macromolecular Compounds, Russia

e-mail: siklitsky@mail.ioffe.ru

Как известно, структура и свойства приповерхностных слоев твердых тел существенно отличаются от объемных, что проявляется при различных тепловых, механических и др. воздействиях. Целью настоящей работы явилось изучение разницы в молекулярной подвижности в объеме и в приповерхностных нанослоях реакторных порошков

сверхвысокомолекулярного полиэтилена (РП СВМПЭ), что актуально для оптимизации параметров технологического процесса получения сверхпрочных нитей СВМПЭ безрастворным методом непосредственно из (РП), используемым в порошковой металлургии [1]. Метод предусматривает спекание частиц СВМПЭ при температуре ниже температуры плавления полимера. Поэтому исследования низкотемпературных релаксационных свойств приповерхностных нанослоев РП, определяющих формирование прочных межчастичных границ, становятся необходимыми для последующего эффективного деформационного упрочнения [2].

Молекулярную подвижность в приповерхностных нанослоях изучали методом плазмоиндуцированной термолюминесценции (ПИТЛ) на уникальном приборе Нанолюминограф, запатентованном в России и США [3, 4]. В камере Нанолюминографа осуществляется активация низкотемпературной маломощной плазмой газового разряда в аргоне при 77К приповерхностных нанослоев полимера толщиной 25-50 nm. Последующее изучение зависимости интенсивности возникающей термолюминесценции при линейном нагреве образца позволяет регистрировать размораживание молекулярной подвижности в области соответствующих релаксационных переходов. Сравнительные данные о размораживании молекулярной подвижности в объеме образца получали стандартным методом радиотермолюминесценции, в котором, в отличие от метода ПИТЛ, для возбуждения исследуемого материала используются высокоэнергетические γ -кванты. Нами исследована разница релаксационных свойств СВМПЭ в объеме и приповерхностных нанослоях ряда РП и пленок СВМПЭ, закристаллизованных из расплава в зависимости от молекулярной массы, условий синтеза и кристаллизации.

Особое внимание уделено анализу релаксационных β -переходов в области 200-260К, соответствующих размораживанию квазинезависимой сегментальной подвижности, при которой в микроброуновское движение вовлекаются участки макромолекул, равные по длине сегменту Куна. Обнаружен неожиданный резкий сдвиг температуры β -перехода (T_β) в сторону более высоких температур в приповерхностных нанослоях РП СВМПЭ по сравнению с объемом. Разница между T_β поверхности частиц реакторного порошка, и T_β объема достигает 90К. Авторы полагают, что причина заторможенной подвижности в неупорядоченных приповерхностных областях частиц РП заключается в наличии напряженных проходных молекул связывающие кристаллиты в процессе кристаллизации полимера в условиях стесненного пространства при низкотемпературном синтезе (30-40°C) СВМПЭ. Анализ полученных данных позволяет подобрать оптимальные условия спекания частиц реакторных порошков. Найдено, что T_β в приповерхностных слоях того же СВМПЭ, закристаллизованного из расплава в изотермических невозмущенных условиях, напротив, на несколько градусов ниже, чем T_β в объеме образца. Это может быть следствием выталкивания на поверхность полимера концов молекул и нерегулярных складок.

Номер проекта РФФИ: 19-03-00789. 18-29-17023 mk

Список литературы

1. Rastogi, S.; Yao, Y.; Ronca, S.; Bos, J.; van der Eem, J. *Macromolecules*, 44, June 2011, 5558-5568
2. L.P. Myansikova, et al., Ch.5 in *Reactor Powder Morphology*, ed. by P.Lemstra and L.Myasnikova, Nova Sci. Publ. 2011
3. Патент РФ 2212650, Москва, 20.09.2003
4. US patent 7, 309, 864D2 Dec (2007)

Влияние параметров шероховатости поверхности и температуры на коэффициент излучения монокристаллов германия

Третьяков С. А.¹, Молчанов С.В.¹, Каплунов И.А.¹, Иванова А.И.¹, Вайсбург Н.Я.¹

¹ТвГУ

e-mail: tasleo@inbox.ru

В настоящее время использование кристаллов германия в ИК оптике и фотоэлектронике имеет достаточно массовый характер. В ряде работ подробно изучена связь между структурными дефектами в германии и оптическими неоднородностями в этих кристаллах. В частности, обнаружена корреляция между интенсивностью рассеяния света и плотностью дислокаций в германии. Исследованы малоугловые границы, а также пространственное распределение дислокаций и удельного электросопротивления по кристаллам [1-5]. Для эффективного применения монокристаллы германия должны иметь как можно более высокое оптическое пропускание и максимально высокую оптическую однородность, так как от них зависят важнейшие характеристики конечных устройств.

Большинство методов [6-8], используемых для контроля качества кристаллов германия, являются контактными, разрушающими (химическое травление, измерение удельного сопротивления и др.) или трудоёмкими и дорогостоящими (просвечивающая электронная микроскопия, ФИП и т.д.). Метод тепловизионного активного контроля выгодно отличается от выше указанных, так как в силу оптических свойств германия (диапазон прозрачности 2-20 мкм), он позволяет бесконтактно получить информацию как о дефектности поверхностных слоев материала, так и об однородности по всему объему, что уменьшает количество технологических шагов для проведения анализа образцов германия.

При тепловизионных измерениях помимо параметров среды (температура воздуха, влажность, температура наведённого излучения), немаловажную роль играет правильно определенный коэффициент излучения, величина которого зависит от материала, шероховатости поверхности и в незначительной мере от температуры образца. Однако в современной литературе отсутствуют данные по коэффициентам излучения для германия в температурном диапазоне до 100°C, который соответствует либо методу активного теплового контроля, либо температуре нагрева элементов при работе устройств на основе германия.

В настоящей работе исследования проводились на монокристаллах германия, выращенных способом Чохральского в направлении $\langle 111 \rangle$, легированных сурьмой (концентрация примеси $1.4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, n -тип проводимости).

Поверхности образцов подвергались обработке шлифпорошками разной размерности (шлифовка) и алмазными пастами (полировка). Шлифовка проводилась водной суспензией порошка электрокорунда: порошок М40 на стеклянной подложке, М28 (промежуточная шлифовка) на стеклянной подложке, порошок М10 (тонкая шлифовка). Полировку образцов проводили в 4 этапа: обработка алмазными пастами 5/3, 3/2, 2/1 и 1/0 на сукне.

С помощью тепловизора FLIR T250 и термопары производились измерения коэффициентов излучения поверхностей монокристаллов германия. Результаты измерений для разных видов поверхности (R_a от 410 нм для шлифованных поверхностей до 3 нм для полированных) и диапазона температур от 30°C до 80°C показали значения в пределах 0,74-0,84. Выявлен эффект снижения значения коэффициентов излучения при увеличении температуры образцов за счет изменений шероховатости поверхностей, вызванных

массопереносом в приповерхностном слое. Результаты экспериментов показали, что использование тепловизионного метода контроля температуры без учёта температурной зависимости коэффициентов излучения может приводит к ошибкам измерения до 4-5 °С.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект No 0817-2020-0007). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП Тверского государственного университета.

Список литературы

1. Каплунов И.А., Колесников А.И. Влияние характеристик германия на рассеяние ИК излучения // Поверхность. 2002. № 2. С.14-19.
2. Мильвидский М.Г., Освенский В.Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. М.: Металлургия, 1984. 384 С.
3. Смирнов Ю.М. Распределение дислокаций в монокристаллах германия // Изв.АН СССР. Сер.физическая. Т.XXXVI. Вып.3. 1972. С.534-536.
4. Смирнов Ю.М., Каплунов И.А., Долматов А.Б. Образование дислокаций в без-дислокационном германии // Изв.ВУЗОВ. Физика. 2005. Т. 48. № 5. С. 21-24.
5. Каплунов И.А., Шелопаев А.В., Колесников А.И. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. № 12. С. 22–25.
6. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД Спектр, 2009.
7. I.Jorge Aldave, P.Venegas Bosom, et. al. // Infrared Physics & Technology. 2013. V.61. P.167-175.
8. J. Christofferson, K. Maize, et. al.// 2007 International Conference on Thermal Issues in Emerging Technologies: Theory and Application, Cairo, 2007, P. 3-9.

Электронно-стимулированная десорбция атомов лития из адсорбированного слоя лития на вольфраме, покрытом плёнкой золота

Лапушкин М. Н.¹, И.А.Громов¹, Т.Э. Кулешова¹, Ю.А. Кузнецов¹, Н.С.Самсонова¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: Lapushkin@ms.ioffe.ru

2D-слои интерметаллидов золота со щелочными металлами (Na_xAu_y , K_xAu_y и Cs_xAu_y) являются полупроводниками, в отличие от объемных образцов (Na_xAu_y и K_xAu_y), которые проявляют металлические свойства. Только CsAu является полупроводником вне зависимости от его размеров.

Электронно-стимулированная десорбция атомов при электронном облучении наблюдается только с поверхности полупроводников и диэлектриков. Задачей данного исследования было определить будут ли 2D-слои интерметаллида Li_xAu_y полупроводниками.

Измерения выполнены *in situ* в высоковакуумной установке «Спектрометр ЭСД» [1]. На поверхность предварительно очищенной W ленты напыляли Au при температуре $T = 300$ К. В дальнейшем на слой золота толщиной (d) не более 5 монослоев (МС) при $T = 300$ К напыляли покрытие Li толщиной не более 3 МС. Концентрация напылённых Au и Li определялась по времени напыления. Количество атомов в монослое Li составляло $5 \cdot 10^{15}$ атом/см², что соответствует плотноупакованному монослою атомов Li с гексагональной

структурой. Измерения выполнялись при $T = 300$ К при энергии бомбардирующих электронов в диапазоне 0,300 eV.

На зависимости выхода атомов лития $q(E_e)$ ЭСД от энергии возбуждающих электронов наблюдаются два квазирезонансных пика с максимумами при 64 и 82 eV, соответствующие энергиям ионизации уровней Au $5p_{3/2}$ и $5p_{1/2}$. Такого вида зависимость $q(E_e)$ наблюдалась ранее в системе K/KAu/W [1].

Выход лития при ЭСД из 1 монослоя Li на поверхности W, покрытого слоем Au любой d не наблюдается, что отражает металлический характер интерфейса Li/Au/W. Для покрытий больше одного монослоя Li может наблюдаться ЭСД атомов Li, только в том случае, если $d_{Au} > 1$ МС. Известно, что ближайший к поверхности W монослой Au не принимает участия в формировании интерметаллида золото-щелочной металл [2].

При напылении более 1 МС на пленку Au с $d_{Au} = 2$ МС начинается наблюдаться ЭСД атомов Li при дозе напылённого Li равного 1 МС. Дальнейшее напыление приводит к линейному росту q вплоть до дозы напыленного Li, соответствующей 2 МС. Это означает, что происходит формирование полупроводникового 2D-слоя Li_xAu_y , а при напылении 2 МС лития формируется соединение LiAu. Увеличение дозы напыления приводит к резкому спаду q , что связано с образованием второго монослоя атомов Li.

Влияние толщины напыляемой плёнки Au на выход ЭСД атомов Li подтверждает представления о формировании соединения интерметаллидов золото-щелочной металл на поверхности W. Для любой толщины слоя Au при напылении субмонослойного покрытия Li процесс ЭСД не наблюдается. Однако, если доза напыляемого Li больше, чем 1 МС, то наблюдается следующая картина: ЭСД атомов Li регистрируется для $d_{Au} > 1$ МС. С увеличением d_{Au} выход атомов Li растёт линейно и при $d_{Au} = 2$ МС достигается максимума q . Дальнейшее увеличение слоя Au приводит к незначительному спаду выхода атомов Li, что может быть вызвано уменьшением концентрации Li на поверхности вследствие диффузии его в плёнку Au с образованием соединения Li_xAu_y , где $y > x$.

Предложена модель процессов ЭСД в исследуемой системе с учётом электронной структуры интерфейса Li/ Li_xAu_y /Au/W. При облучении электронами образуются дырки на уровнях Au $5p_{3/2}$ и Au $5p_{1/2}$. В дальнейшем они заполняются электронами с более высоких уровней, приводя к различным Оже-процессам. В результате электронных переходов происходит образование нейтрального атома Li в поверхностном слое, который в дальнейшем десорбируется. Все электронные переходы происходят в интерфейсе Li/ Li_xAu_y .

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-02-00370.

Список литературы

1. Кузнецов Ю.А., Лапушкин М.Н. Электронно-стимулированная десорбция атомов калия, адсорбированных на поверхности золота, Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. Тверь: Твер. гос. ун-т, В. 12. С. 836-844, 2020
2. Агеев В.Н., Афанасьева Е.Ю. Начальные стадии взаимодействия натрия и цезия с золотом ФТТ, Т. 48, В. 12, С. 2217-2222, 2006

Хиральность структурных образований в сильно разбавленных водных растворах этанола

Шостка В. И.¹, Шостка Н.В.¹, Вершицкий В.И.¹, Халилов С.И.¹

¹ФТИ, КФУ им. В.И. Вернадского

e-mail: vshostka@yandex.ru

В работе рассмотрены результаты формирования хиральных структур в слоях сильно разбавленных водных этанола. Применен метод, основанный на интерференции лазерных лучей, прошедших через водяную линзу различных конфигураций [1]. Так как взаимодействие воды с различными веществами, и со спиртами, в частности, с точки зрения изменения структуры их водных растворов практически не изучено, в связи с чем данное исследование является актуальным как с чисто научной точки зрения, так и с точки зрения практического применения данных растворов в фармакологии, медицине и пищевой промышленности. Обнаружено, что в диапазоне небольших концентраций растворенных веществ в водных растворах, несмотря на некоторую стабилизацию структур в сформированных клатратах в зависимости от количества взаимодействующих молекул возможны образования ассоциатов различной формы. Повышение содержания растворенных веществ в водных растворах приводит к разрушению упорядоченной структуры, а избыточные молекулы гидрофильного вещества соединяясь вместе, образуют сложные агрегаты. При этом молекулы этанола ассоциированы в изогнутые разветвленные цепи и внутримолекулярное вращение не оказывает существенного влияния на структуру [2,3].

Несмотря на важную роль внутримолекулярных водородных связей в водном растворе этанола, хиральность их структуры в жидком состоянии определяется в основном образованием межмолекулярных водородных связей. Наличие в них двух или более гидроксильных групп приводит к тому, что образуется статистически упорядоченная хиральная пространственная сетка, включающая различные клатратные образования. При малых содержаниях этанола в водном растворе, его молекулы внедряются в межузловые полости решетки воды, не вызывая разрушения ее структуры. Подобный механизм растворения продолжается только до некоторой критической концентрации, после чего наступает насыщение и происходит разрушение упорядоченной структуры.

Список литературы

1. Shostka V.I. and Shostka N.V., Metastable states of the fractal-cluster structure of alcohol-containing aqueous solutions // Journal of Physics: Conference Series 1400(6), 066036, (2019).
2. Шостка В.И., Шостка Н.В., Вершицкий В.И., Сравнительный анализ клатратных структур в приповерхностных слоях водных растворов // IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов, 29-31 января 2020, М.: НИЯУ МИФИ, – 704 с. – с.330-332(2020).
3. Шостка В.И., Шостка Н.В., Вершицкий В.И., Халилов С.И., Исследование процессов формирования клатратных структур приповерхностных слоев водно-спиртовых смесей // Сборник тезисов докладов третьей всероссийской конференции Физика водных растворов, 14-15 декабря 2020, М.: Президиум РАН, - с. 53 (2020).

Influence of the temperature gradient on the process of microparticle transfer in a thin liquid layer

Al-Muzaiqer M. ¹, Flyagin V. and Ivanova N.

¹University of Tyumen, Photonics and Microfluidics Research Laboratory.

e-mail: *m.al-muzajker@utmn.ru*

The manipulation of nano-and microparticles, and biological objects in a liquid, or the formation of self-assembly of the desired structure and morphology on surfaces are crucial in various chemical and biomedical research [1], the manufacture of new materials [2], the creation of coatings with specified functional properties, and surface cleaning technologies [3] in electronics and optics. In most cases, the mechanism of self-organization or aggregation of particles is determined by the action of capillary flows that transport particles in areas of intense evaporation in spontaneously evaporating liquids.

In this work, we propose an effective method for dynamic control of the process of self-assembly of particles, which allows you to control the process in real time by adjusting the direction and magnitude of the thermocapillary force, as well as to create patterns of any configuration with high spatial.

As substrate used a welding glass with a spot heater (a metal copper rod with a diameter of 1.6 mm) connected to a Peltier element. A PMMA ring with an internal diameter of 20 mm is glued to the glass with epoxy glue so that the heater is located in the center of the cell.

As working fluids, suspensions of polyethylene particles with sizes ranging from 50 to 150 microns, in isopropanol and in polymethylsiloxane (PMS-10) were used. The experiments were carried out for a range of layer thickness values from 320 to 690 microns, with a constant particle fraction (3 mg).

In heating (negative temperature gradient), the following patterns are revealed: the surface area of the substrate occupied by the particles upon completion of assembly decreases with increasing layer thickness and does not depend on the properties of the carrier liquid; the time of complete assembly of the particles does not depend on the layer thickness, but depends on the properties of the liquid.

In cooling mode (positive temperature gradient): The surface area released from the particles varies slightly with the layer thickness for both liquids but depends on the properties of the liquid. In silicone oil, the cleaning area is larger compared to isopropanol; the formation time of the final particle-free area does not depend on the layer thickness but depends on the properties of the liquid.

It is found that the time of complete assembly correlates with the time of establishing a stationary temperature difference (ΔT) between the center and the edge of the cell, i.e., the speed of particle assembly is determined by the speed of motion that triggers the TC flow of the isotherm.

References

1. Abdel Fatah T. A nanofilter for fluidic devices by pillar-assisted self-assembly microparticles / T. Abdel Fatah, M. Jalali, S. Mahshid // *Biomicrofluidics*, 12, 064103 (2018). DOI: 10.1063/1.5048623.
2. Caleap M. Acoustically trapped colloidal crystals that are reconfigurable in real time / M. Caleap, B. W. Drinkwater // *PNAS*, 111 (17), 6226-6230 (2014). DOI:10.1073/pnas.1323048111.
3. Ivanova N. Removal of micrometer size particles from surfaces using laser-induced thermocapillary flow: experimental results / N. Ivanova, V.M. Starov, A. Trybala, V.M.

Электронная структура термически окисленного вольфрама

Тимошнев С. Н.¹, Дементьев П.А.², Дементьева Е.В.², Лапушкин М.Н.², Смирнов Д.А.³

¹Алферовский университет

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

³Technische Universität Dresden

e-mail: timoshnev@mail.ru

В настоящее время полупроводниковые окислы металлов находят широкое применение в датчиках, сенсорах, солнечных элементах, катализаторах, фото- и электрохромных материалах и т.д. Наиболее исследованным полупроводниковым оксидом металлов является WO_3 из-за его широкого применения. Существует большое количество способов создания окислов W. Одним из простых способов получения окисла W – это термическое окисление W в кислороде при давлении менее 10 Торр и температуре (T) менее 1000 К.

Целью настоящей работы было исследование электронной структуры поверхности окисленного W, полученного при термическом окислении W при давлении кислорода 1 Торр и $T=950$ К.

Фотоэмиссионные исследования были выполнены в Российско-Германской лаборатории на синхротроне HZB BESSY II (Берлин, Германия) с использованием метода фотоэлектронной спектроскопии при возбуждении в диапазоне энергий фотонов 80 эВ – 600 эВ.

Фотоэлектронные спектры валентной зоны термически окисленного W на воздухе совпадают с хорошо известными спектрами валентной зоны окисленного вольфрама [1, 2]. Пик валентной зоны не имеет особенностей и его максимум расположен при 4.5-6.5 эВ ниже уровня Ферми (E_F), причем чем больше энергия возбуждения, тем дальше от E_F он расположен. Также имеется небольшое плечо в области 8-10 эВ ниже E_F . В запрещенной зоне вблизи E_F присутствуют небольшие пики, которые можно приписать W 5d состояниям.

Спектр остовных состояний W $4f_{5/2}$ и W $4f_{7/2}$ состоит из трех компонент, которые соответствуют разным степеням окисления вольфрама: W^{6+} , W^{5+} и W^{4+} , что совпадает с данными других авторов, например [1, 2]. При энергии возбуждения $h\nu = 100$ эВ соотношение этих компонент равно 61:28:11, а для энергии возбуждения $h\nu = 600$ эВ соотношение этих компонент равно 36:28:36. Так как с увеличением энергии возбуждения фотоэмиссии глубина выхода фотоэлектронов возрастает, то такое изменение соотношения указывает на то, что на поверхности больше концентрация вольфрама с большей степенью окисления. Это связано диффузионными процессами кислорода вглубь образца при окислении вольфрама.

При энергии возбуждения $h\nu = 600$ эВ в спектре остовного состояния O 2s (фотоэмиссия с глубины окисла) видны два состояния кислорода: в составе окисла и гидроксила с преобладанием компоненты в составе окисла. Соотношение этих компонент 7:1. Точно такой же результат был получен при энергии возбуждения $h\nu = 120$ эВ в спектре остовного состояния O 2s (фотоэмиссия из поверхности окисла). Наличие гидроксила на поверхности и в глубине окисла вполне объяснимо присутствием паров воды в процессе окисления вольфрама.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-02-00370. Исследовательский проект был поддержан русско-немецкой лабораторией на BESSY II. Мы благодарим HZB за выделение времени пучка синхротронного излучения.

Список литературы

1. Ottaviano L., Bussolotti F., Lozzi L., Passacantando M., La Rosa S., Santucci S., Core level and valence band investigation of WO₃ thin films with synchrotron radiation, *Thin Solid Films*, V. 436, 9–16, 2003.
2. Siokou A., Leftheriotis G., Papaefthimiou S., Yianoulis P., Effect of the tungsten and molybdenum oxidation states on the thermal coloration of amorphous WO₃ and MoO₃ films, *Surf. Sci.*, V. 482-485, 294-299, 2001.

Исследование влияния адсорбции на ориентационные и релаксационные свойства полимерной цепи конечной длины вблизи поверхности твердого тела.

Максимова О.Г.¹, Максимов А.В.¹, Смирнов В.В.¹, Егоров В.И.^{1,2}, Осипов С.В.¹,
Меньшиков Е.В.¹

¹ЧГУ

²Научно исследовательский институт системных исследований РАН

e-mail: valentinesmirnov97@gmail.com

Для исследования динамических свойств полимерного покрытия твердого тела рассмотрена отдельная полимерная цепь конечной длины, обладающая жесткостью на изгиб и находящаяся в растворе вблизи некоторой адсорбирующей плоской поверхности. Один участок цепи закреплен на плоскости, а второй остается свободным. Предполагается, что причиной вытягивания цепи является внутреннее эффективное среднее (молекулярное) поле, формируемое вследствие ее межмолекулярных взаимодействий со свободными концами других цепей. Величина среднего поля зависит от межцепного расстояния, длины свободного участка полимерной цепи и величины параметра дальнего ориентационного порядка. Проведено исследование взаимосвязи между параметрами жесткости цепей на изгиб, локальных межцепных ориентационных взаимодействий, параметрами адгезии, геометрией поверхности и, соответственно, характеристиками ближнего и дальнего порядка.

Получены зависимости параметра дальнего ориентационного порядка от параметра адсорбции и коэффициента среднего поля. Показано, что эти зависимости имеют резкий скачок в определенной критической точке. Доказано, что в критической точке имеет место обычный фазовый переход 1-го рода, связанный с резким изменением степени вытянутости и сопровождаемый резким ростом флуктуаций. Проведено исследование влияния жесткости цепи на степень вытянутости и положение критической точки.

При деформации твердого тела изменяются межцепные расстояния, что приводит к изменению степени вытянутости цепи и параметра дальнего ориентационного порядка. Получены кинетические уравнения для вычисления времени релаксации на основе метода Кубо. Рассчитаны зависимости времен релаксации от величины деформации. Изучена эволюция различных решений в зависимости от длины полимерной цепи и коэффициента адсорбции. Обнаружен эффект «критического замедления», заключающийся в резком

увеличении времен релаксации в окрестности критической точки при образовании поверхностных полимерных слоев на поверхности твердого тела.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект № 19-42-350001

Экспериментальная установка для изучения протекания химических реакций в условиях электрораспылительной ионизации

Кулешов Д. О.¹, Громов И.А.², Соловьева А.В.¹, Есикова Н.А.¹, Галль Н.Р.², Галль Л.Н.¹

¹ИАП РАН

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: Hellchemist@yandex.ru

В настоящее время метод высокопроизводительного скрининга нашел широкое применение в фармацевтике, так как он значительно сокращает временные затраты на создание необходимых лекарственных препаратов. Основные усилия этой области направлены на ускорение синтеза, подбор оптимальных исходных соединений и условий синтеза, миниатюризацию химического оборудования, автоматизацию процессов, а также на уменьшение стоимости проведения исследований.

Для успешного решения приведенных выше задач предлагается использовать принципиально новый подход, заключающийся в проведении химических реакций в факеле электроспрея – физического метода распыления раствора, являющегося важнейшим на сегодня способом получения информации в масс-спектрометрии нелетучих биомолекул. Факел электроспрея представляет собой ансамбль микро- и нанок капель распыленного растворителя, содержащего в себе молекулы анализируемой пробы. В рамках развиваемого направления эти молекулы рассматриваются как реагенты, а капли – как среда их реакций.

В ходе масс-спектрометрических экспериментов было установлено, что в микро- и нанок каплях факела электроспрея могут проходить как простые, так и сложные многостадийные химические реакции, порой со значительным ускорением по сравнению с их протеканием в конденсированной фазе [1-7]. Однако на сегодняшний день механизм ускорения химических реакций в условиях электрораспылительной ионизации остается открытым вопросом.

В настоящей работе представлен разработанный нами прототип устройства, предназначенного для проведения химических реакций в условиях электрораспылительной ионизации. В данном устройстве осуществляется распыление исследуемых реакционных смесей. Образующиеся заряженные капли транспортируются при совместном действии распыляющего напряжения и потока распыляющего газа в накопитель, откуда продукты реакции и непрореагировавшие вещества могут быть извлечены для проведения качественного и количественного анализа, либо для любых других целей. В каплях в процессе их транспортировки протекают химические реакции, на скорость которых можно оказывать влияние варьируя такие параметры как напряженность электрического поля и температура в области транспортировки капель, вязкость распыляемых растворов, скорость потока распыляющего газа. Следует отметить, что существует возможность забора с помощью проботборного капилляра части капель в семплер масс-спектрометра, что позволит реализовать online-мониторинг протекания реакций. Т.о., представленное устройство

может выполнять функцию атмосферной части ионного источника масс-спектрометра, предназначенного для работы в сочетании с электрораспылительной ионизации. На сегодняшний день работа представленного устройства протестирована на кислотнокатализируемых реакциях конденсации аминов с альдегидами и кетонами, в частности, на реакции конденсации анилина с ацетоном [8].

Т.о., использование предложенной экспериментальной установки открывает новые перспективы как для изучения протекания химических реакций, так и для применения электрораспыления в качестве препаративного способа синтеза органических соединений. Дальнейшие исследования протекания химических реакций в условиях электрораспылительной ионизации (в частности механизма их ускорения в микрокаплях) с использованием экспериментальной установки, а также решение задачи сопряжения установки с масс-спектрометрами высокого сопряжения позволят создать аппаратный комплекс, сочетающий в себе возможность ускоренного управляемого химического синтеза с одновременным масс-спектрометрическим контролем его протекания в реальном времени.

Список литературы

1. Girod M., Moyano E., Campbell D.I., Cooks R.G., Accelerated bimolecular reactions in microdroplets studied by desorption electrospray ionization mass spectrometry, *Chemical Science*, Vol. 2, № 3, P. 501-510, 2011
2. Badu-Tawiah A.K., Campbell D.I., Cooks R.G., Reactions of microsolvated organic compounds at ambient surfaces: droplet velocity, charge state, and solvent effects, *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, Vol. 23, №. 6, P. 1077-1084, 2012
3. Badu-Tawiah A. K., Cyriac J., Cooks R.G., Reactions of organic ions at ambient surfaces in a solvent-free environment, *Journal of The American Society for Mass Spectrometry*, Vol. 23, №. 5, P. 842-849, 2012
4. Marquez C.A., Wang H., Fabbretti F., Metzger J.O., Electron-transfer-catalyzed dimerization of trans-anethole: Detection of the distonic tetramethylene radical cation intermediate by extractive electrospray ionization mass spectrometry, *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 130, №. 51, P. 17208-17209, 2008
5. Perry R.H., Splendore M., Chien A., Davis N.K., Zare R.N., Detecting reaction intermediates in liquids on the millisecond time scale using desorption electrospray ionization, *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 50, №. 1, P. 250-254, 2011
6. Müller T., Badu-Tawiah A., Cooks R.G., Accelerated Carbon – Carbon Bond-Forming Reactions in Preparative Electrospray, *Angewandte Chemie International Edition*, V. 51, №. 47, P. 11832-11835, 2012
7. Lebedev A. T., Ambient ionization mass spectrometry, *Russian Chemical Reviews*, Vol. 84, №. 7, P. 665, 2015
8. Kuleshov D. O., Mazur D. M., Gromov I. A., Alekseyuk E. N., Gall N. R., Polyakova O. V., Lebedev A. T., Gall L. N., Study of the Aniline and Acetone Condensation Reaction under Electrospray Ionization Conditions, *Journal of Analytical Chemistry*, Vol. 75, No. 13, pp. 1647–1652, 2020

Исследование способов управления работой выхода нитевидных нанокристаллов фосфида галлия

Шаров В. А.^{1,2}, Алексеев П.А.¹, Федоров В.В.², Мухин И.С.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Академический университет

e-mail: vl_sharov@mail.ru

Нитевидные нанокристаллы фосфида галлия (GaP ННК) перспективны в фотокаталитических и бетавольтаических преобразователях, оптоэлектронике и фотонике. [1,2,3] Для создания омических контактов, а также для увеличения эффективности фотокатализа необходима возможность управления работой выхода ННК. В работе исследована возможность подстройки работы выхода путем изменения кристаллической структуры и добавления As-содержащей оболочки.

GaP ННК были синтезированы методом молекулярно-пучковой эпитаксии в самокаталитическом режиме. С помощью контроля контактного угла капли катализатора во время процесса роста была достигнута политипическая кристаллическая структура ННК: кубическая (сфалеритная) в нижней части и гексагональная (вюрцитная) в верхней, что было подтверждено просвечивающей электронной микроскопией и спектроскопией комбинационного рассеяния. Кроме того, в нижней части ННК были покрыты моноатомной As-содержащей оболочкой.

Работа выхода ННК была исследована методом градиентной сканирующей микроскопии зонда Кельвина. Данный метод позволяет получать информацию о пространственном распределении поверхностного потенциала с высоким разрешением. Экспериментальное исследование было подкреплено численным моделированием потенциала путем решения уравнения Шредингера-Пуассона. Построенная модель учитывала электрические заряды и упругие напряжения, обусловленные плоскими дефектами в ННК, и находилась в согласии с экспериментальными данными.

Было обнаружено, что наличие As-содержащей оболочки увеличивает работу выхода на 300 мэВ. Кроме того, была зарегистрирована разница в 150 мэВ между работой выхода сфалеритной и вюрцитной части. Эти эффекты дают возможность для управления величиной барьера Шоттки и положением границ энергетических зон по отношению к окислительно-восстановительному потенциалу воды.

Работа была выполнена при поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации (гос. задание № 0791-2020-0005)

Список литературы

1. Standing A. et al. Efficient water reduction with gallium phosphide nanowires //Nature communications. – 2015. – Т. 6. – №. 1. – С. 1-7.
2. McNamee S. et al. GaP nanowire betavoltaic device //Nanotechnology. – 2018. – Т. 30. – №. 7. – С. 075401.
3. Trofimov P. et al. Perovskite–gallium phosphide platform for reconfigurable visible-light nanophotonic chip //ACS nano. – 2020. – Т. 14. – №. 7. – С. 8126-8134.

Генерация тока при трении контакта металл-полупроводник

Алексеев П. А.¹, Шаров В.А.¹, Дунаевский М.С.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: nprokher@gmail.com

Создание миниатюрных устройств, позволяющих собирать механическую энергию из окружающей среды (ветер, волны и др.) и преобразовывать её в электричество является актуальной задачей. Одним из видов подобных устройств являются трибоэлектрические наногенераторы. Принцип работы таких устройств основан на трибоэлектрическом эффекте – генерации электрического тока при трении различных материалов. Природа и свойства таких материалов может быть различной. Трибоэлектрическая генерация показана при трении контактов полимер-полимер, полярная жидкость – полимер, полупроводник – полупроводник, металл – полупроводник [1,2]. Недавно было показано, что использование полупроводников для трибоэлектрической генерации позволяет существенно повысить плотности тока до значений достигающих 105 А/м^2 [3]. При этом мощность генератора достигает 1000 Вт/м^2 [4].

Наиболее исследованным полупроводниковым материалом для трибоэлектрической генерации является кремний [2]. Показано, что плотность трибоэлектрического тока зависит от уровня и типа легирования, плотности поверхностных состояний, а также толщины естественного оксида. Полярность трибоэлектрического тока объясняется по-разному. Группа проф. Z. L. Wang объясняет знак трибоэлектрического тока с помощью, так называемого, трибовольтаического эффекта и указывает на то, что знак должен совпадать со знаком фототока [5]. Альтернативным подходом является предложение учитывать положение закрепления уровня Ферми на поверхностных состояниях, а также туннелирование электронов через поверхностный оксид [4,6].

Целью данной работы было определить основные факторы, влияющие на величину и полярность трибоэлектрического тока при трении металла о полупроводник. Эксперимент выполнялся с применением сканирующего зондового микроскопа. Для определения величины тока производилось сканирование поверхности полупроводника металлизированным зондом в контактном режиме с различной силой воздействия на поверхность, при этом регистрировался ток короткого замыкания, протекающий в цепи во время сканирования. Напряжение холостого хода определялось путём подбора напряжения, подаваемого на зонд, при котором трибоэлектрический ток пропадал. В качестве полупроводников использовались Si, InP, InAs, GaAs с различными уровнями и типами легирования. Важно отметить, что полупроводники АЗВ5 имеют более высокую плотность поверхностных состояний, по сравнению с Si, что позволяет более точно определить влияние поверхностных состояний на величину и полярность трибоэлектрического тока.

Показано, что использование полупроводников АЗВ5 является перспективным в трибоэлектрических наногенераторах, и вследствие высокой плотности поверхностных состояний позволяет увеличить плотность тока в 10-100 раз по сравнению с кремнием. Направление трибоэлектрического тока определяется соотношением работы выхода зонда и положением поверхностного закрепления уровня Ферми.

Список литературы

1. Wu C. et al. Triboelectric nanogenerator: a foundation of the energy for the new era //Advanced Energy Materials. – 2019. – Т. 9. – №. 1. – С. 1802906.

2. Yang R. et al. Semiconductor-based dynamic heterojunctions as an emerging strategy for high direct-current mechanical energy harvesting //Nano Energy. – 2021. – С. 105849.
3. Sharov V. A. et al. InP/Si heterostructure for high-current hybrid triboelectric/photovoltaic generation //ACS Applied Energy Materials. – 2019. – Т. 2. – №. 6. – С. 4395-4401.
4. Lin S. et al. Surface states enhanced dynamic schottky diode generator with extremely high power density over 1000 W m⁻² //Advanced Science. – 2019. – Т. 6. – №. 24. – С. 1901925.
5. Zheng M. et al. Scanning Probing of the Tribovoltaic Effect at the Sliding Interface of Two Semiconductors //Advanced Materials. – 2020.
6. Liu J. et al. Tribo-Tunneling DC Generator with Carbon Aerogel/Silicon Multi-Nano-contacts //Advanced Electronic Materials. – 2019. – Т. 5. – №. 12. – С. 1900464.

Модификация поверхности AlN под действием адсорбции К

Бенеманская Г.В.², Тимошнев С. Н.¹

¹Алфёровский университет

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: timoshnev@gmail.com

Нитриды III группы имеют большое значение для разработки гетероструктур, используемых в оптических и мощных электронных устройствах. Несмотря на эффективный технический прогресс в области роста высококачественных материалов, теоретических и экспериментальных данных об электронной структуре III-нитридов все еще недостаточно, особенно в случае AlN. Это порождает важность исследований поверхностных состояний, формирования границ раздела, изгиба зон. Это обусловлено тем, что такие свойства играют ключевую роль в наноструктурах, наногетероструктурах и при разработке оптоэлектронных устройств. Адсорбция металлов на AlN практически не исследована [1, 2]. Адсорбция К на поверхности AlN не исследована. В данной работе эволюция электронной структуры интерфейса К/AlN в зависимости от покрытия К впервые исследована с помощью фотоэлектронной спектроскопии с использованием синхротронного излучения.

Фотоэлектронная спектроскопия является мощным инструментом для изучения свойств материалов и для получения наиболее полной информации о зонной структуре электронных состояний благодаря высокой чувствительности к химическим состояниям. Фотоэмиссионные исследования проводились на RGL-станции синхротрона BESSY II (Берлин, Германия). Энергия фотонов была в диапазоне 100-650 эВ. Исследования проводились *in situ* в сверхвысоком вакууме 5×10^{10} Торр при комнатной температуре. Образцы AlN отжигались *in situ* непосредственно в вакууме при температуре ~900 К. На поверхность образца наносился атомарно чистый калий из стандартного калиброванного источника. Адсорбция К на поверхность AlN была исследована в режиме пошаговых субмонослойных покрытий от 0.1 до 1.5 монослоя. Регистрировалась нормальная фотоэмиссия из области валентной зоны и из остовных уровней N 1s, Al 2s, K 2p, K 3p.

Обнаружено, что адсорбция К модифицирует остовные уровни N 1s, Al 2s и спектры в области валентной зоны. Установлена структура валентной зоны для чистой поверхности AlN. Два поверхностных состояния обнаружены в фотоэмиссионном спектре для чистой поверхности, которые подавляются при адсорбции К. Установлено возникновение

дополнительного пика в спектре основного уровня N 1s, природа которого связана с взаимодействием поверхностных атомов азота и адсорбированных атомов К. Положительное смещение пика в сторону более высокой энергии связи обусловлено переносом заряда и увеличением N-ионности.

Авторы выражают благодарность Берлинскому центру материалов и энергии имени Гельмгольца за предоставление возможности для проведения экспериментов на синхротроне BESSY II и помощь во время экспериментов.

Список литературы

1. Kiranjot, R. Dhawan, R.K. Gupta, P.K. Yadav, Mohammed H.Modi, Interface asymmetry in AlN/Ni and Ni/AlN interfaces: A study using resonant soft X-ray reflectivity, *Appl. Surf. Sci.*, 529, 147199, 2020.
2. P. Kempisty, P. Strak, K. Sakowski, Y. Kangawa, S. Krukowski, *Ab initio* and thermodynamic picture of Al adsorption of AlN(0001) surface – Role of bond creation and electron transition contributions, *Appl. Surf. Sci.*, 532, 147419, 2020.

Синтез пентагонально структурированных пленок палладия и их применение в мембранных приложениях

Петриев И. С.^{1,2}, Пушанкина П.Д.¹, Луценко И.С.¹, Глазкова Ю.С.¹, Мальков Т.И.¹, Барышев М.Г.^{1,2}

¹КуБГУ

²ЮНЦ РАН

e-mail: petriev_iliya@mail.ru

Палладийсодержащие мембраны привлекают большое внимание как научных кругов, так и промышленности, поскольку обладают высокой селективностью по водороду, высокой термической стабильностью и механической стойкостью. [1] Однако, при достаточно низких температурах (<100°C) равновесие между молекулярным водородом в газовой фазе и атомарным адсорбированным в фазе палладия устанавливается очень медленно и трудно, что может быть вызвано инактивной или загрязненной поверхностью мембран. Преодолеть такое условие позволяет модификация поверхности металлической пленки наноструктурированным слоем на основе порошкообразных хемосорбирующих водород веществ [2]. Подобное покрытие позволяет интенсифицировать процесс переноса водорода через цельнометаллическую палладийсодержащую мембрану путем ускорения поверхностных лимитирующих стадий [3]. Это становится возможным благодаря увеличению площади активной поверхности, а следовательно количества центров хемосорбции.

В ходе исследовательской работы на поверхности палладийсодержащих пленок были синтезированы два типа покрытия с частицами сферической формы по методу классической палладиевой черни или «наночастицы» и пентагонально структурированными частицами по новому авторскому методу «наноцветы». Оба покрытия были получены методом электрохимического осаждения, однако, необходимыми условиями получения пентагонально структурированного покрытия являлось добавления ПАВа в рабочий раствор и пониженная, по сравнению с классическим методом, плотность тока.

Модифицированные с обеих сторон палладийсодержащие пленки были исследованы в процессах низкотемпературного (<100°C) транспорта водорода. Где мембраны с пентагонально структурированным функциональным слоем продемонстрировали увеличение

плотности потока до двух раз (до 0,35 ммоль/с м²), по сравнению с мембранами, модифицированными палладиевой чернью. Номинально это достаточно небольшие значения, но в условиях пониженной температуры они являются весьма существенными, поскольку в данном температурном диапазоне практически отсутствует стабильная проницаемость. Такой результат, достигнутый мембранами с принципиально новой структурной организацией «наноцветы», может объясняться повышением адсорбционной активности поверхности, что в свою очередь сказывается на каталитической активности материала по отношению к реакциям с участием водорода [4]. Предположительно, это же является причиной снижения энергетического барьера процесса диссоциации и рекомбинации молекул водорода на поверхности мембраны, что приводит к увеличению скорости проникновения водорода через палладийсодержащую мембрану.

Разрабатываемая в ходе работы палладийсодержащая мембрана, предположительно позволяющая снизить энергетические затраты в процессе получения высокочистого водорода и способная работать при температурах окружающей среды, может стать основой не только для низкотемпературной диффузионной очистки водорода, но и для других низкотемпературных применений таких как: создание водородного электрода кислородно-водородного топливного элемента, применение в электродных процессах электролитического разделения изотопов водорода и др.

Работа выполнена при финансовой поддержке основной части государственного задания Министерства науки и высшего образования Кубанского государственного университета № FZEN-2020-0022, гранта РФФИ и Краснодарского края № 20-42-235001 и Кубанского научного фонда в рамках проекта №НИП-20.1/13.

Список литературы

1. Peters T., Caravella A. // Membranes. 2019. V. 9. № 25. P. 1-5.
2. W. Vielstich, Brennstoffelemente. Moderne Verfahren zur elektrochemischen Energiegewinnung. Weinheim: Verlag Chemie (1965).
3. Petriev I., Pushankina P., Bolotin S. et. al. // J. Membr. Sci. 2021. V. 620. 118894.
4. Lytkina A., Orekhova N., Ermilova M. et. al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2019. V. 44. P. 13310-13322.

Изучение оптических свойств халькогенидных стекол на основе теллура по данным терагерцовой ИК спектроскопии

В.А. Рыжов¹, Б.Т. Мелех¹, Л.П. Казакова^{1,2}

¹ФТИ им. А. Ф. Иоффе

²СПбГЛТУ им. С.М. Кирова

e-mail: v.ryzhov@mail.ioffe.ru

Поиск халькогенидных стекол (ХС) в качестве материала прозрачного в инфракрасной области спектра активно продолжается. Возможность в результате подбора химического состава и специальных технологий синтеза изменять спектральные характеристики этих сплавов в сочетании с их способностью к формовке и вытяжке обеспечивают успех такого поиска. В недавних работах [1,2], выполненных в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, были измерены оптические, параметры сплавов: Ge-Se-Te, Ge-Se-S-Te и Si-Te для спектральных приборов и устройств акустооптики. Эти исследования показали, что окно прозрачности ХС, содержащих теллур, может перекрывать практически весь ИК-диапазон в зависимости от концентрации Ge, Se или Si в сплаве.

Как известно, прозрачность ХС для инфракрасного излучения определяется двумя основными видами механизмов поглощения. Поглощение с коротковолновой стороны спектра связано с переходами электронов из валентной зоны в зону проводимости. Это так называемый край фундаментального поглощения. Его положение отвечает оптической ширине запрещенной зоны. Для халькогенидов S, Se и Te он находится в районе 1-2 μm . С длинноволновой стороны окно прозрачности ХС ограничено многофононным краем решеточного поглощения, которое обусловлено взаимодействием излучения с колебательными модами атомов материала.

Данная работа состояла в создании и изучении новых сплавов систем Ge-Se(Sb)-Te и Si-Ge(Ga)-Te с целью продвижения фононного края поглощения в этих системах в терагерцовую область ИК-спектра. Основным подспорьем работы было в первую очередь знание о спектральном положении решеточных колебаний всех компонентов полученных сплавов. Такие данные стали доступными лишь в последнее время благодаря успехам терагерцовой техники.

Нами были получены и проанализированы ИК-спектры пропускания систем Ge-Se(Sb)-Te и Si-Ge(Ga)-Te составов: $\text{Ge}_{19}\text{Se}_9\text{Te}_{72}$, $\text{Si}_{15}\text{Ga}_{10}\text{Te}_{75}$, $\text{Si}_{10}\text{Ge}_{10}\text{Te}_{80}$, $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{15}\text{Te}_{70}$ и $\text{Ge}_{14}\text{Sb}_{29}\text{Te}_{57}$ для того, чтобы выбрать наиболее подходящее для работы в терагерцовом диапазоне ХС на основе теллура. Наиболее придвинутым в терагерцовые частоты краем фононного поглощения обладают теллуридные стекла системы Ge-Sb-Te. Для оценки влияния процентного содержания элементов сплава на положение длинноволнового края окна прозрачности проведена идентификация полос в спектрах этих стекол на основании расчета и данных о структуре подобных псевдобинарных $(\text{GeTe})_n(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_m$ систем, известных как GST [3]. Окно прозрачности состава $\text{Ge}_{14}\text{Sb}_{29}\text{Te}_{57}$ наибольшее: оно перекрывает диапазон длин волн инфракрасного спектра оптического излучения от 2 до 30 микрон. Отдельные малоинтенсивные пики поглощения в этом интервале принадлежат

колебаниям связей О-Н (2,7 μm), H_2O (6,3 μm), Ge-O (8 and 11 μm), Se-O (10,7 and 16 μm). Их проявление в спектрах объясняется присутствием примесей в ХС.

Список литературы

1. Л.А. Кулакова, Б.Т. Мелех, С.А. Грудинкин, А.П. Данилов *ФТП* 47 1435 (2013).
2. В.А. Рыжов, Б.Т. Мелех. *ФТП* 52 221 (2018).
3. V.A. Ryzhov and D. Arsova, *Phys. Sci. Int. J.* 14 (4), 8 (2017).

Исследования нелинейных колебаний намагниченности касательно-намагниченных плёночных ЖИГ-резонаторов

Гапончик Р. В.¹, Гото Т.², Устинов А.Б.¹

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

²Технологический университет Тойохаши, Япония

e-mail: ferumno33@gmail.com

Спин-волновой резонатор представляет собой плоский прямоугольный образец ферромагнитной пленки. Размеры резонатора, его форма, магнитные параметры пленки и величина подмагничивающего поля определяют спектр резонансных частот. На практике резонаторы на основе пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) используются обычно потому, что этот материал имеет наименьший параметр релаксации колебаний намагниченности. Известно, что с увеличением мощности СВЧ-сигнала, возбуждающего колебания в пленочном ферромагнитном резонаторе, могут возникать различные нелинейные эффекты. Эффект бистабильности [1] наблюдается и достаточно хорошо изучен в нормально намагниченных резонаторах. В случае касательно намагниченных резонаторов имеет место нелинейный сдвиг частоты и нелинейное затухание колебаний намагниченности [2,3,4].

Целью работы является построение модели вынужденных колебаний в слабонелинейных системах с учетом нелинейного сдвига частоты и нелинейного затухания, а также ее экспериментальное обоснование на примере пленочного ферромагнитного резонатора.

Теоретическая модель была получена методом медленно меняющихся амплитуд. С помощью данного метода было решено нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее вынужденные колебания в резонаторе с одновременным учетом нелинейного затухания и нелинейного сдвига частоты. После ряда математических преобразований было получено выражение, описывающее резонансную кривую. Расчеты показали, что нелинейное затухание приводит к расширению резонансной кривой и к уменьшению амплитуды колебаний, а нелинейный сдвиг частоты вызывает сдвиг максимума амплитуды колебаний и приводит к появлению бистабильности. Наличие нелинейного затухания позволяет существенно ограничить влияние нелинейного сдвига частоты на колебательную систему.

Экспериментальный образец резонатора был изготовлен из эпитаксиальной пленки ЖИГ толщиной 7 мкм с размерами в плоскости 1x1 мм². Пленка имела намагниченность насыщения 1750 Гс. Сверхвысокочастотные колебания намагниченности возбуждались в резонаторе микрополосковой антенной шириной 50 мкм и длиной 2 мм, один конец которой был подключен к стандартной микрополосковой линии передачи с характеристическим сопротивлением 50 Ом, а другой конец был заземлен. Резонатор был намагничен в плоскости полем 1800 Э.

Нелинейные свойства резонатора были исследованы с помощью измерений спектров микроволнового поглощения при различных уровнях входной мощности подаваемого СВЧ сигнала (характеристика S_{11}). Нелинейные характеристики резонатора измерялись в диапазоне частот от 5.1 до 5.3 ГГц.

По результатам обработки измерений получены экспериментальные зависимости частоты релаксации колебаний намагниченности и нелинейного сдвига частоты от значения поглощённой резонатором мощности. Результаты показали, что за счёт развития нелинейного затухания с ростом поглощаемой мощности растёт и частота релаксации. Это проявляется в уширении резонансных кривых. Нелинейное затухание ограничивает нелинейный сдвиг частоты.

Из проведенных исследований следует, что развитие нелинейных процессов уменьшает нагруженную добротность ЖИГ-резонатора и увеличивает вносимые в систему потери, что необходимо учитывать при разработке приборов на основе таких резонаторов. Хорошее совпадение экспериментальных и теоретических результатов позволяет сделать вывод о том, что метод медленно меняющихся амплитуд применим для описания нелинейной динамики колебаний намагниченности в ЖИГ-резонаторах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ЯОПН, проект № 21-52-50006.

Список литературы

1. Y.K. Fetisov, et. al. Nonlinear ferromagnetic resonance and foldover in yttrium iron garnet thin films-inadequacy of the classical model, IEEE Trans. Mag., 6, 4511 (1999).
2. H. Yan, et. al. Resonant frequency shift in a MSSW-SER with excitation power, Electron Lett. 32, 1787 (1996).
3. A.V. Drozdovskii, A.B.Ustinov. Nonlinear response of ferromagnetic film resonator under conditions of nonlinear damping of magnetization oscillations, Tech. Phys. Lett. 36, 834 (2010).
4. H. Zhou, et. al. Spin pumping in the nonlinear dynamic regime of a Pt/Y3Fe5O12 heterostructure. Appl. Phys. Lett. 108, 192408 (2016).

Спонтанная терагерцовая генерация ультракоротких волновых импульсов в терагерцовом частотном диапазоне

Опарина Ю. С.¹, Савилов А.В.¹

¹ИПФ РАН

e-mail: oparina@appl.sci-nnov.ru

Генерация коротких сверхширокополосных (несколько волновых циклов) электромагнитных импульсов с высокими пиковыми полями является важной задачей. Такие импульсы востребованы в различных приложениях. Здесь можно отметить так называемое терагерцовое (ТГц) высокоградиентное ускорение, а также использование сильных полей при исследованиях различных сред, включая так называемые эксперименты с накачкой-зондом. Источник для генерации импульсов, с требующимися характеристиками, может быть основан на спонтанном излучении коротких электронных сгустков. Спонтанное излучение реализуется, когда фазовый размер электронного сгустка меньше 2π . Благодаря развитию фотоинжекторов, на которых получают умеренно-релятивистские (3-7 МэВ)

электронные сгустки с длительностью порядка 1 пс и полным зарядом 0.1-1 нК, стало возможным создание источников спонтанного излучения в терагерцовом частотном диапазоне. Однако у спонтанного излучения есть существенный недостаток – быстрое нарушение когерентности из-за увеличения длины сгустка, вызванного сильным кулоновским отталкиванием частиц внутри плотного фотоинжекторного сгустка. Возможным решением этой задачи является стабилизация длины пучка (или даже компрессия), обеспечиваемая собственным излучаемым волновым полем пучка [1]. Этот режим реализуется в случае ондуляторного излучения, когда групповая скорость излучаемого волнового пакета близка к продольной скорости пучка (групповой синхронизм). Групповой синхронизм электронов с излучаемым волновым импульсом может быть обеспечен, например, если процесс генерации происходит в волноводе. Принципиальным отличием процесса спонтанного излучения от процесса индуцированного сверхизлучения является то, что процесс излучения начинается сразу (ему не должна предшествовать группировка), следовательно, формирование ультракороткого волнового пакета происходит сразу, при движении пучка всего через несколько периодов ондулятора, с первого периода ондулятора, когда излучается квазиуниполярный волновой импульс.

Как показывают расчёты, эффективность спонтанного излучения фотоинжекторных сгустков с описанными параметрами в режиме группового синхронизма, когда реализуется стабилизация собственными полями излучения, на уровне 5-8%, длительность излучаемых импульсов – несколько десятков пикосекунд, максимальные значения амплитуды электрического поля десятки МВ/м. Профилирование радиуса волновода позволяет значительно улучшить условия генерации. Профилируя радиус, мы фактически варьируем фазовую скорость излучения. В этом случае волна в генерации «участвует» больше частиц, чем в случае регулярного волновода, взаимодействие более эффективное. Начиная с меньшей скорости (большого радиуса) мы улучшаем условия взаимодействия, обеспечиваем захват большего числа частиц, увеличив фазовую скорость теперь (уменьшив радиус), мы обеспечим более эффективное торможение захваченных частиц, снова увеличив радиус, можно захватить ещё больше частиц. Для рассмотренных примеров эффективность излучения увеличилась до 20%, пиковые значения электрических полей излучаемых волновых импульсов - до 100-120 МВ/м.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда № 20-12-00378

Список литературы

1. Bandurkin, I.V., Oparina, Y.S., Savilov, A.V., «Super-radiative self-compression of photo-injector electron bunches», (2017) Applied Physics Letters, 110 (26), 263508.

Новые возможности коллекторов с азимутальным магнитным полем для многоступенчатой рекуперации в гиротронах

Лукиша О.И.¹, Трофимов П.А.¹, Ушеренко Б.Д.¹

¹СПбПУ

e-mail: trofpa@yandex.ru

Важной задачей, стоящей перед разработчиками мощных гиротронов для энергоемких приложений, является повышение их полного КПД. Эта задача может быть решена за счет применения коллекторов с рекуперацией остаточной энергии электронов. При одноступенчатой рекуперации типичные значения полного КПД мощных гиротронов

составляют 50–55 %. Эффективность рекуперации повышается при переходе к многоступенчатым коллекторам, в которых происходит сепарация в пространстве фракций пучка с разными энергиями электронов и осаждение этих фракций на секции коллектора под различными потенциалами. В последнее время в СПБПУ были разработаны коллекторы с многоступенчатой рекуперацией, в основе работы которых лежит новый способ сепарации электронов в азимутальном магнитном поле, формируемом с помощью тороидального соленоида [1–3]. При траекторном анализе в гиротроне СПБПУ с рабочей частотой 74,2 ГГц и выходной мощностью 100 кВт был достигнут полный КПД, равный 71,8 % в результате 4-ступенчатой рекуперации [2].

В данном докладе обсуждаются возможности повышения эффективности рекуперации в гиротроне СПБПУ. Были опробованы новые решения по оптимизации конструкции тороидального соленоида для этого гиротрона, которые были найдены ранее при моделировании коллектора для прототипа гиротрона, разрабатываемого для термоядерного реактора DEMO [3]. Особенностью тороидального соленоида в гиротроне СПБПУ является наличие двух радиальных связей, в которые собраны его торцевые проводники. Этим обеспечивается повышение доли электронов, проходящих в область рекуперации, где находятся секции коллектора под тормозящими потенциалами. Магнитное поле связей оказывает заметное влияние на траектории электронов, что может негативно сказываться на эффективности рекуперации, а также приводить к отражению электронов от коллектора в сторону резонатора. Анализ сил, действующих на электроны вблизи связей, показал, что положительного эффекта можно добиться, если изменить направление азимутального магнитного поля по сравнению с исходным направлением, для которого были выполнены расчеты, описанные в [2]. При измененном направлении азимутального поля был заметно уменьшен разброс радиальных координат электронных траекторий в области рекуперации. Дополнительного снижения этого разброса можно добиться в результате оптимизации угла наклона и длины конусной части тороидального соленоида.

Для новой конструкции тороидального соленоида была изменена геометрия секций коллектора, а также определены параметры секционированного катода, при которых практически отсутствует осаждение электронов на связях этого соленоида и заметно уменьшено отражение электронов от коллектора. В результате траекторного анализа, выполненного с помощью программного пакета *CST Studio Suite*, был получен полный КПД гиротрона СПБПУ, превышающий это значение для исходной версии тороидального соленоида, при отражении электронов от коллектора менее 1 % при использовании коллектора с 4-ступенчатой рекуперацией.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-12-10010). Часть результатов была получена с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (<http://www.scc.spbstu.ru>).

Список литературы

1. Лукаша О. И., Трофимов П. А. Метод сепарации электронов для систем многоступенчатой рекуперации в гиротронах // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, № 18. – С. 38–45.
2. Лукаша О. И., Трофимов П. А. Высокоэффективный гиротрон с многоступенчатой рекуперацией остаточной энергии электронов // ЖТФ. – 2019. – Т. 89, № 12. – С. 1988–1996.
3. Louksha O., Trofimov P., Manuilov V., Glyavin M. Simulations of a multistage depressed collector for the DEMO prototype gyrotron // Proc. 45th Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Buffalo, USA, 2020.

Бистабильность активных кольцевых резонаторов на поверхностных спиновых волнах

Витко В. В.¹, Гапончик Р.В.¹, Никитин А.А.¹, Устинов А.Б.¹

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: vitaliy.vitko@gmail.com

В последние десятилетия все большее внимание исследователей привлекает эффект дисперсионной бистабильности в резонансных системах различной природы. Такой эффект наблюдается в оптике [1-2], радиофотонике [3-4], магненике [5] и других областях, при изучении нелинейных колебаний. В последние годы появились работы по исследованию бистабильности в гибридных кольцевых резонансных системах на основе ферромагнитных пленок – спин-волновых активных кольцевых резонаторах (АКР) [6]. Такие резонаторы состоят из спин-волновой линии задержки, аттенуатора, направленных ответвителей, а также СВЧ усилителя в цепи обратной связи. Отличительной особенностью АКР является то, что амплитуда СВЧ сигнала значительно возрастает на резонансных частотах и превышает порог возникновения нелинейных эффектов в магнитной пленке. Первым нелинейным эффектом, который проявляется в спин-волновом АКР по мере увеличения мощности, является нелинейный сдвиг частоты каждой резонансной гармоники. После достижения порогового значения мощности возникает частотная область с двумя возможными устойчивыми состояниями, которые отличаются коэффициентом передачи, то есть система переходит в бистабильное состояние.

В настоящей работе нами впервые экспериментально наблюдалась бистабильность колебаний в АКР на поверхностных спиновых волнах. Для проведения экспериментов использовалась пленка железо-иттриевого граната толщиной 5.5 мкм с намагнитченностью насыщения 1750 Гс. Возбуждение и прием спиновых волн осуществлялся микрополосковыми антеннами, расстояние между ними составляло 3.5 мм. Напряженность внешнего магнитного поля составляла 2840 Э. Измерение передаточных характеристик проводилось до порога автогенерации АКР при помощи векторного анализатора цепей. Контроль коэффициента усиления в кольце проводился при помощи перестраиваемого аттенуатора. При увеличении коэффициента усиления наблюдался нелинейный сдвиг частоты. Было зарегистрировано пороговое значение коэффициента усиления, после достижения которого передаточная характеристика становилась бистабильной. Вблизи порога автогенерации частотный диапазон области бистабильности составлял 140 кГц.

Для объяснения наблюдаемого эффекта, был использован оригинальный теоретический подход, позволяющий описать резонансные свойства АКР с учетом нелинейности колебаний намагнитченности. Нелинейное дисперсионное уравнение для поверхностных спиновых волн было получено из линейного путем учета зависимости статической намагнитченности от амплитуды спиновых волн. При этом квадрат амплитуды спиновых волн задавался как произведение квадрата амплитуды входного сигнала на коэффициент передачи АКР по мощности. Для решения поставленной задачи коэффициент передачи был получен в результате суммирования бесконечного числа циркулирующих в АКР волн. Далее, задавая волновое число поверхностной спиновой волны как независимую переменную, определялась ее частота. Подстановка полученных нелинейных волновых чисел в коэффициент передачи позволила рассчитать нелинейные передаточные характеристики АКР. Благодаря разработанному теоретическому подходу был впервые аналитически получен порог бистабильности АКР на поверхностных спиновых волнах. Результаты

численного моделирования с высокой точностью совпадают с измеренными передаточными характеристиками.

Экспериментальные исследования выполнены при финансовой поддержке совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных № МК1938.2020.8. Теоретические исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках "Мегагранта" (проект № 2020-220-08-2146).

Список литературы

1. S. Li, Q. Ge, et al., Optical bistability via an external control field in all-fiber ring cavity, *Sci. Rep.*, vol. 7, 8992, 2017
2. A. A. Nikitin, A. V. Kondrashov, et al., Carrier-induced optical bistability in the silicon micro-ring resonators under continuous wave pumping, *Opt. Commun.*, vol. 480, 126456, 2021
3. V. Vitko, A. Nikitin, et al., Microwave bistability in active ring resonators with dual spin-wave and optical nonlinearities, *IEEE Magn. Lett.*, vol. 9, 1-4, 2018
4. Y. Xiong, Z. Zhang, et al., Experimental parameters, combined dynamics, and nonlinearity of a magnonic-opto-electronic oscillator (MOEO), *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 91(12), 125105, 2020
5. Y. K. Fetisov, C.E. Patton, Microwave bistability in nonlinear thin film ferromagnetic resonator, *J. Commun. Technol. Electron.*, vol. 45 (6), 664-669, 2000
6. P. Janantha, B. Kalinikos, M. Wu, Foldover of nonlinear eigenmodes in magnetic thin film based feedback rings, *Phys. Rev. B*, vol. 95, 064422, 2017

Электродинамическое моделирование спин-волновых устройств

Зарецкая Г.А., Дроздовский А. В., Кустов И.Е.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: avdrozdovskii@etu.ru

Ферритовые материалы нашли широкое применение в технике СВЧ при создании различных “классических” невзаимных и/или управляемых устройств, таких, как циркуляторы, вентили, фазовращатели, линии задержки, резонаторы и фильтры на их основе. Одним из наиболее интересных с точки зрения применения “неклассических” ферритов являются устройства, использующие в основе своей работы монокристаллические пленки феррита в которых могут распространяться волны прецессии намагниченности, т.н. спин-волны. На основе спин-волновых элементов могут быть созданы различные перестраиваемые магнитным полем СВЧ устройства в том числе вентили, линии задержки, фильтры, фазовращатели, элементы СВЧ-логики и пр. [1,2]. В данный момент наибольшее коммерческое распространение получили спин-волновые фильтры, работающие в диапазоне 2 – 14 ГГц [3-5]. Одним из ограничивающих факторов применение спин-волновых устройств является сложность расчета таких приборов.

В данной работе приводятся результаты моделирования передаточных характеристик линий задержки на основе пленки монокристалла феррита, полученные путем электродинамического моделирования. Необходимо отметить, что в случае электродинамического моделирования возможен анализ частотных характеристик всего устройства целиком, с

учетом элементов возбуждения и приема, а также всех паразитных эффектов, которые могут возникать в структуре.

Для моделирования была выбрана конструкция спин-волновой линии задержки [6]. Для возбуждения и приема сигнала в пленке феррита были использованы короткозамкнутые микрополосковые антенны. Ширина антенн и расстояние между антеннами s составляли 50 и 2500 мкм, соответственно. Сверху над микрополосковыми антеннами помещался волновод из пленки феррита. При моделировании в качестве материала феррита был выбран монокристалл железо-иттриевого граната (ЖИГ), как наиболее часто используемый при создании спин-волновых устройств. При моделировании полагалось, что намагниченность насыщения ЖИГ составляла 1750 Гс, а полуширина кривой ферромагнитного резонанса ΔH , была равна 0.5 Э. Чтобы избежать отражения волн от концов волновода, окончания волновода были сделаны под скос. При расчете задавались величина и направление постоянного магнитного поля внутри пленки ЖИГ. При расчете полагалось, что магнитное поле внутри пленки феррита имело напряженность 1200 Э.

При моделировании использовалась программа Ansys HFSS, шаг сетки определялся программой автоматически с ручной корректировкой, исходя из заданных критериев сходимости. Поскольку на частоте построения сетки шаг сетки зависел от длины волны, распространяющейся в структуре, то для ферритовой пленки размерами $0,5 \times 2 \times 0,005$ мм³, в которой распространяются спиновые волны, число тетраэдров, необходимое для расчета, превышает 400 000.

Моделирование проводилось для различных конфигураций поля подмагничивания. В соответствии с теорией [1] полученные при моделировании передаточные характеристики были невязанными для случая, когда поле было направлено в плоскости пленки перпендикулярно направлению распространения волн и взаимными в случае, когда поле подмагничивания было направлено перпендикулярно пленке феррита или сонаправлено с направлением распространения волн. На передаточных характеристиках наблюдались дополнительные провалы, обусловленные паразитной электромагнитной связью антенн, величина которой зависела от s . В рамках численного эксперимента исследовался фазовый набег внутри моделируемого устройства $\phi(f)$. На основе полученных результатов как был получен закон дисперсии $K(f) = \phi(f)/s$. Сопоставление законов дисперсии, полученных, путем электродинамического моделирования и путем расчета по аналитической теории показало незначительное (до 7%) расхождение результатов. Дополнительно полученные результаты электродинамического моделирования сравнивались с результатами экспериментального исследования и показали хорошее соответствие.

Работа поддержана грантом Министерства высшего образования и науки РФ № FSEE-2020-0005.

Список литературы

1. Stancil D.D., Prabhakar A. Spin waves: Theory and applications. Springer, NY, 2009
2. Калиникос Б. А., Устинов А. Б. Сверхвысокочастотные волны в пленочных ферромагнитных структурах. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 120с.
3. Перестраиваемые полосно-пропускающие фильтры // Завод «Магнетон» URL: <http://www.magneton.ru/cat.php?id=104> (дата обращения: 30.05.2020).
4. Продукция АО «НПП «ФАЗА» // АО «НПП «ФАЗА» URL: <http://fazon.ru/products> (дата обращения: 30.05.2020).
5. Геворкян В., Кочемасов В, Устинов А. Перестраиваемые по частоте СВЧ-фильтры на основе ферритовых материалов. Часть 1 // Компоненты и технологии. 2017. №3. С. 16-21.

6. Калиникос Б. А., Устинов А. Б., Баруздин С. А. Спин-волновые устройства и эхо-процессоры. Монография. Под ред. В. Н. Ушакова. М.: Радиотехника, 2013.

Влияние шероховатости границ интерфейсов на спектр усиления в сверхрешётках AlGaAs/GaAs

Дашков А. С.¹, Горай Л.И.¹

¹Алфёровский университет

e-mail: dashkov.alexander.om@gmail.com

Исследования электронных и оптических свойств полупроводниковых многокаскадных и многопериодных квантовых структур способствовали созданию современных источников излучения для среднего и дальнего инфракрасного (ИК) диапазона. В настоящее время аналогичные полупроводниковые структуры рассматриваются как основа для создания источников терагерцового (ТГц) излучения. Ожидается, что такие источники будут использоваться для сканирования багажа и людей в системах досмотра, а также для изучения верхних покровов биологических объектов [1]. При этом ТГц излучение не наносит ущерба изучаемому объекту по сравнению с другими, используемыми для схожих целей, методами исследования. Однако создание ТГц источников по-прежнему является сложной задачей. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является исследование свойств излучающих AlGaAs/GaAs сверхрешёток (СР) [2]. Такие структуры значительно проще по своему строению в сравнении, например, с квантово-каскадными лазерами для того же диапазона длин волн. При создании ТГц источников на основе AlGaAs/GaAs СР необходимо учитывать влияние несовершенства границ слоёв на оптические и электронные свойства конечного прибора. В частности, важно учитывать влияния шероховатости интерфейсов на кривую коэффициента усиления.

В данной работе проведено теоретическое исследование зависимости коэффициента усиления от параметров шероховатости интерфейсов $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ СР, состоящей из 100 и более периодов. В исследовании рассматривались шероховатости с гауссовой автокорреляционной функцией. При моделировании они учитывались как возмущение потенциала потолка зоны проводимости, на котором происходит рассеяние электронов. Для построения кривых усиления был проведён ряд численных экспериментов, в которых варьировались как среднеквадратичное отклонение (СКО) шероховатости, так и её корреляционная длина (КД). В качестве диапазона значений были использованы данные, полученные из аппроксимации экспериментальных кривых усиления для ККЛ на основе GaAs [3]. Моделирование характеристик структуры проводилось для 100 и 300 К. Полученные кривые показывают, что увеличение СКО и уменьшение КД уменьшает величину и остроту пика усиления. Полученные результаты говорят о допустимых уровнях шероховатости интерфейсов слоёв для СР AlGaAs/GaAs при создании излучающих приборов.

Список литературы

1. Song H. J. and Nagatsuma T. (Eds.), Handbook of terahertz technologies: devices and applications. CRC press, 2015
2. Wacker A., Phys. Rep. vol. 357, 1-111, 2002
3. Nelander R. and Wacker A., Appl. Phys. Lett. vol. 92, 081102, 2008

Особенности генерации ЭДС в структуре Pt/YIG на частотах дипольно-обменных резонансов при распространении поверхностной спиновой волны

Селезнев М. Е.¹, Хивинцев Ю.В., Никулин Ю.В., Кожевников А.В., Сахаров В.К., Филимонов Ю.А., Высоцкий С.Л.

¹СФ ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

e-mail: mixanich94@mail.ru

Исследование спин-волнового транспорта в структурах магнитный диэлектрик-металл представляет интерес для развития энергоэффективной элементной базы на основах магнотронной спинтроники [1, 2]. Важными задачами в данной области исследований являются решение проблемы эффективного взаимного преобразования спинового и электрического тока на границе феррит-проводник и миниатюризация структур. На сегодняшний день наиболее широко исследуются структуры на основе пленок железо-иттриевого граната (YIG), характеризующегося наименьшими потерями на распространение спиновой волны, и платины (Pt), характеризующейся сильным спин-орбитальным взаимодействием. В структурах Pt/YIG генерация ЭДС U при распространении спиновой волны может быть вызвана, с одной стороны, действием спиновой накачки и обратного спинового эффекта Холла [1, 2] и, с другой стороны, эффектом увлечения электронов в пленке Pt распространяющейся спиновой волной [3]. В данной работе исследовался эффект генерации ЭДС U распространяющейся поверхностной магнитостатической волной (ПМСВ) мощностью P_{in} в структурах YIG($d=900$ нм)/Pt(9 нм) в виде Pt микрополосок шириной $w=200$ мкм и длиной $L=220, 420$ и 820 мкм, расположенных между интегрированными на поверхности YIG медными микроантеннами для генерации и детектирования ПМСВ.

Исследуемые структуры создавались методами фотолитографии, ионного травления и магнетронного распыления. Электрический контакт микроантенн с измерительной установкой осуществлялся за счет СВЧ микрозондов. Внешнее магнитное поле $H=939$ Ое было направлено касательно поверхности пленки YIG и перпендикулярно Pt микрополоскам, что соответствовало геометрии возбуждения ПМСВ. Исследовались амплитудно- и фазо-частотные характеристики прохождения и отражения сигнала (АЧХ и ФЧХ) при различных значениях входной СВЧ мощности P_{in} , подаваемой на микроантенны на частотах зоны ПМСВ. Также исследовались зависимости генерируемой ЭДС U от частоты накачки f . Для этого на микроантенны подавался СВЧ сигнал, модулированный частотой 11.33 кГц для уменьшения влияния нагрева.

На основе зависимостей АЧХ, ФЧХ и $U(f)$ были рассчитаны дисперсионные характеристики $k(f)$ для структур Pt/YIG и свободной пленки YIG, а также коэффициенты чувствительности $S(f)=U(f)/(P_{in} \cdot K(f))$, где $K(f)$ – коэффициент преобразования входной СВЧ мощности в мощность спиновой волны, рассчитанный на основе данных коэффициента отражения S_{22} при наличии и отсутствии зоны ПМСВ (при $H=939$ Ое и 2473 Ое). Для структур Pt/YIG и свободной пленки YIG рассчитанные $k(f)$ совпадали и соответствовали случаю свободной пленки Деймона-Эшбаха. При этом для свободной пленки YIG значения k достигали $\approx 12000 \text{ см}^{-1}$, тогда как для структур Pt/YIG значения k достигали только $2000-4000 \text{ см}^{-1}$ из-за роста потерь, вносимых Pt микрополосками в связи с чем фаза волн с большими k не могла быть определена.

Для всех исследованных структур в зависимостях коэффициента прохождения $S_{12}(f)$ на определенных частотах f^* наблюдалось резкое уменьшение значений S_{12} , при этом в зависимостях $U(f)$ на этих же частотах f^* наблюдалось резкое увеличение амплитуды U .

Так чувствительность $S(f)$ на частотах f^* достигала значений 0.04В/Вт (для структуры с $L=820\text{мкм}$). Особенности зависимости $S_{12}(f)$ могут быть обусловлены спин-волновыми резонансами (СВР) – гибридизацией дипольной ПМСВ и обменных мод. Отметим, что ранее влияние СВР на АЧХ и ЭДС исследовалось в работе [4] для структуры InSb/YIG, однако в [4] резкому уменьшению амплитуды $S_{12}(f)$ соответствовало резкое уменьшение амплитуды сигнала ЭДС(f).

На частотах, отличных от f^* наибольшая чувствительность наблюдалась для структуры с $L=820\text{мкм}$ и достигала значений $S(f)=0.01$ В/Вт. Значения $S(f)$ для структуры с $L=420\text{мкм}$ отличались незначительно, в то время как для структуры с $L=220\text{мкм}$ значения $S(f)$ были меньше почти в полтора раза.

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана РФФИ (проекты № 19-37-90099, 20-07-00968).

Список литературы

1. Park J. et al. The effect of graphene interlayer at Pt/YIG interface on spin pumping //Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Т. 829. – С. 154534.
2. Sinova J. et al. Spin hall effects //Reviews of Modern Physics. – 2015. – Т. 87. – №. 4. – С. 1213.
3. U.V. Nikulin, M.E. Seleznev, Y.A. Filimonov et al. // Semiconductors, Т. 54, 1721 (2020)
4. Г.Т. Казаков, А.Г. Сухарев, Ю.А. Филимонов и др. // РЭ, Т. 33, 801 (1988).

Конкуренция трёх волн

Опарина Ю. С.¹, Савилов А.В.¹

¹ИПФ РАН

e-mail: YuliaOparina1993@yandex.ru

Современные фотоинжекторы позволяют формировать пикосекундные и субпикосекундные сгустки ультрарелятивистских электронов с большим зарядом (полный заряд 0.1-1 нК. Такие сгустки используются для генерации мощных электромагнитных импульсов в различных частотных диапазонах и, в частности, они очень привлекательны для возбуждения терагерцовых импульсов. В данной работе обсуждается ряд эффектов, имеющих место в режиме генерации электронным сгустком сразу трёх волн. Рассматривается излучение коротких плотных) умеренно релятивистских электронных сгустков в волноводе, помещённом в поперечное периодическое магнитное поле ондулятора. В такой системе может быть реализован следующий режим: групповой синхронизм обеспечивается с волной, поперечная структура которой соответствует моде TE_{12} (режим касания дисперсионных характеристик волны и электронов), кроме того, в режиме пересечения дисперсионных характеристик происходит возбуждение двух волн на высокой (порядка 1 ТГц) и на низкой частотах, поперечная структура которых соответствует низшей моде TE_{11} .

Поскольку в режиме группового синхронизма электронный сгусток не «проскальзывает» относительно максимума излучаемого импульса, генерация в этом случае должна быть наиболее эффективна, однако решающую роль играют особенности динамики частиц в режиме когерентного спонтанного излучения (КСИ), поэтому при определённых параметрах системы можно обеспечить оптимальные условия генерации на самой высокой из трёх частот. В режиме КСИ, реализующемся, когда продольный размер сгустка

меньше длины излучаемой волны, наиболее значительны эффекты компрессии [1] и стабилизации [2]. В связи с этим помимо выявления «лидера» данная задача интересна с точки зрения изучения влияния отмеченных эффектов на высокочастотную генерацию.

Список литературы

1. Bandurkin I.V., Oparina Yu.S., Savilov A.V., Super-radiative self-compression of photo-injector electron bunches, *Applied Physics Letters* 110(26), 263508, 2017 DOI:10.1063/1.4990972
2. V. L. Bratman, Yu. S. Oparina, Yu. Lurie, Simultaneous High-Frequency Super-Radiance and Low-Frequency Coherent Spontaneous Radiation from Ultrarelativistic Electrons in a Waveguide, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2020, 976, № 164268; DOI: 10.1016/j.nima.2020.164268.

Спин-волновой полосно-заграждающий фильтр 9,8-10,8 ГГц

Мартынов М. И.¹

¹ОАО "Завод Магнетон"

e-mail: nitrogeniumfirst@gmail.com

Фильтры на спиновых (магнитостатических) волнах известны довольно давно [1] и являются уникальными, в своем роде, перестраиваемыми СВЧ приборами, позволяющими обеспечивать высокую прямоугольность АЧХ при высокой добротности. Наибольшее распространение получил полосно-пропускающий тип фильтров [2], когда как перестраиваемые полосно-заграждающие фильтры разрабатывают, преимущественно, на основе сфер железо-иттриевого граната (ЖИГ) [3]. Не смотря на возможность фильтров на сферах перестраиваться на две октавы и более, фильтры на спиновых волнах позволяют реализовать АЧХ полосно-заграждающих фильтров эквивалентные 8-16-ти звенным фильтрам, при помощи одного волновода из пленки ЖИГ.

Данная работа посвящена разработке и исследованию коаксиального полосно-заграждающего фильтра на спиновых волнах с диапазоном перестройки 9,8-10,8 ГГц.

В качестве основы фильтра использовалась подложка из поликора с интегральной топологией, на которой была размещена эпитаксиальная пленка замещенного ЖИГ толщиной 7 мкм и намагниченностью 776 Гс. Пленка ЖИГ располагалась параллельно магнитному полю, в зазоре между постоянными магнитами, для возбуждения поверхностных спиновых волн. Полоса заграждения формировалась в пределах спектра существования спиновых волн, за счет диссипации и отражений в пленке ЖИГ. Ширина полосы заграждения фильтра по уровню минус 40 дБ составила 98 МГц в нормальных условиях.

Ширина магнитного зазора выбиралась, исходя из требований к однородности магнитного поля, и составила 3 мм. Для формирования магнитного поля использовался монолитный корпус с комбинированным магнитопроводом. Управление, магнитным полем в зазоре, осуществлялось за счет двух катушек индуктивности, которые обеспечивали перестройку центральной частоты фильтра в диапазоне 1 ГГц при токе в 1 А. Размеры фильтра вместе с выводами составили 51х40х34 (ШхВхГ).

В работе приведены результаты исследования минимизации потерь вне полосы заграждения в диапазоне 1-18 ГГц, за счет согласования волновых сопротивлений. Также были рассмотрены вопросы термостабилизации центральной частоты фильтра в

диапазоне температур от минус 60 °С до +70 °С при обеспечении гарантированного уровня заграждения более 40 дБ. Температурный дрейф центральной частоты не превышает ± 9 МГц. Изменение ширины полосы заграждения составило минус 20% (78 МГц) при +70 °С и плюс 17% (115 МГц) при минус 60 °С.

Список литературы

1. Adam J., Daniel M. The status of magnetostatic devices //IEEE Transactions on Magnetics. – 1981. – Т. 17. – №. 6. – С. 2951-2956.
2. Фирсенков А. И., Козин А. Э. Перестраиваемые полосно-пропускающие СВЧ-фильтры на магнитостатических волнах //Техника радиосвязи. – 2016. – №. 4. – С. 92-101.
3. Кувшинов В., Кочемасов В., Горбачев В. Устройства на основе ЖИГ-резонаторов-продукция компании Micro Lambda Wireless. Часть 1 //Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2014. – №. 6. – С. 157-160.

Задержанный ударно-ионизационный пробой высоковольтных р-і-п диодов

Иванов М. С.¹, Родин П. Б.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: lygeon@gmail.com

Явление задержанного ударно-ионизационный пробоя высоковольтных диодных структур позволяет формировать в последовательной нагрузке мощные импульсы тока с временем нарастания около 100 пс [1,2]. Основанный на этом явлении и применяемый в импульсной технике кремниевый диодный обостритель имеет обычно p^+-n-n^+ структуру с уровнем легирования базы $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ [3]. Механизмы сверхбыстрого переключения такой p^+-n-n^+ структуры так или иначе связаны с распространением сверхбыстрой волны ионизации TRAPATT-типа [4], возбуждение которой возможно только в структуре с легированной базой. Недавно было теоретически [4] и экспериментально [5] показано, что сверхбыстрое переключение в режиме задержанного лавинного пробоя может быть также реализовано в $p-i-n$ диодах, для которых условия возбуждения сверхбыстрого фронта ионизации заведомо не выполняются [4]. Время переключения $p-i-n$ структур составляет десятки пикосекунд. Диоды с $p-i-n$ структурой имеют также более высокое напряжение пробоя [5], что делает их перспективными для практических применений.

В настоящем сообщении проведено теоретическое и численное исследование механизма сверхбыстрого переключения диода со слаболегированной базой в режиме задержанного ударно-ионизационного пробоя. Установлено существование двух качественно различных сценариев переключения, приводящих к малому (менее 100 В) и аномально большому остаточному напряжению. Во втором случае «остаточное поле» в структуре составляет 100 кВ/см, так что при толщине базы более 100 $\mu\text{м}$ остаточное напряжение превышает 1 кВ. Характер переключения определяется геометрией структуры, причем большие остаточные напряжения имеют место для структур малой площади. Анализ простейшей модели лавинного переключателя во внешней цепи методами качественной теории дифференциальных уравнений показывает, что выбор сценария определяется соотношением RC-времени τ_{RC} , заданного собственной емкостью структуры C и величиной омической нагрузки R , и обратной частоты ударной ионизации в пробойном поле β^{-1} .

Успешное переключение требует выполнение условия $\tau_{RC} > \beta^{-1}$. При типичной 50 Ω нагрузке это условие может быть удовлетворено только путем увеличения емкости прибора, т.е. ценой увеличения его площади и уменьшения толщины базы (приводящего к уменьшению напряжения пробоя). Аналитические результаты подтверждены и дополнены прямым численным моделированием.

Список литературы

1. I.V. Grekhov, IEEE Trans. Plasma Science 38(5), 1118-1123, 2010.
2. A.F. Kardo-Sysoev, in Ultra-Wideband Radar Technology, edited by J.D.Taylor (CRC Press, Boca Raton, 2001).
3. V. Brylevskiy, I. Smirnova, A. Gutkin, P. Brunkov, P. Rodin, I. Grekhov, Journal of Applied Physics 122, 185701, 2017.
4. P. Rodin, P.B and M. Ivanov, Journal of Applied Physics, v. 127, 044504, 2020
5. A. S. Kesar, A. Raizman, G.Atar, S. Zoran, S. Gleizer, Y. Krasik, D. Cohen-Elias, Applied Physics Letters, 117(1), 013501, 2020.

ПРИМЕСИ И ДЕФЕКТЫ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

Высокотемпературное облучение протонами с энергией 15 МэВ SiC JBS диодов.

Давыдовская К. С.¹, А. А. Лебедев¹, М. Е. Левинштейн¹, В. В. Козловский², А. Е. Иванов³

¹ФТИ им.А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

³НТЦ микроэлектроники РАН

e-mail: davidovskaya.klava@mail.ioffe.ru

В последние годы в силовой электронике стали часто использоваться высоковольтные диоды Шоттки на основе карбида кремния (JBS диоды). Поскольку они обладают высокой радиационной и температурной стойкостью, JBS-диоды перспективны для использования в ядерной энергетике и космической технике.

Влияние протонного облучения при комнатной температуре на свойства 4H-SiC JBS (“холодное” протонное облучение) широко изучалось [1-7]. Однако аналогичные исследования при повышенных температурах облучения (“горячего” облучения) практически не проводилось, и результаты этих работ были противоречивыми [8-9].

В данной работе впервые исследовалось влияние температуры облучения протонами (энергия 15 МэВ) на характеристики мощного высоковольтного (запирающее напряжение 1700 В) 4H-SiC JBS-диода в диапазоне температур облучения T_i от 23 до 500 °С и доз от $7 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ до $2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Проводилось измерение зависимости концентрации нескомпенсированной примеси методом вольт-фарадных характеристик, и рассчитывалась скорость удаления носителей заряда. Также снимались вольт-амперные характеристики и DLTS-спектры.

Коммерческие 4H-SiC CPW3-1700-S010B-WP (Cree / Wolfspeed) диоды Шоттки с запирающим напряжением 1700 В облучались в импульсном режиме протонами с энергией 15 МэВ. Длительность импульса составляла 2,5 мс, частота повторения - 100 Гц. Начальная концентрация электронов в базовом слое необлученных диодов, определенная из измерений C-V характеристик, составляла $\approx 3,4 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

В ходе экспериментов концентрация N_a-N_d линейно снижалась, однако в случае горячего облучения она снижалась намного меньше. В то время, как скорость удаления носителей заряда для облучения протонами при комнатной температуре составляла $\approx 36 \text{ см}^{-1}$, для горячего облучения, например, для 400°C , $V_d \approx 16.6 \text{ см}^{-1}$.

В необлученных диодах, прямой ток I при прямом напряжении $U = 2 \text{ В}$ был равен $I \approx 12 \text{ А}$. После облучения дозой $= 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при комнатной температуре значение тока I при $U = 2 \text{ В}$ составляет $\approx 10^{-8} \text{ А}$, т.е. уменьшается примерно на 9 порядков. При $T_i = 300^\circ\text{C}$ прямой ток при $U = 2 \text{ В}$ равен $8 \times 10^{-5} \text{ А}$, то есть примерно на 4 порядка больше по сравнению со случаем, когда облучение проводится при комнатной температуре. Когда же T_i увеличивается до 500°C , прямой ток становится еще в 200 раз больше. Дальнейшее увеличение T_i нецелесообразно, так как это приводит к диффузии и легированию металлом (Ni) приповерхностной области SiC.

Измерение DLTS спектров показало, что холодное облучение приводит к существенному увеличению концентрации глубоких центров, однако горячее облучение практически возвращает величину концентрации к значению до облучения (в нашем случае при $D = 4 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $T_i = 400^\circ\text{C}$). Таким образом, можно сказать, что при горячем облучении происходит отжиг дефектов уже на стадии их появления.

Полученные в работе результаты подтверждают перспективность карбида кремния для создания силовых приборов для экстремальных условий эксплуатации, комбинированного воздействия высоких рабочих температур и облучения заряженными частицами.

Работа в Институте Иоффе частично поддержана грантом 20-32-90019 Российского фонда фундаментальных исследований. Импульсные измерения выходных характеристик проводились в Центре коллективного пользования научного оборудования «Элементная радиофотоники и наноэлектроники: технология, диагностика, метрология».

Список литературы

1. A. A. Lebedev, A. I. Veinger, D. V. Davydov, V. V. Kozlovski, N. S. Savkina, A. M. Strel'chuk, *Journ. Appl. Phys.* **88**, 6285 (2000)
2. C. Claeys, E. Simoen, *Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2002
3. A. Castaldini, A. Cavallini, L. Rigutti, F. Nava, Assessment of the intrinsic nature of deep level Z1/Z2 by compensation effects in proton-irradiated 4H-SiC, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 3780 (2004)
4. V.V. Emtsev, A.M. Ivanov, V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, G.A. Oganessian, N.B. Strokan, G. Wagner, Similarities and distinctions of defect production by fast electron and proton irradiation: moderately doped silicon and silicon carbide of n-type, *Semiconductors* **46**, 456 - 465 (2012)
5. P Hazdra, S. Popelka, V. Záhlava, and J. Vobecký, Radiation Damage in 4H-SiC and Its Effect on Power Device Characteristics, *Solid State Phenom.* **242**, 421-426 (2016)
6. P Hazdra, S. Popelka, Displacement damage and total ionization dose effects on 4H-SiC power devices, *IET Power Electron.* **12**, 3910 – 3918(2019)
7. V. Kozlovski1, O. Korolkov, A. Lebedev, J. Toompuu, N. Sleptsuk, Comparative Results of Low Temperature Annealing of Lightly Doped n-Layers of Silicon Carbide Irradiated by Protons and Electrons, *Materials Science Forum* **1004**, 231-236 (2020)
8. A Lebedev, K. Davydovskaya, V. Kozlovski, O. Korolkov, N. Sleptsuk, J. Toompuu, Dependence of the Carrier Removal Rate in 4H-SiC PN Structures on Irradiation Temperature, *Materials Science Forum* **963**, 730-733 (2019)
9. V. Kozlovski, O. Korol'kov, K. S. Davidovskaya, A. A. Lebedev, M. Levinshtein, N. Slepchuk, A. M. Strel'chuk, and J. Toompuu, Influence of the Proton Irradiation

Влияние примесных ионов церия на оптические свойства кристаллов $\text{Li}_2\text{Zn}_2(\text{MoO}_4)_3$

Рахманова М. И., Рядун А.А., Трифонов В.А.

ИНХ СО РАН

e-mail: *rakhmanova_m@mail.ru*

За последние десятилетия белые светодиоды (pc-WLED) стали популярной темой благодаря их выдающейся световой эффективности и яркости, низкому энергопотреблению, надежности, длительному сроку службы и экологичности. Коммерчески доступные светодиоды изготавливаются на основе InGaN диодов с излучением в голубой области. Одним из наиболее известных люминофоров, который используется, как активный слой, является $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ допированный Ce^{3+} . Однако такие устройства имеют ряд недостатков: низкая чистота цвета, термическое гашение и др. Известно, что near UV LED имеют более высокую эффективность возбуждения, чем голубые. Использование $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ допированного Ce^{3+} невозможно совместно с near UV LED ввиду слабого свечения. Актуальной задачей современного материаловедения является поиск альтернативных люминофоров для улучшения характеристик светодиодов. Новые люминофоры на основе монокристаллов $\text{Li}_2\text{Zn}_2(\text{MoO}_4)_3$ допированных ионами Ce^{3+} были изучены в настоящей работе. Церий является известным сенситизатором из-за его сильного поглощения в УФ области спектра и эффективной передаче энергии иону активатору в люминофорах с двойным допированием. Ионы церия имеют простую схему энергетических состояний, у которых имеется один валентный электрон на 4f-орбитали [1]. Спин-орбитальное взаимодействие расщепляет основное состояние на два состояния конфигурации 4f. Ближайшее возбужденное состояние находится на 5f-конфигурации. Механизмы передачи энергии с ионов Ce^{3+} к ионам активаторам интенсивно изучаются во многих неорганических материалах, включая бораты, фториды и фосфаты [2,3]. Энергия передается с уровня 5d Ce^{3+} на возбужденный уровень ионов активаторов посредством процесса резонансной передачи через механизм спинового обмена, который способствует эффективному и настраиваемому цвету излучения. Кроме того, перенос энергии в однофазном люминофоре позволяет избежать повторного поглощения между синим/УФ-светом от светодиодных чипов и красным/зеленым светом от люминофоров, что приводит к повышению эффективности люминесценции и стабильности источника белого света. Низкоградиентным методом Чохральского выращены монокристаллы $\text{Li}_2\text{Zn}_2(\text{MoO}_4)_3$ оптического качества допированные ионами Ce^{3+} . Обнаружена широкополосная люминесценция в диапазоне 400–800 нм. Разложение на гауссовы компоненты показало, что одна полоса относится к собственной люминесценции кристалла, а другая относится к переходам 5d–4f ионов Ce^{3+} . Измерены температурные зависимости спектров эмиссии, возбуждения люминесценции и кинетики затухания в диапазоне 77–300 К. Рассчитаны цветовые координаты, которые отображены на диаграмме цветности CIE 1931. Полученные результаты исследования планируется использовать в дальнейшем для получения настраиваемой полноцветной эмиссии на основе кристаллов кристалла $\text{Li}_2\text{Zn}_2(\text{MoO}_4)_3$ с двойным допированием ионами Ce^{3+} и различными ионами активаторами.

Список литературы

1. McClure D. S. Interconfigurational and charge transfer transitions/ D. S. McClure //Electronic States of Inorganic Compounds: New Experimental Techniques. – Springer Netherlands, 1975. – P. 113-139.
2. C. F. Guo, J. Yu, X. Ding, M. Li, Z. Ren and J. Bai, *J. Electrochem. Soc.*, 2011, 158, J42
3. C. M. Zhang, S. S. Huang, D. M. Yang, X. J. Kang, M. M. Shang, C. Peng and J. Lin, *J. Mater. Chem.*, 2010, 20, 6674

Многоуровневая модель потока сигналов акустической эмиссии и нанотехнология прочностного контроля материалов

Носов В. В.¹, Соавтор Махмудов Х.Ф.

¹СПбПУ, Горный университет, ФТИ им. А.Ф.Иоффе

e-mail: nosovvv@list.ru

Наноструктура материалов определяет их прочностные свойства. Приведена многоуровневая модель потока сигналов акустической эмиссии (АЭ), раскрыт физический смысл, масштабный уровень входящих модель параметров, показана структура математической модели потока сигналов АЭ с составляющими её информативными элементами различного масштабного уровня прочностными характеристиками конструкционных материалов и ресурсом технических объектов. Многоуровневая модель потока сигналов АЭ является иерархически структурированной, получается посредством обобщения детерминировано-статистической вариативности, описывает процесс случайной регистрации детерминировано накапливаемых повреждений в материале как до, так и после образования трещины на стадии ожидания её очередного скачка. Показано, что предложенная нанотехнология прочностного контроля материалов сводится к неразрушающему определению параметров прогностического однородного разрушения, идентификация которого основана на многоуровневом моделировании временной зависимости микротрещинообразования, формулировке критерия прочностной однородности, регистрации связанных с моделью параметров АЭ конкретного изделия, поддающейся автоматизации обработке результатов регистрации и определении универсальных прочностных наноконстант из уже опубликованных справочных данных усталостных испытаний стандартных образцов материала.

Основой многоуровневой модели являются представления о материале, как гетерогенной среде, состоящей из отдельных структурных микроэлементов, разрушающихся в определённый для каждого элемента момент времени. Структура материала обладает свойством иерархичности, а примером структурных элементов могут быть зерна или их границы и неметаллические включения в металлах и их сплавах. Определив параметры этой модели, можно определить состояние или различные показатели прочности и ресурса исследуемого объекта, поэтому базирующиеся на этой модели методы неразрушающего контроля прочности и несущей способности материалов и изделий состоят в экспериментальном определении значений входящих в модель параметров АЭ коэффициентов [1,2]. Проведена апробация модели на изделиях из композиционных материалов, сварных соединениях, сосудах давления, корпусах глубоководных аппаратов,

металлургических слябах [3,4,5], подшипниках скольжения и качения, горных породах и реальном массиве горных пород [6].

Предпосылкой неразрушающего контроля прочности изделий с помощью концентрационно-кинетических АЭ-показателей является установленная связь их с показателями прочности и кривых усталости образцов конструкционных материалов, выявление методом АЭ микроповреждений нагруженных материалов. На основе модели определён активационный объём материала образца, который имеет нано-масштабную размерность и согласуется со значениями, полученными в более ранних работах по АЭ измерениям и деформациям. Подтверждено предположение о соответствии гипотезы линейного суммирования повреждений этапу однородного разрушения, позволяющей осуществлять прогноз остаточного ресурса. Предложенная нанотехнология прочностного контроля материалов и технических объектов сводится к неразрушающему определению параметров прогнозистического однородного разрушения, идентификация которого основана на многоуровневом моделировании временной зависимости микротрещинообразования, формулировке критерия прочностной однородности, регистрации связанных с моделью параметров АЭ конкретного изделия, обработке результатов регистрации с помощью программы и определении универсальных прочностных наноконстант, полученных из данных усталостных испытаний стандартных образцов материала.

Список литературы

1. Носов В.В. Оценка ресурса опасных технических объектов на основе акустико-эмиссионного диагностирования/ Носов В.В., Павленко. // Проблемы машиностроения и автоматизации, №3 — 2020. С 133-141.
2. Nosov V.V. On the Principles of Optimizing the Technologies of Acoustic-Emission Strength Control of Industrial Objects // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2016. V. 52. N. 7. P. 386.
3. Nosov V.V. Acoustic-Emission Quality Control of Plastically Deformed Blanks// Russian Journal of Nondestructive Testing, 2017. V. 53. N. 5. P. 368.
4. Носов В.В., Махмудов Х.Ф. Связь акустической эмиссии упруго нагруженных заготовок и качества проката из них//Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки.2016, т.21, № 3. С. 1195-1198.
5. Носов В.В.Оценка прочности и ресурса сварных конструкций на основе микромеханической модели акустической эмиссии при статическом нагружении //Носов В.В., Ямилова А.Р., Зеленский Н.А., Матвиан И.В.Деформация и разрушение материалов. – М, Издательство: Наука и технологии ООО (Москва), 2016. № 11. -С. 38–45.
6. Носов В.В.Оценка удароопасности участка массива горных пород по результатам регистрации его сейсмоакустической активности //Записки Горного Института. –СПб, Издательство: Санкт-Петербургский горный университет (Санкт-Петербург), 2015 г, -Том 216, -С. 62-75.

Поля внутренних механических напряжений в материалах, определенные по параметрам акустической эмиссии

Гиларов В. Л.¹, Дамаскинская Е.Е.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: vladimir.hilarov@mail.ioffe.ru

Информация о полях напряжений, действующих в материалах в процессе их деформирования или разрушения, представляется чрезвычайно важной как для развития представлений о самих этих процессах, так и для безопасной эксплуатации сооружений и конструкций из них изготовленных. Используя метод акустической эмиссии (АЕ), можно получить такие сведения на основе анализа времен ожидания последовательных событий акустической эмиссии.

Предполагается, что внешняя механическая нагрузка выводит материал из равновесного состояния. В качестве отклика на воздействие материал пытается перейти в новое равновесие, проходя через последовательность метастабильных состояний со временами жизни Δt_i , которые могут быть определены из данных акустической эмиссии и представляют собой паузы между последовательными акустическими событиями. Переход в следующее метастабильное состояние происходит термофлуктуационно по закону С.Н. Журкова [1]. Учитывая это, формулу для локальных внутренних напряжений можно записать в виде:

$$\sigma(\mathbf{r}, t_i) = (U_0 + kT) / \gamma \cdot \ln\left(\frac{\tau_0}{\Delta t_i}\right),$$

где U_0 – энергия активации процесса, τ_0 – характерное время тепловых колебаний атомов, γ – активационный объем (эти величины предполагаются далее константами материала), k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Выявлены особенности релаксации во времени рассчитанных полей напряжений в зависимости от структуры изучаемых материалов. Отмечено, что сильная структурная гетерогенность материалов приводит к более или менее однородным в пространстве напряжениям, а это в свою очередь порождает множественные очаги разрушения. С другой стороны, структурно однородные материалы характеризуются явно выраженными концентраторами внутренних напряжений, что приводит к преимущественному росту одиночных очагов разрушения.

В работе показано, что изменение характера релаксации напряжений во времени может явиться признаком приближающегося разрушения.

Список литературы

1. S.N. Zhurkov. J. Fracture Mechanics **1**, 311, (1965).

Определение объема дефекта *in situ* по параметрам сигналов акустической эмиссии

Дамаскинская Е. Е.¹, В.Л. Гиляров¹, И.А. Пантелеев², Д.В. Корост³, К.А. Дамаскинский⁴

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²ИМСС УрО РАН

³МГУ

⁴СПбПУ

e-mail: kat.dama@mail.ioffe.ru

В процессе формирования и развития дефектной структуры (трещин) в объеме гетерогенного материала под действием механических напряжений происходит выделение тепловой, акустической и электромагнитной энергии [1,2]. В случае квазистатического деформирования хрупких гетерогенных материалов преобладающим механизмом является генерация упругих волн (акустическая эмиссия), сопровождающая появление и развитие субмикро-, микро- и макротрещин. Однако до сих пор не было определенного понимания того, каким образом параметры сигналов АЕ связаны с параметрами источника сигнала – дефекта.

Целью работы является выявление корреляции между параметрами акустической эмиссии, регистрируемой в процессе квазистатического сжатия природного гетерогенного материала, и его дефектной структуры.

Экспериментальное исследование эволюции дефектной структуры проведено с помощью двух независимых методов: акустической эмиссии (АЕ) и рентгеновской компьютерной томографии (СТ).

В результате проведенных экспериментов установлена связь между размером дефектов, образующихся в объеме деформированного гетерогенного материала, и энергией сигналов акустической эмиссии, сопровождающей образование этих дефектов.

По данным компьютерной томографии построена трехмерная визуализация магистральной трещины и определен объем дефектов. Выявлены зависимости энергии сигналов акустической эмиссии E_{total} и объема дефектов от координаты. Полученные результаты позволили сопоставить между собой энергию АЕ (E_{total}) и объем дефектов и установить линейный характер этой корреляции. Аналогичная зависимость для геологических масштабов была получена академиком Садовским [3]. Было показано, что энергия, выделяющаяся при землетрясении, прямо пропорциональна объему очага землетрясения. Однако в лабораторных экспериментах получить подобную зависимость ранее не представлялось возможным. Полученный результат имеет существенное прикладное значение – дает возможность оценить характерные размеры дефектов, образующихся в процессе эксплуатации объекта контроля, по энергии регистрируемой акустической эмиссии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 19-05-00248).

Список литературы

1. Acoustic, electromagnetic, neutron emissions from fracture and earthquake, Ed. A. Carpinteri, G. Lacidogna, A. Manuello, Springer. 265pp., 2015
2. Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Щербаков И.П., Динамика фрактолюминесценции, электромагнитной и акустической эмиссии при ударе по поверхности мрамора. ЖТФ, том **83**(1), 144-147, 2013
3. Садовский М. А., Еще о зависимости объема очага землетрясения от его энергии, Докл. АН СССР, том **275**(5), 1087-1088, 1984

Электрические свойства и теплопроводность монокристаллов теллурида олова с различными концентрациями катионных вакансий

Алиева Т. Д.¹, Г.З. Багиева, Г.Д. Абдинова, Б.Ш.Бархалов, Д.Ш.Абдинов

Институт физики НАН Азербайджана им. академика Г.М.Абдуллаева, Азербайджан

e-mail: tunzalaaliyeva@mail.ru

Теллурид олова, особенно его твердые растворы - перспективные материалы для термо- и фотоэлектрических преобразователей. Эти соединения имеют односто- роннюю область гомогенности, смещенную в сторону избытка теллура и характеризуются высокой концентрацией ($\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$) собственных дефектов (в основном, вакансией в подрешетке олова). Концентрацию этих вакансий можно изменять введением в расплав стехиометрического состава избыточных атомов олова.

С целью выяснения действия вакансий олова на электрические свойства и теплопро- водность кристаллов теллурида олова, в данной работе выращены методом Бриджмена монокристаллы SnTe, содержащие 0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 и 1.0 ат.% избытка против стехио- метрии олова, исследованы их электропроводность s , коэффициенты термоэдс a и тепло- проводности κ в интервале температур 90-300K.

Синтез образцов SnTe из стехиометрической шихты (из шихты, которая содержит 50 ат.% Sn и 50 ат.%Te) и образцов SnTe из шихты стехиометрического состава (навески) в которую дополнительно добавлено избыточное до 1.0 ат.% олова, проводился прямым сплавлением соответствующих количеств исходных компонентов в вакууммированных до $\sim 10^{-2}$ Па кварцевых ампулах при температуре $\sim 1135\text{K}$ в течение 6 часов. Были исполь- зованы олово марки ОВЧ-000 и теллур марки Т-сЧ (99,999).

Исследования проводились на образцах, не прошедших отжиг, и на образцах, про- шедших отжиг в среде спектрально чистого аргона при 773K в течение 120 часов.

Опыты показали, что температурные зависимости s для всех образцов обладают ме- таллическим характером. С ростом концентрации избыточного олова до 0,05 ат.% s об- разца при данной температуре падает, а затем с ростом концентрации олова s растет и приближается к s стехиометрического состава. Кривые $a(T)$ образцов стехиометрического состава и образцов с 0.01 и 1.0 ат.% избытком олова имеют минимумы при $\sim 190, 220\text{K}$. Рассчитаны электронная s_e и решеточная s_r составляющие теплопроводности, а также тепловое сопротивление, вызванное катионными вакансиями.

Показано, что избыточные атомы олова до 0.05 ат.% создают электронейтральные комплексы с катионными вакансиями, рассеивающие фононы, приводят к уменьшению s и s_r , росту a . Выше 0.05 ат.% атомы Sn, заполняя указанные вакансии (это подтверди- лось и микроструктурным анализом) и создавая новые носители тока, приводят к росту s , s_r , и уменьшению a . Зависимости a от концентрации избыточного олова и температуры удовлетворительно объясняются двухзонной моделью для SnTe. Тепло в изученных об- разцах SnTe переносится, в основном, колебаниями решетки и температурная зависимость s_r определяется фонон-фононным рассеянием. Электронная составляющая теплопровод- ности в исследованных образцах не превышает $\sim 30\%$ от общей теплопроводности. Теп- ловое сопротивление, созданное вакансиями в подрешетке олова в изученных монокри- сталлах SnTe, достигает до $\sim 40\%$ от общего теплового сопротивления при $\sim 300\text{K}$.

Влияние атомов легирования на морфологию поверхности плотных диффузионных фильтров-мембран на основе палладия

Акимова О. В.¹, Терешина И.С.¹, Каминская Т.П.² оавтор А.А.¹, Соавтор Б.Б.²,

¹МГУ им. М. В. Ломоносова

e-mail: akimova@physics.msu.ru

Согласно современным представлениям, молекулы водорода при хемосорбции на поверхности металлических сплавов диссоциируют на атомы и водород проникает вглубь объектов [1]. Его внедрение в металлы, диффузия по междоузлиям благодаря малому размеру атомов и взаимодействие с дефектами кристаллической решетки создают внутренние напряжения в гидрированных материалах [2], что приводит к образованию трещин и флехингу поверхности [3], инициируя тем самым процессы ее разрушения.

Исследования морфологии поверхности диффузионных фильтров-мембран на основе палладия, работающих в агрессивных водородсодержащих средах [4] особенно актуальны, так как состояние поверхности плотных диффузионных фильтров-мембран оказывает сильное влияние на стабильную работу системы в целом и степень чистоты водорода.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния элементов легирования, а именно свинца, на морфологию поверхности мембранных фильтров на основе палладия и результаты ее отклика на водородное воздействие из газовой фазы. Различие размеров атомов свинца и палладия порядка 24% (1.75 Å и 1.37 Å, соответственно), что создает микродеформации в мембранном сплаве и поля дилатации кристаллической решетки. Тем не менее добавление этого элемента к палладию улучшает прочностные характеристики мембран и повышает показатель водородопроницаемости [4].

В работе проведено комплексное исследование поверхности мембранного фильтра методами атомно-силовой микроскопии на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) “Smena-A” (платформа “Solver” производства ЗАО НТ-МДТ, Россия и на растровом электронном микроскопе Supra_MSU при ускоряющем напряжении 10 кВ с детектором высокого разрешения Inlense. Обнаружено, что сплаву свойственно явление кавитации на поверхности, возникающее при изготовлении мембран и при обратимом водородном легировании.

Список литературы

1. Pundt A. Hydrogen in Nano-sized Metals // *Advanced Engineering Materials*. 2004. V.6. No. 1-2. pp. 11-22. doi: 10.1002//adem.200300557
2. Tiegel M.C., Martin M.L., Lehmborg A.K., Deutges M., Borchers C., Kirchheim R. Crack and blister initiation and growth in purified iron due to hydrogen loading // *Acta Materialia*. 2016. 115. pp. 24-34.
3. Akimova O.V., Veligzhanin A.A., and Svetogorov R.D. Kinetics of the Structure Evolution of Diffusion Membrane Filters of the Pd–Y System after Hydrogenation // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2020. V. 14. No. 5. pp. 867–874.
4. Gorbunov S.V., Kannykin S.V., Penkina T.N., Roshan N.R., Chustov E.M., and Burkhanov G.S. Palladium–Lead Alloys for the Purification of Hydrogen-Containing Gas Mixtures and the Separation of Hydrogen from Them. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2017. V. 2017. No. 1. pp. 54–59

Фото э.д.с. на контакте металл/слоистый полупроводник n-InSe при условиях разогрева носителей тока электрическим полем

Абдинов А. Ш.¹, Бабаева Р.Ф.²

¹Бакинский государственный университет

²АГЭУ (UNEC), Азербайджан

e-mail: abdinov-axmed@yandex.ru

Исследование фото-вольтаических эффектов в полупроводниках [1], одним из которых является фото-ЭДС на контакте металл/полупроводник, представляет интерес как для изучения механизма генерационно-рекомбинационных процессов, взаимодействия свободных носителей заряда с дефектами различного типа в полупроводниковых материалах и контактных структурах, а также создания на их основе приемников и преобразователей энергии светового излучения в электрическую с преднамеренными назначениями.

В тоже время известны уникальные возможности исследований воздействий сильного электрического поля на различные, в том числе фотоэлектрические, явления в полупроводниках для изучения их структур и физических свойств [2].

В данной работе представляются результаты, полученные при исследовании фото-ЭДС на контакте металл/n-InSe при условиях разогрева носителей тока электрическим полем.

Измерения проводились в вентильном режиме при температурах образца $T_0=77\div350$ К. Разогрев носителей тока был осуществлен путем воздействия на исследуемую структуру импульсов сверхвысокочастотного (СВЧ) электрического поля (10^{10} Гц) с напряженностью $\vec{E}=5\cdot10^1\div4\cdot10^3$ В/см. Контактными материалами брались индий, олова, или же серебряная паста. При измерениях световой поток был направлен перпендикулярно плоскости (001) кристалла, напряженности фото-ЭДС и греющего СВЧ электрического поля вдоль естественных слоев кристалла, освещенный контакт находился в зоне воздействия, а второй (неосвещенный) контакт - вне воздействия, греющего носителей тока СВЧ электрического поля. Структуры металл/n-InSe были изготовлены на основе кусков монокристаллических слитков n-InSe, с различными ($\rho_{T0}\gg2\cdot10^3\div4\cdot10^6$ Ом·см) исходными (имеющими при $T_0=77$ К) темновыми удельными сопротивлениями. С повышением T_0 разница между значениями их темнового удельного сопротивления уменьшалась и при $T_0\geq250$ К совсем исчезала.

Измерялись спектральное распределение, световая характеристика, температурная зависимость величины контактной фото-ЭДС (U_ϕ) при отсутствии (U_ϕ^0) и при воздействии ($U_\phi^{\vec{E}}$) сильного СВЧ электрического поля с различной напряженностью ($\vec{E}$), а также зависимость величины $\Delta U_\phi=(U_\phi^{\vec{E}}-U_\phi^0)$ от $\vec{E}$, при различных внешних условиях.

Установлено что, разогрев носителей тока электрическим полем значительным образом влияет на величину (U_ϕ) и ход основных характеристик фото-ЭДС на контакте металл/n-InSe. В тоже время характер этого влияния зависит от T_0 , ρ_{T0} и интенсивности света (I). Величина $U_\phi^{\vec{E}}$ значительно превышает величину U_ϕ^0 . С ростом $\vec{E}$ величина ΔU_ϕ сначала (при относительно не больших $\vec{E}$) увеличивается линейно ($\Delta U_\phi\sim\vec{E}$), а далее (при более высоких $\vec{E}$) зависимость $\Delta U_\phi(\vec{E})$ выходит на насыщение. С ростом ρ_{T0} величина ΔU_ϕ увеличивается, а ход зависимости $\Delta U_\phi(I)$ - становится суперлинейным. При этом увеличивается также время релаксации фото-ЭДС при прекращении воздействия света и (или) сильного электрического поля. Экспериментальные результаты не зависят от материала металлического контакта.

Полученные результаты объясняются влиянием разогрева носителей тока электрическим полем и пространственной неоднородности кристаллов n-InSe на исследуемый фото-ЭДС.

Список литературы

1. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Наука, 1963. 494 с.
2. Воробьев Л.Е., Данилов С.Н., Ивченко Е.Л., Левинштейн М.Е., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А. Кинетические и оптические явления в сильных электрических полях в полупроводниках и наноструктурах. Санкт Петербург: Наука, 2000. 160 с.

Определение времени локализации зарядов в пленках HfO_2

Дементьев П. А.¹, Дементьева Е.В., Заморянская М.В.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: demenp@yandex.ru

Миниатюризация современных полупроводниковых приборов, в частности МОП-транзисторов, породила волну исследований, связанных с поиском материалов с высокой диэлектрической проницаемостью (high-k). Использование таких материалов позволит преодолеть размерные ограничения, связанные с используемыми в настоящее время SiO_2 и SiON . Одним из наиболее перспективных high-k диэлектриков представляется оксид гафния (HfO_2) в силу высокой диэлектрической проницаемости ($\epsilon \sim 20$), хорошей термодинамической стабильности, высокой плотности (9.68 г/см^3), относительно широкой запрещенной зоны (5.6–5.8 эВ) и подходящей величиной барьера с кремнием ($\Delta E \sim 1.4 \text{ эВ}$), что важно с точки зрения уменьшения плотности токов утечки [1, 2]. Кроме того, еще одним из применений HfO_2 являются энергонезависимые элементы резистивной памяти (Resistive Random Access Memory, ReRAM) [3]. С точки зрения быстродействия приборов на основе HfO_2 представляется важным изучение скорости локализации зарядов в слоях диэлектрика в зависимости от технологии их роста и постростовой обработки.

В работе были исследованы плёнки HfO_2 толщиной 40 нм, выращенные на подложке Si(100) методом атомно-слоевого осаждения (АСО) с системой прекурсоров: ТЕМАН (тетраakis (этилметиламид) гафния(IV)) и $\text{Hf}(\text{NCH}_3\text{C}_2\text{H}_5)_4$ в комбинации с H_2O при температуре подложки 250 °С. После создания часть образцов была отожжена в различных условиях и температурах вплоть до 700 °С [4].

Для оценки скорости локализации зарядов использовались две методики, основанные на методах Кельвин-зонд микроскопии (КЗМ) и локальной катодолуминесценции (КЛ). Методом КЗМ исследовалось количество зарядов, инжектируемых в пленку, в зависимости от времени инжекции. На установке исследования КЛ была использована оригинальная методика измерения динамики КЛ и поглощенного тока [5].

Было определено, что в случае инжекции положительных зарядов зависимость потенциала в центре зарядового пятна слабо зависит от времени инжекции – при изменении времени в 20 раз потенциал меняется лишь в 1,5 раза. В случае отрицательных зарядов ситуация другая – при аналогичном уменьшении времени инжекции потенциал падает более чем в 8 раз. При этом зависимость величины потенциала в центре зарядового пятна от времени носит существенно нелинейный характер. Полученные результаты позволяют

сделать вывод, что время локализации положительных зарядов гораздо ниже, чем у отрицательных зарядов.

Аналогичные результаты были получены и при изучении динамики поглощенного тока. В зависимостях тока от времени наблюдалась лишь компонента, связанная с локализацией отрицательных зарядов, что говорит о том, что локализация положительных зарядов происходит с гораздо меньшими характерными временами.

Применение данных методик позволило определить и сравнить характерные времена локализации положительных и отрицательных зарядов в пленках HfO_2 , полученных разными способами и подвергавшихся различной постобработке.

Список литературы

1. J.H. Choi, Y. Mao, J.P. Chang. Mater. Sci. Eng. R, 72, 97 (2011)
2. D. Barlage, R. Arghavani, G. Dewey, M. Doczy, B. Doyle, J. Kavalieros, A. Murphy, B. Roberds, P. Stokley, R. Chau. IEEE IRDM, 4 (2001)
3. V.A. Gritsenko, T V. Perevalov, D. R. Islamov. Phys Rep. 613, 1 (2016)
4. Д.Р. Исламов, В.А. Гриценко, В.Н. Кручинин, et al. ФТТ 60(10), 2006 (2018).
5. П. А. Дементьев, Е. В. Иванова, М. В. Заморянская. ФТТ 61(8), 1448 (2019)

Синтез ортофосфатов редких земель Y-, LuPO_4 активированных Er^{3+} и Ce^{3+}

Силантьева Е. А.¹, Заморянская М. В.¹, Бураков Б. Е.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Радиевый институт им. В. Г. Хлопина»

e-mail: kattiks@fastmail.com

Для работы микропроцессоров и модулей памяти требуются источники питания слабого тока для обеспечения сохранения данных в памяти устройств при сбое основного источника питания. Одним из решений данной проблемы является разработка маломощного источника питания на основе энергии радиоактивного распада радионуклида. Время службы такого источника зависит, в первую очередь, от периода полураспада радионуклида и может составлять десятки и сотни лет.

Основным элементом такого источника питания может являться химически, механически и радиационно стойкий кристалл (или керамика) с хорошими сцинтилляционными свойствами, допированный радиоизотопом в сочетании с преобразователем оптической энергии в электрический ток. Одними из перспективных материалов, подходящих для этой цели, являются ортофосфаты редких земель (иттрия или лутетия), активированные трехвалентными редкоземельными ионами – центрами люминесценции.

Ортофосфат иттрия – ксенотим с общей формулой MePO_4 (Me – Y и лантаноиды ряда Tb-Lu) является достаточно известным и распространенным в природе фосфатом редкоземельных элементов (РЗЭ), характеризующийся тетрагональной структурой. Природные образцы этого минерала представляют собой сложную изоморфную смесь лантаноидов, а также существенные примеси радиоактивных актиноидов. Это позволяет утверждать, что матрица ксенотима является радиационно стойкой. Кроме того, ортофосфаты иттрия, активированные трехвалентными ионами РЗЭ, обладают яркой люминесценцией в видимом диапазоне спектра. Таким образом, ксенотим является перспективным объектом для данного направления работ.

Целью работы является синтез кристаллов ксенотима разного состава и дальнейшее изучение полученных кристаллов с помощью методов рентгеновской дифракции и рентгеноспектрального микроанализа в сочетании с оптической микроскопией и люминесцентными исследованиями. В соответствии с этой целью была синтезирована часть исходных компонентов будущей шихты: молибдат лития (как часть будущего флюса триоксида молибдена), фосфат лютеция, фосфат церия.

Для достижения этой цели перед авторами работы был поставлен ряд задач:

- отработка методики синтеза кристаллов методом флюса;
- подбор оптимальных условий роста кристаллов;
- активация матрицы ксенотима РЗ ионами и подбор их оптимального содержания.

В настоящее время выполнены задачи по отработке методики синтеза и подбору оптимальных условий роста кристаллов. Синтез ксенотима возможен несколькими способами. Авторами работы проведен ряд экспериментов по синтезу мелкокристаллического ксенотима методом флюса. В качестве флюса был выбран триоксид молибдена с добавкой молибдата лития и карбоната лития для увеличения растворимости ксенотима во флюсе и подавления летучести окиси молибдена. Синтез кристаллов проводился в платиновом тигле на воздухе при температуре 1220 °С с дальнейшим постепенным медленным охлаждением. В завершении каждого эксперимента, после полного остывания печи, тигель с остатками шихты и кристаллами ксенотима подвергался отмывке в концентрированном растворе аммиака в течении 2-3 суток при комнатной температуре. Выращенные кристаллы имеют размер – 0,5-2 мм.

Синтезированные кристаллы были исследованы методами рентгеноспектрального микроанализа и катодolumинесценции.

Список литературы

1. Бураков, Б. Е. Кристаллические минералоподобные матрицы для иммобилизации актиноидов : дис. на соискание уч. степени д-ра. г.-м.н. / Бураков Борис Евгеньевич : СПб. : СПбГУ, 2013. – 186 с.
2. Вильке, К. - Т. Методы выращивания кристаллов / К. - Т. Вильке. – Л. : Недра, 1968. – 425 с.
3. Волков, Ю. Ф. Фосфаты актиноидов $\text{Al}_2\text{MIV}(\text{PO}_4)_3$ (MIV = U, Np, Pu; Al = Na, K, Rb) ромбоэдрического строения / Ю. Ф. Волков, С. В. Томилин, А. И. Орлова, А. А. Лизин, В. И. Спирыков, А. Н. Лукиных // Радиохимия, Т. 45. – 2003. – № 4. - С. 289-297.
4. Еремин, Н. Н. Неорганическая кристаллохимия. Книга 1 / Н. Н. Еремин, Т. А. Еремина. – М. : Книжный дом, Университет (КДУ), 2018. – С. 394. – ISBN 978-5-91304-763-2.
5. Тимофеева, В. А. Морфологические особенности иттриево-алюминиевых гранатов, выращиваемых из флюсовых расплавов на затравках / В. А. Тимофеева, И. Н. Гусева, Н. М. Меланхолин. – Л. : Наука, 1967. – С. 284 – 288.
6. Anderson, E. B. Experimental Synthesis of Crystalline Matrices Based on Ce, Ba, Sr Zirconates for Immobilization of High-Level Radioactive Actinides / E. B. Anderson, B. E. Burakov, V. G. Vasiliev, V. A. Starchenko // Proceedings of the Fourth Annual International Conference HIGH LEVEL RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT. – Las-Vegas, Nevada, USA, 1993. – Vol. 2. – P. 1368-1371.
7. Burakov, B. E. Self-Irradiation of Monazite Ceramics : Contrasting Behavior of PuPO_4 and $(\text{La}, \text{Pu})\text{PO}_4$ Doped with Pu-238 / B. E. Burakov, M. A. Yagovkina, V. M. Garbuzov, A. A. Kitsay, V. A. Zirlin // Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 2004. – Vol. 608. – P. 219-224.

8. Burakov, B. E. Synthesis of Garnet / Perovskite-Based Ceramic for the Immobilization of Pu-Residue Wastes / B. E. Burakov, E. B. Anderson, D. A. Knecht, M. V. Zamoryanskaya, E. E. Strykanova, M. A. Yagovkina // Material Res. Soc. Symp. Proc. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXII, 1999. – Vol. 556. – P. 55-62.

Бозе-Эйнштейновский конденсат экситонов в кристаллах с дефектами и фазовый синхронизм в нелинейных процессах

Заворотнев Ю. Д.¹, Попова С.В.², Румянцев В.В.¹, Федоров С.А.¹

¹ГУ Донецкий физико-технический институт им. А.А.Галкина

²Faculty of Economics and Management, Otto-von-Guericke University, Magdeburg, Germany

e-mail: zavorotnev.yurii@mail.ru

Изучена возможность Бозе-Эйнштейновской конденсации экситонов Френкеля в молекулярных неупорядоченных системах, в которых существует композиционный беспорядок. Рассмотрение проводилось в приближении виртуального кристалла. С помощью метода функции Грина вычислен химический потенциал конденсата экситонов при учете слагаемых гамилтониана третьего и четвертого порядков по операторам квазичастиц. При этом учитывались взаимодействия только между конденсатными квазичастицами. Показано, что слагаемые третьего порядка всегда обуславливают притяжение между экситонами и препятствуют возникновению конденсата. Слагаемые четвертого порядка ответственны за отталкивание. Оказалось, что в двухкомпонентных системах могут существовать области концентрации примеси, в которых вклад четырехчастичных слагаемых больше, чем трехчастичных, т.е. отталкивание доминирует над притяжением и возможно образование конденсата. Эта область может располагаться как внутри области допустимых концентраций, так и на краях в зависимости от соотношений величины сил осцилляторов дипольных переходов. Рассмотрено, какие из двух конкурирующих взаимодействий являются существенными для светлых и темных экситонов. Определена симметрия кристаллов, у которых темные экситоны являются невзаимодействующими.

Важной проблемой являются методы обнаружения конденсата экситонов, поскольку состояние с $k=0$ излучать не может. Выходом из этой ситуации может быть применение различных нелинейных эффектов с участием экситонов конденсата. Поскольку импульс экситона равен нулю, то при реализации некоторого процесса большую роль играет фазовый синхронизм. Из условия одновременного выполнения законов сохранения энергии и импульса, определяются направления наибольшего преобразования энергии излучения. Рассмотрены следующие процессы.

1) Темный экситон распадается на два поляритона, расположенных на разных ветвях. Показано, что при распаде экситонов на два поляритона в кубических кристаллах рассеяние идет по всей сфере. Однако, излучение слабое и усилить его можно путем приложения одноосного давления. В этом случае появляется конус приоритетного излучения. Найдены углы, при которых в одноосных и двухосных кристаллах выполняются условия фазового синхронизма. Приведены графики возможных вариантов максимума излучения.

2) Распад светлого экситона на поляритон и темный экситон. В этом случае энергия темного экситона должна находиться ниже энергии верхней поляритонной ветви. Поскольку можно считать, что энергия темного экситона не зависит от волнового вектора,

то для рассматриваемой ситуации выделенные направления синхронизма отсутствуют и рассеяние идет по всей сфере.

3) Генерация звука при распаде БЭК экситонов на поляритон и фонон. Рассеяние будет идти при малом разбросе частот, причем каждая из них в конусе с определенным углом раствора.

4) Генерация суммарной гармоник. В этом случае поляритон, создаваемый внешней накачкой, взаимодействуя с конденсатным экситоном рождает суммарную гармонику. Найдены частоты соответствующих квазичастиц. Указаны правила отбора для экситонов, допускающих такой процесс.

Список литературы

1. Ю.Д. Заворотнев, В.В. Румянцев, С.А. Федоров, Е.Ю. Томашевская. Оптика и спектроскопия, 128 (2020) 1427-1432.
2. Ю. Д. Заворотнев, В. В. Румянцев, А. Г. Петренко, Е. Ю. Томашевская. Журнал прикладной спектроскопии. 88 (2021) 65-71.

Влияние режимов селективного лазерного плавления и последующей обработки на получаемую структуру и внутренние дефекты

Разносчиков А. С.¹, Вознесенская А.А.¹, Кочуев Д.А.¹, Герке М.Н.¹, Жданов А.В.¹

¹ВлГУ

e-mail: raznoschikoff.ar@yandex.ru

В работе рассмотрено влияние режима синтеза образцов методом селективного лазерного плавления (СЛП) и последующей обработки методом горячего изостатического прессования (ГИП), применяемым для устранения некоторых видов пористости и изменения прочностных характеристик материалов[1-3]. Исследуемым параметром было значение пористости получаемых образцов. Проведен анализ исходного порошкового материала хром-никелевого сплава, выполнено исследование шлифов порошка с целью обнаружения внутренних пор, присутствующих в гранулах порошка, влияющих на конечную пористость образцов после селективного лазерного плавления [4].

В ходе работы получена серия образцов синтезированных при различных режимах. Синтез образцов происходил при следующих параметрах: толщина слоя - 30 мкм, мощность лазерного излучения варьировалась от 150 Вт до 350 Вт, скорость сканирования луча по поверхности порошка варьировалась от 1500 мм/с до 3500 мм/с, защитная среда - азот, построение осуществлялось без дополнительного проплавления по контуру сечения. Аналогичная серия образцов подвергалась обработке горячим изостатическим прессованием (ГИП) при температуре 950 градусов, давлении 1500 бар, выдержке в течении 20 часов. С полученными группами образцов был проведен ряд исследований направленных на выявление пористости и плотности синтезированного материала. Получены значения твердости материала после непосредственно селективного лазерного плавления и после ГИП.

В результате проведенных работ выявлены характерные типы пор образующиеся при СЛП, расположение пор. Выявлено влияние последующей обработки на пористость и микроструктуру получаемого материала. Установлены характерные типы пор поддающиеся устранению.

Список литературы

1. Liverani E. [и др.]. The effects of hot isostatic pressing (HIP) and solubilization heat treatment on the density, mechanical properties, and microstructure of austenitic stainless steel parts produced by selective laser melting (SLM) // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. № 1–2 (107). С. 109–122.
2. Röttger A. [и др.]. Comparison of microstructure and mechanical properties of 316 L austenitic steel processed by selective laser melting with hot-isostatic pressed and cast material // Materials Science and Engineering A. 2016. (678). С. 365–376.
3. Voznesenskaya A. A. [и др.]. Research of post-processing approaches for parts obtained by the method of selective laser melting // Journal of Physics: Conference Series. 2020. № 1 (1439).
4. Zhang B., Li Y., Bai Q. Defect Formation Mechanisms in Selective Laser Melting: A Review // Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition). 2017. № 3 (30). С. 515–527.

Рамановское рассеяние и люминесценция в монокристаллах
аминокислоты глицин $C_2H_5NO_2$ с примесью кроконовой
кислоты $C_5H_2O_5$

Балашова Е. В.¹, Смирнов А.Н.¹, Давыдов В.Ю.¹, Кричевцов Б.Б.¹, Старухин А.Н.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: balashova@mail.ioffe.ru

В настоящее время ведется активный поиск новых экологически чистых органических многофункциональных материалов, обладающих сегнетоэлектрическими, пьезоэлектрическими, нелинейно-оптическими и люминесцентными свойствами [1,2]. Нецентросимметричные органические кристаллы привлекают к себе внимание благодаря их оптической прозрачности в широком диапазоне длин волн, оптической стойкости, присутствием в них пьезоэффекта, а также возможностью получать объемные высококачественные кристаллы относительно простыми методами.

Представленная работа посвящена синтезу и оптическим исследованиям монокристаллов белковой аминокислоты глицин (Gly) $C_2H_5NO_2$, допированных кроконовой кислотой (CA) $C_5H_2O_5$. Выбор кроконовой кислоты обусловлен тем, что ее молекулы, обладают большим дипольным моментом 10 D и могут в виде примеси внедряться в решетку в широком диапазоне концентраций. Кроме того, сильная делокализация π -электронов и внутримолекулярный перенос заряда, обеспечивают высокие значения нелинейно-оптически параметров CA [3].

Кристаллизация глицина $C_2H_5NO_2$ характеризуется полиморфизмом. При атмосферном давлении глицин кристаллизуются в виде α -, β - и γ - модификаций. α - глицин имеет центросимметричную структуру $P2_1/n$, β - и γ - глицин – нецентросимметричную группу симметрии $P2_1$ и $P3_2$ соответственно. Монокристаллы γ - глицина обладают пьезоэффектом ($d_{33} \sim 8$ pC/N) и большими значениями нелинейно-оптических коэффициентов [4].

Монокристаллы глицина, допированные кроконовой кислотой (Gly:CA), выращивались из водного раствора. Для очистки от примесей порошок CA, использованный при

росте, подвергался перекристаллизации. В зависимости от количества СА в растворе получались кристаллы от темно – до светло- желтого цвета в виде шестигуольных пирамид или тонких пластин.

Исследования рамановского рассеяния полученных кристаллов проводились с использованием возбуждения 532 нм, при комнатной и азотной температурах, в спектральном интервале 5–4000 см⁻¹, в геометрии обратного рассеяния: света для различных экспериментальных геометрий -X(ZZ)X, -X(YY)X и -X(ZY)X, где ось Z параллельна полярной оси кристалла [001].

Анализ поляризованных рамановских спектров показал, что спектры кристаллов Gly:CA в виде шестигранных пирамид с высокой точностью совпадают со спектрами номинально чистого γ - глицина [5]. Линии в спектрах кристаллов Gly:CA в виде пластинок хорошо соответствуют α - глицину. Присутствие молекул крононовой кислоты в образцах Gly:CA подтверждается изменением их цвета, на характерный желтый, типичный для кристаллов СА, а также присутствием слабых линий, соответствующих СА в рамановских спектрах.

Было установлено, что воздействие лазерного излучения на кристаллы, сопровождается появлением сильной люминесценции, значительно превышающей интенсивность рамановского рассеяния. Люминесценции наблюдается в области 400 – 700 nm с максимумом на 510 nm (2.44 эВ) при возбуждении на длине волны 325nm. Люминесценция обнаружена, как в кристаллах α - Gly:CA, так и γ - Gly:CA, причем ее величина в α - Gly:CA примерно вдвое больше, чем в γ - Gly:CA.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта № 21-52-53015

Список литературы

1. Horiuchi S., Tokura J. Organic ferroelectrics. Nat. Mater. **7**, 357 (2008).
2. Horiuchi S., Ishibashi Sh. Hydrogen-Bonded Small-Molecular Crystals Yielding Strong Ferroelectric and Antiferroelectric Polarizations. J. Phys. Soc. Jap. **89**, 051009 (2020).
3. Sawada R., Uemura H., Sotome M., et al. Large second-order optical nonlinearity in a ferroelectric molecular crystal of croconic acid with strong intermolecular hydrogen bonds. Appl. Phys. Lett. **102**, 162901 (2013).
4. Kumar R.A., Vizhi R.E., Vijayan N., Babu D.R. Structural, dielectric and piezoelectric properties of nonlinear optical γ -glycine single crystals. Physica B **406**, 2594 (2011).
5. Baran J., Ratajczak H. Polarised IR and Raman spectra of the γ -glycine single crystal. Spectrochimica Acta Part A **61**, 1611 (2005).

Оптические и структурные свойства твердых растворов $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$, синтезированных различными методами

Андрющенко Д. А.¹, Ружевич М.С.¹, Смирнов А.М.¹, Баженов Н.Л.², Мынбаев К.Д.²

¹ИТМО

²ФТИ им.А.Ф.Иоффе

e-mail: dimitriy296@mail.ru

Твердые растворы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (КРТ) являются важным материалом для изготовления фотоприемников, работающих в инфракрасной (ИК) области спектра. Весьма востребованными являются материалы с химическим составом $x \approx 0.3$, так как их ширина запрещенной зоны (~ 250 мэВ при 77 К) соответствует энергии квантов средневолнового (длина волны 3–5 мкм) ИК диапазона. В этом диапазоне работают оптические датчики контроля за состоянием атмосферы и системами промышленного производства, тепловизионные устройства и т.п.

Наиболее распространенными методами выращивания КРТ на сегодняшний день являются молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ), газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (МОГФЭ) и, в меньшей степени, жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ). Для материала, выращенного каждым из этих методов, характерна специфическая дефектная структура (масштаб флуктуаций состава, наличие структурных и точечных дефектов, и т.п.), которая может оказывать существенное влияние на параметры изготавливаемых приборов. В настоящей работе мы сообщаем о результатах сравнительных исследований оптических (фотолюминесценции (ФЛ), оптического пропускания (ОП) и фотопроводимости (ФП)) и структурных (рентгеновская дифракция) свойств образцов твердых растворов $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$, изготовленных различными методами.

Для исследований использовались эпитаксиальные слои $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с $x=0.29\text{--}0.32$, выращенные методами МЛЭ (подложки Si и GaAs), МОГФЭ (подложки GaAs) и ЖФЭ (подложки CdTe и CdZnTe), а также, для сравнения, монокристалл, полученный твердотельной рекристаллизацией с подпиткой из твердой фазы. Сигнал ФЛ возбуждался полупроводниковым лазером с длиной волны 1.03 мкм и регистрировался охлаждаемым фотоприемником на основе InSb. Спектры ФЛ записывались с использованием решеточного монохроматора в диапазоне температур 4.2–300 К. Спектры ОП и ФП записывались при температурах 77 и 300 К с использованием FTIR-спектрометра InfraLum-801. Исследование рентгеновской дифракции (РД) было проведено с помощью рентгеновской установки ДРОН-8.

Непосредственно после выращивания образцы, изготовленные методами МЛЭ и МОГФЭ, демонстрировали значительную степень разупорядочения твердого раствора, что выражалось в существенном отличии положения края ОП и максимума спектра ФЛ от значений, которых можно было бы ожидать, исходя из номинального химического состава исследуемого материала. При этом структурные свойства материала по данным РД не только не уступали, но и превосходили таковые для монокристалла, где разупорядочение по данным ФЛ было существенно меньшим. После проведения различных видов термических отжига разупорядочение в эпитаксиальных слоях существенно уменьшилось. Значения полуширины (ширины на половине высоты) линии межзонной (экситонной) ФЛ при 4.2 К во всех изученных структурах оказались близки и составляли от 8 до 13 мэВ. В эпитаксиальных структурах, выращенных на гетероподложках, были обнаружены акцепторные состояния, предположительно связанные со спецификой ростовых процессов. В

работе анализируется вероятная связь выявленных дефектов с особенностями рассмотренных ростовых технологий.

Параметризация процесса переноса заряда в присутствии лавинного умножения в сильнооблученных pin структурах при $T=1.9\text{ K}$

Шепелев А. С., Еремин В.К., Вербицкая Е.М.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: artem.shepelev@cern.ch

Анализ экспериментальных результатов радиационных *in situ* тестов кремниевых детекторов, проведенных в ЦЕРНе на ускорителе PS [1], позволил наблюдать двухстадийный процесс переноса заряда в сенсорах при температуре 1.9 K [2]. В тестах кремниевые детекторы располагались перпендикулярно интенсивному пучку протонов высокой энергии, разделенному во времени на импульсы длительностью 400 мс. Во время взаимодействия протонов с сенсорами проводились измерения методом переходного тока (ТСТ). В работе [2] подробно описывается формирование токового отклика детектора при такой постановке эксперимента. Основным его результатом стало заключение о двухстадийном процессе переноса заряда, в котором сначала дрейфуют дырки, которые затем умножаются и производят электронно-дырочные пары в тонком слое вблизи контакта. Во второй стадии переноса заряда дрейфуют появившееся в результате процесса умножения электроны.

Для реализации такой картины происходящего в объеме детектора необходимо наличие электрического поля специфического распределения. Высокоэнергетические протоны во время взаимодействия с материалом генерируют свободные носители заряда, создают генерационный ток и одновременно с этим производят дефекты материала. В свою очередь дефекты формируют глубокие уровни в кремнии, способные эффективно захватывать свободные носители заряда. Благодаря этим эффектам в образце во время прохождения импульса протонов реализуется квазистационарное распределение электрического поля, позволяющее наблюдать лавинное умножение заряда вблизи контакта детектора. Таким образом, лавинное умножение дырок в данном эксперименте тесно связано с распределением заряженных глубоких центров в сенсоре.

На основании описанной модели становится возможным экспериментальное вычисление коэффициента умножения, как отношения амплитуд тока первой стадии переноса заряда к амплитуде тока во второй стадии. Однако длительности импульсов при столь низких температурах равны 2-3 нс (в зависимости от типа носителей), поэтому важным оказывается учет влияния механизмов, искажающих форму импульса тока. К таким механизмам в первую очередь относится захват дырок и электронов на глубокие уровни дефектов, который непосредственно определяют амплитуду и изменение тока. Дополнительное влияние на нарастание и спад компонентов импульса оказывают другие факторы: неоднородность лазерной генерации, диффузионное расширение облака дрейфующих носителей заряда и цепь регистрирующей электроники.

Для понимания влияния тех или иных факторов в работе оцениваются их характерные времена и степень влияния на различные временные промежутки протекания тока. Была построена математическая модель, позволяющая получить форму импульса тока такую,

какой она бы была в отсутствие искажающих факторов, то есть провести так называемую де-конволюцию. Для реализации этой операции требуется проводить перебор параметров до тех пор, пока обратная операция (конволюция), примененная к рассчитанному импульсу, не даст наименьшее отличие от экспериментального. Это было проделано для импульсов тока, записанных при различных напряжениях смещения. Полный набор параметров довольно широк, однако некоторые из них могут быть получены напрямую из экспериментальных данных. Например, времена захвата электронов и дырок на глубокие уровни или время отклика цепи считывающей электроники. Другие параметры, например, коэффициент диффузии или параметр, описывающий неоднородность лазерной генерации, связанный с коэффициентом поглощения света в кремнии, хорошо известны.

Таким образом, основным параметром, перебираемым в данной модели, является непосредственно коэффициент умножения дырок. В результате анализа экспериментальных данных и применения описанного алгоритма, не было обнаружено изменения коэффициента умножения дырок с изменением величины приложенного смещения. Такой результат может быть связан с эффектом тока, ограниченного пространственным зарядом, создающим отрицательную обратную связь, стабилизирующим коэффициент умножения.

Список литературы

1. E. Verbitskaya et al. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 796 (2015) 118–125
2. A Shepelev et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1697 012067

Исследование пространственного распределения изотопного состава алмаза по спектрам комбинационного рассеяния

Салказанов А. Т.¹, Д.М. Арзамасцева¹, А.С. Гусев¹, М.О. Смирнова¹, С.А. Тарелкин¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

e-mail: alik.salkazanov@inbox.ru

Гибридная квантовая система NV – ¹³C, состоящая из NV - центра и расположенного на расстоянии порядка нескольких ангстрем изотопического атома ¹³C, имеет большие перспективы для применения в квантовых устройствах обработки и передачи информации. Ядерный спин $I^{(C)}=1/2$ изотопических атомов ¹³C, за счет высокой степени изоляции от окружения, может быть использован в качестве квантовой памяти [1].

Для практических применений, необходимо чтобы атом ¹³C был расположен относительно NV – центра так, чтобы ядерный спин атома ¹³C практически не испытывал нарушающих когерентность случайных переворотов. Такие стабильные спиновые системы NV–¹³C были обнаружены экспериментально в работах [2–4] в результате рутинного перебора большого количества различных систем NV–¹³C, в образцах с содержанием 0,1 – 1,1% ¹³C.

Для построения устройств квантовой обработки информации на основе одиночных NV–¹³C систем, важной задачей является разработка воспроизводимых методов их получения, а также методов их локализации и идентификации.

Для исследований были получены три алмазных образца (4,0x4,0x0,4 мм³) с гомоэпитаксиальными монокристаллическими алмазными слоями различного изотопного состава, выращенные путем осаждения из газовой фазы в микроволновой плазме CH₄/H₂

(метод CVD). Эти слои прецизионно легированы изотопами ^{13}C и содержат NV – центры. Они имеют следующую структуру:

Слой 1 – подложка HPHT, II а алмаз;

Слой 2 – монокристаллический CVD - слой особо чистого алмаза (имеет минимальную возможную концентрацию примесей);

Слой 3 – CVD - слой монокристаллического алмаза с NV - центрами, прецизионно легированный атомами изотопа углерода ^{13}C ;

Слой 4 – CVD - слой особо чистого алмаза (имеет минимальную возможную концентрацию примесей)

Исследования проводились с использованием лазерного конфокального микроскопа Confotec NR500.

Для увеличения точности измерений, была проведена полировка одной из торцевых поверхностей образца. Для полированных торцов были построены карты интенсивности пика ^{13}C и по ним определены глубины залегания изотопно-модифицированных слоев. Далее по положению пика в спектре комбинационного рассеяния света (КРС) ^{13}C ($1280 - 1319 \text{ см}^{-1}$), на основе экспериментальных данных из работы [5], было определено примерное содержание ^{13}C в каждом образце, которое хорошо совпало с соотношением потоков газов $^{13}\text{CH}_4/^{12}\text{CH}_4$ в CVD реакторе во время роста изотопно-модифицированных слоев.

В результате исследований было показано, что методика исследования изотопного состава по картам КРС позволяет определять распределение изотопов ^{13}C в алмазе. Изотопный состав алмаза соответствует соотношению потоков газа при синтезе. Однако, слои, обогащенные ^{13}C , характеризуются повышенным содержанием NV-центров вплоть до 30 ppb. Это связано с недостаточной химической чистотой метана $^{13}\text{CH}_4$. Предположительно для успешного инжиниринга изотопно-обогащенного алмаза для квантовых применений следует обеспечивать чистоту исходных газов (в том числе и метана $^{13}\text{CH}_4$) не хуже 99,9999%.

Данные исследования были проведены в рамках соглашения с Российским научным фондом от 11.11.2020 г. № 21 - 42 - 04416.

Список литературы

1. Nizovtsev A. P. [и др.]. Theoretical study of hyperfine interactions and optically detected magnetic resonance spectra by simulation of the C291 [NV]-H 172 diamond cluster hosting nitrogen-vacancy center // New Journal of Physics. 2014. № August (16).
2. Waldherr G. [и др.]. Quantum error correction in a solid-state hybrid spin register // Nature. 2014. № 7487 (506). С. 204–207.
3. Zaiser S. [и др.]. Enhancing quantum sensing sensitivity by a quantum memory // Nature Communications. 2016. (7). С. 1–11.
4. Unden T. [и др.]. Quantum Metrology Enhanced by Repetitive Quantum Error Correction // Physical Review Letters. 2016. № 23 (116). С. 1–6.
5. Nisum M., Shabanova E., Nielsen O. F. The Second-Order Raman Spectrum of ^{13}C Diamond: An Introduction to Vibrational Spectroscopy of the Solid State // Journal of Chemical Education. 2000. № 5 (77). С. 633–637.

К вопросу о расчетах спектроскопических свойств 3d-ионов в кристаллах с ковалентной связью

Тумаев Е. Н.¹, Рудоман Н.Р., Куликова Н.Н., Андреева А.Р.

¹КуБГУ

e-mail: tumaeva@bk.ru

Одной из проблем при создании активных сред на базе полупроводниковых матриц, содержащих 3dⁿ-ионы является теоретический расчет их спектроскопических свойств. Если для диэлектрических кристаллов точечные дефекты в виде примесных 3d- и 4f- ионов хорошо исследованы, как в теоретической работе Бёте [1], так и в обзорах Каминского А.А. [2], то для полупроводниковых матриц, содержащих 3dⁿ-ионы, теоретические исследования начались только в последнее время, что связано с успехом в отходе от модели точечных зарядов [3]. В тезисах дано краткое изложение расчета спектроскопических свойств 3d-ионов, основанное на обобщении модели точечных зарядов Бёте [1]. При теоретическом исследовании, приведенном в настоящих тезисах, сделано предположение, что влияние зоны проводимости на спектроскопические свойства ионов не учитывается.

Предполагаем, что при ковалентном характере связи взаимодействие оптического электрона 3d-иона, находящегося в точке с радиусом-вектором $\mathbf{r}_1$ происходит в первую очередь не с атомным остовом аниона в точке с радиусом-вектором $\mathbf{R}$, а с электроном внешней оболочки аниона, который находится в точке с радиусом-вектором $\mathbf{r}_2$, отсчитывающийся от положения аниона.

Потенциальная энергия взаимодействия этих электронов равна:

$$V(r) = e^2 / r = e^2 / |R - (r_1 - r_2)| \quad (1)$$

Для потенциала мы предположили, что примесный ион находится в тетраэдрическом окружении. Для октаэдрического окружения расчеты производятся аналогичным способом, изменения касаются только полиномов Стивенса, явный вид которых определяется пространственным расположением анионов, в то время как схема расщепления уровней энергии примесного 3d иона определяется точечной симметрией позиции, в которой этот ион находится.

Затем производим суммирование формулы (1) по анионам.

При этом все слагаемые в полученном новом выражении эквивалентны, поэтому рассматриваем только одно из них. Предполагая, что расстояние R , больше, чем расстояние r , разложим потенциал (1) по степеням отношения $r/R < 1$. При суммировании используем P_k – полиномы Лежандра k -того порядка.

Затем используем разложение полинома Лежандра по сферическим функциям и теорему сложения [4,5]. Переходя от шаровых векторов к сферическим функциям, записываем теорему сложения через коэффициенты разложения $C_{k-m, p-m, m}^{kp}$ [6], явный вид которых дан в [4].

Подставляя разложения в формулу для $V(r)$, получаем после группировки членов стандартную формулу потенциалов взаимодействия оптического электрона 3d-иона с электронами лигандов через параметры кристаллического поля V_{kp} и полиномы Стивенса O_{kp} , явный вид которых зависит от пространственной конфигурации лигандов, окружающих примесный центр. Последнее хорошо известно в теории кристаллического поля [6], следовательно, учет ковалентного характера связей 3d-иона с анионами сводится к модификации параметров кристаллического поля.

Внешняя электронная оболочка анионов заполнена полностью, т.е. имеет конфигурацию S^2P^6 , при этом все 8 электронов эквивалентны в силу sp -гибридизации. Следовательно, принимаем в связи с этим для однозарядного аниона, что его электрон находится в ps -конфигурации, где n – номер внешней электронной оболочки аниона.

Список литературы

1. Sugano S., Tanabe Y. Kamomura H. Multiplets of Transition-Metal Ions in Crystals. Academic Press, New York and London, 1970.
2. А. А. Каминский, Л. К. Аминов, В. Л. Ермолаев и др. Физика и спектроскопия лазерных кристаллов. АН СССР, Ин-т кристаллографии им. А. В. Шубникова. - Москва: Наука, 1986. – 271 с.
3. Srivastava. A. M.; Brik. M. G. (2018). Interpretation of the Spectroscopic Properties of α -LiAlO₂: Mn⁴⁺. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 7, R3012–R3015.
4. Варшалович Д. А. и др. Квантовая теория углового момента (в 2 томах), М., Физматлит, 2017, 2019.
5. Зар Р. Н. Теория углового момента. О пространственных эффектах в физике и химии (М., Мир, 1993), 351 с.
6. Панюшкин В.Т., Черныш Ю.Е., Волынкин В.А., Бородин З., Бородин Г. Ядерно-магнитный резонанс в структурных исследованиях. Москва, изд.: «Красанд», 2016г. 352 стр.

Прогнозирование радиационной деградации кремниевых детекторов под воздействием релятивистских ионов различных масс

Митина Д. Д.¹, Вербицкая Е.М.¹, Еремин И.В.¹, Киселев О.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²GSI, Дармштадт

e-mail: dary.mitina@gmail.com

Кремниевые детекторы излучений являются одним из ключевых элементов крупных детектирующих систем. Такие системы применяются для регистрации продуктов взаимодействия частиц различных масс и энергий в экспериментах на ускорителях (например, на Большом Адронном Коллайдере в ЦЕРНе). Активный интерес к изучению тяжелых ионов и состояния материи, возникающей в результате их взаимодействия, поставил задачу получения интенсивных пучков ионов в широком диапазоне масс в интервале ^7Li – ^{238}U (программа FAIR, GSI, Германия) при контроле их изотопного состава. Задача требует создания устройств регистрации ионов, выдерживающих высокую радиационную нагрузку, где кремниевые детекторы по совокупности своих характеристик не имеют альтернативы. Очевидно, в такой задаче изучение деградации кремниевых детекторов становится необходимым для разработки сценариев как обеспечения функционирования ускорительного комплекса, так и постановки экспериментов.

На данный момент в литературе имеются данные по воздействию нерелятивистских ионов, т.е. ионов, для которых обычно пробег в кремнии меньше, чем толщина детектора. Для релятивистских ионов вопрос остается открытым, хотя сам объект исследования является более простым, чем при воздействии короткопробежных ионов, поскольку пробег

релятивистских ионов превосходит толщину структуры детектора, тем самым генерируя однородное распределение дефектов в объеме. Полученные ранее результаты деградации и спектры радиационных дефектов для детекторов, облученных ионами ^{40}Ar (1.62 GeV, 40.5 MeV/u) [1] показали, что величины параметров деградации могут быть спрогнозированы с использованием масштабирующего коэффициента - Scaling Coefficient. В сравнении с воздействием 23 GeV протонов, скорость деградации детекторов под влиянием ионов аргона приблизительно в 10 раз выше. В то же время распространение модели масштабирования эффектов в кремнии в широком диапазоне масс ионов не проведено, что, как с физической точки зрения (например, влияние кластеров дефектов), так и практической, является недостаточным для предсказания сценария радиационной деградации. Поэтому получение новой информации позволит выполнить оценки радиационного воздействия во всем диапазоне масс путем аппроксимации зависимости по минимальному количеству точек.

В представленной работе исследованы кремниевые планарные $p^+ - n - n^+$ -детекторы на основе кремния с удельными сопротивлениями 2 и 5 k Ωcm , облученные на ускорительном комплексе в GSI ионами ^{12}C и ^{208}Pb ; энергия облучения составляет 500 MeV/u для каждого типа частиц. При толщине детекторов 300 μm указанные частицы теряют лишь незначительную часть своей энергии на толщине детектора, тем самым формируя однородное распределение радиационных дефектов вдоль трека.

В работе приведены результаты моделирования воздействия ионов с использованием программы TRIM и измерений вольт-амперных характеристик образцов до и после облучения. Критерием обеднения Si детекторов являлся факт насыщения обратного тока, величина которого используется в обработке результатов, основанной на предположении о пропорциональности между генерационной компонентой тока структуры при ее полном обеднении и дозой облучения. Это позволяет нормировать значения тока и оперировать величиной линейной плотности генерационного тока $\text{A} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{ion}^{-1}$ для получения ее зависимости от массы иона. Зависимость тока от массы иона анализируется с помощью моделирования первичных дефектов в программе TRIM. В результате моделирования получены распределения первичных дефектов в детекторах и проведено сравнение этих данных с результатами для ионов аргона.

Определены закономерности генерационного тока при увеличении массы иона, совокупность результатов эксперимента и моделирования обсуждается в рамках концепции масштабирования радиационных эффектов в кремнии и кремниевых P-I-N структурах, облученных релятивистскими ионами. На основании полученных результатов делаются оценки сценариев деградации кремниевых детекторов в экспериментах на строящемся ускорителе SIS100 в Германии.

Список литературы

1. V. Eremin et al 2018 JINST 13 P01019

Взаимодействие серы с примесями в ОЦК-железе

Верховых А. В.¹, Мирзоев А.А.¹, Окишев К.Ю.¹, Дюрягина Н.С.¹

¹ЧОУРГУ

e-mail: avverkhovyykh@susu.ru

Современные методы производства стали позволяют снизить количество примесей до очень низкого уровня, но обычно остаются остаточные примеси. Общей чертой неметаллических примесей, таких как водород, кислород, сера, фосфор и т. д., в металлическом материале, является то, что даже их незначительное количество может сильно повлиять на различные свойства материала. Несмотря на то, что предел растворимости таких примесей невелик, существует вероятность того, что примеси будут локально сконцентрированы, например, может происходить сегрегация на границах зерен (ГЗ), приводящая к резкому изменению механических свойств металлов [1].

Сера является вредной примесью, приводящей к охрупчиванию сталей, и ее содержание строго контролируется [2]. Однако, большинство сталей содержит большое число примесных элементов, которые существенно модифицируют данный эффект. Хорошо известно, что охрупчивание сталей, содержащих примеси серы в присутствии марганца, уменьшается [3]. Добавление углерода к сплаву Fe-S уменьшает сегрегацию серы на ГЗ из-за конкуренции со стороны углерода, который также обладает высокой поверхностной активностью [4]. Поэтому целью данной работы было уточнение микроскопических причин роли примесей марганца, углерода и фосфора на растворение серы в ОЦК-железе.

Все расчеты были выполнены с помощью теории функционала плотности с использованием обобщенного градиентного приближения (GGA'96) в программном пакете WIEN2k. Было получено, что энергия растворения серы в ОЦК-железе равна -0,78 эВ. В объемной структуре ОЦК-железа между углеродом и серой наблюдается отталкивание, а энергия растворения серы уменьшается. Для случая Mn-S притяжение наблюдается только в первом окружении, в то время как для системы P-S притяжение наблюдается во всех трех окружениях.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 20-43-740004 p_a_ Челябинск

Список литературы

1. Seah M.P., Adsorption-induced interface decohesion, *Acta Metallurgica*, 28, 955–962, 1980
2. Grabke H. J. Surface and grain boundary segregation on and in iron, *Steel research*, 57, 178-185, 1986
3. Seah M. P., Hondros E. D. Grain boundary segregation, *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 335, 191-212, 1973
4. Suzuki S. et al. Site competition between sulfur and carbon at grain boundaries and their effects on the grain boundary cohesion in iron, *Metallurgical Transactions A*, 18, 1109-1115, 1991 – 1991

Стойкость к низкотемпературной деградации и способность к пластической деформации композиционной керамики на основе диоксида циркония

Дмитриевский А. А.¹, Жигачева Д.Г.¹, Васюков В.М.¹, Овчинников П.Н.¹

¹ТГУ

e-mail: aadmitr@yandex.ru

Циркониевые керамики, упрочненные оксидом алюминия (АТЗ), обладают уникальным комплексом свойств и находят широкое применение от машиностроения до медицины [1]. В АТЗ керамике сильные стороны ZrO_2 (рекордная для оксидных керамик вязкость разрушения, высокие показатели износостойкости и прочности на изгиб, а также низкий коэффициент трения) сочетаются с достоинствами Al_2O_3 (высокими значениями твердости, модуля Юнга и прочности на сжатие). Наряду с описанными достоинствами, подавляющее большинство разработанных на сегодняшний день составов АТЗ керамик имеют два существенных недостатка – хрупкость (при температурах $< 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) и деградация свойств под действием влаги [2,3]. Преодоление (по крайней мере, частичное) этих недостатков, то есть разработка состава и структуры АТЗ керамики, обладающей запасом пластичности при комнатных температурах и стойкостью к низкотемпературной деградации, значительно расширит область ее применения. В связи с этим, работа была нацелена на разработку состава АТЗ керамики, проявляющей способность к пластической деформации при комнатных температурах и обладающей повышенной стойкостью к гидротермальным воздействиям.

Для повышения стойкости АТЗ керамики к низкотемпературной деградации, Y_2O_3 – традиционно используемый стабилизатор тетрагональной фазы диоксида циркония $t\text{-}ZrO_2$ был заменен на CaO . В целях улучшения спекаемости и трансформируемости $t\text{-}ZrO_2 \rightarrow m\text{-}ZrO_2$ в композит был введен третий компонент – SiO_2 [4].

Показано, что разработанные $CaO\text{-}АТЗ$ и $CaO\text{-}АТЗ\text{-}SiO_2$ керамики превосходят мировые аналоги (циркониевые керамики, стабилизированные Y_2O_3 и их композиты с Al_2O_3) по уровню стабильности фазового состава и механических свойств (твердость и вязкость разрушения) в условиях гидротермальных воздействий (давление $P = 2\text{ атм.}$, температура $T = 134\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность $B = 100\text{ }\%$).

Обнаружено проявление признаков пластичности при комнатных температурах (появление площадки текучести на диаграммах одноосного сжатия) при введении 4 – 5 мол. % диоксида кремния в $CaO\text{-}АТЗ$ керамику. Показано, что предел прочности на сжатие при этом достигает значений 2,44 ГПа, а величина относительной деформации – 1,5 %. В пластически деформированных образцах $CaO\text{-}АТЗ\text{-}SiO_2$ (остаточная деформация $\sim 0,15\text{ }\%$) не выявлено изменений микроструктуры. При этом наблюдается уменьшение относительной доли тетрагональной фазы $t\text{-}ZrO_2$. Таким образом, наблюдаемая пластичность $CaO\text{-}АТЗ\text{-}SiO_2$ керамики не связана с зернограницным скольжением (основным механизмом массопереноса при деформации мелкозернистых материалов при высоких температурах), а обусловлена тетрагонально-моноклинными фазовыми превращениями. Это согласуется с выводами [2], сделанными на основе анализа результатов четырехточечного изгиба композиционных керамик $SeO_2\text{-}ZrO_2\text{-}Al_2O_3\text{-}SrAl_{12}O_{19}$.

Достигнутые результаты – повышение стойкости АТЗ керамики к низкотемпературной деградации и обеспечение запаса пластичности с учетом высоких показателей механических свойств (твердость $H = 10,9 \pm 0,5\text{ ГПа}$, вязкость разрушения $K_{IC} = 12,43 \pm 0,35\text{ МПа м}^{0,5}$ и предел прочности на изгиб $\sigma_f = 530 \pm 30\text{ МПа}$ и предел прочности на сжатие

$\sigma_c = 2,44 \pm 0,15$ ГПа) открывают новые возможности для практических приложений CaO-ATZ+SiO₂ керамики в качестве материала для изделий, подверженных длительному воздействию влаги и вынужденных испытывать незначительные деформации в процессе эксплуатации.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта по соглашению № 075-15-2021-709 (уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0037), результаты получены с использованием оснащения Центра коллективного пользования научным оборудованием ТГУ имени Г.Р. Державина.

Список литературы

1. Ghaemi M.H., Reichert S., Krupa A., Zykova A., Lobach K., Sayenko S., Svitlychnyi Y., Zirconia ceramics with additions of alumina for advanced tribological and biomedical applications, *Ceram. Int.*, V. 43, 9746–9752, 2017.
2. Chevalier J., Liens A., Reveron H., Zhang F., Reynaud P., Douillard T., Preiss L., Sergo V., Lughi V., Swain M., Courtois N., Forty years after the promise of «ceramic steel?»: Zirconia-based composites with a metal-like mechanical behavior, *J. Am. Ceram. Soc.*, V. 103, 1482–1513, 2020.
3. Ramesha S., Sara Lee K.Y., Tan C.Y., A review on the hydrothermal ageing behaviour of Y-TZP ceramics, *Ceram. Int.*, V. 44, 20620–20634, 2018.
4. Дмитриевский А.А., Жигачев А.О., Жигачева Д.Г., Родаев В.В., Влияние диоксида кремния на стабильность фазового состава и механические свойства керамики на основе диоксида циркония, упрочненной оксидом алюминия, *Журнал технической физики*, Т. 90, 12, 2108–2117, 2020.

Влияние диамагнитной примеси на состав и структуру монокристаллов $\text{Fe}_{1-x}\text{Me}_x\text{BO}_3$

Могиленец Ю. А.¹, Селезнева К.А.¹, Ягупов С.В.¹, Селезнев К.А.¹, Наухацкий И.А.¹,
Максимова Е.М.¹, Стругацкий М.Б.¹

¹КФУ им. В. И. Вернадского

e-mail: mogilenecya@cfuv.ru

Диамагнитно-разбавленные магнитные монокристаллы, в которых часть парамагнитных ионов изоморфно замещается диамагнитными примесями, позволяют исследовать отдельные механизмы, формирующие то или иное свойство кристалла, а также целенаправленно формировать характеристики материала. В работе рассматриваются диамагнитно-разбавленные монокристаллы бората железа $\text{Fe}_{1-x}\text{Me}_x\text{BO}_3$ ($\text{Me}=\text{Al}, \text{Sc}$), получаемые методом раствор-расплавной кристаллизации [1, 2]. Так как присутствие даже небольшого количества примеси в кристалле снижает его структурное совершенство, то поиск примесных ионов, которые бы минимально влияли на качество образцов, имеет важное значение.

Цель работы – исследовать влияние диамагнитной примеси на состав и структуру монокристаллов $\text{Fe}_{1-x}\text{Me}_x\text{BO}_3$ ($\text{Me}=\text{Al}, \text{Sc}$).

Синтез образцов осуществлялся в системах $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{PbO} - \text{PbF}_2$ и $\text{Sc}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{PbO} - \text{PbF}_2$. Исходные составы шихты подбирались таким образом, чтобы содержание примесных диамагнитных ионов в них было одинаково, $x_{\text{charge}} = 0,05$. Также идентичными были условия подготовки раствор-расплава: просушка реактивов, наплавление, гомогенизация. Ростовые тигли накрывались крышками для того, чтобы снизить

влияние внешних факторов: испарение растворителя, попадание посторонних частиц в раствор-расплав. Единство температурного режима синтеза обеспечивалось тем, что оба тигля располагались максимально близко друг к другу в одной ростовой печи. В результате кристаллизации получены два набора прозрачных пластинчатых зеленых кристаллов, имеющих характерную для FeBO_3 гексагональную форму, размерами до 5 мм в поперечнике и до 40 мкм толщиной.

Методом рентгеноструктурного анализа подтверждено, что полученные кристаллы имеют ромбоэдрическую структуру кальцита. Специфика метода синтеза такова, что содержание примеси в выращенных кристаллах x_{crystal} отличается от ее содержания в исходной шихте x_{charge} и кроме этого величина x_{crystal} имеет некоторый разброс от кристалла к кристаллу [2]. В нашем случае методом рентгенофлуоресцентного анализа установлено, что содержание примеси в синтезированных монокристаллах находится в следующих пределах: $0,05 \leq x_{\text{crystal}} \leq 0,07$ для образцов $\text{Fe}_{1-x}\text{Sc}_x\text{BO}_3$ и $0,06 \leq x_{\text{crystal}} \leq 0,22$ для образцов $\text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x\text{BO}_3$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-32-90054, а также Программы Развития Крымского Федерального Университета им. В.И.Вернадского на 2015-2024 годы, грант №VG04/2019.

Список литературы

1. I.Bernal, C.W.Struck and J.G.White. New transition metal borates with the calcite structure // Acta Cryst. – 1963. – 10. – 849.
2. S.Yagupov, M.Strugatsky, K.Seleznyova, E.Maksimova, I.Nauhatsky, V.Yagupov, E.Milyukova, J.Kliava. $\text{Fe}_x\text{Ga}_{1-x}\text{BO}_3$ single crystals: synthesis and characterization // Applied Physics A. – 2015. – 121(1). – 179-185.

Формирование функционально-градиентных материалов методом механо-термического инкорпорирования керамических частиц в приповерхностные слои алюминиевых сплавов

Желтов М. А.¹, Дмитриевский А.А.¹, Григорьев Г.В.¹, Сульженко М.А.¹

¹ТГУ

e-mail: evskiydmitriy@yandex.ru

Широчайший спектр задач, требующих от конструкционных материалов различия объемных и приповерхностных свойств, предопределил появление нового поколения композиционных материалов – функционально-градиентных материалов (ФГМ) [1]. Основным достоинством таких материалов является отсутствие границ между компонентами (от поверхности к объему), что обеспечивает постепенное пространственное изменение (градиент) механических (иных функциональных) свойств. Концептуально, задача создания ФГМ с заданными свойствами сводится к установлению составов компонентов и определению (расчету) закономерностей их взаимного пространственного распределения, то есть, к разработке градиента структур, одновременно обеспечивающего непрерывное изменение свойств, снижение концентрации внутренних напряжений и увеличение ресурса работы изделия.

Большие перспективы прикладного характера имеют ФГМ, в которых в качестве матрицы используются металлы и сплавы с высоким пределом текучести, а в качестве наполнителя - материалы, обладающие высокой прочностью. В связи с этим, работа нацелена на разработку комплекса технологических операций, обеспечивающих создание ФГМ на основе алюминиевых сплавов (матричный материал) и наноструктурированной циркониевой керамики (материал, градиентно армирующий приповерхностные слои матрицы). Широкое применение алюминиевых сплавов и композитов на их основе (в том числе ФГМ) в производстве авиакосмической техники, автопроме и судостроении и непрерывно растущие требования к комплексу их механических, трибологических и коррозионных свойств, обеспечивают работе несомненную практическую значимость.

Для формирования ФГМ в работе использовали промышленные алюминиевые сплавы систем (Al-Mg с содержанием примеси магния от 3 до 6%), а также волокна (с поперечным размером $\sim 150 - 200$ нм) стабилизированного в тетрагональной фазе диоксида циркония собственного производства. Для получения волокон из циркониевой керамики (с диаметром в диапазоне от 100 до 250 нм) использовали метод электроспиннинга. Конкурентными преимуществами этого метода являются относительные дешевизна и аппаратная простота, универсальность, вариативность процесса, воспроизводимость результатов, широкий спектр входного сырья, возможность контролируемого получения волокон длиной от нескольких сантиметров до нескольких метров.

Образцы ФГМ изготавливали методом механо-термического инкорпорирования керамических частиц в приповерхностные слои алюминиевых сплавов. Для этого на заранее подготовленные заготовки алюминиевого сплава наносили слой частиц (волокон) циркониевой керамики. Далее заготовку с насыпным ансамблем частиц пропускали через печь (керамический кольцевой нагреватель) для повышения температуры до предплавильных значений. Затем разогретую заготовку с нанесенными керамическими частицами подвергали прокатке в электромеханических вальцах с контролируемой скоростью и степенью деформации.

Показана возможность контролируемой модификации поверхности сплава – инкорпорирование керамических частиц в приповерхностные слои алюминия. С использованием сканирующей электронной микроскопии показано, что варьированием параметров насыпного ансамбля (размеры и количество волокон), режимов механической обработки, а также количества повторяющихся циклов достигается контролируемое распределение керамических частиц (частиц механически разрушенных волокон) по глубине приповерхностного слоя алюминиевого сплава.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта по соглашению № 075-15-2021-709 (уникальный идентификатор проекта RF---2296.61321X0037). Результаты получены с использованием оснащения Центра коллективного пользования научным оборудованием ТГУ имени Г.Р. Державина.

Список литературы

1. Минько, Д. В. Теория и практика получения функциональноградиентных материалов импульсными электрофизическими методами / Д. В. Минько, К. Е. Белявин, В. К. Шелег. – Минск: БНТУ, 2020. – 450.

Катодолуминесценция углеродсодержащих дефектов в гексагональном нитриде бора

Петров Ю. В.¹, Вывенко О.Ф.¹, Гогина О. А.¹, Bolotin K.², Kovalchuk S.²

¹СПбГУ

²Freie Universität Berlin

e-mail: y.petrov@spbu.ru

Гексагональный нитрид бора (h-BN) является одним из перспективных материалов для создания источников одиночных фотонов [1], которые в нем представлены двумя спектральными полосами с положением бесфононных линий при примерно 2.0 и 4.1 эВ. Происхождение этих линий связывается с оптическими переходами с участием точечных дефектов, атомный состав и конфигурация которых является пока еще предметом дискуссий. Недавно было найдено, что интенсивность полосы 4.1 эВ больше в образцах с повышенной концентрацией углерода [2], однако прямых экспериментальных свидетельств участия этого элемента в формировании указанной полосы, насколько нам известно, еще получено не было. В настоящей работе впервые получены данные, которые демонстрируют разгорание люминесцентной полосы 4.1 эВ в результате локальной диффузии углерода в нитрид бора с его поверхности.

Пленки толщиной от 11 до 170 нм были получены из монокристалла h-BN методом эксфолиации. Исследования катодолуминесценции (КЛ) проводилось в диапазоне температур от 7 до 300 К в сканирующем электронном микроскопе Zeiss Supra 40 VP, оборудованном системой регистрации катодолуминесценции Gatan Mono CL3+, при возбуждении электронами с энергией 5 кэВ, которой достаточно для возбуждения КЛ по всей толщине исследованных образцов.

В спектрах КЛ исходного нитрида бора наблюдались две серии полос излучения, состоящих из основной узкой линии около 2 эВ и 2,9 эВ и их фононных повторений, хорошо согласующиеся по своим параметрам с литературными данными. Интенсивность этих полос была равномерна по поверхности образцов и росла с увеличением толщины пленок, свидетельствуя об их однородном распределении как латерально, так и по глубине.

Осаждение углерода проводилось методом электронно-лучевой литографии разложением углеводородного прекурсора на локальные области образца размерами несколько микрометров, что позволило сравнивать их спектры со спектрами чистых участков. В результате осаждения углерода при комнатной температуре появлялась и со временем разгоралась полоса с положением бесфононной линии при 4.1 эВ, а также три фононных сателлита, интенсивность первого из которых превышала интенсивность основной полосы почти в два раза. Спектральное положение компонентов этой полосы не изменялось, а их интенсивность несколько возрастала с понижением температуры. Перечисленные свойства являются характерными признаком линии, с использованием которой ранее наблюдали однофотонное излучение [1]. Осаждение углерода при низких температурах (7К) не приводило к заметному увеличению интенсивности указанной полосы, проявляющемуся после нагрева образцов до комнатной температуры и усиливающемуся после высокотемпературного отжига в вакууме при 1000С.

Для оценки глубины миграции углерода с поверхности было проведено облучение пленок нитрида бора ионами галлия с энергией 30 кэВ, создающее радиационно-индуцированные дефекты на глубине не более 50 нм. Такие дефекты играют роль центров безызлучательной рекомбинации, которые приводит к существенному уменьшению интенсивности всех полос катодолуминесценции. Оказалось, что в образце толщиной 170 нм при

увеличении дозы ионного облучения в диапазоне от 1013 до 1015 см-2, интенсивность полос 2 эВ и 2.9 эВ при увеличении дозы уменьшается, а затем выходит на насыщение в то время, как полоса 4.1 эВ исчезает практически полностью. Таким образом, впервые экспериментально установлено, что внедрение углерода из поверхностного слоя уже при комнатной температуре создает в h-BN центры на глубине до 50 нм, ответственные за люминесцентную полосу 4.1 эВ, являющуюся источником одиночных фотонов. Тем самым получено однозначное свидетельство участия атомов углерода в составе таких центров и показана возможность управляемого их создания.

Исследования выполнены с использованием оборудования Междисциплинарного ресурсного центра по направлению “Нанотехнологии” Научного парка СПбГУ.

Список литературы

1. Bourrellier R., et al., Bright UV single photon emission at point defects in h-BN, Nano Letters, том. 16, 4317–4321, 2016
2. Pelini T., et al., Shallow and deep levels in carbon-doped hexagonal boron nitride crystals, Physical Review Materials, том. 3, 094001, 2019 г.

Дефектность 2D-графеновых структур, полученных самораспространяющимся высокотемпературным синтезом

Неверовская А. Ю.¹, Возняковский А.П.¹, Николаев Г.А.¹

¹НИИСК

e-mail: anna-neverovskaya@yandex.ru

Работа посвящена исследованию дефектности 2D-графеновых структур, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС-синтез). Такие структуры, по комплексу морфометрических параметров относящихся к графеновым нанопластинам (ГНП), нашли применение в различных областях практического применения. Так показана эффективность их применения в качестве добавки в полимерные [1] и металломатричные композиты [2], в качестве эффективного сорбента радионуклидов [3]. Разработанная нами методика легко масштабируется и позволяет получить ГНП в количествах, необходимых для удовлетворения спроса конечного потребителя. Физически, СВС представляет собой процесс перемещения волны сильной экзотермической реакции по смеси реагентов (окислителя и восстановителя), в котором тепловыделение локализовано в слое и передается от слоя к слою путем теплопередачи. Важно также отметить, что в качестве исходных веществ для получения 2D наноуглеродов в нашем процессе мы используем возобновляемые биоматериалы, такие как крахмал, лигнин, кора деревьев. При этом имеется возможность проведения синтеза в любой атмосфере или в вакууме [4]. Для возможных практических применений важно оценить степень дефектности графеновых листов, формирующих полученные ГНП. Наиболее существенными дефектами структуры являются вакансионный дефект (отсутствие атома углерода в гексагональной решетке графена) и дефекты Стоуна-Уэльса (наличие пары пента-гептагон [5] в «поле» гексагонов). Строгая оценка дефектности графена – процесс крайне затруднительный и требующий наличия сложного дорогостоящего оборудования. Нами была предложена простая, но достаточно информативная методика определения дефектности графена, основанная на использовании реакции 2,4 диенового синтеза [6]. Протекание данной реакции обуславливает наличие в дефектах пятичленных циклов, которые могут исполнять роль

диенофилов. Таким образом, отсутствие или протекание реакции 2,4 диенового синтеза может служить как качественной, а поскольку это реакция проходит количественно, то и количественной оценкой (концентрация молей дефектов Стоуна-Уэлса в грамме нанотрубода) совершенства структуры листа графена. В качестве образца сравнения мы выбрали одностенные нанотрубки, поверхность которых (как достоверно установлено) формируется сочетанием гекса- и пентагонов атомов углерода. Наши эксперименты показали, что данная реакция успешно протекает в случае одностенных углеродных нанотрубок и совершенно не проходит в случае ГНП, полученных по методу СВС-синтеза. Таким образом, можно утверждать, что дефекты типа Стоуна-Уэлса в полученных ГНП или полностью отсутствуют или существуют в концентрациях ниже чувствительности метода их регистрации (газо-жидкостная хроматография).

Список литературы

1. Chatterjee S, Nafezarefi F, Tai N H, Schlagenhaut L, Nüesch F A, Chu B T T 2012 *Carbon* **50** 5380
2. Moghadam A D, Omrani E, Menezes P L, Rohatgi P K 2015 *Composites Part B: Engineering* **77** 402
3. Wang X, Chen Z, Wang X 2015 *Science China Chemistry* **58** 1766
4. Мержанов А Г 2000 *Твердопламенное горение* (Черноголовка: ИСМАН) с 224
5. Eleetskii A V, Iskandarova I M, Knizhnik A A, Krasikov D N 2011 *Physics Uspekhi* **54** 227
6. Stocking E M, Williams R M 2003 *Angew Chem Int Ed* **42** 3078

Фотоэлектрические свойства диодов Au/ α -Ga₂O₃

Чернобровкин И. Д.¹, О.Ф. Вывенко¹, Н.В. Базлов¹, В.И. Николаев², А.И. Печников²

¹СПбГУ

²ФТИ им. Иоффе

e-mail: Tschernobrowkin.Ilja@yandex.ru

Оксид галлия Ga₂O₃ привлекает внимание исследователей ввиду своих уникальных свойств: устойчивость к большим электрическим полям, фоточувствительность и способность излучения света в сине-фиолетовом диапазоне. В последние годы, благодаря разработке и усовершенствованию методов получения однофазных образцов, возрос интерес к метастабильным ϵ - и α -фазам [1]. Последняя имеет решетку корунда, аналогичную и близкую по параметрам к сапфиру, что делает ее технологически предпочтительной по сравнению с другими фазами. Особый интерес представляет получение данных по фотоэлектрическим свойствам в связи с предполагаемым использованием α -Ga₂O₃ для создания детекторов, нечувствительных к солнечному излучению. В настоящей работе приводятся первые данные по исследованию спектрального отклика фотодиодов на основе α -Ga₂O₃.

Измерение спектра фототока короткого замыкания проводилось на структуре шоттки-диода на основе пленки монокристаллического α -Ga₂O₃, выращенные методом HVPE, толщиной 5 мкм, верхний слой ($\approx$ 200 нм) которого легирован оловом. Измерение проводилось с использованием ксеноновой лампы ДКСШ-500 в качестве источника света.

Вольтамперные характеристики (ВАХ) полученных диодов характеризовались большим коэффициентом выпрямления и малыми обратными токами. Концентрация

некомпенсированных доноров, определенная из вольт-фарадных характеристик (ВФХ) составила $N_D \approx 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при сопротивлении базы $r \approx 10^3 \text{ Ом}$.

ВАХ диодов в темноте были хорошо воспроизводимы и мало отличались при разных направлениях сканирования по напряжению. Однако, после приложения большого прямого напряжения при засветке с длиной волны 320 нм происходил переход из низко- в высокопроводящее состояние, что проявлялось в возрастании обратного тока более, чем на два порядка величины. Анализ обратных ветвей ВАХ показал, что токи носят туннельный характер. Тем самым возрастание тока можно объяснить резким увеличением положительного заряда доноров в области пространственного заряда диода – явлением, которое принято называть сохраняющейся проводимостью. Этот результат находится в качественном согласии с недавно опубликованными данными, в которых было зафиксировано необратимое увеличение концентрации доноров после освещения из данных ВФХ [2], но дополнительно показывает, что для перехода в высокопроводящее состояние требуется как акт поглощения света, так и присутствие основных носителей в зоне проводимости.

Для объяснения бистабильных свойств исследованных диодов можно предположить, что в исследованном материале существуют дефекты, которые имеют две метастабильные конфигурации, одна из которых стабилизируется ориентацией под действием большого электрического поля, а переход в другую происходит в квазинейтральном материале при фотоопустошении ее локального энергетического уровня в запрещенной зоне подобно тому, как это известно для железо-борных пар в кремнии [3].

Спектральные измерения фототока диода в модулированном режиме выявили его насыщение за времена меньше секунды и монотонный рост сигнала, начиная от $E_1 \approx 1.5 \text{ эВ}$, который резко обрывается на $E_2 \approx 4 \text{ эВ}$, и при $E > E_2$ слабо зависит от $h\nu$. При этом величина фототока в несколько раз превышала темновое значение даже при $h\nu < 0.5 \cdot E_g$. Согласно общепринятым представлениям фототок диода определяется током неосновных носителей. Однако в полупроводнике n-типа с большими концентрациями легирующей примеси все ловушки, находящиеся в запрещенной зоне ниже уровня Ферми, должны быть заполнены основными носителями, что делает невозможным реализацию такого механизма для $h\nu < 0.5 \cdot E_g$. Это противоречие можно объяснить тем, что в действительности возникновение большого фототока связано с опустошением уровней в верхней половине запрещенной зоны, которое приводит к увеличению положительного заряда в ОПЗ и соответствующему увеличению электрического поля диода, и как следствие, к росту его туннельной составляющей.

Кристаллы $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ выращены ООО «Совершенные кристаллы», Санкт Петербург.

Список литературы

1. Vladimir I. Nikolaev, Sergey I. Stepanov, Alexey E. Romanov, Vladislav E. Bougrov. Gallium Oxide, Single Crystals of Electronic Materials. 487–521. Elsevier, 2019
2. Polyakov, A. Y et. al. Deep Trap Spectra of Sn-Doped $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Grown by Halide Vapor Phase Epitaxy on Sapphire. APL Mater., 7, 051103, 2019
3. Chantre, A. Introduction to defect bistability. Appl. Phys. A 48, 3–9, 1989

Алмазы полученные при высоком давлении и температуре без металла катализатора в присутствии фтора

Прилежаев К. С.¹, Ручкин И.А.², Шахов Ф.М.³

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт

e-mail: kirill.prilezhaev@gmail.com

Техника получения алмазов стремительно развивается вот уже 70 лет, постоянно удешевляя и упрощая производство. Новые открытия в области синергетического действия фтористых и водородистых соединений на параметры синтеза – объект пристального внимания ученых. Снижение давления и температуры с неприемлемо высоких 7-8 ГПа до приемлемых 4-5 ГПа, а температуры до 1500 °С и меньше – мечта любого производителя алмазов как традиционных, так и высокотехнологичных назначений, ведущая к экономии дефицитных сверхтвердых керамик, а также расширению применения алмазов во всех сферах промышленности.

В работе была поставлена задача, применив запатентованный в ФТИ им. А.Ф. Иоффе метод синтеза алмаза из графита без металла-катализатора для синтеза высокочистых алмазных порошков, проверить синергетические свойства добавок фторсодержащих веществ.

Серия экспериментов, проведенная в аппарате высокого давления типа «тороид», подтвердила существенное снижение температуры перехода алмаз-графит при давлении в 6-7 ГПа.

Проведены исследования XRD, Рамановская и ЭПР спектроскопия. Выявлено влияние соотношения F- и H- содержащих добавок на эффективность синтеза

Список литературы

1. Davydov V.A., Synergistic Effect of Fluorine and Hydrogen on Processes of Graphite and Diamond Formation from Fluorographite-Naphthalene Mixtures at High Pressures, *J. Phys. Chem. C* 2011, 115, 43, 21000–21008
2. Shakhov F.M., Abyzov A.M., Takai K. Boron doped diamond synthesized from detonation nanodiamond in a C-O-H fluid at high pressure and high temperature.: *J. Solid State Chem.*, 2017, 256, 72-92.

Коллективное взаимодействие структурных дефектов в условиях высокоскоростной деформации

Малашенко В. В.¹, Малашенко Т.И.²

¹ДонФТИ им. А.А. Галкина

²ДонНТУ

e-mail: malashenko@donfti.ru

Как известно, пластичность, прочность и другие механические свойства твердых тел в значительной степени определяются зарождением, размножением и движением дислокаций – линейных дефектов, являющихся границами незавершенного сдвига. Двигаясь по кристаллу под действием внешних и внутренних напряжений, дислокация

взаимодействует с другими структурными дефектами, затрудняющими ее перемещение, в результате чего происходит упрочнение материала. Медленно движущиеся дислокации, кинетическая энергия которых оказывается меньше высоты потенциальных барьеров, созданных дефектами, останавливаются перед барьерами и преодолевают их с помощью тепловых флуктуаций. Кинетическая энергия быстро движущихся дислокаций превосходит высоту энергетических барьеров, такие дислокации преодолевают препятствия динамическим образом, без термических флуктуаций. Это динамическая область скоростей, в которой дислокации движутся со скоростями от десятков до тысяч метров в секунду. Такой режим реализуется при высокоэнергетических внешних воздействиях: высокоскоростная обработка материалов, динамическое канально-угловое прессование, ударно-волновое воздействие лазерным излучением и корпускулярными потоками, пробивание оболочек [1, 2]. Широко применяемый для анализа этих процессов метод молекулярной динамики не позволяет получать аналитические зависимости механических свойств материалов от их упругих констант и характеристик структурных дефектов. Развита нами теория динамического взаимодействия структурных дефектов дает возможность получать такие зависимости для широкого круга задач дислокационной динамики, объясняет ряд экспериментально наблюдающихся закономерностей, предсказывает существование новых динамических эффектов, стимулирует постановку целенаправленных экспериментов, выявляет общие закономерности динамического поведения объектов совершенно разной физической природы и предсказывает существование новых динамических эффектов, тем самым стимулирует целенаправленную постановку новых экспериментов [3-5]. В частности, в рамках единого подхода объяснены различные типы концентрационной зависимости твердорастворного упрочнения (линейная, корневая, N -образная), отрицательная и N -образная скоростная зависимость предела текучести, линейная зависимость константы динамического торможения от параметра несоответствия. Предсказаны ориентационный эффект динамического взаимодействия дислокации с дислокационными петлями, эффект блокировки динамического торможения дислокаций на примесях в приповерхностной области кристалла, эффект сухого трения дислокаций в состаренных сплавах, нарушение соотношения Тейлора в условиях высокоскоростной деформации, подавление скачков пластической деформации магнитным полем при низкотемпературном деформировании двухкомпонентных сплавов. Показаны общие черты динамического поведения в таких процессах, как динамическое торможение дислокаций примесями, торможение дислокаций магнонами, торможение доменной стенки магнитными точечными дефектами, работа туннельного диода, эффект Ганна, перезарядка ионистора.

Список литературы

1. Batani, D., Europhysics Letters, Vol. 114, 65001(1–7). 2016.
2. Канель, Г.И., Зарецкий Е.Б., Разоренов С.В., Ашитков С.И., Фортов В.Е., УФН, Т. 1875, 525–545, 2017.
3. Варюхин В.Н., Малащенко В.В., Известия РАН. Серия физическая, Т. 82, 37– 42, 2018.
4. Малащенко В. В., ФТТ, Т. 62, 1683-1685, 2020.
5. Malashenko V.V., Physica B: Phys. Cond. Mat., Vol. 404, 3890–3893, 2009.

The Interpolation method: particle resolved experimental verification in model systems.

Корсакова С. А.¹, Яковлев Е.В.¹, Крючков Н.П.¹, Юрченко С.О.¹

¹МГТУ им. Н. Э. Баумана

e-mail: sofia.korsakova@gmail.com

Establishing relationships between the structure of condensed matter, its collective dynamics, thermodynamic properties and details of the interaction between individual particles is an interdisciplinary problem that is of great importance for both fundamental and applied research in condensed matter, chemical physics, chemistry, materials and soft matter [1-6].

The interactions between particles in different systems can be described as pairwise, which makes it possible to calculate the thermodynamic properties of the system using the virial equation of state and thermodynamic integration using the pair interaction potential and the pair correlation function [7]. In typical materials, such calculations are complicated by the many-body interaction, but the analysis of pair correlators is important and allows one to determine the interaction energy corresponding to pairwise interactions.

The interpolation method (IM) is used to accurately calculate the pair correlation function in classical crystals (crystals whose particle dynamics are described using classical mechanics) [8-15]. The IM allows us to calculate pair correlations, taking into account an interplay between harmonic effects leading to Gaussian correlation peaks at large distances, and anharmonicity of the interaction in a local environment, leading to non-Gaussian correlation peaks at short distances [11]. The IM considers the pair correlation function of a crystal as the sum of contributions (correlation peaks) of all particles moving around their nodes in the lattice.

In this work, IM was first experimentally tested for pair correlations in model crystals. Colloidal suspensions and complex (dusty) plasma allow experimental studies with the resolution of individual particles with tunable interactions, which is an excellent system for analyzing pair correlations with IM [8-11],[13-15]. We performed experiments with systems demonstrate a wide range of particle interactions - from soft to hard-sphere-like - with the spatial resolution of individual particles: charge stabilized 3D colloidal crystals in nonpolar solvent, with 2D colloidal crystals (silica particles in deionized water), and with 2D complex (dusty) plasma crystals. We have shown that IM can be used to obtain the parameters of pair interaction between particles (which was taken for Yukawa repulsion), and IM is also suitable for the analysis of many-body interactions if they can be reflected into pairwise interactions with some effective parameters. Our experimental results demonstrate excellent agreement with theoretical studies and confirm the applicability of IM for the analysis of interactions and correlations in various crystals [16].

Список литературы

1. P. M. Chaikin and T. C. Lubensky, Principles of Condensed Matter Physics (Cambridge University Press, 1995).
2. P. Atkins, J. d. Paula, and J. Keeler, Atkins' Physical Chemistry, 11th ed. (University Press, Oxford, 2017).
3. A. Fernandez-Nieves and A. M. Puertas, Fluids, Colloids, and Soft Materials: An Introduction to Soft Matter Physics (Wiley, 2016).
4. A. Ivlev, H. Löwen, G. Morfill, and C. P. Royall, Complex Plasmas and Colloidal Dispersions: Particle-Resolved Studies of Classical Liquids and Solids, Series in Soft Condensed Matter (World Scientific, Singapore, 2012).
5. H. Löwen, Phys. Rep. 237, 249 (1994).
6. K. Trachenko and V. V. Brazhkin, Rep. Prog. Phys. 79, 016502 (2015).

7. J.-P. Hansen and I. R. MacDonald, Theory of Simple Liquids (Academic, London, 2006).
8. S. O. Yurchenko, J. Chem. Phys. 140, 134502 (2014).
9. S. A. Khrapak, N. P. Kryuchkov, S. O. Yurchenko, and H. M. Thomas, J. Chem. Phys. 142, 194903 (2015).
10. S. O. Yurchenko, N. P. Kryuchkov, and A. V. Ivlev, J. Chem. Phys. 143, 034506 (2015).
11. S. O. Yurchenko, N. P. Kryuchkov, and A. V. Ivlev, J. Phys.: Condens. Matter 28, 235401 (2016).
12. S. A. Khrapak, N. P. Kryuchkov, and S. O. Yurchenko, Phys. Rev. E 97, 022616 (2018).
13. N. P. Kryuchkov, S. A. Khrapak, and S. O. Yurchenko, J. Chem. Phys. 146, 134702 (2017).
14. S. O. Yurchenko, K. A. Komarov, N. P. Kryuchkov, K. I. Zaytsev, and V. V. Brazhkin, J. Chem. Phys. 148, 134508 (2018).
15. N. P. Kryuchkov, S. O. Yurchenko, Y. D. Fomin, E. N. Tsiok, and V. N. Ryzhov, Soft Matter 14, 2152 (2018).
16. E.V. Yakovlev, M. Chaudhuri, N. P. Kryuchkov, P.V. Ovcharov, A.V. Sapelkin, and S. O. Yurchenko, J. Chem. Phys. 151, 114502 (2019).

Вольт-амперные характеристики соединительных туннельных диодов при температурном нагреве до 80 °C

Контрош Е. В.¹, Климко Г.В., Ваулин Н.В., Б.Я. Бер, Калиновский В.С.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kontrosh@mail.ioffe.ru

Рабочая температура многопереходных фотопреобразователей (МП ФЭП) при возбуждении мощным оптическим излучением может значительно возрасти в зависимости от эффективности теплоотвода и величины оптической мощности [1]. В этом случае, вольт-амперная характеристика (ВАХ) соединительных туннельных диодов (ТД) может оказывать влияние на эффективность МП ФЭП. Основной задачей данной работы являлся анализ ВАХ туннельных диодов в температурном диапазоне от 25 °C до 80 °C.

Проведены температурные измерения ВАХ двух типов $n^+-GaAs/p^{++}-GaAs/i-GaAs/i-Al_{0,2}Ga_{0,8}As/p^{++}-Al_{0,2}Ga_{0,8}As$ структур ТД, выращенных при температурах эпитаксии – T_{growth} – 500 °C для структуры “А”, и 450 °C для “В” методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) согласно технологии описанной в работе [2]. Структуры “А” и “В” отличались технологически закладываемой толщиной слаболегированной области – W_i (7,5 nm – А, 10 nm – В). Методом динамической вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС), установлено, что в структуре “А” наблюдается значительное перекрытие распределения легирующих примесей доноров Si и акцепторов Be. Методом фотолитографии на структурах были сформированы мезы диаметром 250 μm с омическими контактами.

Согласно измеренным ВАХ при 25 °C средняя плотность пикового туннельного тока в образцах структуры “А” составила 111 A/cm², а “В” – 131 A/cm². При повышении температуры до 80 °C в структуре “В” наблюдается рост плотности пикового туннельного тока (J_{peak}) на 4%, что объясняется уменьшением ширины запрещенной зоны с последующим уменьшением высоты потенциального барьера и увеличением вероятности квантового туннелирования [3]. В структуре “А” с повышением температуры наблюдается падение плотности пикового туннельного тока на 5%. Это может быть связано со снижением степени вырождения p^{++} -GaAs слоя, из-за перекомпенсации примесей Si, Be [1, 3, 4]. В итоге, при нагреве из-за смещения уровня Ферми ближе к дну зоны проводимости плотность пикового туннельного тока снижается.

Дифференциальное сопротивление (R_d) ВАХ ТД согласно математическому моделированию [2,5] в основном определяется последовательным сопротивлением структуры ТД – R_s и поскольку с ростом температуры R_s снижается, мы наблюдаем снижение R_d на 10% для “А” и на 14% для “В” структур.

Таким образом в работе показано, что снижение температуры эпитаксиального роста $n^+-GaAs/p^{++}-GaAs/i-GaAs/i-Al_{0,2}Ga_{0,8}As/p^{++}-Al_{0,2}Ga_{0,8}As$ структуры ТД и включение слаболегированного i -слоя толщиной 10 nm в активной области позволяет обеспечить температурную стабильность ТД в диапазоне температур 25-80 °C.

Список литературы

1. J. F. Wheeldon et al., «AlGaAs tunnel junction for high efficiency multi-junction solar cells: Simulation and measurement of temperature-dependent operation» 2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Philadelphia, PA, 2009, pp. 000106-000111, doi: 10.1109/PVSC.2009.5411723.
2. Kalinovskii, V.S., Kontrosh, E.V., Klimko, G.V. et al. Development and Study of the p-i-n GaAs/AlGaAs Tunnel Diodes for Multijunction Converters of High-Power Laser Radiation. Semiconductors 54, 355–361 (2020). <https://doi.org/10.1134/S1063782620030112>.
3. S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd edition, (John Wiley and Sons, New York, 1981), p. 255.
4. W. A El-Basita, Z.I.M.A wad, S.A.Kamha, F.A.S.Soliman, Temperature dependence of backward tunnel diode oscillator circuit, Microelectronics Journal, Volume 99, May 2020, 104756
5. M. Baudrit, C. Algora. IEEE Trans. Electron Dev., 57 (11), 2564 (2010).

Исследование характеристик радиоизотопного источника энергии на основе (Y,Eu)PO₄ / ²³⁸Pu и Al_xGa_{1-x}As/GaAs фотопреобразователя

Прудченко К. К.¹, Толкачёв И.А.¹, Силантьева Е.А.¹, Контрош Е.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: ksenialeti@gmail.com

В современной нано и оптоэлектронике возникает потребность в слаботочных источниках энергии с сверх длительным сроком действия, которые используются в устройствах с низким уровнем энергопотребления. В связи с этим, значительное внимание уделяется разработке и усовершенствованию радиоизотопных источников энергии (РИЭ), в которых энергия радиоактивного распада изотопов преобразуется в электрическую энергию [1].

РИЭ с прямым преобразованием из-за разрушающего воздействия ионизирующего излучения непосредственно на полупроводниковые структуры испытывают потребность в дополнительной защите от радиации и имеют значительно меньший срок службы, чем РИЭ с промежуточным преобразованием энергии радиоактивного распада в энергию оптического излучения [2]. Источником оптического излучения в РИЭ с промежуточным преобразованием могут служить радиационно-стойкие минералоподобные матрицы, например, кристаллы типа ксенотим YPO₄, в составе которых, как примесь введены: в количестве ≤0,01% от общей массы радионуклид ²³⁸Pu (с преобладающим излучением альфа-частиц) и в качестве люминесцентных центров - ионы европия Eu³⁺ ~ 2-3% [3]. Использование высокоэффективных наногетероструктурных Al_xGa_{1-x}As/GaAs фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) и безопасных радиолюминесцентных источников оптического излучения позволяют обеспечить в течение длительного времени, порядка периода полураспада изотопа, максимальную производительность РИЭ.

В данной работе исследованы характеристики РИЭ с промежуточным преобразованием энергии радиоактивного распада в энергию оптического излучения. Выполнен расчёт в программе «Silvaco Atlas TCAD», по результатам которого проведена оптимизация Al_xGa_{1-x}As/GaAs структуры. Исследованы темновые и световые вольт-амперные

характеристики ФЭП при возбуждении оптическим излучением экологически безопасного радиoluminesцентного источника $\text{YPO}_4(\text{Eu}^{3+})/^{238}\text{Pu}$ с оптической мощностью излучения $\sim 1\text{ Вт}$. Разработан макет РИЭ и сделана оценка его эффективности, выявлено хорошее совпадение расчётного значения КПД РИЭ с экспериментальным.

Список литературы

1. H. G. J. Moseley, and J. Harling, The Attainment of High Potentials by the Use of Radium, Proc. R. Soc. (London) A, 88, 471, 1913.
2. В.В. Светухин, С.Г. Новиков, А.В. Беринцев, А.А. Черторийский, А.С. Алексеев, Двойное преобразование энергии в радиоизотопном источнике питания, Известия высших учебных заведений, Электроника, №5, т.21, стр. 429-434, 2016.
3. B. E. Burakov, V. M. Garbuzov, A. A. Kitsay, V. A. Zirlin, M. A. Petrova, Ya. V. Domracheva, M. V. Zamoryanskaya, E. V. Kolesnikova, M. A. Yagovkina, M. P. Orlova, The Use of Cathodoluminescence for the Development of Durable Self-Glowing Crystals Based on Solid Solutions $\text{YPO}_4 - \text{EuPO}_4$, Semiconductors, vol. 41, №4, p. 427-43, 2007.
4. В.М. Андреев, В.В. Евстропов, В.С. Калиновский, В.М. Лантратов, В.П. Хвостиков, Токопрохождение и потенциальная эффективность (КПД) солнечных элементов на основе р-п переходов из GaAs и GaSb, Физика и техника полупроводников, т.43, № 5, 2009.
5. В.С. Калиновский, Е.В. Контрош, Г.В. Климко, Т.С. Табаров, С.В. Иванов, В.М.Андреев, Влияние механизмов токопрохождения на эффективность фотодиодов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, Письма в ЖТФ, т. 44, вып. 22, 2018.

The highly efficient exciton channel of photo-activation for redox reactions on the surface of 2D $\text{ZnO}/\text{ZnO}_{1-x}/\text{O}^-$ nanostructures type

Lisachenko A. A.¹, Titov V. V., Akopyan I. K., Labzovskaya M. E., Novikov, B. V.

¹Saint-Petersburg State University, V. A. Fock Institute of Physics, Russia

e-mail: a.lisachenko@spbu.ru

ZnO became one of the most efficient active medium of photo cells for the conversion of solar energy into chemical and electrical one and as a redox photocatalyst. However, only UV light including under 4% of the solar spectrum, generates e^-h^+ pairs. For using the visible region, which accounts for $\sim 50\%$ of solar energy, ZnO is sensitized by dyes or by doping with metal and nonmetal elements. However the absorption coefficients achievable in the VIS region are much less than those of the fundamental absorption. Despite high generation efficiency of e^-h^+ pairs in the UV region their concentration sharply decreases due to their recombination (either a direct e^-h^+ recombination, or via recombination centers) and due to overcoming the surface potential barriers.

In order to provide the absorption coefficient of $\sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$ and at the same time to reduce the loss of photo-generated e^-h^+ pairs we used the photo-generated excitons as neutral energy carriers. The high binding energy of excitons in ZnO (60 meV) ensures their safety during the transport at room temperature ($kT = 27 \text{ meV}$). In order to exclude the radiative recombination on the surface we created the 2D-structure $\text{ZnO}/\text{ZnO}_{1-x}/\text{O}^-$ in which the exciton decays non-radiatively into a pair of long-lived (10^3 s) electron-donor and hole active centers [1,2].

High purity (99.99%) nano-crystallites ZnO were exhaustively characterized by the methods of optical and Photo-luminescent spectroscopy (PLS), SEM, UPS(21.4, 8.43 eV), XRD [1,2]. The experiments were carried out in a flow-through mass-spectrometric reactor at the pressures of 10^{-8} - 10^{-6} Torr. [3].

The 2D “core-shell” structure ZnO/ZnO_{1-x} was formed directly in the reactor chamber using partial photo-desorption of surface oxygen. Additional adsorption of atomic oxygen on the ZnO/ZnO_{1-x} surface creates a layered structure ZnO/ZnO_{1-x}/O⁻. The radiative decay of an exciton on the ZnO surface is excluded by the structure ZnO/ZnO_{1-x}/O⁻. In the electric field of the “dead zone” the exciton decays non-radiatively [1] into a pair of long-lived (up to $8 \cdot 10^3$ s) electron and hole active centers which are stable for up to 400 K [2].

It was stated the effect of a specific photo-activation of the redox reactions of the photo-stimulated oxygen isotope exchange (POIE) by the ZnO/ZnO_{1-x}/O⁻ system in the spectral region of the exciton resonant excitation. The reaction efficiency (the number of reaction acts per incident quantum) turned out to be 5-7 times higher than with interband absorption [3].

The obtained results show that the excitons transfer the excitation energy from bulk to the surface more efficiently than the free carriers. The use of resonant exciton excitation of ZnO photocatalyst could be appropriate for highly efficient photoconverters and indoor photocatalytic reactors.

Acknowledgments

This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project №. 18-03-00754 and 19-72-30004) and by the St.Petersburg State University (project №. AAAA-A19-119082790069-6 and №. 75746688).

The authors are grateful to the staff of St. Petersburg State University Resource Centers: “Nanocomposites,” “Physical Methods of Surface Research,” “X-ray Diffraction Studies,” and “Nanophotonics.”

References

1. V. V. Titov, A. A. Lisachenko, I. Kh. Akopyan, M. E. Labzovskaya, and B. V. Novikov, *J. Lumin.* **195**, 153 (2018).
2. V. V. Titov, A. A. Lisachenko, I. Kh. Akopyan, M. E. Labzovskaya, and B. V. Novikov *Physics of the Solid State*, 2019, Vol. 61, No. 11, pp. 2134–2138.
3. Victor V. Titov, Andrey A. Lisachenko, Mariana E. Labzovskaya, Irina Kh. Akopyan, and Boris V. Novikov *J. Phys. Chem. C* 2019, 123, 27399–27405

О результатах моделирования и макетирования полоскового пассивного параметрического радиоответчика

Бабанов Н. Ю.¹, Ларцов С.В.¹, Самарин В.П.¹ Ключев А.В.²,

¹НГТУ им. Р. Е. Алексеева

²НИИИС

e-mail: babanov@nntu.ru

В пассивных параметрических радиоответчиках (ППР) облучающий зондирующий сигнал (ЗС) преобразуется в ответный сигнал (ОС) на частоте половинной субгармоники ЗС [1].

Это свойство делает ППР привлекательными для использования в качестве пассивных радиомаркеров [2], на фоне нелинейных помех [3].

Однако ППР, предложенный в [1] подвержен влиянию окружающих предметов, плохо соответствует задаче маркировки различных объектов, так как представляет собой диполь, соединенный с параметрическим контуром из проволочной индуктивности и полупроводникового диода, выполняющего роль варактора.

Первым шагом решения этой проблемы стала разработка модели ППР [4], позволившей описать процессы, протекающие в конструкции ППР - двухполюсника, предложенной в [1].

Кроме того, была предложена новая конструкция ППР – четырехполюсника [5], состоящая из, нагруженных на. Реализация новой конструкции ППР требует хорошего согласования его элементов: полосковых антенн ЗС и ОС с системой из 4-х параметрических контуров, включенных по мостовой схеме.

Для обеспечения этого согласования была скорректирована математическая модель ППР. Новая математическая модель ППР позволила выполнять счетные эксперименты по вычислению амплитудных характеристик для заданных значений частоты ЗС и параметров элементов ППР. В частности, была решена задача оптимизации величин сопротивлений излучения антенн ЗС и ОС с точки зрения максимизации уровня ОС для частоты ЗС 400 МГц. Наилучшими значениями оказались значения сопротивлений излучения: для антенны ЗС - $R_{A1} \gg 73$ Ом, а для антенны ОС - $R_{A2} \gg 700$ Ом.

Макетирование мостового полоскового ППР с целью проверки результатов моделирования показало хорошее соответствие результатов счетного и натурного экспериментов.

Список литературы

1. Gorbachev, P. A. Nonlinear Scatterer of Electromagnetic Waves Generating Subharmonics // Journal of Communications Technology and Electronics , Vol. 44, No. 10, 1999, p. 1077- 1080.
2. Gorbachev, A. A. Probing Media with Nonlinear Inclusions by Electromagnetic Waves // Journal of Communications Technology and Electronics , Vol. 41, No. 2, 1996, p. 137-141.
3. A. A. Gorbachev, S. V. Lartsov, S. P. Tarakankov, and E. P. Chigin. Interferences in Nonlinear Probing Systems // Journal of Communications Technology and Electronics, Vol. 43, No. 1, 1998, p. 68 - 72 .
4. Yu. Babanov, A. V. Kluyev, S. V. Lartsov & V. P. Samarin Simulation of the Reradiation Processes at the Pump-Signal Half Frequency in a Single-Circuit Parametric Scatterer // Radiophysics and Quantum Electronics, 2015, volume 58, pages 296–306.
5. Н.Ю.Бабанов, А.В.Клюев, С.С.Корсаков, А.А.Куликов,С.В.Ларцов Полосковый мостовой пассивный нелинейный радиоответчик// Патент РФ RU 2652150 С2, опубл. 25.04.2018г. Бюл.12.

Four-terminal perovskite-silicon tandem solar cells for low light applications

Nikolskaia A. B.¹, S.S. Kozlov¹, M.F. Vildanova¹, O.K. Karyagina¹, O.I. Shevaleevskiy¹

¹IBCP RAS

e-mail: anickolskaya@mail.ru

Nowadays the performance of conventional crystalline silicon (c-Si) solar cell under standard illumination conditions AM1.5G (1000 W/m²) has nearly reached its theoretical maximum [1]. It is also known that with light intensity decrease the power conversion efficiency (PCE) of c-Si solar cells drastically reduces [2]. In this regard the efforts are carried out to integrate c-Si solar cells into the tandem systems [3]. In a tandem system a certain part of the solar spectrum passes through partially transparent top solar cell and then falls on the surface of c-Si bottom solar cell. Low cost and easily manufactured perovskite solar cells (PSCs) look to be the best candidates for transparent top devices [4]. Using different types of electron transport layers in PSCs allow to adjust the photoelectrical and optical characteristics of the top solar cell and to optimize the configuration of perovskite-silicon (PSC/c-Si) tandem system for effective operation under both standard illumination conditions and at low light intensities [5].

In this study photoelectrodes based on very large bandgap materials ($E_g > 5$ eV), such as ZrO₂, were used for manufacturing PSCs for PSC/c-Si tandem solar cells. Semitransparent PSCs with the device architecture of glass/FTO/c-TiO₂/ZrO₂/CH₃NH₃PbI₃/PTAA/PEDOT:PSS/FTO/glass were fabricated under ambient conditions at high humidity level (~50%) and were used as top cells in PSC/c-Si tandem systems with four-terminal (4-terminal) configuration. Optical and incident photon-to-current conversion efficiency (IPCE) data were obtained. Current density-voltage (J - V) characteristics were measured in PSCs, in standalone c-Si solar cells and in PSC/c-Si tandem solar cells under different illumination conditions in the range of 10-1000 W/m². The light intensity level was reduced using neutral filters (Marumi, Japan), which provided a uniform decrease in light flux in the spectral range from 300 to 1100 nm.

The PCE value of 12.7% (1000 W/m², AM1.5G) was obtained for PSCs based on a mesoscopic ZrO₂ layer that was 6.5% higher than the efficiency of the PSCs with state-of-the-art TiO₂ photoelectrode. In this case ZrO₂ layer was used as a scaffold layer. We have shown that the electronic transport at the perovskite/ZrO₂ interface is provided on the base hopping conduction mechanism via the localized states within ZrO₂ bandgap. As a result, we observed a sufficient decrease of recombination losses at this interface area. The efficiency of the PSCs with ZrO₂ photoelectrode did not significantly change with the light intensity reduction, while the efficiency of the PSCs with TiO₂ photoelectrode was decreased by ~20%. The data obtained have also shown the excellent light-scattering properties of ZrO₂ layers.

The fabricated PSCs were used as top elements in PSC/c-Si tandem solar cells. The PCE value of 18.7% (1000 W/m², AM1.5G) was obtained for PSC/c-Si tandem systems with ZrO₂ photoelectrode that exceeded the PCE for a standalone c-Si solar cell by ~24%. Besides that, the efficiency of PSC/c-Si tandem solar cells was significantly higher than the efficiency of c-Si cell under low light conditions. The PCE value of 4-terminal PSC/c-Si tandem solar cell under 15 W/m² illumination was found to be 12.8% that is 4 times higher than the PCE value for a standalone c-Si solar cell.

The obtained results demonstrate that the ZrO₂-based photoelectrodes are promising for the manufacturing high efficient PSCs and for improving the performance of PSC/c-Si tandem systems, which have shown the capability to effectively operate in a wide range of different light illumination conditions (10-1000 W/m²).

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 19-08-01042).

References

1. Park N.G. Research direction toward scalable, stable, and high efficiency perovskite solar cells. *Adv. Energy Mater.*, 2018, 10(13), 1903106.
2. Nikolskaia A.B., Kozlov S.S., Vildanova M.F., Shevaleevskiy O.I. Power conversion efficiencies of perovskite and dye-sensitized solar cells under various solar radiation intensities. *Semiconductors*, 2019, 53(4), 550–554.
3. Leijtens T., Bush K.A., Prasanna R., McGehee M.D. Opportunities and challenges for tandem solar cells using metal halide perovskite semiconductors. *Nat. Energy*, 2018, 3, 828–838.
4. Li H., Zhang W. Perovskite tandem solar cells: from fundamentals to commercial deployment. *Chem. Rev.*, 2020, 120(18), 9835–9950.
5. Noh M.F.M., Teh C.H., Daik R., Lim E.L., Yap C.C., Ibrahim M.A., Ludin N.A., Yusoff A.R., Jange J., Teridi M.A.M. The architecture of the electron transport layer for a perovskite solar cell. *J. Mater. Chem. C*, 2018, 6, 682–712.

Обеспечение надежного охлаждения камеры сгорания кислородно-водородного варианта жидкостного ракетного двигателя «Раптор» при глубоком дросселировании тяги

Мукамбетов Р. Я.¹, Боровик И.Н.¹

¹МАИ

e-mail: ralif.mukambetov@mail.ru

В данной работе проведен анализ возможности глубокого дросселирования жидкостного ракетного двигателя при условии надежного охлаждения камеры жидким водородом.

Одной из проблем современного ракетостроения является многоразовое использование ступеней ракет-носителей. Подобное решение позволит снизить стоимость запусков и, как следствие, повысить конкурентоспособность. Одним из вариантов решения данной проблемы является посадка ступени ракеты-носителя с использованием реактивной тяги маршевого двигателя [1]. Подобная идея позволит посадить ступени непосредственно на стартовый стол, в результате чего ликвидируются затраты на транспортировку в случае посадки вне космодрома. Для данного решения требуется глубокое дросселирование двигателя, что приводит к возникновению следующей проблемы: надежное охлаждение камеры двигателя на режимах глубокого дросселирования. Данная проблема связана с тем, что охлаждение осуществляется одним из компонентов топливной пары, а именно – горючим, в качестве которого используется жидкий водород.

В данной работе проведен анализ возможности глубокого дросселирования жидкостной ракетной двигательной установки при условии надежного комбинированного охлаждения камеры двигателя [4]. Для расчета охлаждения использовался программный комплекс "HOLOD", разработанный в МГТУ им. Баумана. Для определения лучистого теплового потока использовалась методика, описанная в [4]. В ходе исследования установлена возможность дросселирования двигателя до 28% от номинального режима. При данной величине дросселирования обеспечивается предельно возможное охлаждение стенок

камеры без прогара. Данное значение дросселирования двигательной установки позволяет получить схема охлаждения камеры, которая подразумевает разделение потоков охладителя и использование петлевого решения на срезе сопла, что позволяет снизить расход горючего на охлаждение. Для надежного охлаждения подвод охладителя организован на наиболее теплонапряженном участке камеры.

Список литературы

1. Гахун Г.Г. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей. М: Машиностроение, 1989. - 424 с.;
2. Кудрявцев В.М., Васильев А.П. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. – М.: Высшая школа, 1975. – 656 с.;
3. Беляков В.А., Василевский Д.О. Перспективные схемные решения безгазогенераторных двигателей // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2019. №58.;
4. Затонский А.В., Орлин С.А., Пелевин Ф.В. Расчет теплового состояния камеры ЖРД с использованием ЭВМ. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 71 с.

Новая параметризация скорости реакции синтеза $d+{}^3\text{He}\rightarrow p+{}^4\text{He}$ и уточнение критерия Лоусона для термоядерных устройств на ее основе

Годес А. И.¹, Исхак А.Б., Шаблов В.Л.

ИАТЭ НИЯУ МИФИ

e-mail: godes.ai@yandex.ru

Для корректного описания кинетических процессов в устройствах термоядерного синтеза необходимо знать с достаточно высокой степенью точности (порядка 5%) сечения σ и скорости реакций $\langle\sigma v\rangle$. Изменение в величине $\langle\sigma v\rangle$ даже на несколько процентов может заметно повлиять на параметры перспективных установок [1].

Целью данной работы определение температурной зависимости скорости реакции $d+{}^3\text{He}\rightarrow p+{}^4\text{He}$ в диапазоне 0-400 кэВ. Актуальность работы связана с тем, что к настоящему времени не было дано удовлетворительного теоретического описания сечения этой реакции, согласующегося с наиболее надежными экспериментальными данными в диапазоне энергий 0-1000 кэВ [2,3].

Для сечения и скорости данной реакции были разработаны различные параметризации [4-6], данные которых заметно отличаются, особенно в области резонанса ядра ${}^5\text{Li}^{**}$. Эти отличия, в основном, связаны с тем, что они создавались в разное время и потому базировались на различающемся экспериментальном материале. Единственная параметризация, согласующаяся с имеющимися экспериментальными данными – это параметризация [6], включенная в базу данных NACRE [7]. При определении температурной зависимости скорости реакции в [6] используется специальная процедура аппроксимации экспериментальных данных по сечению, в основе которой лежит приближение Брейта-Вигнера. В то же время существует достаточно простой и эффективный теоретический способ описания околороговых, в том числе резонансных, ядерных реакций – приближение эффективного радиуса (ПЭР) [8,9], которое является безмодельным подходом и оперирует с экспериментально наблюдаемыми величинами-длиной рассеяния, эффективным радиусом и параметром формы потенциала. ПЭР использовалось в [10,11] для

описания сечения данной реакции, однако в этих работах не использовались или использовались частично данные [2,3].

Сечение в ПЭР описывается формулой [11,12]

$$\sigma_r(E) = \frac{8\pi}{3k^2} \frac{\beta(k)D(k)}{(\alpha(k) - 2h(\eta))^2 + (\beta(k) + D(k))^2},$$

где

$$D(k) = \frac{2\pi}{\exp(2\pi\eta) - 1} -$$

проницаемость кулоновского барьера, $h(k) = \operatorname{Re}\psi(i\eta) - \ln\eta = \operatorname{Re}\psi(i/k a_c) + \ln(k a_c)$,

$\psi(z)$ – логарифмическая производная гамма-функции или ψ – функция, $\eta = \frac{1}{k a_c}$ – кулоновский параметр, a_c – боровский радиус для пары d-³He,

$$\alpha(k) = \alpha_0 + \alpha_1 (k a_c)^2 + \alpha_2 (k a_c)^4$$

$$\beta(k) = \beta_0 + \beta_1 (k a_c)^2 + \beta_2 (k a_c)^4.$$

В работе были найдены 6 параметров ПЭР ($\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \beta_0, \beta_1, \beta_2$), с помощью которого удалось описать данные [2,3] в пределах экспериментальной точности в диапазоне энергий 0-800 кэВ. Эти параметры равны:

$$\alpha_0 = 0.1619, \alpha_1 = 0.14897, \alpha_2 = 0.0000488,$$

$$\beta_0 = 0.0183, \beta_1 = 0.000268, \beta_2 = 0.0024478.$$

На этой основе была рассчитана скорость реакции d+³He→p+⁴He в диапазоне 0-400 кэВ. Рассчитанные значения хорошо согласуются с данными [6,7]. Полученные результаты позволили уточнить критерий Лоусона, который использовался в форме, приведенной в [13]:

$$n\tau = 5.73 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}, T = 104 \text{ кэВ},$$

тогда как по данным [13]

$$n\tau = 6.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}, T = 105 \text{ кэВ}.$$

Приведенные результаты показывают их различие на уровне 12%, что связано как с учетом релятивистских эффектов в выражении для тормозного излучения, так и с использованием новых значений для скорости реакции синтеза.

Список литературы

1. Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Системы альтернативной термоядерной энергетики. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. - 200 с.
2. Moller W., Besenbaher F. A note on the ³He + D nuclear-reaction cross section. // Nuclear instruments and methods. -1980. –P. 111-114.
3. Krauss A., Becker H.W., Trautvetter H.P., Rolfs C., Brand K. Low-energy fusion cross sections of D+D and D+ ³He reactions//Nuclear Physics.-1987.-v.A465.-P.150-172.
4. Козлов Б.Н. Скорости термоядерных реакций // Атомная энергия. –1962.-т. 12, вып. 3.- С. 238-240.
5. Bosch H.S., Hale G.M. Fusion cross-sections and thermal reactivities // Nuclear Fusion. -1992. –V. 32. -№4. – P.620-622.
6. G.R. Caughlan, W.A. Fowler, Thermonuclear reaction rates V// Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics.-1988.-V.40.-P.283-334.

7. Xua Y., Takahashia K., Gorielya S., et al. NACRE II: an update of the NACRE compilation of charged-particle-induced thermonuclear reaction rates for nuclei with mass number $A < 16$ // *Astronomy&Astrophysics*.-2013.-v.549.-A106.-10p./doi.org/10.1051/0004-6361/201220537.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика т.3. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. – М.: Наука, 1974. – 752 с.
9. Bethe A. H. Theory of the effective range in nuclear scattering. // *Physical Review*.-1949.-V.76.-№1.-PP.38-50.
10. Барит И.Я., Сергеев В.А. Анализ резонансных реакций $\text{H}^3(\text{d},\text{n})\text{He}^4$ и $\text{He}^3(\text{d},\text{p})\text{He}^4$ в приближении эффективного радиуса взаимодействия // *Труды ФИАН им. П.Н. Лебедева*. – 1969. –Том 44. – С. 3-15.
11. Карнаков Б.М., Мур В.Д., Поздняков С.Г., Попов В.С. Полюса и резонансы в низкоэнергетическом рассеянии заряженных частиц // *Ядерная физика*. -1991. – т. 54. –вып. 2(8). – С.400-403.
12. Годес А.И., Шаблов В.Л. Резонансная модель связанных каналов в задаче рассеяния $\text{d}-^3\text{He}$ в окрестности энергии состояния $(3/2)^+$ ядра ^5Li /Менделеев. *Электронный научный журнал*.-2019.-выпуск 3(3).-С.8-14.
13. Баско М.М. Физические основы инерциального термоядерного синтеза.- М:ИТЭФ.-2007.-147с.

Детермализация рекомбинационных каналов в GaAs солнечных элементах с GaInAs квантовыми точками

Минтаилов М. А., Евстропов В.В., Минтиров С.А., Надточий А. М., Салий Р. А.,
Калужный Н. А.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: mamint@mail.ioffe.ru

Одним из направлений повышения эффективности (кпд) современных GaInP/GaAs/Ge много-переходных (МП) солнечных элементов (СЭ) является введения в область р-п перехода субэлементов квантово-размерных объектов (квантовых ям, квантовых точек (КТ) и др.) [1-5] т. е. объектов с экситонным характером рекомбинационно-генерационных процессов. Такие объекты обеспечивают поглощение фотонов с энергией ниже ширины запрещённой зоны субэлемента и последующий тепловой выброс электронов в зону проводимости и дырок в валентную зону. В результате появляются свободные электронно-дырочные пары, способные разделяться электрическим полем р-п перехода и, следовательно, создавать фотовольтаический эффект: увеличивать фото-генерированный ток, что должно привести к увеличению эффективности. Однако включение квантовых объектов приводит к возникновению дополнительных каналов рекомбинации, повышающих общий ток насыщения р-п перехода [6,7] и, как следствие, уменьшающих вырабатываемое субэлементом напряжение. В работе продолжено исследование температурных зависимостей фотолуминесценции (ФЛ) массива КТ [8], предназначенных для встраивания в GaAs субэлемент GaInP/GaAs/Ge МП СЭ. На основании анализа спектров фотолуминесценции определены температуры детермализации различных типов КТ и смачивающего слоя, а также произведен расчёт токов насыщения GaAs субэлемента.

Спектры ФЛ были аппроксимированы суммой трёх пиков, описываемых распределением Гаусса. Пик с наибольшей энергией фотона, хорошо проявлявшийся при низких

температурах в области 1.35 эВ, соответствовал расчётному положению ямо-подобного смачивающего слоя. Пики от квантовых точек располагались достаточно близко по энергиям, поэтому их сумма проявлялась как один «уширенный» пик. Достаточно отчётливо положения обоих пиков КТ различались при температуре 300К в областях энергий фотона 1.14 эВ для КТ первого типа (КТ₁) и 1.05 эВ для КТ второго типа (КТ₂). При низких температурах проявлялся также пик от GaAs матрицы.

В результате проведенной аппроксимации были получены зависимости интенсивности ФЛ от температуры для четырёх наблюдаемых переходов. Эти зависимости позволили сделать вывод, что КТ₁ детермализованы при температурах ниже 150 К, а КТ₂ при температурах ниже 90 К. В этих диапазонах интенсивность ФЛ не зависит от температуры, что свидетельствует об отсутствии термализации носителей. Детермализация носителей в смачивающем слое не наблюдалась, однако в области от 20 – 50 К наблюдалось замедление роста интенсивности ФЛ от пика смачивающего слоя. Интересным является тот факт, что точки первого типа детермализуются быстрее, хотя их эффективная ширина запрещенной зоны больше и значит у них меньшие энергии захвата электронов и дырок. Известно, что поверхностная плотность таких КТ является меньшей, и потому рекомбинация при токопрохождении в основном должна идти через более «глубокие» КТ₂.

Используя подход в [7] был проведен расчёт тока насыщения исследуемого СЭ при различных температурах. Для этого, для расчёта предельных токов насыщения разных каналов был использован температурный токовой инвариант [9]. Доля каждого из каналов вычислялась согласно высотам пиков каналов на спектрах фотолюминесценции. Расчёт позволил определить характер зависимости тока насыщения GaAs субэлемента от температуры.

Список литературы

1. Ekins-Daukes, et. al., Appl. Phys. Lett. 75 pp 4195-4197, 1999
2. Browne B, et. al., AIP Conf. Proc. CPV-9 (AIP) pp 3–5, 2013
3. Guimard D, et. al., Appl. Phys. Lett. 96, p. 203507, 2010
4. Toprasertpong K, et. al., Prog. Photovolt: Res. Appl. 24, pp 533-542, 2016
5. Mintairov S A, et. al., Nanotechnology 26, p. 385202, 2010
6. M. A. Mintairov, et. al., Appl. Phys. Express 13, p. 075002, 2020
7. М.А. Минтаиров, и др., ПЖТФ, 46 (12), с. 30, 2020
8. Р.А. Салий, и др., ФТП, 54(10), с. 1079, 2020
9. M. A. Mintairov, et. al., J. Phys.: Conf. Ser. 1697, p. 012170, 2020

Определение спектральной фоточувствительности многопереходных солнечных элементов при радиационных испытаниях

Левина С. А.¹, В.М. Емельянов, М.А. Минтаиров, М.В. Нахимович, М.З. Шварц

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: levina@mail.ioffe.ru

Для солнечных элементов (СЭ) космического назначения радиационная стойкость является ключевым показателем, определяющим энергетическую вооруженность и задающим эксплуатационный потенциал космического аппарата. Оценка таких ресурсов прогнозируется по результатам измерений спектральных и вольтамперных характеристик

СЭ, проводимых в наземных условиях. И если для однопереходных СЭ давно существует стандартный протокол определения нормируемых фотоэлектрических характеристик [1], то для высокоэффективных (с КПД более 30%) многопереходных (МП) СЭ требуется дополнительно учитывать ряд важных оптоэлектронных взаимодействий между фотоактивными субэлементами (р-п переходами), имеющих место в монолитной гетероструктуре [2].

Во-первых, спектральные характеристики МП СЭ могут быть получены только при сильном токовом рассогласовании между субэлементами, задаваемом световым смещением. В результате в оптически смещенных субэлементах часть фотогенерированных носителей заряда излучательно рекомбинирует, а возникающий поток вторичного рекомбинационного (люминесцентного) излучения поглощается в слоях более узкозонных субэлементов с генерацией дополнительного фототока. Установленный режим оптической связи и результирующий токовый баланс легко нарушается при световом воздействии на любой из субэлементов. В результате регистрируемые значения спектрального отклика узкозонных субэлементов оказываются заниженными. Причем величина ошибки будет зависеть от установленного уровня светового смещения, эффективности процессов излучательной рекомбинации и результативности оптических связей между субэлементами [3]. Погрешности в регистрации спектральных характеристик приводят к ошибочным данным по КПД СЭ и оценкам долговременной энергопроизводительности солнечных батарей.

Во-вторых, при испытаниях СЭ на воздействие эксплуатационных факторов (прежде всего это оценки радиационной стойкости и температурной стабильности) эффективность оптических взаимодействий между субэлементами будет меняться, внося дополнительные неопределенности в оценки нормируемых фотоэлектрических характеристик.

В данной работе методика определения спектральных зависимостей фоточувствительности МП СЭ с оптически связанными р-п переходами [3] применена к образцам на результативность люминесцентных взаимодействий которых влияет радиационное облучение. По мере увеличения дозы облучения и интегрального уровня радиационных повреждений многослойной гетероструктуры в р-п переходах постепенно происходит смена доминирующего механизма рекомбинации (с излучательной на безызлучательную). Показано, что если методика измерений не принимает во внимание специфику оптических взаимодействий и не отслеживает деградацию оптических связей, то вместо снижения (что является естественной реакцией фотопреобразователя на радиационные повреждения) может наблюдаться увеличение фототока узкозонного (принимающего люминесцентное излучение) субэлемента. Соответственно с увеличением дозы облучения будет регистрироваться рост фототока субэлемента, формируя «отрицательную» деградационную зависимость, что, очевидно, является абсолютно неприемлемым при определении КПД и радиационной стойкости МП СЭ космического назначения.

Список литературы

1. K. Emery, Measurement and Characterization of Solar Cells and Modules, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Chapter 16, 2003
2. E. Barrigón, P. Espinet-González, Y. Contreras, I. Rey-Stolle, Why can't I measure the external quantum efficiency of the Ge subcell of my multijunction solar cell?, in AIP Conf. Proc., 2015.
3. S.A. Levina, V.M. Emelyanov, E.D. Filimonov, M.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev "Cascade optical coupling and quantum efficiency measurements of MJ SCs", Solar Energy Materials & Solar Cells, 213 (2020) 110560, doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110560

Влияние позиционирования массива квантовых точек в p-n переходе фотопреобразователя на его фотоэлектрические характеристики

Салий Р. А.¹, Минтаиров М.А.¹, Минтаиров С.А.¹, Шварц М.З.¹, Калужный Н.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: r.saliy@mail.ioffe.ru

На сегодняшний день самыми эффективными являются фотопреобразователи (ФЭП) на основе АЗВ5 полупроводников, а среди них многопереходные (каскадные) ФЭП, которые используются как для наземных концентраторных, так и для космических применений. Для улучшения фотоэлектрических характеристик таких ФЭП, разрабатываются подходы с использованием квантоворазмерных структур, таких как квантовые ямы, квантовые точки (КТ), а также их комбинации. Существует концепт ФЭП со встроенными массивами квантоворазмерных структур, в рамках которого предполагается достичь согласования по величине фотогенерируемого тока субэлементов многопереходной структуры и, в перспективе, увеличить ее КПД [1]. Однако основная проблема встраивания в структуру ФЭП массивов КТ, заключается в падении напряжения холостого хода (V_{oc}) с ростом количества рядов КТ [2]. Основная причина падения V_{oc} связана с внесением дополнительных рекомбинационных уровней в запрещенную зону материала матрицы и изменением механизмов токопрохождения, а вместе с этим, темновых токов насыщения, являющимися фундаментальными параметрами p-n перехода. Однако ряд работ [3-4] показывает, что особые подходы к дизайну активной области ФЭП, а в частности изменение расположения массива КТ в пределах i-области p-n перехода, оказывает существенное влияние на значения КПД и V_{oc} .

Объектом исследований в данной работе был GaAs ФЭП со встроенным массивом InGaAs КТ [5]. GaAs ФЭП с увеличенным фотогенерированным током, за счет встраивания квантоворазмерных объектов в его гетероструктуру, может быть эффективно использован в качестве субэлемента в многопереходном ФЭП, для достижения токового баланса [6].

Целью работы было исследование расположения массивов КТ, встроенных в однопереходный GaAs ФЭП. Для того чтобы оценить влияние расположения массивов КТ на его фотоэлектрические характеристики были выращены 4 структуры ФЭП: реперный ФЭП, не содержащий массивов КТ; ФЭП с КТ, расположенными в середине i-области; ФЭП с КТ, смещенными к эмиттеру; ФЭП с КТ, смещенными к базе. Массивы КТ во всех ФЭП содержали 5 рядов КТ. Для всех выращенных образцов были измерены спектральные характеристики внутреннего квантового выхода (Q_{int}). По полученным спектрам Q_{int} были рассчитаны вклады в фотогенерированный ток, а также отдельно вклады массивов КТ. Также, при различных значениях концентрации солнечного излучения была измерена величина V_{oc} .

Для всех ФЭП с КТ полученные зависимости Q_{int} продемонстрировали заметное уширение спектральной фоточувствительности за краем поглощения GaAs. Сравнение полученных фотоэлектрических характеристик показало, что позиционирование массива КТ на границе «эмиттер – i-область» позволяет получить наибольший прирост фотогенерированного тока. Прирост фототока в ФЭП с КТ, смещенными к эмиттеру, составил приблизительно $0,8 \text{ mA/cm}^2$ по сравнению с реперным ФЭП без КТ. Однако, не смотря на прирост фототока, наблюдалось заметное падение величины V_{oc} ($\sim 0.2 \text{ V}$). Образец, в котором массив КТ был смещен к базе, продемонстрировал меньшую, по сравнению с двумя другими образцами, спектральную фоточувствительность в длинноволновой области

спектра. При этом было показано, что перемещение массива КТ к границе «i-область – база» уменьшает темновой ток насыщения и увеличивает V_{oc} . Уменьшение V_{oc} относительно реперного ФЭП по сравнению с другими образцами составило всего ~ 0.1 В.

По результатам анализа полученных фотоэлектрических характеристик было показано, что за счет правильного позиционирования массива КТ на границе «i-область – база», можно нивелировать эффект падения напряжения в ФЭП с КТ.

Список литературы

1. Algora J C, Rey-Stolle I. Handbook of concentrator photovoltaic technology (John Wiley & Sons, UK, 2016)
2. Lopez N et al. 2007 *Sol. Ener. Eng.* **129** p. 319
3. Kalyuzhnyy N A et al. 2016 *Progr. Photovolt.* **24** 1261
4. Блохин С А и др. 2009 *ФТП* **43** 4
5. Salii R A et al. 2020 *Semiconductors* **54** 1267–1275
6. Mintairov M A et al. 2020 *Appl. Phys. Express* **13** 6

Электрические свойства кремниевых высоковольтных фотопреобразователей на основе сквозных термомиграционных каналов

Середин Б. М.¹, Ломов А.А.², Заиченко А.Н.¹, Гаврус И.В.¹, Пащенко А.С.^{1,3}, Малибашев А.В.¹, Рубан Л.В.⁴

¹ЮРГПУ (НПИ), ²ФТИАН РАН, ³ЮНЦ РАН, ⁴АО Сатурн

e-mail: seredinboris@gmail.com

Идея создания высоковольтных фотопреобразователей (ВФЭП) известна уже давно [1, 2]. Такие ВФЭП предоставлялись авторами как твердотельные матрицы из последовательно скоммутированных микроэлементов, расположенных перпендикулярно облучаемой поверхности. Твердотельная коммутация микроэлементов внутри ВФЭПа должна была способствовать одновременному увеличению вырабатываемого напряжения, снижению омических потерь и упрощению сборки солнечных модулей. Варианты конструкции ВФЭП оптимизировать как для космического применения, так и для наземного, в частности, при преобразовании концентрированного солнечного излучения [3, 4]. Предлагались разные методы изготовления сквозных *p-n* переходов микроэлементов ВФЭП, среди которых метод термомиграции (по другому названию, метод зонной перекристаллизации градиентом температуры) [5, 6] обладал явными преимуществами и давал большую надежду в создании сквозных, однородно легированных акцепторами каналов. Однако полученные в то время ВФЭП имели низкую снимаемую мощность, большей частью обусловленную слабой воспроизводимостью процесса термомиграции. Обилие процессов и факторов, сопровождающих синхронную термомиграцию ансамбля жидких зон сквозь подложку, усложняло оптимизацию технологии ВФЭП.

В последние годы интерес к термомиграции вновь представлен публикациями: разработаны методики формирования локальных жидких зон [7, 8], предложены подходы конструирования специализированного термического оборудования [9], получены данные по фундаментальным свойствам термомиграционных *p*-каналов [10] и исследовано влияние термомиграции на эффективность преобразования энергии [11]. Авторы

настоящего сообщения применили упомянутые разработки для получения ВФЭП и исследовали их фотоэлектрические свойства.

Для проведения исследований использовались пластины кремния ЭКЭФ-20 толщиной 500 мкм. Ширину каналов и шаг между ними изменяли соответственно от 50 до 200 мкм и от 2 до 10 мм. В качестве растворителя кремния применяли алюминий. Жидкие зоны толщиной от 20 до 60 мкм формировали избирательным смачиванием [8] при температуре 800 – 850°C. Процесс термомиграции зон проводили в вакуумной термической установке [9]. Градиент температуры был направлен перпендикулярно плоскости (111) кремниевых пластин и составлял 30 – 50 К/см при температуре из диапазона 900 – 1200°C. При этом время термомиграции массива жидких зон соответственно составляло 1.5 – 1.0 час. После термомиграции Si-Al зоны испарялись с тыльной стороны пластин в объеме установки в течение дополнительного термического отжига (1 – 4 ч), которые также применялись для регулирования градиента концентрации примеси в вертикальных *p-n*-переходах. После термомиграции пластины механически утоняли с двух сторон до толщины 300 мкм. Далее кратковременной диффузией бора получали на фронтальной стороне пластины горизонтальный *p*-слой (глубина 0.5 мкм). Затем этот фронтальный *p-n* переход разделяли вблизи рабочих вертикальных *p-n* переходов пазами и наносили антиотражающее покрытие на основе тетраэтоксититана. На тыльной стороне создавали контакты, последовательно нанося Ti, Ti+Pd, Ag, и этим же материалом закоротки паразитных *p-n* вертикальных переходов.

Изучение электрических свойств образцов проводилось измерением световых нагрузочных вольт-амперных характеристик на импульсном имитаторе солнечного излучения ЗАО «Техноэксан». Условия измерения соответствовали атмосферной массе AM 1.5D, плотность мощности падающего излучения 1000 Вт/м². В ходе исследования определялись: плотность тока короткого замыкания (J_{sc}), напряжение холостого хода (U_{oc}), фактор заполнения ВАХ (FF), коэффициент полезного действия (Eff). В результате исследований получены 15 переходные ВФЭП общей площадью 10.47 см², которые имели: $J_{sc} = 32.13$ мА/см², $U_{oc} = 8.55$ В, FF = 68.14 и Eff = 13.84 %. Для достижения данных характеристик термомиграция реализована при 1100 °C и дополнительном термическом отжиге течении 2 часов.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 19-07-00306 и Государственного задания ЮРГПУ(НПИ).

Список литературы

1. U.S. Pat N2919299. 29.12.1959
2. U.S. Pat N3015762. 02.01.1962
3. Ландсман А.П., Стребков Д.С. Гелиотехника. 1970. №2, С.21-27.
4. Goodrich J., Chapple-Socol J., Allendore G., Frank R., Solar Cells. 1982. Vol. 6, №1. P. 87-101.
5. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин, В.П. Попов. М.: Металлургия, 1987. 232 с.
6. Дорошенко В.Г., Закс М.Б., Калашьян и др. Гелиотехника, 1979, №4, с.14 -18)
7. Б.М. Середин, В.П. Попов, А.Н. Заиченко /Вестник Сев.-Кав. федерального ун-та. 2017. № 1 (58). с.7 – 13.
8. В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин, Б.М. Середин /Электронная техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы. 2015. №2-3 (236-237). С.105-115.
9. В.Н. Лозовский, Б.М. Середин, А.С. Полухин, А.И. Солодовник. //Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2015. №5 (239). С.65-76.

10. V. N. Lozovskii, A. A. Lomov, L. S. Lunin, B. M. Seredin, and Yu. M. Chesnokov. Semiconductors, 2017, Vol. 51, No. 3, pp. 285–289.
11. В.Н. Лозовский, В.П. Попов, Б.М. Середин. ВАНТ Сер. Физ. радиац. возд. на радиоэлектрон. аппарат. 2015, 3, 57.

Применение сегнтоэлектриков для повышения эффективности привода электротранспортных средств

Зубцов В. И.¹

¹ПГУ, Белоруссия

e-mail: subcv@rambler.ru

Одним из решений существующих серьезных экологических проблем является возможность замены транспортных средств на двигателях внутреннего сгорания средствами на электротяге. Основным препятствием этому является малая энергоемкость аккумуляторов и, следовательно, малый пробег электротранспорта на одной их зарядке (свободный ход). Кроме того, оставляют желать лучшего такие характеристики аккумуляторов как время зарядки, срок службы, надежность и др.

Разработана энергоустановка (ЭУ) [1] для увеличения эффективности привода электротранспортных средств с использованием многокомпонентной сегнетопьезоактивной керамики. ЭУ работает совместно со всеми видами аккумуляторов и позволяет достичь той же производительности (при таком же свободном ходе электротранспортных средств) с меньшим количеством аккумуляторов в 3...5 раз. Это дает возможность уменьшить стоимость электромотоцикла, примерно, на 30...35% в зависимости от модификации сегнетопьезоактивной керамики и электрической цепи, время зарядки аккумуляторов в 3...5 раз, затраты на их утилизацию по истечению срока службы и, естественно, вес электромотоцикла.

Управление электроупругостью сегнтоэлектрических элементов в установке дает возможность повышать эффективность преобразования энергии, т. е. увеличивать удельную энергию аккумуляторов. В результате происходит увеличение электрической мощности P на выходе ЭУ [1].

Понятно, что эффективный электропривод для электротранспортных средств должен иметь оптимальную массу M по отношению к электрической мощности P . Исследованиями установлено, что увеличение (уменьшение) электрической мощности в нагрузке в 2 раза ведет к росту (уменьшению) массы в 2 корня из двух раз, в 3 раза – в 3 корня из трех раз и т.д. [1]. Другими словами, эти изменения закономерны и происходят в соответствии с геометрическими прогрессиями. Так, например, подходящие M для электровелосипеда с $P = 0.45$ кВт, электроскутера с $P = 3.0$ кВт, электромотоцикла с $P = 5.0$ кВт и миниавтомобиля с $P = 10.0$ кВт будут (ориентировочно) 0.21 кг, 3.62 кг, 7.8 кг и 21.8 кг, соответственно.

Многокомпонентные сегнетопьезоактивные керамики, имеют важные для электромеханических преобразователей [2] характеристики: высокие пьезо- и диэлектрические свойства: механическую прочность и сегнтожесткость. Они отвечают специфическим требованиям: серийной пригодности, компактности, технологичности и др. [3,4].

Сегнетоэлектрики относительно дешевы в производстве, в то время как производство литий ионных аккумуляторов очень дорогое и только проектируемые в настоящее время более эффективные аккумуляторы будут еще дороже.

Таким образом, применение сегнетоэлектриков для повышения эффективности привода электротранспортных средств является очень перспективным.

Список литературы

1. Zubtsov V I, Zubtsova E V and V V Derugin The technology of increasing the energy density of batteries by controlling the degree of polarization of ferroelectrics. Jornal of Physics: Coferennce Series: 1400, 066061, 2019
2. Аронов В.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. - Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 270 с.
3. Zubtsov V.I. Control of the physical properties of materials using piezoelectrics. Riga: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020. - 262 p.
4. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. - М.: Энергия, 1978. – 245 с.

Спектроскопическое проявление туннельной связи между квантовыми ямами CdTe в гетероструктуре CdTe/ZnTe

Философов Н. Г.¹, Агекян В.Ф.¹, Будкин Г.², Karczewski G.³, Серов А.Ю.¹, Резницкий А.Н.²

¹СПбГУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

³Institute of Physics PAN, Warsaw, Poland

e-mail: n.filosofov@spbu.ru

Изучены спектры фотолюминесценции (ФЛ) асимметричной системы двойных квантовых ям CdTe/ZnTe в серии образцов, содержащих два слоя CdTe номинальной толщиной 2 и 4 монослоя (МС), образованных осаждением в режиме атомно-слоевой эпитаксией в матрице ZnTe. Образцы были выращены на подложках GaAs(100) и включали буферный слой ZnTe толщиной 1 мкм, две квантовые ямы CdTe, разделенных ZnTe барьером толщиной 40, 70, 100, 130 и 160 МС, и покрывающий слой ZnTe толщиной 50 нм. Исследована зависимость относительной интегральной интенсивности ФЛ мелкой (I_1) и глубокой (I_2) квантовых ям при надбарьерном возбуждении от интенсивности накачки (J) при возбуждении лазерами с различными длинами волн излучения.

Установлено, что в образце с барьером толщиной в 40 МС величина отношения I_1/I_2 зависит от интенсивности возбуждения и в пределе слабой интенсивности накачки экспоненциально растет по мере уменьшения начальной кинетической энергии возбуждаемых светом электронно-дырочных пар. Как показано в нашей работе [1], такой вид зависимости отношения I_1/I_2 от длины волны возбуждения следует ожидать, если барьер в 40 МС туннельно прозрачен для одиночных носителей, в то время как вероятность туннелирования между ямами горячих экситонов оказывается меньше вероятности их излучательной рекомбинации. В то же время для образцов с толщинами барьера в 70 МС и более, зависимость отношения I_1/I_2 от интенсивности возбуждения J одинакова при возбуждении различными длинами волн. Этот результат позволяет сделать вывод, что при толщине ZnTe барьера 70 МС и более квантовые ямы с номинальной толщиной 2 и 4 МС являются туннельно-независимыми как для экситонов, так и для одиночных носителей.

Вместе с тем, обнаружено, что в спектрах ФЛ образцов с ямами, разделенными широкими барьерами, отношение I_1/I_2 растет с ростом интенсивности возбуждения. Этот результат можно объяснить тем, что на процесс энергетической релаксации влияет не только туннелирование носителей заряда из мелкой квантовой ямы в глубокую, но и уход носителей на безызлучательные центры рекомбинации. В этом случае поведение I_1/I_2 как функции J с ростом интенсивности накачки отражает постепенное насыщение центров безызлучательной рекомбинации для электронов и дырок, при этом скорости насыщения центров различны для мелкой и глубокой квантовых ям. Это различие можно объяснить разной степенью локализации электронных волновых функций в этих ямах.

Для проверки влияния безызлучательной рекомбинации на зависимость интенсивности люминесценции квантовых ям от уровня оптического возбуждения мы исследовали эти зависимости на двух образцах CdTe/ZnTe, содержащих одиночные квантовые ямы CdTe номинальной толщиной 2 и 4 МС. Оказалось, что интенсивность люминесценции образца с мелкой ямой растет быстрее с ростом интенсивности возбуждения относительно

излучения образца с глубокой ямой. Это подтверждает существенную роль ухода носителей заряда на центры безызлучательной рекомбинации в исследованном наборе образцов.

Список литературы

1. V. Agekyan, G. Budkin, N. Filosofov, *et all.*, J. of Lumin., 230 (2021) 117762.

Индукцированные переменным полем переходы “изолятор-полуметалл-изолятор” в 2D кристаллах со смещенными дираковскими точками

Кухарь Е. И.¹, Крючков С.В.^{2,3}

¹ВИТИ НИЯУ МИФИ

²ВГСПУ

³ВолгГТУ

e-mail: eikuhar@yandex.ru

Современное развитие наноэлектроники непосредственно связано с созданием новых материалов различной размерности, включая 2D системы моноатомной толщины (например, графен). Относительно недавно получен новый тип 2D кристаллов, для носителей заряда которых характерна существенная анизотропия закона дисперсии. В одном направлении электроны движутся подобно дираковским фермионам, в то время как в ортогональном направлении они движутся как нерелятивистские частицы с параболическим законом дисперсии. Такой класс материалов получил название полудираковских кристаллов [1]. Фосфорен – один из его представителей [2]. Анизотропные свойства могут проявлять носители заряда графена, если последний подвергнуть механическому напряжению. Вследствие этого дираковские точки смещаются по направлению друг к другу вплоть до их слияния, а гамильтониан такой системы приобретает «полурелятивистскую» форму [3]. Актуальным является исследование эффектов, возникающих в процессе облучения 2D структур высокочастотному (ВЧ) электромагнитному (ЭМ) излучению. Один из таких эффектов – реализация топологических изоляторов Флоке-типа (ФТИ) [4]. Ниже приведены результаты исследования модификации Флоке-спектра 2D кристалла со смещенными дираковскими точками. Модельный гамильтониан изучаемой системы имеет вид

$$\hat{H}(\mathbf{p}) = v_F p_x \hat{\sigma}_x + (\alpha p_y^2 - \Delta) \hat{\sigma}_y,$$

где $\hat{\sigma}_{x,y,z}$ – матрицы Паули, v_F – скорость на поверхности Ферми. Если $\Delta = 0$, то гамильтониан $\hat{H}$ описывает полудираковский кристалл, причем $m = 1/2\alpha$ – эффективная масса электрона, движущегося вдоль оси y . Если $\Delta \neq 0$, то существуют две дираковские точки, расположенные на расстоянии $2\sqrt{2m\Delta}$ друг от друга в $\mathbf{p}$ -пространстве.

Указанная структура подвергается действию ВЧ ЭМ волны, распространяющейся вдоль оси z и имеющей круговую поляризацию. Векторный потенциал поля равен ($c=1$)

$$\mathbf{A}^{\text{ac}} = \frac{E_0}{\omega} (\sin \omega t, \cos \omega t).$$

Здесь E_0 и ω – амплитуда и частота электрической составляющей волны соответственно. Состояние электрона в этом случае описывается спинором u , удовлетворяющим уравнению ($\hbar = 1$)

$$-i \frac{\partial u}{\partial t} + \hat{H}(\mathbf{p} + e\mathbf{A}^{\text{ac}})u = \tilde{\varepsilon}u,$$

где $\tilde{\varepsilon}$ – Флоке-спектр, который вычислен путем усреднения вышеуказанного уравнения по ВЧ составляющим поля и спинора u . При этом полагались выполненными условия $\omega \gg \Delta$ и $\omega \gg v_F \sqrt{m\Delta}$. В результате получено следующее выражение

$$\tilde{\varepsilon} = \pm \Delta \sqrt{q_x^2 + (q_y^2 - 1 + W)^2 + \tilde{W}^2 q_y^2}.$$

Здесь $q_x = v_F p_x / \Delta$, $q_y = p_y / \sqrt{2m\Delta}$, $W = p_E^2 / 4m\Delta$, $p_E = eE_0 / \omega$, $\tilde{W} = 4W\sqrt{2\mu} / \nu$,
 $\mu = mv_F^2 / \Delta$, $\nu = \omega / \Delta$.

Анализ результатов вычислений показал следующее.

1) Флоке-спектр 2D кристалла имеет сложную структуру: (а) поверхность $\tilde{\varepsilon}(\mathbf{p})$ имеет как точки минимума, так и седловые точки, (б) топология поверхности $\tilde{\varepsilon}(\mathbf{p})$ зависит от интенсивности ВЧ поля.

2) Увеличение интенсивности ВЧ поля ведет к динамическому наведению щели так, что 2D структура проявляет себя как ФТИ. Это продолжается до тех пока параметр W не достигнет значения $W=1$.

3) Если $W=1$, то возникает одна новая дираковская точка вместо двух, существовавших до включения ВЧ поля. Эта ситуация соответствует состоянию полуметалла с анизотропным спектром. Однако в данном случае полуметаллическое состояние является динамически наведенным.

4) Динамически наведенное полуметаллическое состояние не является устойчивым. Как только параметр W превысит 1, снова возникает квазиэнергетическая щель. Таким образом, мы имеем дело с индуцированным ВЧ полем переходом «изолятор – полуметалл – изолятор», возможным для 2D кристаллов с изначально смещенными дираковскими точками.

Список литературы

1. Mawrie A., Muralidharan B., Direction-dependent giant optical conductivity in two-dimensional semi-Dirac materials, Physical Review B, Vol. 99, p. 075415, 2019.
2. Ezawa M., Highly anisotropic physics in phosphorene, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 603, p. 012006, 2015.
3. Pyatkovskiy P.K., Chakraborty T., Dynamical polarization and plasmons in a two-dimensional system with merging Dirac points, Physical Review B, Vol. 93, p. 085145, 2016.
4. Wang Y.H., Steinberg H., Jarillo-Herrero P., Gedik N., Observation of Floquet-Bloch states on the surface of a topological insulator, Science, Vol. 342, pp. 453-457, 2013.

Теория эффектов оптического выстраивания и оптической ориентации в коллоидных наноплателетах.

Смирнова О. О.¹, Родина А.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: smirnova.olga248@gmail.com

Методы поляризационной спектроскопии позволяют получить информацию о тонкой структуре и динамических процессах в наноструктурах. При поглощении циркулярно поляризованного света согласно правилам отбора угловой момент фотонов передается системе и происходит выборочное заселение уровней. Если скорость рекомбинации оказывается больше скорости релаксации, то в эксперименте будет наблюдаться циркулярная поляризация фотolumинесценции (ФЛ) - эффект оптической ориентации [1]. В случае возбуждения линейно поляризованным светом может наблюдаться эффект оптического выстраивания.

В коллоидных наноплателетах сильное размерное квантование и диэлектрический контраст усиливают обменное взаимодействие электрона и дырки, что приводит к расщеплению экситонных подуровней. Нижними по энергии оказываются уровни темного экситона (с проекцией $F = \pm 2$ на ось квантования), сдвинутые ниже уровней светлого экситона (с проекцией полного момента $F = \pm 1$) на величину порядка $\Delta E_{AF} \sim 5$ мэВ [2]. При этом времена релаксации между спиновыми подуровнями светлого экситона, а также из светлых состояний в темные обычно намного короче времен излучательной рекомбинации. Эффекты оптической ориентации и оптического выстраивания в таких условиях не проявляются. Однако недавно оба эффекта наблюдались экспериментально в наноплателетах CdSe с оболочкой CdS, в которых расщепление $\Delta E_{AF} \sim 2$ мэВ, но тем не менее превышает тепловую энергию при низких температурах.

В данной работе теоретически исследованы условия возникновения эффектов оптического выстраивания и оптической ориентации в ансамбле коллоидных наноплателетов. Изучена зависимость интегральной поляризации от температуры и внешнего магнитного поля и временная зависимость при низких температурах. Особое внимание уделено роли спин-зависимой релаксации и рекомбинации.

Поляризация ФЛ представляется суммой поляризаций излучения светлого и темного экситона, взвешенных с соответствующими долями интенсивности относительно суммарного излучения.

Анизотропия формы в плоскости наноплателета расщепляет состояния светлого экситона на состояния $|X\rangle, |Y\rangle$. При усреднении по произвольной ориентации наноплателетов в плоскости подложки термодинамический вклад в линейную поляризацию исчезает и остается только поляризация, связанная с линейно поляризованным возбуждением.

Если релаксация в темные состояния медленная, то при резонансном заселении светлых состояний будет преимущественно наблюдаться поляризация светлого экситона, определяющаяся соотношением времени жизни светлого экситона и времени релаксации между состояниями $|X\rangle, |Y\rangle$.

Скорости релаксации из состояний $|X\rangle, |Y\rangle$ в состояния темного экситона $|X_F\rangle, |Y_F\rangle$ зависят от энергетического расстояния между уровнями, поэтому расщепление между светлыми состояниями δ приводит к появлению спин-зависимой релаксации.

При больших скоростях релаксации интегральная интенсивность при низких температурах определяется излучением темного экситона. При этом передаче поляризации в темный экситон противодействует спин-зависимая релаксация в темные состояния, спиновая релаксация между темными состояниями, а также их спин-зависимая излучательная рекомбинация, которая появляется благодаря подмешиванию соответствующих светлых состояний.

Магнитное поле смешивает $|X\rangle, |Y\rangle$ состояния светлого экситона, что приводит к уменьшению линейной и возникновению циркулярной поляризации в системе.

При повышении температуры ускоряются как релаксационные, так и рекомбинационные процессы и увеличивается относительный вклад излучения светлого экситона.

Таким образом, возможность наблюдения эффектов оптического выстраивания и оптической ориентации в ансамбле коллоидных наноплателетов зависит от характерных скоростей релаксации в системе и соотношения между энергетическими расщеплениями. Полученные результаты позволяют анализировать экспериментальные данные и определять характерные параметры экситонов в коллоидных наноплателетах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №19-52-12064).

Список литературы

1. A. Kastler, Science, 13, 158(3798), 214-21, 1967
2. E. Shornikova, Nanoscale, 10, 646, 2018

Динамика массива лазеров на основе микростолбиков с КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

Петренко А. А.¹, Ковалев А.В.¹

¹Университет ИТМО

e-mail: aapetrenko@itmo.ru

Структуры на основе микростолбиков представляют собой эпитаксиально выращенные планарные микрорезонаторы, включающие два распределенных брэгговских отражателя, а также расположенную в центральном слое резонатора активную область, в качестве которой могут выступать самоорганизованные квантовые точки [1]. Важной особенностью излучающих структур на основе микростолбиков с квантовыми точками является возможность их достаточно простого масштабирования, создания массивов, включающих множество микростолбиков, для дальнейшего интегрирования в фотонные интегральные схемы со сложными архитектурами [2].

В настоящей работе теоретически исследованы динамические режимы ансамбля излучающих микростолбиков с квантовыми точками при различных значениях параметра силы связи между ними на примере массива из трех сопряженных друг с другом идентичных микростолбиков.

Математическая модель представляет собой систему скоростных уравнений для массива сопряженных лазеров на основе квантовых точек [3]. Комплексная амплитуда $E_k(t)$ поля лазерного излучения k -го микростолбика из массива, включающего M идентичных микростолбиков, описывается следующим выражением:

$$\frac{dE_k(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1+i\alpha)G_k(t)E_k(t) + i\kappa(E_{k-1}(t) + E_{k+1}(t)),$$

где время t выражено в единицах времени жизни фотона в резонаторе (τ_p); $G_k(t)$ – функция, отвечающая за усиление в k -ом микростолбике: $G_k(t) = g(2\rho_k(t)-1)-1$; α – фактор уширения линии; g – дифференциальное усиление; κ – параметр связи, зависящий от эванесцентного сопряжения между микростолбиками. В качестве допущения в математической модели учтено, что локально микростолбик взаимодействует только с двумя соседними микростолбиками. Активная среда для k -го микростолбика с квантовыми точками моделируется следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{d\rho_k(t)}{dt} &= \eta_d \left[F(\rho_k(t), n_k(t)) - \rho_k(t) - (2\rho_k(t)-1)|E_k(t)|^2 \right], \\ \frac{dn_k(t)}{dt} &= \eta_w \left[J - n_k(t) - 2F(\rho_k(t), n_k(t)) \right],\end{aligned}$$

где $\rho_k(t)$ – вероятность заселенности точки; $n_k(t)$ – число носителей заряда в смачивающем слое; $\eta_d = \frac{\tau_p}{\tau_w}$ – отношение между временем жизни фотона и временем релаксации заселенности точки; $\eta_w = \frac{\tau_p}{\tau_w}$ – отношение между временем жизни фотона и временем τ_w релаксации носителей заряда смачивающего слоя; J – параметр накачки. Функция $F(\rho(t), n(t))$ характеризует обмен носителями заряда между точкой и смачивающим слоем:

$$F(\rho(t), n(t)) = R^{cap}(1 - \rho(t)) - R^{esc}\rho(t),$$

где $R^{cap} = Bn(t)$ – процесс захвата носителя заряда со скоростью $B \sim 10^2$, R^{esc} – зависящая от температуры скорость высвобождения носителя заряда в смачивающий слой, $R^{esc} \ll R^{cap}$ при комнатных температурах.

Были определены значения параметров модели, соответствующие экспериментальным данным [4]. Показанная хаотическая динамика массива лазеров на основе микростолбиков с квантовыми точками при $\kappa \sim 0.06...0.14$ позволяет предсказывать их потенциальное применение для создания новых типов фотонных устройств, например, компактных генераторов случайных чисел, обеспечивающих высокие скорости генерации (сотни Гбит/с) битовых последовательностей высокого качества.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект тематики научных исследований № 2019-1442.

Список литературы

1. Gies C., Reitzenstein S. Quantum dot micropillar lasers // Semiconductor Science and Technology – 2019. – Т. 34 – № 7 – С.073001.
2. Pammi V.A., Alfaro-Bittner K., Clerc M.G., Barbay S. Photonic Computing With Single and Coupled Spiking Micropillar Lasers // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics – 2020. – Т. 26 – № 1 – С.1–7.
3. Erneux T., Viktorov E.A., Mandel P. Time scales and relaxation dynamics in quantum-dot lasers // Physical Review A – 2007. – Т. 76 – № 2 – С.23819.
4. Kreinberg S. et al. Mutual coupling and synchronization of optically coupled quantum-dot micropillar lasers at ultra-low light levels // Nat. Commun. 2019. Т. 10, № 1. С. 1539.

Electron transmission properties in a system of two orthogonal quantum rings

Smolkina M. O.¹, Popov I.Yu.¹, Vorobiev A.M.¹

¹ITMO University

e-mail: vega14@mail.ru

Introduction

One of the basic questions in the field is as follows: How can one control the electron transport in a nanosystem? The most natural way is related to using of external electric or magnetic field. There are a number of works describing systems composed of quantum rings and the manipulation with the value of magnetic field to control the electron transmission in nanostructures [1-3]. In our work, we suggest a construction composed of two orthogonal rings (i.e., the graph is not plane) which allows one to control the electron transmission due to the direction of the magnetic field or, in other words, due to the construction orientation in respect to the field.

Theoretical model

We propose a possible model of a quantum device consisting of two identical quantum rings. One ring is in the XOY plane and the other is in the ZOY plane. These two rings are orthogonal to each other and have a common center at the point (0; 0; 0). The device also has an input wire, which is connected to one of two common points of the rings. Each ring is equipped with an output wire. This construction can rotate around the Y axis, while the magnetic field vector is directed along the Z axis and does not change its direction. For quantum rings, a one-dimensional approximation is considered, and the scattering problem is taken as a base.

The functions in the incoming and outgoing leads, denoted by $\psi_I(x_I)$, $\psi_{II}(x_{II})$,

$$\psi_I(x_I) = e^{ikx_I} + C_1 e^{-ikx_I},$$

$\psi_{III}(x_{III})$ can be written as: $\psi_{II}(x_{II}) = C_{10} e^{ikx_{II}}$,

$$\psi_{III}(x_{III}) = C_{15} e^{ikx_{III}}.$$

The functions on rings can be written as:

$$\psi_{AD}(\phi) = C_2 e^{ikR\phi} + C_3 e^{-ikR\phi},$$

$$\psi_{AC_{XOY}}(\phi) = C_4 e^{ikR\phi} + C_5 e^{-ikR\phi},$$

$$\psi_{AB}(\phi) = C_6 e^{ikR\phi} + C_7 e^{-ikR\phi},$$

$$\psi_{AC_{ZOY}}(\phi) = C_8 e^{ikR\phi} + C_9 e^{-ikR\phi},$$

$$\psi_{BC}(\phi) = C_{11} e^{ikR\phi} + C_{12} e^{-ikR\phi},$$

$$\psi_{CD}(\phi) = C_{13} e^{ikR\phi} + C_{14} e^{-ikR\phi},$$

where AD, AB, BC, CD are the edges between junction points, $AC_{XOY}(AC_{ZOY})$ are the edges between junction points in XOY(ZOY) plane.

The magnetic Kirchhoff conditions are as follows:

$$\begin{cases} e^{(-1)^\mu i\Phi_e(\phi_e)} \psi_e(\phi_e) = \psi_{e'}(\phi_e) e^{(-1)^\mu i\Phi_{e'}(\phi_e)} \\ \sum_e (-1)^{[e]} \partial \psi_e(\phi_e) e^{(-1)^\mu i\Phi_e(\phi_e)} = 0 \end{cases},$$

where $[e]=0$ for the output edge and $[e]=1$ for the input edge. Since the orientations of the edges in some points will not coincide with the parameters on the ring, we will take into account the negative sign in front of Φ_e , so μ equals 0 or 1, depending on the orientation.

$$\text{Besides } \Phi_e(\phi_e) = \begin{cases} 0, & \text{in the beginning of edge } e, \\ \int_{\phi_e} a(\tau) d\tau, & \text{in the end of edge } e. \end{cases}$$

As mentioned earlier, the magnetic field is assumed to be directed along the Z axis, therefore $\Phi_1(\phi) = BR^2\phi \cos \alpha$, $\Phi_2(\phi) = BR^2\phi \sin \alpha$, where $\Phi_1(\phi)$ belongs to the ring in the XOY plane and $\Phi_2(\phi)$ belongs to the ring in the ZOY plane.

Using the magnetic Kirchhoff conditions and the expressions for leads, edges and for $\Phi_1(\phi)$, $\Phi_2(\phi)$ and employing the Gaussian elimination method, we can obtain all the unknown coefficients $C_1, C_2, \dots, C_{15}$. Finally, the reflection coefficient can be written as $Ref = C_1 * C_1^*$, the transmission coefficients: $T_1 = C_{10} * C_{10}^*$ and $T_2 = C_{15} * C_{15}^*$.

Numerical results

We have done a numerical study to illustrate some essential characteristics of the electron transport in the proposed device. The values of transmission coefficients T_1 and T_2 vary in the range from 0 to 1 when changing the wave number and the rotation angle. If the value of one of the two transmission coefficients approaches 1, we can say that the wave passes in this output wire, otherwise, when approaching 0, the wave in the wire does not pass. To solve the problem posed in Introduction, we have found such values of the parameters: the rotation angle α , radius of the rings, wave number k , angles ξ and θ between the leads and axis, when the coefficients T_1 and T_2 are opposite in the following sense: when one is close to 1 and the other is close to 0.

Conclusion

A system of equations was compiled to describe the electron transport. As a result, the values of transmission coefficients at the output wires of the quantum switch model were obtained. Testing of the proposed model with various sets of parameters, allows us to find dependencies between the parameters and the transmission coefficients. Particularly, the described approach makes it possible to establish such situations in which the proposed quantum device behaves like a switch between two channels. We showed examples of such switching. The suggested model is explicitly solvable. It allows one to find the corresponding "switching angles" for any particular case.

Aknowledgements

This work was partially financially supported by the Government of the Russian Federation (grant 08-08), grant 16-11-10330 of Russian Science Foundation, by grant 19-31-90164 of RFBR.

Список литературы

1. Pavlov, B.S., Popov, I.Yu., Geyler, V.A., Pershenko, O.S. 2000 Possible construction of quantum multiplexer. *Europhys. Lett.* **52** (2), 196-202.
2. Geyler, V.A., Popov, I.Yu. 2001 Quantum interference rectifier. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures.* **9** (4), 631-634.
3. Dehghana, E., Khoshnouda, D. S., Naeimi, A.S. 2018 Logical spin-filtering in a triangular network of quantum nanorings with a Rashba spin-orbit interaction. *Physica B* **529**, 21-26.

Квазистационарные состояния в топологических изоляторах с магнитными барьерами конечной проницаемости

Хомицкий Д. В.¹, Лаврухина Е.А.¹

¹Университет Лобачевского

e-mail: khomitsky@phys.unn.ru

Топологические изоляторы (ТИ) представляют собой такое фазовое состояние в твердотельной структуре, при котором в объёме уровень Ферми находится в запрещённой зоне, а на границе имеются хорошо проводящие состояния, устойчивые к возмущениям определённого типа [1]. Нетривиальные свойства ТИ привлекают внимание исследователей на протяжении последних двух десятилетий. В то время как в понимании их фундаментальных свойств есть значительный прогресс, пути технологических и приборных применений ТИ развиты значительно слабее. Одна из причин заключается в трудностях при создании на их базе компактных объектов для хранения и обработки информации, таких как квантовые точки (КТ). В предыдущие годы было предложено несколько моделей КТ в ТИ при наличии магнитных барьеров на их границе, при этом барьеры имели идеализированную структуру с бесконечно узкой шириной или с исчезающе малой проницаемостью [2]. В наших работах [3, 4] были предложены, на наш взгляд, более реалистичные модели с магнитными барьерами конечных размеров на краю двумерного ТИ на базе квантовой ямы HgTe/CdTe . Были рассчитаны параметры зонной структуры и времена энергетической релаксации, а в недавней работе [5] были вычислены отклики на периодическое электрическое поле, моделирующие управляющие импульсы в будущей модели кубита на базе таких КТ. Была обнаружена важная роль состояний непрерывного спектра, присутствующих в модели барьеров конечной высоты. При этом барьеры предполагались непроницаемыми, а уровни дискретного спектра имели нулевую ширину.

В данной докладе мы рассматриваем более реалистичную ситуацию, при которой магнитные барьеры на краю ТИ имеют конечную проницаемость, а состояния дискретного спектра под барьерами имеют конечную ширину уровня и являются квазистационарными. Более детально обсуждается вывод модели краевых состояний в присутствии магнитных барьеров на основе магнитных диэлектриков. Согласно нашим оценкам [5] операции с заселённостями уровней в периодическом электрическом поле могут быть осуществлены на малых временах порядка 10 пс, что задаёт верхний предел допустимой ширины уровней. Мы рассчитываем зависимость ширины уровней для квазистационарных состояний с помощью различных методов, включая задачу рассеивания и задачу о решении уравнения Шрёдингера для краевых состояний в ТИ с комплексной энергией. Результаты всех подходов хорошо согласуются между собой, и говорят о принципиальной возможности создания структуры с временем жизни квазистационарного состояния более 1 нс, если ширина магнитного барьера превосходит величину порядка 100 нм. В этих условиях, которые можно считать достижимыми с технологической точки зрения, время жизни состояний между барьерами будет на два порядка превосходить интервал, требуемый для операций с заселённостью уровней, что позволит, как мы надеемся, выполнять их в реальных структурах.

Мы выражаем надежду, что результаты работы могут представлять интерес для развития структурных и приборных приложений физики топологических изоляторов, которые найдёт своё применение в новых поколениях устройств обработки и хранения информации. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания № 0729-2020-0058.

Список литературы

1. X-L Qi and S-C Zhang, «Topological insulators and superconductors», Rev. Mod. Phys. V. 83, 1057 (2011).
2. C. Timm, «Transport through a quantum spin Hall quantum dot», Phys. Rev. B V.86, p.155456 (2012); G. Dolcetto, N. Traverso Ziani, M. Biggio, et al, «Coulomb blockade microscopy of spin-density oscillations and fractional charge in quantum spin Hall dots», Phys. Rev. B V.87, p.235423 (2013).
3. D.V. Khomitsky, A.A. Chubunov, A.A. Konakov, «Regular and irregular dynamics of spin-polarized wavepackets in a mesoscopic quantum dot at the edge of topological insulator», ЖЭТФ, т.150, вып.6(12), с.1200 (2016).
4. Д.В. Хомицкий, А.А. Чубанов, Е.А. Лаврухина, Н. Нжийа, «Релаксация энергии в квантовой точке на краю топологического изолятора», ФТП, т.51, вып.11, с.1557 (2017).
5. Д.В. Хомицкий, К.С. Кабаев, Е.А. Лаврухина, «Спиновый резонанс в квантовой точке на краю топологического изолятора при учёте состояний континуума», ЖЭТФ, т.158, вып.5(11), с.929 (2020).

Зонная структура и меж-трубочные электронные переходы в двустенных углеродных нанотрубках

Чалин Д. В.¹

¹ЮФУ

e-mail: chalin.d.v@mail.ru

Обычно оптический спектр двустенной углеродной нанотрубки (ДУНТ) можно описать как простую суперпозицию спектров одностенных нанотрубок, из которых состоит данная ДУНТ. При этом спектральные линии оказываются лишь немного смещены в виду слабого Ван дер Ваальсового взаимодействия между слоями ДУНТ [1]. Однако, недавние экспериментальные результаты показывают, что это верно не для всех ДУНТ. В опубликованном рэлеевском спектре нанотрубки (12,11)@(17,16) содержатся дополнительные спектральные пики, которые не могут быть соотнесены с оптическими переходами в индивидуальных одностенных нанотрубках [2].

Используя теорию сильной связи, мы демонстрируем, что в некоторых ДУНТ межслойное взаимодействие может изменить зонную структуру нанотрубок таким образом, что становятся возможными электронные переходы между зонами, происходящих из разных слоев ДУНТ. В результате такой перестройки зонной структуры и появляются дополнительные пики в оптическом спектре ДУНТ [1]. Найдены геометрические критерии реализации таких переходов.

Пользуясь известными экспериментальными данными о 118 оптических переходах [3], мы демонстрируем еще шесть примеров двустенных нанотрубок, в которых возможны меж-трубочные переходы. Развитый подход позволяет рассчитать энергии и обычных внутри-трубочных переходов, а также может являться полезным инструментом для структурной идентификации двустенных нанотрубок.

Авторы выражают свою благодарность за финансовую поддержку Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант № 18-29-19043.

Список литературы

1. D. V. Chalin, and S. B. Rochal. Band structure and inter-tube optical transitions in double-walled carbon nanotubes. *Physical Review B*, 102(11), 115426 (2020).
2. S. Zhao, P. Moon, Y. Miyauchi, T. Nishihara, K. Matsuda, M. Koshino, and R. Kitaura. Observation of drastic electronic-structure change in a one-dimensional moiré superlattice. *Phys. Rev. Lett.* 124, 106101 (2020)
3. K. Liu et al.. Van der Waals-coupled electronic states in incommensurate double-walled carbon nanotubes. *Nature Physics*, 10(10), 737-742 (2014).

Эффект Холла в магнитокалорических сплавах на основе Ni-Mn-In

Емельянова С.М.¹, Марченков В.В.^{1,2}

¹ИФМ УрО РАН

²УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

e-mail: emelyanova@imp.uran.ru

Сплавы Гейслера систем Ni-Mn-X (X = Ga, In, Sb, Sn) в настоящее время подвергаются активным исследованиям, поскольку в них могут наблюдаться гигантские значения магнитокалорического эффекта (МКЭ) за счет структурного превращения, сопровождаемого магнитным переходом. Положение характерных температур фазовых переходов (ТФП), т.е. A_s , A_f , M_s и M_f – температур начала и конца аустенитного и мартенситного превращений, соответственно, на температурной шкале, позволяет сделать вывод о структурном состоянии сплава, которое, в свою очередь, тесно связано с магнитными свойствами. Известно, что число валентных электронов на атом e/a и объем элементарной ячейки V_{cell} находятся в тесной взаимосвязи с ТФП. В [1] была также установлена взаимосвязь между ТФП и такими параметрами, как коэффициент Холла и концентрация носителей заряда n . Цель настоящей работы заключалась в установлении взаимосвязи между вышеуказанными параметрами и ТФП в сплавах Гейслера $Ni_{47-x}Mn_{42+x}In_{11}$ ($x = 0; 1; 2$).

Исследованные сплавы были приготовлены в дуговой печи в атмосфере аргона, полученные слитки отжигались при температуре 1100 К в течение 24 часов с последующим охлаждением с печью. Элементный анализ, проведенный с помощью сканирующего электронного микроскопа (Inspect F, FEI Company), показал, что химический состав образцов с хорошей точностью соответствует заданному. Рентгеноструктурные исследования выявили присутствие во всех образцах структуры $L2_1$. Намагниченность и эффект Холла были измерены в Центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН. Магнитные свойства были измерены в магнитных полях до 50 кЭ в температурном интервале 150-330 К и при 4,2 К. Измерения эффекта Холла проводились стандартным четырехзондовым методом на постоянном токе при температуре 4,2 К в магнитных полях до 50 кЭ.

В результате проведенных исследований установлено, что значения коэффициента нормального эффекта Холла (НЭХ) положительны для всех исследованных сплавов, следовательно, основными носителями заряда являются дырки. Кроме того, значения НЭХ уменьшаются по мере увеличения содержания никеля в сплаве, т.е. по мере возрастания параметра e/a . Коэффициенты аномального эффекта Холла (АЭХ) также оказались положительными, однако, их значения, в отличие от НЭХ, возрастают по мере роста e/a . Установлено, что при возрастании значений e/a происходит возрастание концентрации носителей заряда n , а также ТФП. Например, значения A_s составляют 170 К, 258 К и 315 К для

сплавов $\text{Ni}_{45}\text{Mn}_{44}\text{In}_{11}$, $\text{Ni}_{46}\text{Mn}_{43}\text{In}_{11}$ и $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{42}\text{In}_{11}$, соответственно. Таким образом, в результате настоящей работы для исследованных сплавов была обнаружена взаимосвязь между концентрацией носителей заряда n и ТФП, а именно, ТФП монотонно возрастают по мере роста n .

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Спин», № АААА-А18-118020290104-2) при частичной поддержке Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006).

Список литературы

1. V.V. Marchenkov, S.M. Emelyanova, Low Temperature Physics **47**, no. 1, 62 (2021)

Топологически запрещенные квазичастицы в системе с дисперсией, характерной для купратных высокотемпературных сверхпроводников, и сильным электрон-фононным взаимодействием: образование псевдощели.

Доронкина С. В.¹, Мясникова А. Э.¹

¹ЮФУ

e-mail: doronkina1234@gmail.com

Последние результаты экспериментальных исследований свойств купратных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) стимулировали интерес к учету электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ) в моделях сверхпроводников наряду с сильными электронными корреляциями. В данной работе исследуется влияние сильного ЭФВ на основное состояние систем с законом дисперсии, характерным для купратных ВТСП. Характерной особенностью дырочно-допированных систем с сильным дальнедействующим ЭФВ является сосуществование (би)поляронов большого радиуса и делокализованных электронов. Мы показываем, что стационарные состояния делокализованных носителей в потенциале, создаваемом автолокализованными носителями, или в потенциале зарядового упорядочения, можно представить как распределенные волновые пакеты (РВП), характеризующиеся различными значениями волнового вектора в областях с различным значением потенциала зарядового упорядочения. Как оказалось, топология поверхностей постоянной энергии дырочно-допированных купратов запрещает РВП со средними импульсами вблизи антинодального направления. Возникающее уменьшение плотности состояний носителей заряда проявляется при исследовании методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) как псевдощель. Если приложенная разность потенциалов достигает величины амплитуды потенциала зарядового упорядочения, она компенсирует этот добавочный потенциал, восстанавливая тем самым плотность состояний. В экспериментах по фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ARPES) фотоэлектроны с волновыми векторами вблизи антинодальных точек $(\pm\pi/a, 0)$ и $(0, \pm\pi/a)$ возникают из РВП со средними импульсами, довольно далекими от антинода, когда фотоэмиссия происходит из областей с минимальным (отрицательным) потенциалом. В результате энергия таких фотоэлектронов ниже энергии, соответствующей их импульсу по закону дисперсии, на величину амплитуды добавочного потенциала, что и проявляется как псевдощель. При этом спектральный вес в спектрах ARPES смещен к более высоким (по модулю) значениям энергии связи на эту величину, демонстрируя псевдощель, и сильно

уширен из-за широкой размазки состояния квазичастицы по импульсам, что и наблюдается в экспериментальных спектрах ARPES купратов [1]. Предлагаемый подход позволяет рассчитать ширину псевдощели (как амплитуду потенциала зарядового упорядочения) и температуру ее исчезновения (как температуру, соответствующую тепловому распаду биполяронов) как функции допирования. Результаты оказываются в хорошем согласии с экспериментальными данными [2,3]. Ранее использование модели с сосуществованием биполяронов большого радиуса и делокализованных носителей позволило объяснить аномалии в высокоэнергетической области спектров ARPES (области “вертикальной дисперсии”) [4] и различное поведение волнового вектора зарядового упорядочения как функции допирования в различных купратах [5], что долгое время оставалось загадочным экспериментальным результатом в купратах [6]. Полученное в рамках настоящего подхода основное нормальное состояние купратов, в котором допированные дырки оказываются автолокализованными дырками до достижения некоторого уровня допирования p^* и сосуществуют с электронными РВП, объясняет перестройку поверхности Ферми, наблюдаемую при $p=p^*$ в экспериментах по квантовым осцилляциям (когда при $p < p^*$ наблюдается только малый электронный карман, а при $p > p^*$ - большая дырочная поверхность Ферми).

Список литературы

1. M. Hashimoto et al., Nat. Phys. **6**, 414 (2010).
2. N. Doiron-Leyraud et al., Nat. Comm. **8**, 2044 (2017).
3. Ø. Fischer et al., Rev. Mod. Phys. **79**, 353 (2007).
4. A. E. Myasnikova et al., J. Phys.: Cond. Matter **30**, 125601 (2018).
5. A. E. Myasnikova et al., J. Phys.: Cond. Matter **31**, 235602 (2019).
6. R. Comin and A. Damascelli, Ann. Rev. Cond. Matter Phys. **7**, 369 (2016).

Влияние межминизонных переходов на нелинейный транспорт в квантовых полупроводниковых сверхрешетках в условиях воздействия высокочастотной электромагнитной волны

Глазов С. Ю.^{1,2}, Носаева Т.А.²

¹ВГСПУ, ²ВолГМУ

e-mail: ser-glazov@yandex.ru

Технология зонной инженерии находит широкое применение при создании современных устройств наноэлектроники на основе полупроводниковых материалов. Воздействие дополнительного периодического потенциала сверхрешетки (СР) позволяет варьировать ширину разрешенных и запрещенных минизон. В результате появляется возможность изменения оптических и транспортных свойств материалов в широких пределах. Такая перестройка приводит к необходимости учета многофотонного характера поглощения излучения.

Ток увлечения электронов проводимости в полупроводниковых СР электромагнитными волнами рассматривался в целом ряде работ (см. [1,2] и литературу в них). В данной работе представлены результаты исследования эффекта увлечения электронов сильной электромагнитной волной, распространяющейся перпендикулярно оси симметрии сверхрешетки. Вероятность межзонного перехода определяется в рамках теории возмущений с помощью метода эффективного гамильтониана электрон-фотонного взаимодействия. В рамках такого подхода учитывается и многофотонное поглощение. Рассмотрен случай

низких температур, когда уровни всех минизон валентной зоны будут заняты электронами, а уровни минизон зоны проводимости – свободными. Увлечение носителей заряда происходит в процессе перехода электронов из верхней минизоны валентной зоны в нижнюю минизону зоны проводимости, при этом только малая часть энергии фотона передается продольному движению электрона. При типичных значениях параметров системы проведено численное моделирование плотности тока увлечения в зависимости от интенсивности и частоты волны.

Плотность тока увлечения растет с увеличением амплитуды электромагнитной волны, достигнув максимума начинает осциллировать вокруг среднего, слабо убывающего значения. Это явление объясняется уменьшением вероятности переходов с поглощением фотонов с ростом интенсивности света. В случае сильной электромагнитной волны наблюдается стабилизация тока увлечения при учете многофотонного процесса поглощения, которая связана с узостью минизон зоны проводимости и валентной зоны, в отличие от стабилизации поглощения в атомных системах. Математически стабилизация определяется также как и в случае модели Келдыша – Фейсала – Риса ограниченностью функций Бесселя действительного аргумента.

В результате анализа частотной зависимости плотности продольного тока установлено, что ток сначала растет, причем рост начинается при частотах, меньших характерной частоты запрещенной зоны (проявление эффекта Франца-Келдыша), а затем убывает, появляются пики тока, амплитуда которых увеличивается. Каждый из пиков поглощения соответствует определенному числу поглощенных фотонов. Немонотонный характер продольной плотности тока, связанный с многофотонным характером поглощения излучения, может быть использован при создании детектора высокочастотного излучения.

Список литературы

1. Вязовский М.В., Сыродоев Г.А. Ток увлечения в квантовой сверхрешетке при распространении сильной бихроматической электромагнитной волны // ФТП. 1999. Т. 33. В. 12. С. 1443-1446.
2. Носаева Т.А., Сыродоев Г.А. Ток увлечения в квантовой сверхрешетке при распространении сильной бихроматической электромагнитной волны // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 12. С. 12-16.

Влияние неидеальности интерфейса AlN/GaN на свойства двумерного газа в гетероструктурах для полевых транзисторов

Артеев Д. С.¹, Сахаров А. В.¹, Лундин В. В.¹, Заварин Е. Е.¹, Цацульников А. Ф.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²НТЦ Микроэлектроники РАН

e-mail: ArteevDS@mail.ioffe.ru

Уникальные свойства системы материалов типа III-N, такие как высокая насыщенная скорость электронов, большие пробойные напряжения и возможность образования твердых растворов во всем диапазоне составов, делают их очень перспективными для применения в силовой, высокотемпературной и СВЧ электронике. Благодаря полярной природе этих материалов на их основе возможно создание гетероструктур с двумерным электронным газом с концентрацией носителей заряда больше 10^{13} см^{-2} и подвижностью до $2200 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при комнатной температуре [1].

Известно, что электроны в твёрдых растворах испытывают т.н. “alloy disorder scattering” или сплавное рассеяние, существенно снижающее подвижность. В случае гетероструктур с двумерным электронным газом с GaN каналом рассеяние происходит в результате проникновения волновой функции электронов в барьерные слои. Для борьбы с этим возможно использование тонкого слоя AlN между каналом и барьерным слоем [2]. Однако несовершенство ростовых технологий или неоптимальные параметры роста могут приводить к неидеальностям интерфейса AlN/GaN. Кроме того, Al-Ga в III-N материалах обладают хоть и малым, но ненулевым коэффициентом взаимной диффузии [3, 4], а значит длительное воздействие высоких температур может также приводить к размытию гетерограницы.

В данной работе путём численного решения уравнений Шрёдингера и Пуассона, а также расчётов времени релаксации носителей заряда проведен анализ влияния неидеальности гетерограницы AlN/GaN на концентрацию и подвижность двумерного электронного газа.

Список литературы

1. Chen J.T. et al., Room-temperature mobility above 2200 cm²/V·s of two-dimensional electron gas in a sharp-interface AlGaIn/GaN heterostructure, *Appl. Phys. Lett.*, 106, 251601, 2015
2. Smorchkova, I. P., et al. AlN/GaN and (Al, Ga) N/AlN/GaN two-dimensional electron gas structures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy. *J. Appl. Phys.*, 90 (10), 5196-5201, 2001
3. Nemoz, M., et al. Interdiffusion of Al and Ga in AlN/AlGaIn superlattices grown by ammonia-assisted molecular beam epitaxy. *Superlattices and Microstructures* 150 (2021): 106801.
4. Aleksandrov, I. A., et al. Diffusion in GaN/AlN superlattices: DFT and EXAFS study. *Appl. Surf. Sci.* 515 (2020): 146001.

Критическая температура генерации стимулированного излучения среднего ИК диапазона в серии HgCdTe структур с различным числом квантовых ям

Уточкин В. В.¹, Морозов С.В.¹, Фадеев М.А.¹, Михайлов Н.Н.²

¹ИПФ РАН

e-mail: xenonum@bk.ru

В работе исследуются гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) HgCdTe/CdHgTe, являющиеся одним из перспективных кандидатов для создания межзонных полупроводниковых лазеров среднего ИК диапазона. Хорошо известно, что в узкозонных КЯ на основе HgCdTe варьированием толщины и состава КЯ можно получить сильно непараболический закон дисперсии носителей, близкий к релятивистскому закону дисперсии дираковских фермионов [1]. Подобный квазирелятивистский закон дисперсии приводит к подавлению безызлучательной оже-рекомбинации, что определяет возможность реализации эффективных межзонных источников среднего ИК диапазона [2].

Исследованная серия структур была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на полуизолирующих GaAs (013) подложках с ZnTe и CdTe буферами. Структуры содержали в активной области различное число (3, 5, 10) КЯ с номинально нулевым

остаточным содержанием Cd толщиной 2.7 нм каждая. Общая толщина волноведущего $\text{Hg}_{0.25}\text{Cd}_{0.75}\text{Te}$ слоя с КЯ составляла ~ 700 нм для эффективной локализации волноводной моды. Измерения спектров стимулированного излучения (СИ) проводились в криостате замкнутого цикла ($T = 8 - 300$ К). В качестве источника оптического возбуждения использовался параметрический генератор света (1.6 мкм, 10 нс, 10 Гц). Накачка образца осуществлялась со стороны ростовой поверхности (при этом луч лазера накачки полностью покрывал поверхность образца). Вторичное излучение собиралось с торца структуры и заводилось в фурье-спектрометр BrukerVertex 80v, работавший в режиме пошагового сканирования. Рассеянное излучение лазера накачки во всех экспериментах отсекалось при помощи фильтра из Ge. В качестве фотодетектора использовался HgCdTe приёмник KolmarTechnologies D317.

За счёт максимально близких параметров КЯ и барьерных слоёв, во всех структурах было получено СИ на длине волны ~ 4 мкм при 9 К. Далее для каждого образца в серии исследовалась температурная эволюция СИ и его пороговых характеристик. В то время как в области низких температур пороговые интенсивности генерации СИ во всех структурах практически совпадают, то, начиная с температуры ~ 70 К, пороговая интенсивность генерации в структуре с тремя КЯ начинает быстро расти, и уже при температуре 140 К доходит до максимальной интенсивности генерации, обеспечиваемой установкой. При этом характеристическая температура роста пороговой интенсивности для трёхямной структуры составляет 25 К. Для структуры с пятью КЯ характеристическая температура составляет те же 25 – 30 К, но при этом пороговая интенсивность генерации СИ при каждой температуре ниже, чем в структуре с тремя ямами. За счёт этого пороговая интенсивность генерации СИ в пятиямной структуре доходит до максимальной интенсивности установки только при 190 К. В то же время, характеристическая температура последней, десятиямной структуры сохраняется на уровне ~ 40 К вплоть до температуры 210 К, при которой пороговая мощность генерации СИ также упирается в максимальную мощность установки. Таким образом, за счёт увеличения числа КЯ в активной области лазеров среднего ИК диапазона на основе HgCdTe возможно оптимизировать отношение усиления к потерям и улучшить характеристики СИ, в частности, пороговую интенсивность генерации. Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования № 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024).

Список литературы

1. B.A. Bernevig, T.L. Hughes, and S.C. Zhang, Quantum spin Hall effect and topological phase transition in HgTe quantum wells, Science, том. 314(5806), 1757, 2006
2. G. Alymov, V. Rumyantsev, S. Morozov, V. Gavrilenko, V. Aleshkin, D. Svintsov, Fundamental limits to far-infrared lasing in auger-suppressed HgCdTe quantum wells, ACS Photonics, том. 7(1), 98-104, 2019

Нелинейная квантовая метрология на основе линейно связанных солитонов в интерферометре Маха-Цендера с диссипацией частиц

Алоджанц А. П.¹, Царёв Д.В.¹, Нго Т.В.¹, Р.-К. Ли²

¹Университет ИТМО

²Институт фотонных технологий, национальный университет Цинь Хуа, Синьчу, Тайвань

e-mail: alexander_ap@list.ru

Квантовая метрология – одна из наиболее быстро развивающихся и актуальных областей современных квантовых технологий [1]. Физические схемы квантовой метрологии могут быть реализованы с бозонными частицами – атомами или фотонами на основе интерферометра Маха-Цендера (МЦ) и ставят целью измерение разности фаз ϕ между его плечами, которое в квантовом случае ограничено флуктуациями соответствующей разности числа частиц на его входе [1]. Традиционные подходы, основанные на интерферометрах с когерентным источником частиц, ограничены стандартным квантовым пределом (СКП) точности измерения, определяемой как $\Delta\phi = N^{-1/2}$, где N – число частиц, участвующих в измерении. Методы квантовой метрологии позволяют преодолеть СКП и достичь так называемого предела Гейзенберга, $\Delta\phi = N^{-1}$, с помощью сжатых и/или запутанных квантовых состояний источника частиц на входе интерферометра [1]. Более того, фазовый сдвиг, нелинейно зависящий от числа частиц, может быть измерен с точностью $\Delta\phi < N^{-1}$ в рамках нелинейной квантовой метрологии [2]. Однако, в этом случае принципиальную роль играют потери даже небольшого числа частиц, ухудшающие точность измерений [3].

В данной работе предложен новый подход к нелинейной квантовой метрологии, учитывающий потери небольшого числа частиц, и основанный на квантовых свойствах запутанных светлых солитонов [2]. В частности, рассматривается система двух слабо связанных (в латеральной плоскости) одномерных солитонов – солитонных джозефсоновских контактов (СДК), которая описывается эффективным (безразмерным) параметром Λ , являющимся отношением параметра (керровской) нелинейности к коэффициенту линейной связи между солитонами [4]. Как показано в [4], вблизи критического значения $\Lambda \approx 2$, в такой системе формируются запутанные фоковские состояния, близкие по своим свойствам к так называемым $N00N$ -состояниям, однако более устойчивые к потерям небольшого числа частиц. Использование таких состояний для последующего измерения разности фаз солитонов позволяет реализовать схему нелинейной квантовой метрологии с точностью, ограниченной супер-гейзенберговским пределом (СГП), $\Delta\phi \propto N^{-3}$.

Зависимость предельной точности $\Delta\phi_{\min}$ от параметра η , характеризующего долю частиц, участвующих в измерении, демонстрирует, что при $\eta \geq 0.98$ именно $N00N$ -состояние обеспечивает наилучшую точность на уровне СГП $\Delta\phi \propto N^{-3}$. Однако, при оптимальными являются состояния СДК с $\Lambda \approx 2$, позволяющие преодолеть нелинейный интерферометрический предел (НИП) $\propto \eta^{-1/2} N^{-5/2}$ – предел точности нелинейной квантовой метрологии с когерентными состояниями с учетом диссипации частиц.

Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант РФФИ 19-52-25012 МНТ_a.

Список литературы

1. Pezzè L., et al, 2018 Quantum metrology with nonclassical states of atomic ensembles// Rev. Mod. Phys. 90, 035005

2. Tsarev D.V., Ngo T.V., Lee Ray-Kuang, Alodjants A.P. 2019 Nonlinear quantum metrology with moving matter-wave solitons // New Journal of Physics 21 083041
3. Demkowicz-Dobrzański R., Jarzyna M., Kołodyński J. 2015 Quantum limits in optical interferometry // Progress in Optics 60 345-435
4. Tsarev D.V., Alodjants A.P., Ngo T.V., Lee Ray-Kuang 2020 Mesoscopic quantum superposition states of weakly-coupled matter-wave solitons // New Journal of Physics 22 113016

«Двойная» диффузия в бинарной системе аргон-азот

Поярков И. В.^{1,2}

¹МАИ,

²МГУПП

e-mail: p-igor@inbox.ru

В результате исследования массопереноса в газовых смесях были обнаружены температурные изменения в диффузионном аппарате что позволило сделать вывод: массоперенос проходит под действием двух сил – градиента концентрации (диффузия) и градиента температуры (термодиффузия). Изучение массопереноса в трехкомпонентных газовых смесях при постоянной температуре, в которой проявляются два независимых градиента, показали, что диффузионный процесс при определенных условиях сменяется конвективным течением, это явление в литературе получило название «double diffusive convection» [1].

В литературе достаточно много исследований, связанных с проявлением «двойной» диффузии в трехкомпонентных газовых системах, в бинарных системах хорошо изучен массоперенос при наличии градиента температуры при устойчивой стратификации плотности (более «легкий» компонент смеси находится над «тяжелым»). Исследований, когда более «тяжелый» компонент системы находится над «легким» гораздо меньше, так как при таком расположении компонентов, как правило, наблюдается конвективный массоперенос. Еще меньше исследований таких бинарных систем при наличии градиента температуры. В связи с этим представляется актуальным исследовать смену режимов «диффузия – конвекция» в самой простой смеси – бинарной, при этом организовать явление «двойной» диффузии. Для получения явления «double diffusive convection» в бинарной системе организуются два градиента: градиент концентрации, за счет размещения более плотного компонента над менее плотным, и градиента температуры, вносящий противоположный вклад в отрицательный градиент плотности.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования массопереноса в бинарной газовой системе $Ar-N_2$ при наличии градиента температуры, направленного против градиента плотности. В качестве метода исследования был выбран хорошо изученный и апробированный двухколбовый метод. Данный метод позволяет проводить исследования массопереноса в газовых системах в широком диапазоне температур и давлений при различном концентрационном составе газовых систем [2, 3]. В эксперименте более «тяжелый» газ Ar (молекулярной массы $39,9 \text{ кг/кмоль}$), размещался в верхней колбе, находящейся при температуре $283,0 \pm 0,1 \text{ К}$, а «легкий» газ N_2 (молекулярной массы $28,0 \text{ кг/кмоль}$) – в нижней, с температурой $343,0 \pm 0,1 \text{ К}$, колбы имели объем $62,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, соединялись капилляром радиусом $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и высотой $63,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Газы в обеих колбах находились при одном и том же заданном давлении для данного эксперимента, изменяемом в диапазоне от $0,2 \text{ МПа}$ до $1,2 \text{ МПа}$, время процесса смешения составляло 960 с . Для определения вида массопереноса (диффузионный или конвективный) применялся метод «соотношения», а именно экспериментальные значения концентраций соотносились с вычисленными, в предположении диффузионного процесса смешения [2]. Если массоперенос был конвективный, соотношение не равнялось 1. В качестве

сравнения, проведены исследования при температуре обеих колб равной $295,0 \pm 0,1$ К, то есть организован массоперенос при наличии одного градиента - градиента плотности.

Эксперимент показал, что при отрицательном градиенте плотности до давления 0,5 МПа процесс смешения диффузионный как при наличии градиента температуры, так и при его отсутствии. При увеличении давления наблюдалось существенное отличие опытных данных от теоретических значения концентраций, чем выше давление, тем отличие больше. В этой ситуации можно говорить о наличии свободно-конвективных течений, которые возникают в гравитационно неустойчивой системе, вызванного действием двух противоположно направленных градиентов - градиента плотности и температуры. Следует отметить, что интенсивность конвективного массопереноса больше при отсутствии градиента температуры.

В заключении можно отметить, что в гравитационно неустойчивой бинарной газовой системе за счет образования локальных неоднородностей плотности в капилляре наблюдается как диффузионный процесс, так и массоперенос свойственный «double diffusive convection».

Список литературы

1. Hupper H.E., Turner J.S. Double diffusive convection // Journal of fluid mechanics, - 1981. – Vol. 106. – P.413 – 453.
2. Жаврин Ю.И., Косов В.Н., Красиков С.А. Некоторые особенности конвективного тепломассопереноса в многокомпонентных газовых смесях // ИФЖ. 1996. Т. 69, № 6. С. 977-981
3. Жаврин Ю.И., Молдабекова М.С., Поярков И.В., Мукамеденкызы В. Экспериментальное исследование диффузионной неустойчивости в трехкомпонентной газовой смеси при нулевом градиенте плотности // Письма в журнал технической физики, 2011. – Т. 37, Вып. 15 – С. 62-68.

Неустойчивость местных сверхзвуковых зон при обтекании двойного клина постоянной ширины в средней части

Кузьмин А. Г.¹

¹СПбГУ

e-mail: a.kuzmin@spbu.ru

Численные исследования 1990-х годов выявили бифуркации невязкого трансзвукового обтекания аэродинамических профилей, содержащих участки малой или нулевой кривизны [1,2]. Дальнейшие исследования невязких и турбулентных течений показали, что возникновение бифуркаций обусловлено неустойчивостью взаимодействия местных сверхзвуковых зон, формирующихся около таких профилей и крыльев [3-6]. В работе [7] было рассмотрено обтекание простого профиля в виде симметричного двойного клина 8%-й ширины с плоскими боковыми сторонами и дан подробный анализ физических причин возникновения переходов между симметричными и несимметричными режимами обтекания при нулевом угле атаки в некотором диапазоне числа Маха набегающего потока воздуха.

Настоящая работа является продолжением исследований, представленных в [4, 7]. В отличие от [7] основное внимание уделено изучению неустойчивости структуры течения

при фиксированных значениях числа Маха M_∞ набегающего турбулентного потока и изменениях угла атаки.

Решения нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, получены на мелких расчетных сетках с помощью вычислительной программы второго порядка точности, основанной на методе конечных объемов. Полученные решения показывают, что в диапазоне числа Маха $0.841 \leq M_\infty \leq 0.847$ при изменениях угла атаки α от -0.6° до 0.6° может существовать до пяти разных ветвей зависимости коэффициента подъемной силы от α , которые соответствуют разной структуре потока. Реализация того или иного режима зависит от истории изменения M_∞ и α . Переходы между разными режимами сопровождаются резкими изменениями положения ударных волн, скачками подъемной силы и, как правило, слиянием или расщеплением местных сверхзвуковых зон. Помимо этого развиваются автоколебания потока, вызванные неустойчивостью отрыва пограничного слоя от задней части профиля (buffet onset). Амплитуда колебаний заметно уменьшается при увеличении M_∞ . Показано, что вблизи середины вышеуказанного диапазона M_∞ могут происходить скачкообразные изменения коэффициента подъемной силы без слияния или расщепления местных сверхзвуковых зон.

Отметим, что аэродинамические профили с участками малой кривизны привлекают повышенное внимание исследователей в последние годы в связи с тем, что к ним приводят задачи оптимизации [8]. Возможность резкой реструктуризации течения под действием малых возмущений должна учитываться при проектировании аэродинамических поверхностей и органов управления, так как скачкообразные изменения давления на поверхности могут существенно влиять на устойчивость работы турбомшины и движение летательного аппарата по траектории.

Работа выполнена с использованием ресурсов вычислительного центра СПбГУ (<http://cc.spbu.ru>) при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-01-00242.

Список литературы

1. Jameson A., Airfoils admitting non-unique solutions of the Euler equations, AIAA Paper, no. 91-1625, 1–13, 1991.
2. Hafez M., Guo W., Some anomalies of numerical simulation of shock waves. Part I: inviscid flows, Computers and Fluids, Vol. 28, 701–719, 1999.
3. Kuzmin A., Instability and bifurcation of transonic flow over airfoils, AIAA Paper, no. 2005-4800, 1–8, 2005.
4. Кузьмин А.Г., Бифуркации течения при трансзвуковом обтекании простых профилей с эллиптической и клиновидной носовыми частями, Прикладная механика и техническая физика, том 51, 22–28, 2010.
5. Kuzmin A., Non-unique transonic flows over airfoils, Computers and Fluids, Vol. 63, 1–8, 2012.
6. Ryabinin A.N., Transonic flow past symmetrical unswept and swept wings with elliptic nose, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 10, no. 20, 9359–9363, 2015.
7. Kuzmin A., Transonic flow bifurcations over a double wedge, Physica.SPb/2020, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1697, Article ID 012207, 1–7, 2020.
8. Destarac D., Carrier G., Anderson G. R., Nadarajah S., Poole D. J., Vassberg J. C., Zingg D. W., Example of a pitfall in aerodynamic shape optimization, AIAA Journal, Vol. 56, no. 4, 1532–1540, 2018.

Первое применение кода GENE для определения областей стабильности микротиринговой неустойчивости в плазме сферического токамака Глобус-М/М2

Патров М.И., Киселев Е.О.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: mipatrov@mail.ru

В работе приводятся первые результаты применения гирокинетического моделирования кодом GENE для условий разрядов сферического токамака Глобус-М и Глобус-М2 [1]. Описана адаптация кода GENE [2]. В качестве входных параметров использовались градиенты концентрации и температуры плазмы, электронное бета, столкновительность и конфигурация магнитного поля. Последнему было уделено особое внимание. Для этого искалось самосогласованное решение уравнения Грэда-Шафранова и уравнения диффузии полоидального магнитного потока с помощью кодов ASTRA 7.0 и SPIDER. В качестве граничного условия задавалось положение последней замкнутой магнитной поверхности, полученной методом токовых колец на основании измерений сигналов с магнитных петель.

Приводятся данные по расчету областей стабильности микротиринговых неустойчивостей плазмы токамака. областей стабильности плазменных микронеустойчивостей. Приводятся результаты анализа изменения локальных параметров плазмы токамака Глобус-М2 для широкого диапазона плазменного бета, столкновительности, коэффициента запаса устойчивости, шира магнитного поля, а также результаты расчета инкрементов микронеустойчивостей и рассуждения об их идентификации. Приводятся также результаты первых расчетов областей стабильности для MTM, ITG, TEM и ETG мод.

Список литературы

1. Minaev V.B. et al, 2017, Nucl. Fusion, 57, p. 066047.
2. T. Dannert and F. Jenko, 2005, Phys. Plasmas, 12, p. 072309.

Об аналитическом вычислении коэффициента теплопроводности бинарных жидкостей

Гладков С.О.¹, Побережский С.Ю.¹

¹МАИ

e-mail: ps801801@yandex.ru

В настоящей работе будут приведены некоторые аналитические и экспериментальные результаты, посвященные выяснению зависимости коэффициента теплопроводности жидких смесевых растворов k в виде функции от температуры T и относительной концентрации c_1 , где c_1 - концентрация смешиваемой с однородным составом внешней добавки, критическая концентрация этой добавки, при которой происходит превращение первичной (основной жидкости, в которую вливается условно говоря новая) в эту новую. В теории перколяции (см., к примеру, [1]) такая критическая концентрация носит название порога перколяции или в более понятной терминологии подобные процессы называют также эффектом протекания от одной границы до противоположной.

Мы подробно остановимся на аналитическом описании зависимости для простейшего случая бинарных растворов, а затем приведем ее обобщение на случай произвольного количества добавок, концентрацию которых будем обозначать безразмерным параметром i , где индекс i , а полное количество добавочных жидкостей. Здесь стоит обратить внимание на один весьма важный момент. При добавлении инородной жидкости в основной состав она может произвольным образом растекаться по всему заданному объему, но при этом образовывать некоторые кластерные соединения определенного линейного размера. Такой кластер, если ему выгодно появиться с энергетической точки зрения (подобное явление в теории магнетизма связывается с образованием доменной структуры ферромагнетика), должен характеризоваться некоторым поверхностным натяжением, удерживающим его от распада. Поэтому становится вполне понятным, что возможны лишь два сценария образования бинарных (и более сложных) смесей, зависящих от чисто физических свойств смешиваемых жидкостей: 1. С образованием кластеров и 2. Полное перемешивание растворов.

Что касается физических свойств подобных неоднородных смесей, то они вполне понятны и легко объяснимы с точки зрения основных законов теории теплопереноса в гетерогенных структурах, подробно изложенных, например, в монографии [2]. И хотя в этой монографии отражены основные принципы теории теплопереноса в неоднородных кристаллах, описанный в ней общий физический принцип легко может быть перенесен и на жидкие смеси растворы.

Поскольку при описании явлений теплопереноса всегда имеет место постановка граничных условий, то ключевым моментом предлагаемой теории будет учет связи объемных молекул с поверхностными. При решении уравнения Больцмана поверхностные молекулы можно считать равновесными, характеризующие своей собственной температурой, равной температуре термостата (то есть на границе жидкости температура равна), в отличие от объемных, которые мы считаем квазиравновесными, с квазиравновесной температурой. При этом классическое кинетическое уравнение Больцмана для газов мы феноменологически модифицируем, добавляя в правую часть уравнения дополнительное слабое, учитывающее взаимодействие объемных молекул с поверхностными.

Подчеркнем, что решение поставленной задачи с учетом дополнительного интеграла столкновений, связанного с учетом взаимодействия объемных молекул с поверхностными в известной нам литературе, посвященной классическому уравнению Больцмана, мы не обнаружили. Подобный подход был использован, например, в работе [3], в которой исследовалось установление равновесия в системе ядерных спиновых волн, выведенных с помощью некоторого внешнего воздействия из состояния равновесия.

Найденная, благодаря предложенному подходу, зависимость коэффициента теплопроводности бинарной смеси от температуры хорошо согласуется с результатами экспериментальных измерений теплопроводности для весьма широкого диапазона разнообразных растворов [4].

Список литературы

1. D. Stauffer, A. Aharony, Introduction to Percolation Theory, Taylor and Fransis, London, 1994.
2. С.О. Гладков. Физика композитов: термодинамические и диссипативные свойства. М.: Наука. 1999. 330 с.
3. С.О. Гладков, М.И. Каганов. К теории релаксации ядерных спинов в ферромагнетиках. ЖЭТФ. 1981. Т. 80. В. 4. СС. 1577-1585.
4. С.Ю. Побережский Теплопроводность бинарных растворов органических жидкостей по группам классификации Эвелла [Электронный ресурс]/ С.Ю.

Побережский // Современные проблемы науки и образования. - 2014. - № 4. С 175-182.

Пациент-ориентированные расчеты кровотока в проксимальном анастомозе при бедренно-подколенном шунтировании

Иванова Я. Ф.^{1,2}, Тихомолова Л.Г.², Юхнев А.Д.^{1,2}, Врабий А.А.², Калмыкова Р.В.², Морозов А.Н.², Супрунович А.А.²

¹СПбПУ

²Первый Санкт-Петербургский государственный университет им. акад.И.П.Павлова

e-mail: radfn94@mail.ru

Современные методы численного моделирования служат вспомогательным инструментом для прогнозирования состояния пациентов после сердечно-сосудистых операций. Одной из распространенных операций на сосудах является шунтирование бедренных артерий синтетическим протезом, которое выполняется для восстановления кровотока через пораженный участок сосуда [1]. Нередко, однако, после операции может наблюдаться быстрый рост неоинтимы (фиброзной оболочки, образующейся на внутренней поверхности сосудистого протеза) в области соединений сосуда с протезом - входного (проксимального) и выходного (дистального), что приводит к уменьшению проходимости протеза, а в дальнейшем и полному его зарастанию. Оценка рисков осложнения данного вида для пациента, перенесшего операцию, представляет несомненный интерес.

Пациент-ориентированные трехмерные расчеты кровотока позволяют оценить гемодинамические параметры, влияющие на нарастание неоинтимы, индивидуально, основываясь на результатах ангиографии и ультразвуковой доплерографии. К таковым параметрам относятся мгновенные и средние значения сдвиговых напряжений, индекс их колебаний, и другие [2-3]. Используя знания о взаимосвязи гемодинамических параметров с нарастанием неоинтимы в анастомозе, можно прогнозировать темпы его послеоперационного зарастания.

Цель настоящего исследования заключается в отработке методики пациент-ориентированных расчетов данной направленности и ее приложении для сопоставительного анализа результатов, полученных для нескольких, существенно различных моделей проксимального анастомоза бедренно-подколенного шунтирования, проведенного выше щели коленного сустава.

Геометрические модели для численного расчета получены путем обработки клинических данных послеоперационной ангиографии, проведенной методом компьютерной томографии пяти пациентов в сроки от 1 недели до года. Для поэтапного создания твердотельных моделей был использован набор компьютерных программ: 3D Slicer, The Vascular Modeling Toolkit, Rhino 6, Siemens NX 10, с помощью которых была сформирована фасетная модель, преобразованная затем в единую поверхность, и после – в твердотельную модель. Модели представляют собой ответвление шунта (диаметром 8-10 мм, под углом 30°-80°) от общей бедренной артерии (диаметром 5-7 мм) и последующего деления сосуда на глубокую и поверхностную бедренные артерии. Кровоток по последней сохранился только у одного пациента.

Численные расчеты пульсирующего течения кровеимитирующей жидкости (с плотностью 1000 кг/м^3 и вязкостью $0.004 \text{ Па}\cdot\text{с}$) в моделях проксимальных анастомозов были проведены на основе уравнений Навье-Стокса с применением программы ANSYS CFX по методу конечных объемов. Численные решения получены без учета влияния упругости стенок сосудов и переноса тепла. Характерные числа Рейнольдса на входе той или иной модели в момент максимального расхода составляли от 1000 до 2300, числа Уомерсли – от 3.5 до 5.5. Граничные условия для расчетов ставились в соответствии с индивидуальными данными послеоперационных ультразвуковых доплеровских измерений скорости в бедренных артериях и шунте.

В работе дается сопоставительный анализ мгновенных полей скоростей и давлений, и осредненных по циклу характеристик - сдвиговых напряжений и индекса их колебаний. Определяется вид застойных зон (различной протяженности - от 10 до 50 мм), возникновение которых связано с пространственными изгибами области соединения сосуда с шунтом и несоответствием их диаметров.

Общей особенностью всех исследованных моделей является наличие различных по размерам зон низких сдвиговых напряжений (менее 1 Па) и высокого индекса их колебаний (более 0.5) в области соединения сосуда с шунтом и в шунте. Наличие таких областей указывает на высокие риски нарастания неоинтимы в области анастомоза. Анализ проходимости шунтов через год после операции у двух пациентов указал на нарастание неоинтимы (максимальной толщиной 2,5 мм) в местах, предсказанных в расчетах как склонных к зарастанию.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 20-65-47018.

Список литературы

1. Donadoni F., Pichardo-Almaraz C., Bartlett M. et al. Patient-Specific, multi-scale modeling of neointimal hyperplasia in vein grafts // *Front. Physiol.* Vol. 8, 20 p., 2017.
2. Zhang B., Gu J., Qian M. et al. Correlation between quantitative analysis of wall shear stress and intima media thickness in atherosclerosis development in carotid arteries // *BioMed Eng OnLine*, Vol. 16, 17 p., 2017.
3. Annette M., Molony D., Timmins L. et al. The influence of multidirectional shear stress on plaque progression and composition changes in human coronary arteries // *Journal of Euro PCR*, Vol. 15, pp. 692-699, 2019.

Особенности обтекания модели транспортного самолета с работающими воздушными винтами при моделировании отказа двигателя в аэродинамической трубе

Пигусов Е. А.¹, Крутов А.А.¹, Черноусов В.И.¹

¹ФГУП «ЦАГИ»

e-mail: pigusoff@gmail.com

Традиционной проблемой, возникающей при формировании аэродинамической компоновки двухдвигательного самолета с турбовинтовыми двигателями, является аэродинамическая интерференция, возникающая между элементами планера и воздушным винтом, создающим тягу. Важным аспектом данной проблемы является случай отказа одного двигателя, так как возникающие при этом силы и моменты существенно меняют

аэродинамические характеристики (АДХ) самолета [1]. Снижение влияния отказа двигателя на АДХ и парирование возникающих при этом сил и моментов является одной из наиболее важных задач проектирования.

В настоящей работе представлены результаты эксперимента по моделированию отказа одного двигателя на модели легкого конвертируемого самолета (ЛКС) с работающими воздушными винтами (ВВ) в аэродинамической трубе (АДТ) малых скоростей Т-102 ЦАГИ [2]. Аэродинамическая компоновка ЛКС выполнена по классической схеме со свободонесущим высокорасположенным крылом с удлинением $l=9.68$, фюзеляжем с поперечным сечением в регулярной части в форме трапеции со скругленными углами и палубным хвостовым оперением. Для проведения исследований с работающими ВВ, на модель установлена модельная силовая установка. Испытания модели проводились в посадочной конфигурации при скорости потока в АДТ $V=31$ м/с в диапазоне углов атаки $\alpha=10\div 22^\circ$ и углов скольжения $\beta=-20\div 20^\circ$.

В работе рассмотрено влияние отказа правого и левого двигателя для посадочной конфигурации модели при коэффициенте нагрузки на ометаемую винтом площадь $B=0.5$. Показано, что отказ, как правого, так и левого двигателя не приводит к существенному изменению эффективности рулей высоты, и практически не оказывает влияние на эффективность руля направления и элерона. Парирование отказа правого двигателя производилось с помощью отклонения элеронов на правой консоли на угол $\delta_\omega=10^\circ$ и на левой – на $\delta_\omega=-10^\circ$ для парирования момента крена, и руля направления на угол $\delta_n=-10^\circ$ для парирования моментов крена и рыскания. Указанные отклонения органов управления при отказавшем правом двигателе достаточны для компенсации влияния отказа критического двигателя в боковом канале.

Список литературы

1. Петров А.В., Аэродинамика транспортных самолетов короткого взлета и посадки с энергетическими системами увеличения подъемной силы. – М.: Инновационное машиностроение, с. 736, 2018
2. Крутов А.А., Мельничук Ю.П., Петров А.В., Пигусов Е.А., Черноусов В.И., Совершенствование аэродинамической компоновки легкого конвертируемого самолета. Материалы XXIX научно-технической конференции по аэродинамике, с. 143, 2018 г.

Обнаружение колебательных решений у вакуумного диода в режиме с полным отражением электронов

Кузнецов В. И.¹, Морозов И.К.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: vikuz1946@gmail.com

Для генерации мощного СВЧ-излучения используют вакуумные диоды с виртуальным катодом (виркаторы, редитроны, отражательные триоды и др.) [1]. В этих устройствах с эмиттера поступает поток электронов с функцией распределения по скоростям, близкой к монокинетической. При превышении плотностью тока порогового значения в рабочем промежутке возникает виртуальный катод, колебания которого и преобразуются в СВЧ-излучение. В отражательных триодах дополнительный электрод обеспечивает сильное торможение и разворот электронного пучка. Здесь также формируется

виртуальный катод, но за счет увеличения пространства, где происходит взаимодействие электронов с колеблющимся электрическим полем, возникают широкополосные шумоподобные колебания. Можно ли обеспечить увеличение пространства взаимодействия за счет отраженных электронов, но без формирования виртуального катода? Для ответа на этот вопрос в докладе изучается устойчивость стационарных решений для плоского вакуумного диода, в котором разность потенциалов между электродами отрицательна и настолько велика, что все эмитированные электроны отражаются внутри межэлектродного промежутка, не достигая второго электрода, и возвращаются обратно на эмиттер.

При изучении устойчивости стационарных решений нами рассматривалось семейство диодов с одной и той же напряженностью электрического поля на эмиттере E_0 , но разными величинами межэлектродного зазора L и внешнего напряжения V . При этом напряжение подбиралось таким образом, чтобы с увеличением зазора у диода была одна и та же плазменная область, но разные вакуумные части. Затем E_0 изменялось. Оказалось, что для некоторых величин E_0 с увеличением L стационарные решения становятся неустойчивыми. При этом неустойчивость развивается в довольно узком диапазоне по E_0 . Исследования устойчивости решений проводились численно с использованием высокоточного E,K-кода [2]–[4]. Построена граница области устойчивости на плоскости $\{L, V\}$. Расчеты развития неустойчивости на нелинейной стадии показали, что в области неустойчивости вместо стационарных решений реализуются решения с нелинейными колебаниями электрического поля, но без образования в плазме виртуального катода. Таким образом, можно обеспечить развитие колебаний электрического поля в вакуумном диоде с полным отражением электронного пучка. Это позволит создать генератор СВЧ-излучения на основе такого диода.

Список литературы

1. V.D. Selemir, A.E. Dubinov, V.V. Voronin, V.S. Zhdanov. IEEE Trans. Plasma Sci. 48(6), 1860 (2020).
2. В.И. Кузнецов, А.Я. Эндер. ЖТФ. 53(12), 2329 (1983).
3. V.I. Kuznetsov, A.Ya. Ender, H. Schamel, P.V. Akimov. Phys. Plasmas. 11(6), 3224 (2004).
4. В.И. Кузнецов, А.Я. Эндер. Физика плазмы. 36(3), 248 (2010).

Исследования течения теплоносителя в кассетной тепловыделяющей сборке активной зоны реактора атомной станции малой мощности

Доронков Д. В.¹, Дмитриев С.М.¹, Демкина Т.Д.¹, Добров А.А.¹, Доронкова Д.С.¹, Полуничев В.И.¹, Пронин А.Н.¹, Рязанов А.В.¹, Хробостов А.Е.¹

¹НГТУ им. П. Е. Алексеева

e-mail: nevid000@mail.ru

В 2020 году первая отечественная плавучая атомная теплоэлектро станция была введена в промышленную эксплуатацию. Основным компонентом станции является плавучий энергоблок «Академик Ломоносов», в состав которого входят реакторные установки КЛТ-40С, разработанные АО «ОКБМ Африкантов». Технической основой создания энергоустановок данного класса является использование судовых реакторных технологий [1, 2].

Следующим этапом развития судовых реакторных технологий является разрабатываемый в настоящее время проект атомной станции малой мощности плавучего исполнения на базе энергоустановок типа РИТМ.

В новых реакторах типа РИТМ применяются модернизированная кассетная активная зона, имеющая ряд существенных отличий от активной зоны базовой конструкции, используемой в реакторе КЛТ-40С, таких как измененная геометрия твэльного пучка, иная форма центрального вытеснителя, а также иная конструкция дистанционирующей решетки. Данные изменения конструкции топливных кассет могут привести к значительным изменениям полей аксиальных и поперечных скоростей потока, а также интенсивному перераспределению осевого расхода теплоносителя в поперечном сечении топливной кассеты, что в свою очередь может сказаться на теплотехнических характеристиках всей активной зоны.

Таким образом особенности конструкции новой кассетной активной зоны реактора типа РИТМ обусловили необходимость оценки ее теплотехнической надежности [3]. Обоснование теплотехнической надежности активной зоны, во многом базируется на теплогидравлическом расчете, который проводится с использованием программ детального поясечного расчета. Такие программы основаны на математических моделях, включающих в себя эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние различных конструктивных элементов топливных кассет на гидродинамику, тепло- и массообмен теплоносителя, что обуславливает проведение дополнительных работ по их валидации.

Таким образом, особенности конструкции новой кассетной активной зоны требуют экспериментального исследования течения теплоносителя в твэльном пучке с установленными пластинчатыми дистанционирующими решетками, что является актуальной задачей, решение которой позволит обосновать ее теплотехническую надежность.

Целью работы является оценка перестроения поля аксиальных и поперечных скоростей потока, а также распределения аксиального расхода теплоносителя через характерные области поперечного сечения топливной кассеты. Для достижения поставленной цели проведен ряд экспериментов на аэродинамическом исследовательском стенде [4, 5] на масштабной модели твэльного пучка топливной кассеты с пластинчатыми дистанционирующими решетками. В качестве показательной была выбрана область, охватывающая третью часть всего поперечного сечения модели и включающая все характерные типы ячеек.

Картина течения теплоносителя представляется картограммами распределения поперечных и аксиальных скоростей, а также графическими зависимостями распределения аксиальных скоростей потока и осевых расходов теплоносителя через характерные типы ячеек. Анализ пространственного распределения тангенциальных и осевых скоростей потока позволил изучить и детализировать картину течения теплоносителя в топливной кассете.

Результаты экспериментов используются при инженерном обосновании конструктивных решений при проектировании активных зон реакторов типа РИТМ. Накопленная база опытных данных по течению теплоносителя в тепловыделяющих сборках кассетного типа используется для верификации CFD-кодов, как зарубежной, так и отечественной разработки, а также программ детального поясечного расчета активных зон с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности.

Список литературы

1. Зверев Д.Л., Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н., Галицких В.Ю., Полуничев В.И., Вешняков К.Б., Кабин С.В., Турусов А.Ю. Реакторные установки для атомных

- ледоколов. Опыт создания и современное состояние, Атомная энергия, том. 129, № 1, 29-37, 2020 г.
2. Беляев В.М., Большухин М.А., Пахомов А.Н., Хизбуллин А.М., Лепехин А.Н., Полуничев В.И., Вешняков К.Б., Соколов А.Н., Турусов А.Ю. Опыт создания первой в мире плавучей АЭС. Направления дальнейшего развития, Атомная энергия, том. 129, № 1, 37-43, 2020 г.
 3. Дмитриев С.М., Баринов А.А., Самойлов О.Б., Хробостов А.Е. Методы обоснования теплотехнической надежности активной зоны тепловых водо-водяных реакторов, Атомная энергия, том. 120, № 5, 270-275, 2016 г.
 4. Дмитриев С.М., Бородин С.С., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР, Атомная энергия, том. 113, № 5, 252-257, 2012 г.
 5. Самойлов О.Б., Шипов Д.Л., Куприянов А.В., Шолин Е.В., Вишневая Т.Ю., Молодцов А.А., Осин А.Б., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Доронков Д.В., Морозкин О.Н. Исследование эффективности пластинчатых решеток-интенсификаторов теплообмена в сборках типа ТВСА-Т, Атомная энергия, том. 128, № 1, 18-23, 2020 г.

Влияние контракции положительного столба цезиевого импульсно-периодического разряда на его светоотдачу

Богданов А. А.¹, Гавриш С.В.², Марциновский А.М.¹, Столяров И.И.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²ООО НТП «Мелитта»

e-mail: a.bogdanov@mail.ioffe.ru

Цезиевый сильнооточный импульсно-периодический разряд высокого давления в последние годы всесторонне исследуется как эффективный и экологически чистый (безртутный) источник видимого [1-6] и инфракрасного [7] излучения с очень высоким индексом цветопередачи R_a (до 95–98). В последних работах [5,6] было обнаружено, что в лампах с достаточно протяженной разрядной трубкой (межэлектродное расстояние $L = 55$ мм) наблюдается сложная немонотонная зависимость светоотдачи от мощности лампы (давления паров цезия). После максимума (при $P_{Cs} = 120-150$ Торр) уменьшение светоотдачи с ростом мощности W сменяется ее повторным значительным (выше первоначального максимума) увеличением. Это увеличение можно объяснить визуально наблюдаемой контракцией разряда при переходе к большим мощностям. Этот эффект рассматривался как один из возможных путей повышения энергоэффективности цезиевых осветительных ламп. Однако на лампах с более коротким межэлектродным расстоянием ($L = 22$ мм) повторного роста светоотдачи не наблюдалось. После максимума светоотдача продолжала уменьшаться вплоть до $W = 200$ Вт/см. Было выдвинуто предположение, что это объясняется различным характером контракции. На длинной горелке разрядный шнур локализуется у стенки, что существенно уменьшает радиальную оптическую плотность τ_R и облегчает выход излучения континуума. На короткой горелке шнур всегда был локализован по центру трубки. Для проверки этого предположения была проведена серия спектральных измерений, результаты которых представлены в настоящей работе.

Оказалось, что при локализации разрядного канала у стенки во всем исследованном диапазоне удельной мощности разряда (до $W = 250$ Вт/см) температура на его оси не поднимается выше 6000-7000 К, поскольку большие градиенты температуры и концентрации при таком расположении обеспечивают сравнительно легкий отвод энергии. В результате температура растет очень медленно, а большая часть мощности, вкладываемой в разряд, выносится излучением. Последнее подтверждается резким возрастанием интегрального светового потока в импульсе при контракции [5], что, собственно, и обуславливает повторный рост светоотдачи. При локализации разрядного шнура на оси вынос энергии затруднен, с увеличением мощности температура растет быстрее, и при $T > 6000-7000$ К плазма переходит в полностью ионизованное состояние (однократные ионы цезия Cs^+). Вследствие высоких потенциалов ионизации и возбуждения Cs^+ при дальнейшем увеличении мощности разряда происходит только нагрев плазмы. Выносимая на стенку частицами тепловая энергия будет расти пропорционально температуре, а излучение при полной ионизации должно увеличиваться незначительно. Это и приводит к быстрому, почти скачкообразному росту температуры до 13000–14000 К, когда начинается возбуждение и ионизация Cs^+ (а также атомов ксенона, который используется для поджига разряда). В результате на спектрах короткой горелки при высоких температурах было зарегистрировано много линий Cs^+ и Xe (они никогда не наблюдалось на лампе с длинной горелкой).

Полученные результаты позволяют адекватно обозначить перспективу повышения светоотдачи цезиевых осветительных ламп.

Список литературы

1. Бакшт Ф. Г., Лапшин В. Ф., Теория импульсно-периодического излучающего разряда высокого давления в цезии, Письма в ЖТФ, том 30, вып. 24, 70-76, 2004.
2. Baksht F. G., Gavrish S. V., Kaplan V. B., Lapshin V. F., Martsinovsky A. M., Study of the Optical Properties of a Pulse-Periodic High-Pressure Cesium Discharge, Plasma Phys. Rep., vol. 36, 1199-1202, 2010.
3. Rakic M., Pichler G., Time evolution of the spectrum of the cesium high pressure discharge light source, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., vol. 151, 169-173, 2015.
4. Бакшт Ф. Г., Лапшин В. Ф., Генерация видимого излучения с непрерывным спектром импульсно-периодическим разрядом высокого давления в цезии, Успехи прикладной физики, том 5, 525-533, 2017.
5. Гавриш С. В., Каплан В. Б., Марциновский А. М., Столяров И. И., Исследование светоотдачи безртутной цезиевой лампы в режиме импульсно-периодического разряда, Прикладная физика, № 5, 78-84, 2019.
6. Богданов А. А., Гавриш С. В., Коваль В. В., Марциновский А. М., Столяров И. И., Особенности сильноточного цезиевого импульсно-периодического разряда как источника видимого излучения, Прикладная физика, № 6, 16-22, 2020.
7. Гавриш С. В., Логинов В. В., Пучнина С. В., Импульсные газоразрядные источники ИК-излучения для оптико-электронных систем (обзор), Успехи прикладной физики, том 6, 333-348, 2018.

Спектральный и корреляционный анализ микротурбулентности плазмы в сферическом токамаке Глобус-М2

Пономаренко А. М.¹, В.В. Буланин¹, В.К. Гусев², В.Б. Минаев², А.В. Петров¹, Ю.В. Петров²,
А.Ю. Яшин¹

¹СПбПУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: annap2000dreeonn@gmail.com

Программа управляемого термоядерного синтеза (УТС) в настоящее время ориентирована на создание токамака-реактора. Одной из основных проблем в реализации УТС остается проблема аномального переноса энергии и частиц в токамаке, который обусловлен турбулентностью плазмы. Именно поэтому на данный момент актуальна задача об изучении турбулентных процессов в плазме. В докладе представлены первые результаты анализа мелкомасштабных флуктуаций в новом компактном сферическом токамаке Глобус-М2 [1].

Для исследования турбулентных возмущений в горячей зоне удержания плазмы в токамаке использовался метод микроволнового доплеровского обратного рассеяния. Эта диагностика основана на регистрации рассеяния на мелкомасштабных флуктуациях плотности плазмы [2]. По спектрам сигнала обратно рассеянного излучения определялись такие характеристики турбулентностей, как их амплитуда и скорость вращения. С целью получения таких данных был разработан пакет программ для спектрального и корреляционного анализа сигналов в среде MATLAB. С помощью этих программ можно было получать путем обработки сигналов In-phase & Quadrature (IQ) детекторов обратно рассеянного излучения временные зависимости амплитуды и скорости. Все полученные данные представлялись в виде спектрограмм и коррелограмм. Относительно простой интерфейс позволял оперативно выбирать нужный для интерпретации экспериментальных данных метод статистической обработки хаотических флуктуаций или способы выделения квазикогерентных колебаний. Предварительно с помощью метода расчёта лучевых траекторий определялись локализация области обратного рассеяния и волновые числа рассеивающих флуктуаций.

В работе продемонстрированы результаты анализа данных, полученных в первых сериях разрядов на токамаке Глобус-М2 в экспериментах с нагревом плазмы с помощью пучка нейтральных атомов. Исследовалась эволюция спектров колебаний амплитуды и скорости при переходе из L-режима в H-моду. Приведены данные о спектрах флуктуаций в H-моду при развитии локализованных на периферии мод (ELMs) и в разрядах с переходным режимом удержания (в I-фазе). Все данные сопоставляются с результатами спектральных исследований, полученных в других экспериментах, в том числе и в токамаке Глобус-М при пониженном магнитном поле.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2020-0024).

Список литературы

1. V B Minaev et al 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1094 012001
2. Hirsch M. et al 2001 Plasma Phys. Control. Fusion 43 1641

О конвекции Рэлея-Бенара в сжимаемом газе

Палымский И. Б.^{1,2}

¹СГУГИТ

²СиБГУТИ

e-mail: palymsky@yandex.ru

Конвекция Рэлея-Бенара – классическая область науки, в рамках которой для несжимаемой среды разработана основанная на приближении Буссинеска математическая модель и соответствующие численные методы [1,2]. Однако, при конвекции газа приближение Буссинеска справедливо только в лабораторных условиях, а конвекция в областях высотой несколько десятков сантиметров и более требует учета сжимаемости газа на основе полных уравнений газовой динамики из-за относительно большого изменения гидростатического давления по высоте области [3].

Однако, конвекция газа на основе полных нелинейных уравнений газовой динамики исследована слабо, что обусловлено техническими трудностями, связанными, во-первых, с жесткостью системы уравнений, что обуславливает необходимость проводить вычисления с неоправданно малыми шагами по времени и, во-вторых, с крайне малым относительным изменением давления [4].

Для исследования влияния высоты области на устойчивость статического режима конвекции Рэлея-Бенара, возникающей при подогреве снизу, по полным уравнениям газовой динамики [1,6] была рассчитана нейтральная кривая, где значение критического числа Рэлея есть функция высоты области, которая изменялась в расчетах от 0.005 м до 0.5 м.

При численном интегрировании все границы области предполагались жесткими с условием прилипания для скорости и изотермическими, отнесенный к вертикальному горизонтальный размер области всегда был равен π , значения всех параметров соответствуют воздуху при нормальных условиях и зависимостью коэффициентов вязкости и теплопроводности от температуры пренебрегается.

Показано, что критическая высота области (для воздуха в нормальных условиях примерно 21 см) делит нейтральную кривую на две части. Исключая небольшую переходную зону, критическое число Рэлея при высоте области меньше критической близко к значению 1971.4, соответствующему конвекции несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска и больше критической – к критическому значению числа Рэлея, построенному по адиабатическому градиенту температуры. Другими словами, критическая высота разделяет по степени вариации гидростатического давления изобарный и сверхадиабатический режимы конвекции.

Показано, что значение критической высоты пропорционально корню четвертой степени из произведения кинематической вязкости, температуропроводности и абсолютной температуры газовой смеси.

По условию постоянства рассчитанного критического значения числа Рэлея видно, что диапазон применимости приближения Буссинеска простирается по высоте области от 1 см до 10 см, при меньшей высоте области использование приближения Буссинеска неправомерно из-за больших вариаций температуры и плотности, а при большей – из-за относительно сильного изменения гидростатического давления и обусловленной им сжимаемости.

Подчеркнем, что смена режимов конвекции наблюдается при высоте области, при которой вариация давления ничтожно мала и имеет порядок тысячных долей процента от значения давления на нижней границе области, принятого за характерное. Отметим, что при высоте области больше 17 см критическая разность температур соответствует

устойчивой стратификации среды по плотности, то есть конвекция развивается при уменьшающейся с высотой плотности газа. Этот эффект связан с адиабатическим характером движения частиц газа и следует из соотношений Пуассона и уравнения для плотности газа в статическом состоянии. Показано также, что при высоте области большей 32 см величина критического градиента температуры заметно (примерно на 15 %) меньше адиабатического.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грант №20-08-00903-а.

Список литературы

1. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости, М.: Наука, 1972, 392 с.
2. Палымский И.Б., Турбулентная конвекция Рэлея-Бенара. Численный метод и результаты расчетов, Germany: LAP, 2011, 232 с.
3. Кригель А.М., Вопросы термодинамики турбулентной конвекции, Журнал технической физики, Т.86, В.11, 136-139, 2016.
4. Лапин Ю.В., Стрелец М.Х., Внутренние течения газовых смесей, М.: Наука, 1989, 368 с.
5. Полежаев В.И., Численное решение уравнений Навье-Стокса для течения и теплообмена в замкнутой двумерной области, Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., 1967, 196 с.

Определение температуры за отраженной ударной волной по спектрам оксидов AlO и CaO

Безверхний Н. О.¹, Лапушкина Т. А.¹, Монахов Н. А.¹, Петренко М. В.¹, Поняев С. А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: nikolaybezverhny@gmail.com

Изучение метеоритов может дать информацию об условиях в ранней Солнечной системе. Объекты размером более нескольких метров могут упасть на Землю, поэтому их состав можно исследовать в лаборатории. Иная ситуация для небольших объектов, которые полностью сгорают в атмосфере. Состав таких объектов можно определить только с помощью спектроскопического анализа светового следа [1].

Видимое излучение возникает в основном из-за возбуждения атомов и молекул при взаимных столкновениях, а также рекомбинации свободных электронов с ионами и последующих каскадных переходов. В работе [2] анализируется молекулярное излучение оксидов в спектре болида. В спектрах были идентифицированы молекулярные полосы AlO, CaO, FeO и MgO. Однако, не все молекулярные константы CaO известны, поэтому спектр не был подробно проанализирован.

В данной работе получены спектры излучения молекулы AlO и CaO за фронтом отраженной ударной волны на ударной трубе диаметром 50 mm. Разработана модель спектра излучения AlO. Проведена оценка температуры плазмы по наблюдаемым в спектре молекулярным полосам AlO. Представленные результаты могут быть использованы для проверки теоретических моделей спектра излучения молекулы CaO при различных температурах.

Список литературы

1. Rudawska, R., Zender, J., Koschny, D., Smit, H., Lohle, S., Zander, F., Eberhart, M., Meindl, A., Latorre, I. U., 2020. A spectroscopy pipeline for the Canary island long baseline observatory meteor detection system. *Planetary and Space Science* 180, 104773. doi:10.1016/j.pss.2019.104773
2. Borovicka, J., Berezhnoy, A.A., 2016. Radiation of molecules in Benešov bolide spectra. *Icarus*, Volume 278, p. 248-265. doi:10.1016/j.icarus.2016.06.022

Моделирование распространения слабых ударных волн в водной пене

Гайнуллина Э.Ф., Болотнова Р.Х.

ИМех УФИЦ РАН

e-mail: elina.gef@yandex.ru

Изучение демпфирующих способностей водных пен, снижающих интенсивность ударных волн, имеет важный научно-практический интерес, поскольку преграды из водных пен являются одним из перспективных методов защиты от ударного воздействия высокоэнергетических технологических процессов на промышленных производствах.

Особенности динамики сильных ударных волн в водных пенах исследованы в работах [1] – [3], в которых отмечено, что при прохождении сквозь пенную среду происходит значительное ослабление ударного импульса и уменьшение скорости его распространения. При воздействии интенсивных ударных волн водная пена разрушается на микрокапли. В этом случае при ее описании используется модель газожидкостной смеси [3]. Представляют интерес исследования, связанные с изучением динамической реакции водной пены на слабое ударное воздействие, сохраняющее ее структуру [4].

В настоящей работе теоретически исследовалось распространение ударных волн небольшой амплитуды в ударной трубе, заполненной воздухом и содержащей слой водной пены, в соответствии с экспериментами [4]. Моделирование изучаемого процесса проведено с использованием разработанной авторами двухфазной модели водной пены [5] в однодавленческом, односкоростном, двухтемпературном приближении на основе подхода [6]. Модель учитывает межфазный контактный теплообмен Ранца-Маршалла, эффективную вязкость Гершеля–Балкли, описывающую поведение пены как неньютоновской жидкости, с дополнительным описанием упругих свойств водной пены при слабом ударном воздействии, не допускающем ее разрушение. Свойства компонент воздуха и воды, входящих в пенную структуру, описаны с помощью реалистических уравнений состояния. Компьютерная реализация модели выполнена в новом решателе открытого пакета гидродинамического моделирования OpenFOAM посредством внедрения в него новой модели водной пены, позволяющей описывать ее вязкопластические, термодинамические и упругие свойства.

При анализе результатов численного моделирования оценена достоверность описания динамики слабых ударных волн в газожидкостной пене, подтвержденная сравнением найденных решений и экспериментальных данных [4]. Получены оценки влияния термодинамических и вязкоупругих свойств водной пены на интенсивность и структуру ударной волны.

Исследования Болотновой Р.Х. поддержаны средствами госбюджета по госзаданию 0246–2019–0052, исследования Гайнуллиной Э.Ф. выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90013.

Список литературы

1. Del Prete E., Chinnayya A., Domergue L. et al., Blast Wave Mitigation by Dry Aqueous Foams, *Shock Waves*, vol. 23, no. 1, 39–53, 2013.
2. Jourdan G., Marian C., Houas L. et al., Analysis of shock-wave propagation in aqueous foams using shock tube experiments, *Phys. Fluids*, vol. 27, 056101, 2015.
3. Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F., Modeling dynamics of shock impact on aqueous foams with account for viscoelastic properties and syneresis phenomena, *Fluid Dynamics*, no. 5, 604–608, 2020.
4. Monloubou M., Le Clanche J., Kerampran S., New experimental and numerical methods to characterise the attenuation of a shock wave by a liquid foam, *Actes 24ème Congrès Français de Mécanique*. Brest: Association Française de Mécanique (AFM), 255125, 2019.
5. Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F., Influence of the dissipative properties of aqueous foam on the dynamics of shock waves, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 61, no. 4, 510–516, 2020.
6. Tacconi Z., Feasibility analysis of a two-fluid solver for cavitation and interface capturing as implemented in OpenFOAM, *Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica*, Politecnico di Milano, 134, 2018.

Gas discharge sustained by powerful THz and sub-THz gyrotrons in the mixtures of noble gases with nitrogen

Сидоров А. В.¹, Веселов А.П.¹, Разин С.В.¹, Бармашова Т.В.¹, Водопьянов А.В.¹, Лучинин А.Г.¹, Орловский А.А.¹, Глявин М.Ю.¹

¹ИПФ РАН

e-mail: alvasid@inbox.ru

Sub-terahertz and terahertz frequency ranges still remain the least studied from the point of view of gas discharge physics. Investigation of terahertz gas discharge, sustained by the powerful focused beams of the electromagnetic radiation, has become possible recently due to the development of the powerful sources in this range (FELs and gyrotrons) and is of interest both from a fundamental research and from possible applications.

This work presents the results of the studies of the discharge propagation under the action of the focused beam of sub-terahertz (263 GHz) [1] and terahertz (670 GHz) [2] gyrotrons. The discharge propagation velocity towards electromagnetic radiation was measured in various noble gases (argon, krypton) mixtures with nitrogen in the wide pressure range (0.1 – 2 atm) for various field intensities into the focal spot (from dozen of kW/cm² to several MW/cm²).

The experimental setups with both gyrotrons described in detail in [3]. In case of 263 GHz it was CW gyrotron with power up 1 kW, in case of 670 GHz – pulsed gyrotron (20 μs) with power up to 40 kW.

In both cases the focusing system provided the size of the focal spot of $(2-3) \cdot \lambda$, which ensured the investigation of discharge phenomena in a wide pressure range (0.1 – 2 atm). To avoid

the influence of residual gas the vacuum discharge chamber before filling with operating gas was evacuated to a pressure of 10^{-6} Torr. The optical glow of the discharge was recorded both with the help of a camera, speed camera and streak camera.

In both cases discharge appeared in the focal spot spread towards heating radiation into the area with the field intensity much less than one in the focal spot.

Velocity of the discharge propagation was measured by using photos from speed camera with small exposure (down to 20 ns) and streak camera. It was demonstrated that discharge velocity increase along with pressure decrease and drops with electric field decrease as it moves away from the focal spot.

Список литературы

1. М. Yu. Glyavin, et al, *Rev. Sci. Instrum.*, v. 86, p. 054705, 2015.
2. М. Yu. Glyavin, A. G. Luchinin, G. S. Nusinovich, J. Rodgers, D. G. Kashyn, C. A. Romero-Talamas, and R. Pu, *Appl. Phys. Lett.* v. 101, p. 153503, 2012.
3. A V Sidorov, S V Golubev, S V Razin, A P Veselov, A V Vodopyanov, A P Fokin, A G Luchinin and M Yu Glyavin, *J. Phys. D: Appl. Phys.* v. 51, p. 464002, 2018.

Использование технологий 3D-печати в импульсном газодинамическом эксперименте

Котов М. А.¹, Монахов Н.А.², Поняев С.А.², Попов П.А.², Твердохлебов К.В.²

¹ИПМех РАН, ²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kotov@ipmnet.ru

Важным научным направлением является поиск и разработка эффективных методов управления высокоэнтальпийными потоками газа вблизи поверхности высокоскоростных летательных аппаратов [1,2]. Для успешного решения указанных проблем необходимо иметь возможность экспериментального исследования тепловых потоков к поверхности тела, находящегося в сверхзвуковом и гиперзвуковом потоке газа со значительной степенью ионизации в широком диапазоне энтальпий. Важной задачей для развития научных представлений о процессах теплообмена при высокоскоростном движении является получение надежных экспериментальных данных с использованием импульсных аэродинамических установок и сравнение этих данных, полученных на различных установках при схожих параметрах течения. Сравнительно простым устройством для создания высокоэнтальпийных газовых потоков является ударная труба, сопряженная со сверхзвуковым соплом. Как правило, для создания течения в находящемся за торцом ударной трубы в сопле реализуется режим отражения ударной волны от торца, при этом характеристики течения в сопле определяются параметрами газа (температурой и давлением) в зоне торможения вблизи торца ударной трубы. При этом важным техническим этапом в данных исследованиях является разработка и изготовление трехмерных моделей различной формы для реализации их обтекания сверхзвуковым потоком. Форма моделей в таких экспериментах может изменяться от простых геометрических форм и их комбинаций, типа «конус-цилиндр» [3], , полусфера [4], клин и полуклин [5,6], до комплексных конструкций, например, моделей спускаемых аппаратов с внешними и внутренними сложными конструкционными элементами для установки вставок их различных материалов, датчиков и исполнительных механизмов.

В данной работе рассматриваются особенности применения методов 3D печати для быстрого прототипирования и изготовления моделей для импульсного высокоскоростного газодинамического эксперимента. Современные аддитивные технологии позволяют осуществлять технологичное изготовление моделей, пригодных для применения в импульсном газодинамическом эксперименте, за минимальное время и число стадий обработки на доступном оборудовании. Структура и свойства получаемых моделей могут быть недостижимы с помощью традиционных технологий изготовления.

Представляется вариант конструкции соплового блока аэродинамической установки, предусматривающей изготовление профилированных контуров методом трехмерной печати. Комбинация состоит из трех элементов – двух металлических фланцев и модели сопла, изготавливаемой на 3D-принтере. Спроектированная конструкция осесимметричного соплового блока может применяться в аэродинамических установках с высокой продолжительностью рабочего времени, где характерные диаметры выходного сечения сопла не превышают несколько десятков см, а температурные параметры набегающего потока не превышают 60-100 °С. Эти значения на сегодняшний день являются типичными показателями полезной области печати большинства 3D-принтеров и максимальной рабочей температуры для большинства материалов, используемых в аддитивных технологиях и доступных на рынке [7]. Данная конструкция может применяться и в газодинамических установках кратковременного действия и в ударных трубах, поскольку основной нагрев происходит в области перед металлической торцевой гайкой входного сечения сопла, а период высокоэнтальпийных нагрузок непосредственно на сопловый контур составляет до нескольких десятков мс, что сравнительно мало для предельных значений интегральной тепловой нагрузки материалов. Можно отметить, что представленная логика проектирования соплового блока может быть применена для изготовления деталей и их использования на установках, работающих с плоскими прямоугольными соплами.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации (МК-144.2020.1).

Список литературы

1. Lapushkina T A, and Erofeev A V 2017 *Tech. Phys. Lett.* 43 17.
2. Bobashev S V, Mende N P, Popov P A, and Sakharov V A 2010 *Tech. Phys.* 55 1760.
3. Bobashev S V, Mende N P, Popov P A, and Sakharov V A 2010 *Tech. Phys.* 55 1760.
4. Kotov M A, Kryukov I A, Ruleva L B, Solodovnikov S I and Surzhikov S T 2015 *Supersonic Air Flows Around Some Geometrical Primitives 33rd AIAA Applied Aerodynamics Conf. AIAA 2015–3012.*
5. M A Kotov et al 2017 *J. Phys.: Conf. Ser.* 815 012025.
6. Kotov M A, Kryukov I A, Ruleva L B and Solodovnikov S I 2017 *The Investigation of Shock Wave Interaction with Aerodynamic Models 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting paper 2017–0262 AIAA.*
7. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M., *Additive Manufacturing Technologies* 3rd ed., Springer, 2021.

Самоорганизация газоразрядной плазмы сильно электроотрицательных газов

Казанцев С. Ю.^{1,2}, Андреев С.Н.¹, Нижегородов В.В.¹, Подлесных С.В.^{2,3}

¹Московский политех

²МТУСИ

³ИОФ им. А.М. Прохорова РАН

e-mail: s-kazantsev@mail.ru

Известно, что в некоторых газовых смесях, содержащих сильно электроотрицательные газы возможно получение объемного самостоятельного разряда без использования специальных устройств предыонизации [1-3]. Данная форма разряда была названа самоиницирующий объемный разряд (СИОР) [1]. При этом однородность СИОР может быть существенно улучшена, если применять полупроводниковые или анизотропно-резистивные катоды [2]. Сочетание особенностей разряда в газовых смесях, содержащих сильно электроотрицательные газы и использование специальных электродов, позволяет формировать однородный масштабируемый разряд и возбуждать большие объемы газовой среды, что находит применения в нецепных HF(DF) лазерах [1,2], химическом кислородно-йодном лазере с объемной наработкой атомов йода [3] и плазмохимических реакторах [4]. В [5, 6] было показано, что особенности СИОР обусловлены процессами самоорганизации диссипативных структур, представляющих собой диффузные каналы, прорастающие из катодных пятен. Целью настоящей работы являлось исследование влияния материала и структуры катода на рождение и процесс самоорганизации диссипативных плазменных структур.

Проведены экспериментальные и теоретические исследования процессов возникновения и самоорганизации плазменных структур, возникающих в газоразрядной плазме сильно электроотрицательных газов. Установлено, что рождение плазменных структур, формирующих визуально однородный объемный самостоятельный разряд в разрядных промежутках с металлическими и полупроводниковыми электродами инициируется эктонами [7], возникающими в процессах взрывной эмиссии электронов с участков поверхности катода, обладающей повышенной эмиссионной способностью. Проведен анализ фотографий СИОР, полученных в различных условиях и выявлены закономерности пространственного распределения диссипативных структур в разрядном объеме. Для описания динамики формирования диссипативных структур в плазме СИОР разработана простая математическая модель, которая дает качественное, а в некоторых случаях и хорошее количественное описание явлений, наблюдаемых в эксперименте.

Список литературы

1. Аполлонов В.В. и др. Самоиницирующий объемный разряд в нецепных HF-лазерах на смесях SF₆ с углеводородами // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. – №. 3. – С. 207-214.
2. Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Podlesnykh S.V. Self-sustained volume discharge in mixtures of SF₆ with hydrocarbons, hydrogen and deuterium for non-chain HF(DF) lasers // Journal of Physics D: Applied Physics, том 51, 384003, 2018.
3. Белевцев А. А. и др. Самоиницирующий объемный разряд в иодидах, используемый для наработки атомарного йода в импульсных химических кислородно-йодных лазерах // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33. – №. 6. – С. 489-492.

4. Аксинин В.И. и др. Возможность применения объемного самостоятельного разряда в смесях $\text{SiF}_4\text{--H}_2$ для синтеза фторсиланов //Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2. – №. 1. – С. 24-30.
5. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю. Самоорганизация газоразрядной плазмы в SF_6 и смесях на его основе //Письма в ЖТФ. – 2019. – Т. 45. – №. 9. – С. 23-25.
6. Аполлонов В. В., Казанцев С. Ю. Самоорганизация диссипативных структур в газоразрядной плазме самоинициирующегося объемного разряда //Краткие сообщения по физике Физического института им. ПН Лебедева Российской Академии Наук. – 2019. – Т. 46. – №. 5. – С. 14-20.
7. Месяц Г. А. Эктоны в электрических разрядах //Письма в журн. эксперим. и теор. физики. – 1993. – Т. 57. – №. 2. – С. 88-90.

Построение первичных моделей процесса восстановления теплозащитного покрытия с низкой работой выхода электронов спускаемых аппаратов в полете

Колычев А. В.¹, Ренев М.Е., Савелов В.А., Архипов П.А., Керножицкий В.А.

¹БГТУ ВОЕНМЕХ им. Д.Ф. Устинова

e-mail: anturui@mail.ru

В настоящее время актуальным является разработка и создание частично многоразовых ракет-носителей и многоразовых спускаемых аппаратов (СА). Основной тенденцией является разработка методов и средств повышения надежности и ресурса систем их тепловой защиты, в том числе и при многократном его применении.

Для решения данных задач (повышения надежности и ресурса) предлагается теплозащитное покрытие, нанесенное на элемент конструкции летательного аппарата, восстанавливать в процессе полета [1]. Для в область перед защищаемым элементом конструкции или поверхности СА навстречу набегающему потоку через устройство подачи, например, форсунку или сопло, подают порошок из жаростойкого и жаропрочного материала. Причем данный материал является материалом слоя теплозащитного покрытия, которое уже нанесено изначально на защищаемый элемент конструкции. Для осуществления такого способа СА оборудуется внутренним устройством, обеспечивающим в полете подачу порошкообразного материала в наружное лобовое пространство при одновременном формировании электростатического поля в этом пространстве.

Во время нахождения в наружном лобовом пространстве происходит разогрев в потоке плазмы набегающего потока частиц покрытия и термоэмиссия электронов с этих частиц. В результате они приобретают положительный заряд. Само теплозащитное покрытие имеет отрицательный потенциал и к нему начинают притягиваться частицы с положительным зарядом. В результате происходит прилипание частиц теплозащитного покрытия к исходному покрытию и его восстановление. Таким образом, реализуется плазменное нанесение теплозащитного покрытия, в котором плазмой является плазма набегающего потока воздуха, а подложкой - само исходное теплозащитное покрытие.

Кроме того, если частицы порошка восстанавливаемого защитного покрытия выполнены из материала с низкой работой выхода электронов, то при его восстановлении (наслоении) и нейтрализации, оно также начинает испускать электроны - происходит термоэлектронная эмиссия и термоэмиссионное охлаждение восстанавливаемого защитного

покрытия. Таким образом, появляется возможность повысить надежность и ресурс спускаемых аппаратов.

В настоящей работе рассмотрены первичные модели процесса восстановления теплозащитного покрытия с низкой работой выхода электронов спускаемых аппаратов в полете.

Список литературы

1. Колычев А.В., Керножицкий В.А. Усаченко А.Д. Патент на изобретение № 2719052 «Способ тепловой защиты элемента конструкции летательного аппарата в полете и устройство для его осуществления», 17.04.2020, заявка от 11.03.2019.

Анализ динамики формирования сверхзвуковой струи водяного пара при истечении из тонкого сопла

Коробчинская В. А.¹, Болотнова Р.Х., Файзуллина Э.А.

¹ИМех УФИЦ РАН

e-mail: buzina_lera@mail.ru

В последнее время изучение струйных течений связано с их широким применением в различных технологиях по распылению жидкостей и направлено на решение проблем безопасности современного энергетического оборудования.

В работе [1] исследовались процессы эволюции газовых струй, сопровождающиеся формированием дисков Маха и образованием вихревых колец. В [2] проводились эксперименты по исследованию истечения перегретой воды из камеры высокого давления через короткие цилиндрические и щелевые каналы. Определялся угол распада струи в зависимости от различных режимных факторов и начальных условий. В [3] численно исследовался процесс истечения воды при начальном сверхкритическом давлении при торцевом разрыве трубопровода.

Целью данной работы является моделирование и численное исследование процесса пространственного истечения через тонкое сопло кавитирующей струи водяного пара в окружающую среду в соответствии с экспериментами работы [2].

При моделировании поставленной задачи используется двухтемпературная, однодавленческая, односкоростная двухфазная модель газожидкостной смеси [4, 5], учитывающая контактный теплообмен и массообменные процессы испарения и конденсации.

Компьютерная реализация предложенной модели газожидкостной смеси осуществлена с использованием разработанного авторами решателя в среде пакета OpenFoam. Обоснование достоверности применяемого численного метода проведено при сравнительном анализе решений задачи о точечном взрыве в газе, полученных применением решателя пакета OpenFOAM и автомодельного аналитического метода, предложенного Седовым [6].

Проведенные численные исследования сверхзвуковых режимов истечения интенсивно расширяющейся вскипающей струи выявили условия формирования висячего скачка уплотнения с образованием диска Маха. Отмечено, что появление зон низкого давления сопровождается вихреобразованием и закручиванием струи в сторону внешнего участка. Показано, что на дальнейшее развитие основного струйного течения оказывают влияние сформированные группы тороидальных вихрей, которые приводят к

последовательности акустических волновых импульсов в газовой области, предшествующих основной струе.

Исследования поддержаны средствами госбюджета по госзаданию 0246–2019–0052.

Список литературы

1. Ishii R., Fujimoto H., Hatta N., Umeda Y., Experimental and numerical analysis of circular pulse jets, J. Fluid Mech, vol. 392, 129–153, 1999
2. Решетников А.В., Бусов К.А., Мажейко Н.А., Скоков В.Н., Коверда В.П., Переходные режимы вскипания струй перегретой воды, Т и А, том. 19, № 3, 359–367, 2012
3. Алексеев М.В., Вожаков И.С., Лежнин С.И., Прибатурин Н.А., Волновые процессы при истечении водяного теплоносителя со сверхкритическими начальными параметрами, Т и А, том. 24, № 5, 821–824, 2017
4. Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф., Особенности формирования полой струи водяного пара сверхкритических параметров состояния, истекающего через тонкое сопло, Т и А, том. 25, № 5, 783–789, 2018
5. Болотнова Р.Х., Исследование динамики формирования полой струи при истечении пара из сверхкритического состояния, Многофазные системы, том. 13, № 4, 73–78, 2018
6. Болотнова Р.Х., Коробчинская В.А., Сопоставление численного и автомодельного решений задачи Седова о точечном взрыве в газе, Многофазные системы, том. 15, № 3–4, 212–216, 2020

Моделирование эффекта воспламенения горючих газов в полужамкнутом объеме

Быков Н. В.^{1,2}, Шестаков И.Е.¹

¹МГТУ им. Н. Э. Баумана

²ФИЦ Химической физики им. Н.Н. Семенова РАН

e-mail: bykov@bmstu.ru

Исследуется эффект самовоспламенения газовой смеси при сжатии поршнем. Такой эффект, в частности, возникает в пружинно-поршневых баллистических установках при добавлении небольшого количества смазки, которая при экспериментальных исследованиях воспламенялась. Такой эффект также известен под названием "дизель-эффекта" в пружинно-поршневых винтовках [1]. Также экспериментально известно [2], что этот эффект в подобных системах способен вызвать непредсказуемое увеличение скорости тела, что приводит к тому, что кинетическая энергия пули превышает допустимую энергию для нелетального оружия. В силу сказанного довольно важно уметь предсказывать и контролировать этот эффект для чего требуется умение его адекватно моделировать.

Для моделирования эффекта воспламенения и последующего горения смесей в полужамкнутом объеме используется двумерная газодинамическая модель турбулентного течения газов. Рассматривается приближение предварительно перемешанной смеси. Горение описывается в рамках модели диссипации вихря (eddy dissipation model) [3], основным положением которой является то, что время реакции намного меньше времени смешения:

$$\rho \dot{\omega}_k = A \frac{\varepsilon}{k} \max \left(Y_{fu}, \frac{Y_{ox}}{s}, \frac{Y_{pr}}{s+1} \right),$$

где ρ - плотность смеси; $\dot{\omega}_k$ - скорость горения (образования продуктов реакции); Y_{fu}, Y_{ox}, Y_{pr} - средние концентрации горючего, окислителя и продуктов реакции

соответственно; s - стехиометрические коэффициенты; A , B - настраиваемые параметры модели.

В результате моделирования было проведено сравнение давления, средней температуры и других параметров в случае отсутствия и наличия воспламенения смеси в результате ее сжатия поршнем. Также показан эффект увеличения скорости разгоняемого тела на 15 - 20%.

Список литературы

1. Travella D. Dieseling in Spring Piston Airguns: A Conceptual Analysis. Preprint, 2015. 25 p. DOI: 10.13140/2.1.1583.1847
2. Mogni B., Maines S. Homicide Using an Air Weapon. *Clin Pract Cases Emerg Med.* 2019;3(3):289-294. Published 2019 Jul 22. doi:10.5811/cpcem.2019.6.42982
3. Magnussen B. F. and Hjertager B. H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion, Symposium (International) on Combustion 16 (1), 719-729, (1977). DOI: 10.1016/S0082-0784(77)80366-4.

Приближенно-аналитическая модель сверхзвукового течения с маховским отражением при наличии импульсного энергоподвода

Чернышов М. В.¹, Алексеева М.М.¹, Матвеев С.А.¹, Савелова К.Э.¹

¹ БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

e-mail: mvcher@mail.ru

Развитие реактивной техники и струйных технологий требует теоретического анализа ударно-волновой структуры течений с нерегулярным (маховским) отражением косых скачков уплотнения. Такие течения возникают, например, во входных частях воздухозаборников сверхзвуковых летательных аппаратов, в сверхзвуковых газовых струях и сопловых устройствах. Быстрая и простая оценка размеров маховских скачков, на поверхности которых имеют место повышенные потери полного давления и соответствующий рост энтропии потока газа, позволяет управлять параметрами реактивных двигателей, дальностью сверхзвуковой струи в технологических установках.

Разработанные ранее приближенно-аналитические модели течений (см., например, [1]) позволяли с разной степенью точности определить ключевой параметр задачи – высоту тройной точки маховского отражения. Обладая значением этого параметра, несложно восстановить форму и свойства других газодинамических разрывов в поле течения.

Интерес к уточнению предшествующих и созданию новых приближенно-аналитических моделей, проявившийся в последние несколько лет [2-4], по-видимому, связан с практической разработкой аппаратов для полетов с высокой сверхзвуковой скоростью, а также прямоточных детонационных двигателей и комбинированных двигательных устройств [5].

В представленном докладе проведен сравнительный анализ разработанных моделей сверхзвуковых течений с маховским отражением. Параметры ударно-волновой структуры, полученные с помощью приближенно-аналитических моделей, сравниваются с экспериментальными данными и результатами численного моделирования.

Повышенная температура потока газа (или топливно-воздушной смеси) за маховским скачком уплотнения, в несколько раз превышающее температуру за системой из падающего и отраженного косых скачков, может инициировать импульсный энергоподвод, а также другие высокотемпературные физико-химические явления. Авторами разработана приближенно-аналитическая модель, позволяющая учесть возможность положительного или отрицательного импульсного энергоподвода за главным скачком. Положительный энергоподвод может быть связан с инициируемыми экзотермическими химическими реакциями, отрицательный - с затратами энергии на проявление эффектов реального газа. Таким образом, данные существующих аналитических моделей уточняются без ущерба для быстроты оценки параметров ударно-волновой структуры течения и возможности управления потоком в режиме реального времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (НИР «Создание опережающего научно-технического задела в области разработки передовых технологий малых газотурбинных, ракетных и комбинированных двигателей сверхлегких ракет-носителей, малых космических аппаратов и беспилотных воздушных судов, обеспечивающих приоритетные позиции российских компаний на формируемых глобальных рынках будущего», FZWF-2020-0015).

Список литературы

1. Омельченко А.В., Усков В.Н., Чернышов М.В. Об одной приближенной аналитической модели течения в первой бочке перерасширенной струи // Письма в Журнал технической физики. 2003. Т. 29. Вып. 6. С. 56-62.
2. Tao Y., Liu W., Fan X., Xiong B., Yu J., Sum M. A study of the asymmetric shock reflection configurations in steady flows // Journal of Fluid Mechanics. 2017. Vol. 825. Pp. 1-15.
3. Lin J., Bai C.-Y., Wu Z.-N. Study of asymmetrical shock wave reflection in steady supersonic flow // Journal of Fluid Mechanics. 2019. Vol. 864. Pp. 848-875.
4. Roy S., Gopalapillai R. An analytical model for asymmetric Mach reflection configuration in steady flows // Journal of Fluid Mechanics. 2019. Vol. 863. Pp. 242-268.
5. Chernyshov M.V., Murzina K.E., Matveev S.A., Yakovlev V.V. Shock-wave structures of prospective combined ramjet engine // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 618. Paper No. 012068. 10 pp.

Расчет параметров реального газа и измерение давления за отраженными ударными волнами различной интенсивности

Сахаров В.А., Резников Б.И., Лапушкина Т.А., Масюкевич А.В., Поняев С.А., Монахов Н.А.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: 79313165906@yandex.ru

Импульсные газодинамические установки, в частности, ударные трубы, являются эффективным инструментом для изучения широкого спектра физических явлений, которые можно разделить на два основных направления. В первом случае исследуются процессы, происходящие непосредственно в самом рабочем газе при его взаимодействии с ударными волнами. Во втором случае ударная труба используется в качестве средства создания высокоскоростного потока газа и предметом исследования являются процессы,

возникающие при его взаимодействии с поверхностью модели. В таком случае, помимо камеры низкого и высокого давления ударной трубы, установка дополняется сверхзвуковым соплом, выходящим в демпферный бак.

Принципиальным условием получения достоверных результатов является контроль параметров ударно нагретого газа при входе в сверхзвуковое сопло, особенно в случае высоких чисел Маха падающей ударной волны. В этом случае особенно становится заметным отличие от идеальной теории ударной трубы, использующей предположение об одномерном адиабатическом процессе с постоянным показателем адиабаты газа. В настоящей работе представлены результаты расчета газодинамических параметров с учетом диссоциации за отраженной ударной волной в широком диапазоне чисел Маха. Проведено сравнение полученных расчетных данных с результатами экспериментов, выполненных на ударной трубе ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Для измерения параметров газа за отраженной ударной волной, в торцевой части камеры низкого давления была установлена заглушка, в которой были установлены пьезоэлектрические датчики давления. Определена граница применимости идеальной теории, показана необходимость учета диссоциации газа при высоких числах Маха падающей ударной волны. Также определен корректирующий коэффициент, показывающий отличие экспериментальных данных, полученных на данной установке от рассчитанных по идеальной теории.

Список литературы

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Дрофа, 2003, 840 с.
2. Ударные трубы. Сборник статей по ред. Х.А. Рахматуллина и С.С.Семенова, Изд-во иностранной литературы, 1962, 700 с.

Эффективность использования переходов Н-подобных ионов для формирования активных сред источников излучения высокой яркости в мягком рентгеновском спектральном диапазоне

Тимишина М. В.^{1,2}, Калинин Н.В.¹, Бурцев В.А.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²ООО Лаборатория им. В.А. Бурцева

³СПбГУ

e-mail: mariyatimshina@yandex.ru

Создание источников излучения высокой яркости в мягком рентгеновском спектральном диапазоне на сегодняшний день является актуальной задачей. В качестве примеров можно отметить большой практический интерес к применению таких источников в области биологических и медицинских исследований, рентгеновской микроскопии, диагностики плазмы и т.д.

Один из перспективных подходов к решению данной проблемы основан на использовании плазмы многозарядных ионов в качестве активной среды источников излучения. В зависимости от механизма создания плазмы с необходимым неравновесным ионным составом наиболее часто анализируются ионизационно-столкновительная и рекомбинационная накачки, имеющие свои достоинства и недостатки [1,2].

В данном докладе рассматривается рекомбинационная накачка активной среды Н-подобных ионов азота. В качестве механизмов охлаждения плазмы задается расширение и собственное объемное излучение. Проведен комплексный анализ эффективности использования переходов 3-2 и 4-3, основанный на результатах разработанной авторами модели поуровневой кинетики формирования активной среды, позволяющей моделировать изменение заселенности рабочих уровней и коэффициент усиления слабого сигнала k при варьировании рабочих условий.

Во-первых, приведены расчеты для стационарных условий по температурам и плотностям, которые позволили определить область изменения температуры и плотности, в которой на переходе 3-2 и 4-3 можно получить усиление с $k > 1 \text{ см}^{-1}$. Однако, в физических устройствах температура и плотность электронов не изменяются независимо, а связаны динамикой плазмы. В связи с этим также приведены результаты расчетов для нестационарных профилей температуры и плотности, получаемых в гидродинамическом расчете при использовании лазерной накачки. В этом случае также возможно получение критического значения коэффициента усиления $k > 1 \text{ см}^{-1}$. Динамика плазмы рассчитывалась в одномерном (1D) одножидкостном, двухтемпературном (2T) гидродинамическом приближении самосогласованно и расчетом неравновесной ионизации. Далее производится расчет усилительных характеристик плазмы.

Согласно проведенным расчетам, оптимальные коэффициенты усиления слабого сигнала на переходах 3-2 и 4-3 отличаются незначительно. В то же время, длина волны, соответствующая переходу 3-2 (13.4 нм) примерно в 3 раза меньше, чем переходу 4-3 (38.2 нм), что создает определенные преимущества переходу 3-2.

Список литературы

1. Держиев В.И., Жидков А.Г., Яковленко С.И. Излучение ионов в неравновесной плотной плазме. – М.: Энергоатомиздат, 1986. 160 с.
2. Боровский А.В., Галкин А.Л. Лазерная физика: Рентгеновские лазеры, ультракороткие импульсы, мощные лазерные системы. – М.: ИздАТ, 1996.

Численное моделирование теплового состояния реактора по обезвоживанию плавиковой кислоты во фронте фильтрационного горения углерода в кислороде

Попов П.А.¹, Талалов В.А.², Пашкевич Д.С.², Камбур П.С.², Капустин В.В.²

¹ФТИ им. А.Ф.Иоффе

²СПбПУ

e-mail: valentin.kapustin.2014@yandex.ru

Фторид водорода с содержанием воды не более 0,6 масс.% широко применяют в современной химической промышленности как фторирующий агент. Сырьевым источником фторида водорода является высококачественный плавиковый шпат – природный минерал, запасы которого ограничены. Поиск альтернативных источников фторида водорода является актуальной задачей.

В некоторых современных производствах побочным продуктом являются водные растворы фторида водорода, именуемые плавиковой кислотой. Плавиковая кислота с содержанием фторида водорода 40% является азеотропным раствором, и технологии получения из этой смеси фторида водорода отсутствуют.

В работах [1-3] приведен термодинамический анализ и экспериментальное исследование метода получения фторида водорода при высокотемпературном взаимодействии испаренной плавиковой кислоты с углеродом во фронте горения углерода в кислороде. В этом процессе при температуре порядка 1500 К вода, входящая в состав плавиковой кислоты, взаимодействует с углеродом с образованием водорода и монооксида углерода, а фторид водорода остаётся химически и термически стабильным.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования процессов тепло и массообмена в реакторе получения фторида водорода при высокотемпературном взаимодействии испаренной плавиковой кислоты во фронте фильтрационного горения углерода в кислороде. Рассчитанные поля температуры сравниваются с полученными в эксперименте.

Список литературы

1. Пашкевич Д.С., Алексеев Ю.И., Петров В.Б. [и др.] Стабильность фторида водорода в высокотемпературной зоне восстановления воды углеродом // Химическая промышленность. - 2015. - Т. 92., №5. - С. 211-220.
2. Капустин В.В., Пашкевич Д.С., Талалов В.А. [и др.] Исследование стабильности фторида водорода в условиях протекания реакции получения водяного газа // Инженерно-физический журнал. - 2019. Т. 92., №4. С. 917-926.
3. Капустин В.В., Пашкевич Д.С., Мухортов Д.А. [и др.] Конверсия водяного пара при взаимодействии испаренной плавиковой кислоты с углеродом // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. - 2019. Т. 12., №1. - С.105-116.

Применение термоэлектрических преобразователей излучения для регистрации теплового потока за отраженной ударной волной

Котов М.А.¹, Шемякин А.Н.¹, Соловьев Н.Г.¹, Якимов М.Ю.¹, Глебов В.Н.², Дуброва Г.А.², Малютин А.М.², Попов П.А.³, Поняев С.А.³, Лапушкина Т.А.³, Монахов Н.А.³, Сахаров В.А.³

¹ИПМех РАН

²ИПЛИТ РАН

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: nm1988@mail.ru

Импульсные газодинамические установки, в частности, ударные трубы, являются эффективным инструментом для создания и изучения высокоскоростных течений газа. К используемым средствам диагностики предъявляются серьезные требования по минимальным габаритам, механической прочности, чувствительности и помехоустойчивости. Также, датчики должны обладать высоким быстродействием, поскольку максимальное рабочее время установок такого типа не превышает нескольких миллисекунд.

Коллективом авторов разработаны и изготовлены термоэлектрические датчики теплового потока на основе искусственно анизотропной пленки, получаемой методом вакуумного осаждения на подложку. Датчики такого типа успешно применяются в лазерных системах для измерения мощности излучения [1, 2]. Основной отличительной особенностью тонкопленочных термоэлектрических датчиков является возможность расчета плотности теплового потока непосредственно по электрическому сигналу. Работа посвящена

исследованию применимости датчиков в газодинамическом эксперименте на ударных трубах. В качестве тестовой задачи выбрано измерение теплового потока при отражении ударной волны от торца ударной трубы.

В торце камеры низкого давления были установлены тонкопленочный термоэлектрический датчик, датчик на анизотропных термоэлементах [3, 4] и датчик давления. В экспериментах регистрировался тепловой поток в начальной фазе отражения ударной волны различной интенсивности в азоте и ксеноне. Установлено, что созданный термоэлектрический датчик на основе анизотропных пленок обладает малым временем отклика, высоким уровнем электрического сигнала, а также достаточной механической прочностью при интенсивных силовых и тепловых воздействиях. Полученные результаты демонстрируют его применимость для тепловых измерений в импульсных газодинамических экспериментах с характерным временем процесса в несколько микросекунд.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-144.2020.1)

Список литературы

1. V.N. Glebov, V.M. Manankov, A.M. Malyutin, N.N. Golovatyuk, Y.V. Zastavny, Thermoelectric mirror-detector for laser radiation, Proc. SPIE 2257 (1994) 225–227.
2. A.N. Shemyakin, M.Yu. Rachkov, N.G. Solovyov, M.Yu. Yakimov, Radiation power control of the industrial CO₂ lasers excited by a nonself-sustained glow discharge with regard to dissociation in a working gas mixture, Optics and Laser Technology 98 (2018) 198–204.
3. P.A. Popov, S.V. Bobashev, B.I. Reznikov, V.A. Sakharov, A Method of Nonstationary Heat Flux Calculation Using the Signal of a Sensor Based on Anisotropic Bismuth Single-Crystal Thermoelements, Technical Physics Letters 44 (4) (2018) 316–319
4. P.A. Popov, V.A. Sakharov, S.A. Poniaev, N.A. Monakhov, M.A. Kotov, Heat flux measurement at the initial phase of normal shock wave reflection using the sensor on anisotropic thermoelements, Journal of Physics: Conference Series 1697 (1) (2020)

О фотоэмиссии электронов с поверхности пылевой частицы в газоразрядной плазме

Сясько А. В.¹, Голубовский Ю.Б.¹, Карасев В.Ю.¹

¹СПбГУ

e-mail: syaskoa@mail.ru

На протяжении длительного времени в литературе обсуждаются механизмы зарядки пылевых частиц в лабораторной газоразрядной плазме, что нашло отражение в многочисленных статьях и обзорных работах, например [1–2]. Детально обсуждаются механизмы, связанные с потоками электронов и ионов, которые ведут к отрицательной зарядке пылевой частицы вследствие амбиполярной диффузии. Обсуждаются вопросы о положительной зарядке частиц вследствие термоэлектронной и вторичной электронной эмиссии. Рассматривается влияние метастабильных атомов на нагрев пылевых частиц.

Также процессом, способным приводить к выбиванию электронов с поверхности частицы, является фотоэлектронная эмиссия под действием потока фотонов из объема плазмы. Наибольший интерес представляют фотоны резонансного излучения с энергиями

около 10-19 эВ, что превышает работу выхода для большинства материалов порядка 6 эВ. Величину потока эмитированных электронов можно найти как [3]:

$$\Phi = 4\pi a^2 YJ \begin{cases} 1 & \varphi_s < 0 \text{ (a)} \\ \exp(-e\varphi_s / kT) & \varphi_s > 0 \text{ (b)} \end{cases}$$

где a - радиус пылевой частицы, J - плотность потока фотонов, Y - коэффициент фотоэмиссии, φ_s - потенциал поверхности пылевой частицы, T - температура фотоэлектронов. Это выражение выведено в предположении изотропности источника излучения, коэффициенте поглощения излучения близком к единице, а также максвелловской функции распределения фотоэлектронов. В зависимости от знака заряда частицы, следует пользоваться выражением (a) или (b).

Для вычисления потока фотоэлектронов необходимо знать конкретное выражение для плотности потока фотонов J [см⁻²с⁻¹], попадающих на пылевую частицу. Авторам настоящей работы не удалось найти статьи, посвященные корректному вычислению этого потока. Следует иметь в виду, что сложность в вычислении потока резонансных фотонов связано с пленением излучения. Поскольку коэффициенты поглощения в центре резонансных линий велики ($k_0 \approx 10^6$ см⁻¹), фотоны испытывают многочисленные акты поглощения с переизлучением. Несмотря на большие коэффициенты поглощения, фотоны, распространяющиеся в крыльях спектральных линий, могут достигать рассматриваемые поверхности с макроскопических расстояний, ограничивающих объем плазмы. Это принципиально отличает механизм распространения фотонов от диффузии частиц, для которых можно ввести длину свободного пробега.

Предметом настоящей работы является вычисление потока резонансных фотонов на сферическую пылевую частицу для тлеющего разряда сферической и цилиндрической геометрии с учетом пленения излучения. В работе впервые приводятся выражения для вычисления этого потока. Показано, что в случае пленения излучения в плазме с цилиндрической геометрией, при вычислении потока резонансных фотонов имеет место насыщение потока и можно ограничиться объемом плазмы гораздо меньшим, чем характерные размеры, несмотря на то, что излучение в крыльях спектральных линий с малым коэффициентом поглощения распространяется на достаточно большие расстояния. В случае сферической геометрии плотность потока фотонов возрастает с увеличением размеров плазмы.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-12-00009

Список литературы

1. Piel A., Melzer A., Dynamical processes in complex plasmas, Plasma Physics and Controlled Fusion, vol. 44, R1, 2001
2. Fortov V. E., Khrapak A. G., Khrapak S. A., Molotkov V. I., Petrov O. F., Dusty plasmas, Physics-Uspekhi, vol. 47 447-492, 2004
3. Goree J., Charging of particles in a plasma, Plasma Sources Science and Technology, vol. 3, 400-406, 1994

S-, P- и R- страты в инертных газах как аттракторы фазовых траекторий электронов в пространственно периодических полях

Гуркова Т. В.¹, Голубовский Ю.Б.¹, Валин С.В.¹,

¹СПбГУ

e-mail: st064740@student.spbu.ru

Стратифицированное состояние является одной из наиболее распространенных форм газового разряда в инертных газах. Механизмы стратификации очень разнообразны и зависят от условий разряда, таких как сорт газа, его давление, ток и радиус газоразрядной трубки. Экспериментальное и теоретическое исследование стратификации в инертных газах строится на основе флюидного и кинетического подходов. В гидродинамическом приближении электроны характеризуются концентрацией, средней энергией или температурой, направленной скоростью и скоростью ионизации, которые зависят от локального значения электрического поля. Границы применимости данного подхода определяются условием малости длины энергетической релаксации по сравнению с масштабом неоднородности плазмы. Кинетический подход, описывающий противоположный случай, когда электроны пролетают большие расстояния, превышающие размер неоднородности (длину страты) без заметных потерь энергии в столкновениях, соответствует малым давлениям и токам. В рамках кинетического подхода был обнаружен эффект бунчировки электронов – стягивание функции распределения к гауссоподобным максимумам, перемещающимся вдоль резонансных траекторий в резонансных полях.

В настоящей работе в отличие от кинетического подхода развивается более простой динамический подход [1,2], основанный на анализе фазовых траекторий электронов в синусоидально модулированных полях. Применение методов нелинейной динамики к простейшему случаю движения электронов без потерь энергии вплоть до достижения порога возбуждения показывает, что имеют место целочисленные и нецелочисленные резонансы электрического поля для любых начальных энергий электронов, инжектированных в заданное поле. В кинетической теории этот наиболее важный случай игнорируется, поскольку функции распределения воспроизводятся от периода к периоду, и отсутствует диссипация. Важность данного случая с точки зрения динамики заключается в появлении пространственного масштаба периодического поля и возможности рассматривать положительный столб как пространственный резонатор, содержащий фундаментальную моду S - страту и высшие моды, в том числе P- и R- страты. Эти моды соответствуют целочисленным и рациональным резонансам электрического поля. Область применимости соответствует бесстолкновительному режиму набора энергии электронами вплоть до порога возбуждения. Это условие предполагает, что длина свободного пробега превышает длину страты.

Анализ движения электронов при наличии малых потерь энергии за счет упругих ударов на длине страты показывает стягивание фазовых траекторий к аттракторам. В кинетической теории аттракторам соответствуют резонансные траектории, вдоль которых перемещаются характерные максимумы на функциях распределения. Область применимости в этом случае предполагает, что длина энергетической релаксации, а не длина свободного пробега, превышает длину страты. Одно из преимуществ рассматриваемого метода заключается в устранении затруднений кинетической теории, связанных с большой длиной пространственного установления функции распределения, намного превышающей длину положительного столба.

Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому научному фонду: грант РНФ 18-12-00009.

Список литературы

1. Golubovskii Y., Pelyukhova E., Sigener F., Nekuchaev V. Stratification of discharge in noble gases from the viewpoint of the discrete dynamics// Phys.Plasmas 22, 032105 (2015).
2. Golubovskii Y., Valin S., Pelyukhova E., Nekuchaev V., Sigener F. Discharge stratification in noble gases as convergence of electron phase trajectories to attractors// Phys.Plasmas 23, 123518 (2016).

Численное исследование течения в венозном клапане при реконструктивной операции

Гатаулин Я. А.^{1,2}, Юхнев А.Д.^{1,2}, Росуховский Д.А.²

¹СПбПУ

²Институт экспериментальной медицины

e-mail: yakov_gataulin@mail.ru

Венозная гидродинамика представляет особенный теоретический и практический интерес вследствие малой изученности (по сравнению с артериальной) и серьезности венозных заболеваний. Одним из таких заболеваний является венозная несостоятельность/недостаточность — патология, возникающая вследствие нарушений венозного оттока крови в нижних конечностях [1].

Течение в несостоятельном венозном клапане характеризуется несмыканием створок клапана, в результате чего нарушается запирающая функция клапана, заключающаяся в препятствовании обратному течению (оттоку) крови. Данная патология возникает в силу разных причин – расширение/выпячивание вены, укорочение створок венозного клапана, потеря их эластичности, асимметричность створок клапана и т.д.

С помощью численного моделирования можно получить новую информацию о течении в венозном клапане, полезную для совершенствования методов диагностики и лечения заболеваний вен [2,3].

Впервые проводится численное моделирование реконструктивной операции на клапане – экстравазальной коррекции клапана. В ходе операции накладывается цилиндрическая манжета из материала, близкого по характеристикам к венозной стенке. Манжета увеличивает синусы и уменьшает диаметр вены, в результате чего створки клапана начинают смыкаться, и клапан возвращается к нормальному функционированию. Целью настоящей работы является исследование движения створок и течения в клапане подколенной вены до и после реконструктивной операции.

В качестве модели клапана до операции была взята разработанная ранее авторами двумерная симметричная модель несостоятельного венозного клапана [4]. В модели клапана после операции радиус вены уменьшается на 30%, а синусы исчезают.

На входной границе в обеих моделях задается изменение расхода во времени цикла [3], на выходной – постоянный уровень давления. Для жидкости выбрана ньютоновская модель. Течение является ламинарным. Использовано приближение жестких стенок ввиду малости их перемещений для подколенной вены.

Проведен расчет течения жидкости с помощью технологии fluid-structure interaction (FSI), которая реализована в виде совместного решения уравнений вязкой несжимаемой жидкости и деформируемого твердого тела с помощью лагранжево-эйлеровского подхода. Гидродинамические расчеты выполнялись в программном комплексе Ansys Fluent, механические – в Ansys Mechanical. Особенностью данного расчета является учет в модели смыкания створок венозного клапана, для чего решалась специальная задача о контактном взаимодействии. Расчеты выполнялись на динамической сетке с использованием алгоритмов сглаживания и перестроения.

Расчет показал, что до операции клапан полностью не закрывался, амплитуда колебаний створок в открытом состоянии составляла около 5% от радиуса вены. После операции створки стали закрываться, амплитуда колебаний створок увеличилась до 10%, причем часть времени цикла (20%) клапан находится в полностью закрытом состоянии. Особенный интерес врачей-флебологов представляет застойная область за клапаном, поскольку она является местом образования тромбов. После операции размер застойной области (скорость, в которой меньше 1 см/с) сокращается примерно в 3 раза.

Проведенный расчет модели несостоятельного венозного клапана подколенной вены показал гемодинамическую эффективность реконструктивной операции. Результаты расчета могут быть использованы врачами-флебологами при планировании оперативных вмешательств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках госзадания "Гемодинамические реакции при сложных постуральных воздействиях и при тромбозах артериальных и венозных сосудов"

Список литературы

1. Santler B., Goerge T. Chronic venous insufficiency – a review of pathophysiology, diagnosis, and treatment // JDDG Vol.15, №5. 20p. 2017.
2. Hajati Z., Moghanlou F., Vajdi M. et al. Fluid-structure interaction of blood flow around a vein valve // BioImpacts, , 10(3), 169-175, 2020.
3. Soifer E., Weiss D., Marom G., Einav S. The effect of pathologic venous valve on neighboring valves: fluid-structure interactions modeling // Med Biol Eng Comput., vol. 55, №6, pp. 991–999. 2017.
4. Gataulin Y.A., Yukhnev A.D., Smirnov S.I., Rosukhovskiy D.A. Numerical analysis of the leaflet elasticity effect on the flow in the model of a venous valve // Journal of Physics: Conf. Series 1359 6p. 2019.

Исследование дозвукового обтекания цилиндра с интерцепторами при различных числах Рейнольдса

Шевченко А. В.¹, Пирогов С.Ю.¹, Юрьев А.С.¹, Поняев С.А.¹

¹ВКА

e-mail: artnetru@yandex.ru

Задача обтекания цилиндра дозвуковым потоком воздуха является классической, вместе с тем, даже в простейшей постановке численное моделирование поперечного обтекания цилиндра дозвуковым потоком представляет достаточно серьезные трудности, связанные с правильным расчетом условий схода и интенсивности вихрей в донном следе с целью удовлетворительного соответствия экспериментальным результатам.

Известно, что в широком диапазоне чисел Рейнольдса при реализации ламинарного режима движения в следе за цилиндром формируется вихревой след в виде периодически повторяющихся вихрей, получивших название «дорожки Кармана». Такое обтекание приводит к возникновению интенсивных периодических колебаний как силы сопротивления, так и подъемной силы, действующей на цилиндр.

С целью снижения вредного воздействия периодических нагрузок от вихревого следа, а также стабилизации потока в донной области за цилиндром применяются различные способы управления. К наиболее простым способам относят установку интерцепторов в донной области, с целью снижения интенсивности нестационарных процессов в следе за цилиндром. Помимо задач стабилизации, применение данных способов используется для изменения коэффициента сопротивления.

В качестве модели рассматривается поперечное обтекание кругового цилиндра ($D = 1$ м) с установленными в донной области интерцепторами ($h=0,05D$, при $\alpha = 0 - 100^\circ$) дозвуковым потоком воздуха, в диапазоне чисел Re от 10^2 до 10^6 . В качестве модели турбулентности, замыкающей уравнения Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, использовалась модель $k-\epsilon$ SST [3].

Проведена серия расчетов для исследования картин течения, а также полученных зависимостей коэффициентов сопротивления от положения интерцепторов при различных числах Рейнольдса.

Список литературы

1. Roshko, A., Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number. *J. Fluid Mech.* **10**(3) (1961) pp 345–356.
2. Roshko, A., On the drag and shedding frequency of two-dimensional bluff bodies. *NACA TN 3169*. 1954. (пластина в следе за цилиндром из Чжена).
3. Mentner F.R., Galpin P.F., Esch T., Kuntz M., Berner C. CFD Simulations of Aerodynamic Folws with a Pressure-Based Method // *Paper ICAS 2004–2.4.1*, Japan, Yokohoma, 2004. – 11 p.
4. van Nunen, J.W.G., Pressure and forces on a circular cylinder in a cross flow at high Reynolds numbers. In: Naudascher, E. (ed.), *Flow Induced Structural Vibrations*. Springer-Verlag, Berlin (1974) pp. 748–754.
5. Parnaudeau P., Carlier J., Heitz D., Lamballais E. Experimental and numerical studies of the flow over a circular cylinder at Reynolds number 3900 // *Phys. Fluids*. 2008. Vol. 20. 085101.
6. Ongoren A., Rockwell D. Flow structure from an oscillating cylinder Pt 1. Mechanisms of phase shift and recovery in the near wake // *J. Fluid Mech.* 1988. V. 191. P. 197–223.

Исследование взаимодействия выдуваемых струй аргона из тела с набегающим гиперзвуковым потоком

Яшков С. А.¹, Шевченко А.В.¹, Юрьев А.С.¹, Поняев С.А.¹, Ротэрмель А.Р.¹

¹ВКА

e-mail: yashkov.s@inbox.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований взаимодействия выдуваемых струй аргона из тела с набегающим гиперзвуковым потоком. Определены

газодинамические параметры набегающего потока вблизи вблизи притупленного конуса при различной интенсивности выдуваемой газовой струи, из носовой и боковой части модели летательного аппарата. Представлены фотографии фаз ударно-волнового взаимодействия набегающего потока с выдуваемой струей. Исследования проведены с помощью импульсной гиперзвуковой трубы ИТ-1М.

Проведение натурных экспериментов играет большую роль в научных исследованиях, так как они являются эффективным средством верификации математических моделей и результатов расчетов. В статье приведены результаты экспериментальных исследований взаимодействия выдуваемых струй аргона с набегающим гиперзвуковым потоком. Взаимодействие выдуваемых струй с набегающим потоком приводит к образованию перед ними скачка уплотнения, не приводящего к росту лобового сопротивления, и позволяет создавать управляющие моменты при движении, а также изменять статическую устойчивость модели.

Представлены результаты экспериментальных исследований газодинамических параметров набегающего гиперзвукового потока ($M_\infty=18$) вблизи обтекаемого тела с выдуваемой газовой струей аргона ($(p_j=103\dots506)\times 10^3$ Па и $T_j=283$ К) из модели в набегающий поток.

Данные полученные в ходе экспериментальных исследований в аэродинамической трубе, целесообразно использовать для верификации результатов, полученных в ходе численных экспериментов. Экспериментальные исследования способствуют более полному изучению методов газодинамического управления летательных аппаратов при движении в гиперзвуковом потоке.

Список литературы

1. B. Sudarshan, Srisha M.V. Rao, G. Jagadeesh, S. Saravanan. Effect af the axial cavity with an opposing high-pressure jet combination in a Mach 6 flow condition. J. Acta Astronautica 178(2021), 335-348.
2. Raymond Brun. Shock Tubes and Shock Tunnels: Design and Experiments // RTO-EN-AVT-162 lecture series at the von Karman Institute, 2009. 26 p.
3. Звегинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. Часть 1. Установки для научных исследований. Новосибирск: Параллель, 2014. 551 с.
4. Райзер Ю.П. Введение в гидрогазодинамику и теорию ударных волн для физиков, «Интеллект», 2011. 431 с.
5. Mentner F.R., Galpin P.F., Esch T., Kuntz M., Berner C. CFD Simulations of Aerodynamic Folws with a Pressure-Based Method // Paper ICAS 2004–2.4.1, Japan, Yokohoma, 2004. – 11 p.
6. Глушко Г.С., Иванов И.Э., Крюков И.А. Расчет сверхзвуковых турбулентных течений. Институт Проблем механики РАН, Препринт № 793 2006, 36 с.
7. Liou M. S., Steffen C. J. Jr., A New Flux Splitting Scheme // Journal of Computational Physics, Vol. 107, 1993, pp. 23-39.

Исследование гиперзвукового обтекания тела с газодинамическими органами управления, при движении в плотных слоях атмосферы

Сназин А.А.¹, Шевченко А. В.¹, Шевченко В.И.¹, Поняев С.А.¹

¹ВКА

e-mail: alexsnzn@gmail.com

Движение летательных аппаратов на гиперзвуковых скоростях в плотных слоях атмосферы сопровождается высокими динамическими нагрузками, возникающими от набегающего потока. При этом необходимо обеспечивать надежность их функционирования и эффективность управления. Одно из направлений совершенствования эффективности управления летательных аппаратов является развитие газодинамических органов управления. Не менее актуальным является вопрос стабилизации движения и снижения силы лобового сопротивления.

В качестве модели исследования рассматривается тело в форме конуса обтекаемое гиперзвуковым потоком ($M = 10$); с расположенными на определенном удалении ($l = 12, 45, 79$ мм) от носовой части ряда отверстий ($d_{отв} = 1, 2, 3$ мм). Расчетные исследования проведены для высот $H = 10, 30, 50, 60, 70$ км. В качестве модели турбулентности применялась модель $k-\omega$ SST [3].

Проведена серия численных экспериментов по определению зависимостей коэффициентов лобового сопротивления и момента тангажа для различных высот, мест расположения отверстий, величин массового расхода и давления вдуваемого газа. Показано, что, вдув газа, существенно снижает лобовое сопротивление движущегося тела, а также с увеличением высоты движения тела необходимое количество вдуваемого газа для сохранения заданного значения момента тангажа снижается.

Список литературы

1. Huang W., Wang Z.-G., Wu J.-P., Li S.-B. Numerical prediction on the interaction between the incident shock wave and the transverse slot injection in supersonic flows // Aerospace Science and Technology. 2013. 28, N 1. 91–99.
2. Li S. B., Wang Z. G., Huang W., Liu J. 2016. Effect of the injector configuration for opposing jet on the drag and heat reduction. Aerospace Science and Technology. 51: 78–86
3. Li S. B., Wang Z. G., Huang W., Liu J. 2017. Drag and heat reduction performance for an equal polygon opposing jet. Journal of Aerospace Engineering. 30(1): 04016065.
4. Huang W., Liu W.-D., Li S.-B., Xia Z.X., Liu J., Wang Z.G. Influences of the turbulence model and the slot width on the transverse slot injection flow field in supersonic flows // Acta Astronautica. 2012. 73. 1–9.
5. Karagozian AR. Transverse jets and their control. Progress in Energy and Combustion Science 2010; 36:53153.
6. Краснов Н.Ф., Захарченко В.Ф., Кошевой В.Н. Основы аэродинамического расчета. Трение и теплопередача. Управление обтеканием летательных аппаратов/Под ред. Н.Ф. Краснова: Учеб. пособие для студентов вузов. –М.:Высш. шк.,–1984.–264 с., ил.

Экспериментальное исследование течения в упругой модели бифуркации брюшной аорты

Синицына Д. Э.¹, Зайцев Д. К.¹

¹СПбПУ

e-mail: sinicina.daria@yandex.ru

С помощью ультразвукового доплеровского метода исследовано пульсирующее течение кровеймитирующей жидкости в модели бифуркации брюшной аорты и общих подвздошных артерий, проведен сравнительный анализ влияния упругости стенок сосуда на структуру течения.

Исследования проводились на двух идентичных по геометрии моделях сосуда среднестатистической конфигурации [1-3]: жесткой и упругой. Модель включает в себя выходной участок брюшной аорты диаметром 18 мм, которая разделяется на правую и левую общие подвздошные артерии диаметром 11 мм; отклонение подвздошных артерий от оси брюшной аорты составляет 25°. В рассматриваемой упрощенной конфигурации не учтены физиологические пространственные изгибы сосудистого русла. Жесткая модель была изготовлена посредством 3D-прототипирования из непрозрачного фотополимера Tough2000 v1. Упругая модель изготавливалась методом отливки смеси, основным компонентом которой является силиконовая резина Silastic T4, в «напечатанную» на 3D-принтере разборную форму; толщина стенок готовой модели составляла 1 мм.

Согласно клиническим данным [4,5], в течение сердечного цикла диаметр брюшной аорты меняется на 5-20%. Для обеспечения подходящей степени растяжимости упругой модели бифуркации брюшной аорты был проведен ряд экспериментов, в которых варьировался состав силиконовой смеси и оценивалась деформация готовой модели под действием статического давления. В результате анализа для дальнейшего изготовления моделей подобран состав смеси, который обеспечивает изменение диаметра сосуда 10-30%.

Исследование структуры течения в разработанных моделях бифуркации брюшной аорты проводилось на стенде с циркуляцией кровеймитирующей жидкостью (36%-ый водно-глицериновый раствор, $\rho = 1050 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0,004 \text{ Па}\cdot\text{с}$) по замкнутому контуру. Пульсирующий в соответствии с физиологической кривой расхода поток жидкости создавался системой насосов; максимальный расход составлял 5,5 л/мин, что отвечает числу Рейнольдса на входе в модель $Re_{\text{макс}}=1700$.

В ходе экспериментов на упругой модели пульсации стенки сосуда регистрировались высокоскоростной камерой SonyAlfa6000 (50 кадр/сек). Последующая покадровая обработка видео проводилась в программном комплексе MovaviVideoSuite11, а измерения текущего значения диаметра в течение цикла – в программе Photoshop. Согласно измерениям, в момент максимального расхода приращение диаметра сосуда достигало 30% и сохранялось до конца фазы прямого тока.

Измерения скорости потока в моделях сосудов проводились с помощью ультразвукового сканера LogicScan 64, снабженного линейным датчиком с рабочей частотой 5-7 МГц. В качестве рассеивающего агента использовалась суспензия красителя (5 г/л). Детальное измерение профилей продольной скорости проводилось в режиме импульсно-волнового доплера (PW-режим), ультразвуковой датчик устанавливался под углом 60° к оси сосуда, контрольный объем – 1 мм. Проведено сравнительное исследование профилей осевой скорости, формирующихся в жесткой и упругой моделях в течение сердечного цикла в разных сечениях модели. В качестве примера, наиболее интересным местом является область бифуркации: в сечении на расстоянии 9 мм перед точкой бифуркации для момента

максимального расхода заметного отличия толщины пограничного слоя для жесткой и упругой моделей в пределах точности измерений не обнаружено, упругость стенок не влияла на структуру поперечного течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-01-00629А).

Список литературы

1. O'Flynn P. M., O'Sullivan G., Pandit A. S., Geometric variability of the abdominal aorta and its major peripheral branches, *Annals of biomedical engineering*, Vol. 38, No. 3, 824-840, 2010
2. Shah P. M., Scartont H. A., Tsapogas M. J., Geometric anatomy of the aortic-common iliac bifurcation, *Journal of Anatomy*, Vol. 126, Pt. 3, 451-458, 1978
3. Lorbeer R., Grotz A., Dörr M., Völzke H., Lieb W., Kühn J.-P., Mensel B., Reference values of vessel diameters, stenosis prevalence, and arterial variations of the lower limb arteries in a male population sample using contrast-enhanced MR angiography, *PLoS One*, Vol. 13. No. 6. 1-15, 2018
4. Tang B. T., Cheng C. P., Draney M. T. et al., Abdominal aortic hemodynamics in young healthy adults at rest and during lower limb exercise: quantification using image-based computer modeling, *American journal of physiology heart and circulatory physiology*, Vol. 291, No. 2, 668-676, 2006
5. Ahlgren A. R., Hansen F., Sonesson B. et al., Stiffness and diameter of the common carotid artery and abdominal aorta in women, *Ultrasound in medicine and biology*, Vol. 23. No. 7, 983-988, 1997

Неустойчивость тонкой пленки магнитной жидкости под действием вибраций

Володин И. В.¹, Алабужев А.А.^{1, 2}

¹ПГНИУ, ²ИМСС УрО РАН

e-mail: ivanwolodin@gmail.com

Поведение феррожидкостей в магнитном поле привлекает внимание ученых не только из-за фундаментальных проблем, вызванных описанием данного рода явлений, но и из-за их технологического применения. Вертикальное магнитное поле при действии на слой ферромагнитной жидкости со свободной поверхностью может приводить к неустойчивости Розенцвейга [1], то есть к деформации поверхности раздела. Развитие этой неустойчивости происходит при превышении некоторого критического значения намагниченности (см., например, [2]). Существует несколько способов подавления этой неустойчивости, например, вибрационное воздействие. Влияние вертикальных вибраций на тонкую пленку жидкости было исследовано в работе [3]. Показано, что такие вибрации могут стабилизировать поверхность раздела. Горизонтальные вибрации не могут стабилизировать пленку: порог неустойчивости либо снижается, либо остается неизменным [4].

Целью данной работы является изучение подавления неустойчивости Розенцвейга с помощью гармонических вибраций. Рассматривается горизонтальный слой ферромагнитной жидкости на твердой подложке в поле тяжести под действием постоянного вертикального магнитного поля. Слой имеет свободную деформируемую поверхность, выше которой находится невесомый газ, движением которого мы пренебрегаем. Толщина слоя предполагается настолько малой, что необходимо учитывать межчастичное взаимодействие

жидкости с твердой подложкой (например, притягивающее ван-дер-ваальсово притяжение). Другими словами, слой представляет тонкую пленку. Подложка совершает вертикальные гармонические колебания. Частота вибраций предполагается высокой по сравнению с характерными временами продольного переноса импульса, но сравнимой с временем вязкой релаксации возмущений поперек слоя. Получены амплитудные уравнения, описывающие осредненную динамику такой системы. Исследована линейная неустойчивость, получены карты устойчивости.

Список литературы

1. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. М.: Мир, 1989. 357 с.
2. Неустойчивость Розенцвейга в тонком слое магнитной жидкости, ЖТФ, Т. 83, вып. 12, 17-25, 2013.
3. Shklyaev S., Khenner M., Alabuzhev A.A., Enhanced stability of a dewetting thin liquid film in a single-frequency vibration field, Phys. Rev. E, V. 77, 036320, 2008.
4. Shklyaev S., Alabuzhev A. A., Khenner M. Influence of a longitudinal and tilted vibration on stability and dewetting of a liquid film. Phys. Rev. E 79, 051603, 2009.

Численное исследование кавитации в жидкостях, содержащих растворённый газ

Махнов А. В.^{1,2}, Шмидт А.А.²

¹СПбПУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: mahnov_av@spbstu.ru

Несмотря на то, что кавитация более ста лет является одним из актуальных направлений для исследований в области механики жидкости и газа, полное понимание механизмов возникновения и развития кавитации на текущий момент не достигнуто. Наряду с научной значимостью проблемы существует также широкий круг инженерных задач, эффективное решение которых требует развития моделей, опирающихся на основы механики гетерогенных сред и корректно описывающих влияние межфазных процессов.

Особенный интерес в данной работе представляют жидкости, содержащие растворённые газы. Выделение растворённого газа из жидкой фазы в газообразную (в газовые пузыри или каверны) обычно принято трактовать как медленный процесс, скорость которого контролируется диффузией через межфазную поверхность. Однако, данный процесс может, оставаясь диффузионным по своей природе, происходить и на существенно более коротких временных масштабах, если в жидкости с растворёнными газами происходит падение давления до давления насыщенных паров и, как следствие, возникает паровая кавитация.

Основным результатом работы является анализ структуры нестационарного течения жидкости, а также анализ механизмов развития кавитации и газовыделения в таком течении в условиях, характерных для реальных гидравлических систем.

Анализ проведён на основе численного моделирования, которое осуществлялось с помощью открытого программного комплекса OpenFOAM. В качестве основы для алгоритма численных расчётов используется метод конечных объёмов.

Физико-математическая модель течения кавитирующей жидкости была построена на основе уравнений Навье-Стокса для сжимаемой среды и дополнена баротропным

уравнением состояния, которое учитывает эффект от паровой кавитации через зависимость плотности от давления для парожидкостной смеси. Данный подход был обобщён на случай жидкости, содержащей растворённые газы, путём добавления параметризованной модели, позволяющей описать эффект от выделения растворённого газа и при этом учесть характерное время диффузионного процесса, которое в общем случае может отличаться от временных масштабов гидродинамической задачи на несколько порядков.

Список литературы

1. H.-A. Freudigmann, A. Dörr, U. Iben, P. F. Pelz (2017). Modeling of cavitation-induced air release phenomena in micro-orifice flows, *Journal of Fluids Engineering* 139(11), 111301.
2. K. Kowalski, S. Pollak, R. Skoda, J. Hussong (2018). Experimental study on cavitation-induced air release in orifice flows, *Journal of Fluids Engineering* 140(6), 061201.
3. U. Iben, A. Makhnov, A. Schmidt (2018). Numerical study of the effects of dissolved gas release in cavitating flow, *AIP Conf. Proc.* 2027(1), 030128.
4. L. Rayleigh, VIII (1917). On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity, *Philos. Mag.* 34(200), 94 – 98.
5. M. S. Plesset, A. Prosperetti (1977). Bubble dynamics and cavitation, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 9(1), 145 – 185.
6. J. B. Keller, M. Miksis (1980). Bubble oscillations of large amplitude, *J. Acoust. Soc. Am.* 68(2), 628 – 633.
7. Nigmatulin, R. I., Khabeev, N. S. and Nagiev, F. B. (1981). Dynamics, heat and mass transfer of vapour-gas bubbles in a liquid, *Int. J. Heat Mass Transfer* 24(6), 1033 – 1044.
8. Vogel, A., W. Lauterborn, and R. Timm (1989). Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary, *Journal of Fluid Mechanics* 206, 299 – 338.

Double-well радиочастотная ловушка для заряженных микрочастиц

Кокорина О. О.¹, Рыбин В.В.¹, Рудый С.С.¹, Рождественский Ю.В.¹

¹ИТМО

e-mail: kokorinaolga2001@mail.ru

Квадрупольная линейная ионная ловушка часто используют для осуществления локализации заряженных объектов, таких как одиночные ионы, нано- и микрочастицы [1,2]. Описание локализации одиночной одноатомной частицы в квадрупольном масс-филт্রে основано на анализе эффективного потенциала частицы [3,4]. В системе с запирающими электродами также прибегают к формализму цилиндрического псевдопотенциала. Однако форма эффективного потенциала частицы в такой системе зависит как от характеристик локализованной частицы, так и от параметров экспериментальной установки. Наличие запирающих электродов в системе трансформирует квадрупольное поле ловушки, а также цилиндрический псевдопотенциал локализованной частицы [5]. Результатом такой трансформации может являться переход потенциала от цилиндрического к double-well форме.

В настоящей работе предложена реализация экспериментальной установки для локализации микрочастиц с возможностью формирования двух явных потенциальных минимумов в рабочей области ловушки. Управление формой эффективного потенциала достигается варьированием амплитуд постоянного и переменного напряжения на стержневых электродах (ДС и АС соответственно) и постоянного напряжения на запирающих ЕС-электродах ловушки. Максимальное допустимое отношение амплитуд напряжений на АС, ДС и ЕС электродах составляет 15:1:1. Конфигурация установки позволяет регистрировать положение частиц в пространстве с трех различных ракурсов (top, front left and front right) со скоростью 200 fps и возможностью отслеживания плотности частиц в реальном времени.

Для регистрации double-well формы эффективного потенциала в ловушке была проведена локализация грубодисперсных микрочастиц с характерным размером от 2 до 50 мкм. Показано расщепление пика плотности распределения частиц в рабочей области ловушки. Определены параметры напряжения, при которых наблюдается расщепление пика плотности.

Список литературы

1. March R. E. An introduction to quadrupole ion trap mass spectrometry //Journal of mass spectrometry. – 1997. – Т. 32. – №. 4. – С. 351-369.
2. Rolston S. L., Gabrielse G. Cooling antiprotons in an ion trap //Hyperfine Interactions. – 1989. – Т. 44. – №. 1. – С. 233-245.
3. Wineland D. J. et al. Atomic-ion Coulomb clusters in an ion trap //Physical review letters. – 1987. – Т. 59. – №. 26. – С. 2935.
4. Bush J. et al. The nanopore mass spectrometer //Review of Scientific Instruments. – 2017. – Т. 88. – №. 11. – С. 113307.
5. Rudyi S. S., Vovk T. A., Rozhdestvensky Y. V. Features of the effective potential formed by multipole ion trap //Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. – 2019. – Т. 52. – №. 9. – С. 095001.

Об ограничении скорости движения плазмы в электродинамическом ускорителе

Горяинов В. Ю.^{1,2}, Воронин А.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

e-mail: vgoryainov@mail.ioffe.ru

Первый ускоритель плазмы, разгоняющий ее до скоростей ~100 км/с, был создан в 1955 году и нашел впоследствии широкое применение в работах по управляемому термоядерному синтезу, облучении материалов, моделировании взаимодействия плазмы с магнитным полем в космосе и др. Идея ускорителя, разработанная Л.А. Арцимовичем, состояла в расширении замкнутого контура при пропускании через него импульса тока [1]. В этом случае кинетическая энергия W ускоряемой массы M определяется формулой: $W = \frac{M \cdot V^2}{2}$, где V - скорость. Энергия конденсаторного накопителя E , применяемого

для создания тока в ускорителе, имеет вид: $E = \frac{C \cdot U^2}{2}$, где C и U - емкость и напряжение

накопителя, соответственно. Из соотношения формул видно, что зависимость скорости движения массы от напряжения и тока I ускорителя должна быть прямо пропорциональ-

ной, а именно: $V \approx \frac{U}{\sqrt{M}}$ или $V \approx \frac{I}{\sqrt{M}}$.

В настоящей работе представлен оригинальный метод определения скорости плазменной струи по измерению времени задержки между максимумами тока и вспышки излучения на мишени, удаленной от источника. Эксперименты проводились на стенде, оснащенном коаксиальным и рельсовым ускорителями плазмы, в вакууме, с импульсным напуском различных газов и материалов электродов. Получены зависимости скорости и спектрального состава струи от тока ускорителя. При больших токах ускорителя обнаружено замедление скорости струи, а также большая интенсивность излучения примесей в потоке по сравнению с интенсивностью ионизированной компоненты рабочего газа. Результаты экспериментов позволяют утверждать, что происходило увеличение разгоняемой массы за счет поступления примесей с электродов. Это приводило к уменьшению скорости струи. Эксперименты с рельсовым ускорителем, оснащенном внешними проводниками с током позволяют увеличить магнитное поле в ускорителе совместно с током разряда, не создающим примесей. Результаты этих экспериментов также представлены в настоящей работе.

Работа выполнена с использованием Федерального центра коллективного пользования "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" (проект RFMEFI62119X0021), включающего Уникальную научную установку "Сферический токамак Глобус-М", а также поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки по проекту №0784-2020-0020.

Список литературы

1. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М., ЖЭТФ, том. 33, вып. 1, 1-8, 1957.

Эволюция полидисперсного облака пузырей при течении в трехмерном пузырьковом реакторе колонного типа

Чернышев А. С.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: alexander.tchernyshev@mail.ioffe.ru

Гидродинамика потоков, обусловленных всплытием пузырей, существенным образом зависит от распределения пузырей в толще несущей среды [1]. При этом влияние оказывают не только суммарная объемная доля пузырей в каждой точке потока, но и их распределение по размерам во всей области [2]. Сложность и взаимосвязанность процессов, протекающих в такого рода течениях, обуславливают их значимость для развития науки многофазных сред, а их распространенность в технических приложениях обеспечивает практическую значимость такого рода исследований.

Численное моделирование как эффективный метод исследования многофазных полидисперсных пузырьковых течений используется в представленной работе.

Математическая модель основана на эйлери-эйлеровском подходе к описанию многофазных сред [1]. Уравнения Навье-Стокса, лежащие в основе модели, дополнены источниками слагаемыми, включающими силовое межфазное взаимодействие, а также силу плавлучести. В модели учитывается влияние силы Стокса, Сэффмана, присоединенных масс и силы пристеночного смачивания. Турбулентность несущей фазы учитывается при помощи модифицированной $k-\omega$ SST модели Ментера [3] с дополнительными слагаемыми, моделирующими генерацию и диссипацию турбулентности за счет относительного движения дисперсной среды. Обратное влияние турбулентности на дисперсную фазу учитывается при помощи слагаемого, описывающего траекторную дисперсию пузырей. Для учета неоднородности пузырей по размерам была использована гетерогенная многоклассовая модель MULTIPLE SIZE GROUP (MUSIG) [4]. Модель позволяет, вводя произвольное количество классов пузырей M , с достаточной точностью описывать поведение полидисперсной среды во всем рассматриваемом объеме жидкости [2].

Численный алгоритм, построенный на базе предложенной модели, основан на методе конечных объемов и неструктурированных сетках. Для аппроксимации уравнений была выбрана схема дискретизации со вторым порядком по пространству, обладающая свойством невозрастания приращения функции. Разрешение полей давления и скорости было выполнено в рамках модифицированного алгоритма SIMPLE, адаптированного для решения задач с несколькими фазами, различными по плотности.

В работе исследуется течение полидисперсной пузырьковой среды, возникающее под действием силы тяжести, в трехмерном прямоугольном в сечении пузырьковом реакторе колонного типа. Реактор в начальный момент времени полностью заполнен водой, пузыри воздуха поступают в реактор через вмонтированный в дно аэратор. В результате моделирования была получена характерная картина течения с восходящим потоком в центре и нисходящими струями в углах области. При этом малые пузыри, взвешенные в жидкости, уносятся потоком в придонную область, замедляя нисходящее движение жидкости и уменьшая интенсивность рециркуляции потока. При этом происходит уширение облака пузырей с большим заполнением области реактора.

Список литературы

1. A. S. Chernyshev, A. A. Schmidt, Tech. Phys. Lett. **46**, 27–30 (2020)
2. А.С. Чернышев, А.А. Шмидт, Труды НИИСи РАН, **8(6)**, 52–58 (2018)
3. F. R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry, Turbulence, heat and mass transfer **4**, 625–632 (2003)
4. E. Krepper, D. Lucas, T. Frank, H.-M. Prasser, P. J. Zwart, Nuclear Engineering and Design **238**, 1690–1702 (2008)

Калибровка нейтронной диагностики токамака Глобус-М2

Скрекель О. М.¹, Бахарев Н.Н.¹, Варфоломеев В.И.¹, Гусев В.К.¹, Жильцов Н.С.¹, Ильясова М.В.¹, Киселев Е.О.¹, Корнев В.А.¹, Курский Г.С.¹, Мельник А.Д.¹, Минаев В.Б.¹, Мирошников И.В.¹, Патров М.И.¹, Петров Ю.В.¹, Сахаров Н.В.¹, Тельнова А.Ю.¹, Тяхменева Е.А.¹, Толстяков С.Ю.¹, Хилькевич Е.М.¹, Чернышев Ф.В.¹, Шевелев А.Е.¹, Щёголев П.Б.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: skrekelenok@mail.ru

Сферический токамак Глобус-М2 является модернизированной версией установки Глобус-М. Целью реконструкции, завершённой в 2018 году [1], было увеличение

тороидального магнитного поля с 0.4 до 1 Тл и тока плазмы с 0.25 до 0.5 МА, сохраняющие геометрические параметры вакуумной камеры и плазмы (большой радиус $R = 36$ см, малый радиус $a = 24$ см, аспектное отношение ≈ 1.5). В ходе первых экспериментальных кампаний 2019-2020 годов на токамаке Глобус-М2 удалось достигнуть значений поля 0.8 Тл и тока 0.4 МА [2]. Рождение нейтронов в экспериментах на установке Глобус-М2 обусловлено взаимодействием быстрых ионов, возникающих при инжекции пучка атомов высокой энергии, с ионами основной плазмы и друг с другом. При этом протекает реакция ядерного синтеза $D+D \rightarrow n(2.45\text{МэВ}) + {}^3\text{He}(0.82\text{МэВ})$. Увеличение магнитного поля и тока привело к росту основных параметров плазмы и к улучшению удержания быстрых частиц, следствием чего стал рост полного нейтронного потока.

В настоящее время система нейтронной диагностики установки Глобус-М2 состоит из двух коронных счетчиков с полиэтиленовым замедлителем (БДН-20) и нейтронного спектрометра.

В работе рассмотрены результаты калибровки нейтронных детекторов, выполненной в экспериментальном зале токамака Глобус-М2. Калибровка проводилась при помощи AmBe источника ($\langle E \rangle \cong 4$ МэВ, $I_0 = 9.9 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$), движущегося с равномерной скоростью вокруг центрального соленоида в экваториальной плоскости вакуумной камеры. Нейтронные потоки от источника измерялись в нескольких фиксированных точках, соответствующих разной удаленности детектора от оси токамака. Калибровочный коэффициент вычислялся как отношение полного числа нейтронов, испускаемых AmBe источником из камеры токамака, к измеренной скорости счета детектора в данной точке пространства. Используя найденный калибровочный коэффициент и рассчитанное пространственное распределение функции источника нейтронов, можно вычислить полный нейтронный выход из плазмы токамака.

Сравнение экспериментально измеренного в процессе калибровки нейтронного потока на детектор с потоком, рассчитанным при помощи трехмерного моделирования методом Монте-Карло, показало сильное влияние нейтронов, переотраженных от элементов экспериментального зала, на величину измеряемого сигнала.

Эксперименты выполнены на уникальной научной установке «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав федерального центра коллективного пользования «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» (уникальный идентификатор RFMEFI62119X0021). Бахарев Н.Н., Скрекель О.М., Ильясова М.В., Мельник А.Д., Тельнова А.Ю., Тюхменева Е.А., Шевелев А.Е., Щеголев П.Б. выражают благодарность за финансовую поддержку Российскому Научному Фонду, проект № 21-72-20007

Список литературы

1. V.B. Minaev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, V.I. Varfolomeev, N.N. Bakharev, V.A. Belyakov, E.N. Bondarchuk, P.N. Brunkov, F.V. Chernyshev, V.I. Davydenko, V.V. Dyachenko, A.A. Kavin, S.A. Khitrov, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, A.N. Konovalov, V.A. Kornev, G.S. Kurskiev, A.N. Labusov, A.D. Melnik, A.B. Mineev, M.I. Mironov, I.V. Miroshnikov, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, V.A. Rozhansky, A.N. Saveliev, I.Yu. Senichenkov, P.B. Shchegolev, O.N. Shcherbinin, I.V. Shikhovtsev, A.D. Sladkome-dova, V.V. Solokha, V.N. Tanchuk, A.Yu. Telnova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov and E.G. Zhilin // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. P. 066047 (DOI: 10.1088/1741-4326/aa69e0)
2. G.S. Kurskiev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, I.M. Balachenkov, N.N. Bakharev, V.V. Bulanin, F.V. Chernyshev, A.A. Kavin, E.O. Kiselev, N.A. Khromov, V.B. Minaev, I.V. Miroshnikov, M.I. Patrov, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, P.B. Shchegolev, A.Yu. Telnova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, E.A. Tuxmeneva, V.I. Varfolomeev, A.Yu.

Yashin, N.S. Zhiltsov // Nucl. Fusion. 2021. (<https://doi.org/10.1088/1741-4326/abe08c>)

Исследование эффективности лазерной абляционной обработки материалов в электростатическом поле

Егорова А. В.¹, Кочуев Д. А.¹, Черников А. С.¹, Галкин А. Ф.¹

¹ВлГУ

e-mail: nastik.e@bk.ru

Эффективным методом для получения материалов с заданными свойствами является применения нанопорошков. Поэтому одним из важных применений лазерных технологий является формирование различных микро- и наночастиц из широкого круга различных материалов. Получаемые сферические нанопорошки используются в качестве сырья для синтеза новых материалов в направлениях оптики, фотоники и биомедицинских применений [1, 2]. Проблемой является небольшая производительность данного метода [3]. Одним из методов повышения эффективности лазерного синтеза наночастиц является использование обработки в электростатическом поле. Применение электростатического поля позволяет осуществлять эффективный вынос и сбор продуктов абляции из области распространения лазерного излучения. Данный метод способствует исключению повторного воздействия лазерного излучения на аблированные частицы, а также воздействия лазерно-индуцированного плазменного факела.

Использование электростатического поля в схемах для осуществления процесса лазерной абляции порошковых материалов позволяет осуществлять вынос продуктов абляции из области распространения лазерного излучения без ухудшения качества поверхности и дисперсии получаемых микро- и наноразмерных порошковых материалов. При использовании электростатического поля высокой напряженности разлет аблированных частиц приобретает предопределенный характер. Продукты абляции, приобретая заряд, осаждаются на высоковольтных электродах. Для подтверждения предположения о повышении эффективности лазерной абляции была произведена оценка скорости выноса частиц из области распространения лазерного излучения, определен ряд условий, влияющих на данный параметр. А именно, дистанция, которую должна преодолеть частица для выхода из вероятной области распространения лазерного излучения, а также время, за которое частица должна покинуть заданную область. Оценки были произведены аналогично проведенным в работе [4].

В результате проведенных оценок получено распределение скоростей разлета сферических частиц титана и оксида алюминия в зависимости от размера частиц (от 10 до 50 нм). Полученные результаты показывают значительное влияние присутствия продуктов абляции на динамику лазерной обработки. При устранении продуктов абляции из зоны лазерного воздействия наблюдается рост интенсивности абляционной обработки на исследуемом диапазоне энергий лазерного излучения.

Список литературы

1. Ivanov, M., Kopylov, Y., Kravchenko, V., & Zayats, S. (2013). Sintering and optical quality of highly transparent yb-doped yttrium lanthanum oxide ceramics. *physica status solidi c*, 10(6), 940-944.

2. Ivanov, V. V., Shkerin, S. N., Rempel, A. A., Khrustov, V. R., Lipilin, A. S., & Nikonov, A. V. (2010, July). Electrical conductivity of zirconia-based solid electrolyte with submicron grain size. In *Doklady Physical Chemistry* (Vol. 433, No. 1, pp. 125-127). SP MAIK Nauka/Interperiodica.
3. Fazio, E., Gökce, B., De Giacomo, A., Meneghetti, M., Compagnini, G., Tommasini, M., ... & Neri, F. (2020). Nanoparticles Engineering by Pulsed Laser Ablation in Liquids: Concepts and Applications. *Nanomaterials*, 10(11), 2317.
4. Майер, А. Е. (2013). О возможности использования ускоренных электрическим полем наночастиц для нанесения покрытий и модификации поверхностного слоя металлов. *Вестник Челябинского государственного университета*, (25 (316)).

Процесс генерации вистлерных возмущений при взаимодействии сгустка лазерной плазмы с замагниченной плазмой

Березуцкий А. Г.¹, Тищенко В.Н.¹, Захаров Ю.П.¹, Мирошниченко И.Б.¹, Шайхисламов И.Ф.¹

¹ИЛФ СО РАН

e-mail: a.berezuckiy@yandex.ru

В экспериментах на лазерно-плазменном стенде КИ-1 ИЛФ СО РАН и расчетах на суперкомпьютерах показано, что сгустки лазерной плазмы могут генерировать в силовой трубке замагниченной интенсивные вистлеры, магнитное поле которых достигает ~20 % от магнитного поля фона. При этом возможен вистлер, спектр которого содержат линии вблизи нижнегибридной частоты и в десятки раз более высоких частотах. Эффект наблюдается при резонансном взаимодействии сгустков с фоном, когда ионно-плазменная длина фона превышает значение $L_{pi} > 0.5$. При $0.3 < L_{pi} < 0.4$ в силовой трубке возбуждаются одновременно три типа волн – вистлеры, альфвеновская и магнитозвуковая волны, в диапазоне $L_{pi} < 0.3$ – альфвеновская и магнитозвуковая волны.

В работе приводятся экспериментальные результаты по генерации вистлерных возмущений сгустками лазерной плазмы в замагниченной плазме. Вистлеры характеризуются азимутальной компонентой магнитного поля с правосторонней круговой поляризацией, распространяющиеся со скоростями $V \sim 300$ км/с. Результаты экспериментов показали, что магнитные возмущения имеют правостороннюю круговую поляризацию и имеют характерную понижающуюся частоту от 10^6 Гц в начале пакета до $2 \cdot 10^5$ Гц в конце. Вистлеры распространяются в среде, когда безразмерный параметр $L_{pi} > 0.4$ ($L_{pi} = c / (\omega_p R_d)$, R_d – характерный радиус сгустка). При $L_{pi} < 0.3$, сгустки генерируют альфвеновскую и медленную магнитозвуковую волну [1], а в диапазоне $0.3 < L_{pi} < 0.4$ кроме вистлеров, в среде, распространяется и альфвеновская волна [2]. В эксперименте, максимальная амплитуда вистлеров $\delta V_{max}/V_0 = 0.24$ достигается в поле $V_0 = 200$ Гс. При $V_0 = 300$ Гс, величина δV_{max} резко уменьшается, что связано с изменением концентрации фона за счет сжатия внешним магнитным полем и уменьшения L_{pi} . Скорость распространения возмущений показывает практически линейную зависимость от величины магнитного поля. Частота возмущений $\omega = 0.76$ МГц в поле 100 Гс, $1 \div 1.25$ МГц при 200 Гс и 2.5 МГц в поле 300 Гс соответственно.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания №АААА-А17-117021750017-0 при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований

Президиума РАН № 22. Параллельное компьютерное моделирование было выполнено на суперкомпьютерах МСЦ РАН, НГУ, ССКЦ СО РАН.

Список литературы

1. V. N. Tishchenko, A. G. Berezhutskii, E. L. Boyarintsev, Yu. P. et al. Quantum Electron., 47:9 (2017), 849–852
2. P.A. Prokopov, Yu.P. Zakharov, V.N. Tishchenko, et al. 2016. Solar-Terrestrial Physics, 2016. Vol. 2. Iss. 1, pp. 19–33.

Натекание плазменного потока на плотную внутримагнитосферную плазму в рамках лабораторного моделирования

Чибранов А. А., Березуцкий А.Г., Ефимов М.А., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Посух В.Г., Руменских М.А., Трушин П.А., Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ СО РАН

e-mail: chibranov_25@mail.ru

Настоящий эксперимент проводился на базе лабораторной установки КИ-1 [1] (ИЛФ СО РАН) и был ориентирован на изучение взаимодействия натекающего потока плазмы и плотной внутри магнитосферной плазмы. Подобная конфигурация эксперимента ранее не ставилась и является актуальной для изучения.

Внутри вакуумной ($P \approx 3 \cdot 10^{-6}$ торр) цилиндрической камеры с размерами 5×1.2 м помещались полиэтиленовые мишени, которые облучались импульсным лазером для создания потоков плазмы. Первый плазменный поток создавался одновременным облучением двух мишеней и разлетался внутри магнитного поля дипольного типа (с магнитным моментом до 10^6 Гс·см³) [2], образуя плотную ($n \sim 10^{14}$ см⁻³) внутри магнитосферную плазму. Второй поток плазмы ($n \sim 10^{13}$ см⁻³) налетал на магнитосферу с расстояния 53 см. Его скорость была перпендикулярна магнитному моменту и приблизительно равнялась 100 км/с. Основные измерения проводились с использованием магнитных зондов и зондов Ленгмюра.

Результаты эксперимента показывают, что на первом этапе формируется плазма, захваченная в дипольном магнитном поле. Второй внешний плазменный поток формирует магнитосферу и взаимодействует с внутренней плазмой. Для демонстрации данного взаимодействия был проведен идентичный эксперимент без внутримагнитосферной плазмы. Так, в присутствии внутренней плазмы были определены масштаб магнитосферы ($R = 20$ см), величина поджатия магнитного дипольного поля ($dBz = 70$ Гс) и параметр Холла ($D = 2.9$), при этом наблюдаться переходная магнитосфера, качественно более близкая планетарным. При натекании потока только на магнитное поле эти параметры достигали величин $R = 16$ см, $dBz = 110$ Гс и $D = 1.5$, что характерно для типичных мини-магнитосфер, получаемых в лабораторных экспериментах. Различие в полученных данных свидетельствует о значительном влиянии внутримагнитосферной плазмы на моделируемые процессы.

Данные, полученные в ходе проведения исследований могут быть использованы для более точного теоретического анализа и численного моделирования космофизических процессов, а также могут быть использованы для исследования околоземной космической среды и разработке моделей предсказания космической погоды.

Настоящая работа была выполнена в рамках проекта РНФ № 18-12-00080, при поддержке грантов РФФИ № 18-2921018, 20-02-00520 и гранта Минобрнауки 075-15-2020-780, а также Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема No AAAA-A17-117021750017-0).

Список литературы

1. Захаров Ю. П., Оришич А. М., Пономаренко А. Г., Лазерная плазма и моделирование нестационарных космических процессов, Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР. 1988 г.
2. Руменских М.С., Чибранов А.А., Ефимов М.А., Березуцкий А.Г., Посух В.Г., Захаров Ю.П., Бояринцев Э.Л., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф., Лабораторное моделирование взаимодействия Солнечного ветра с Лунными магнитными аномалиями, Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 111(6), 335-342, 2020 г.

Магнитосферные процессы, протекающие в атмосферах горячих Юпитеров и наблюдаемые при лабораторном моделировании

Ефимов М. А., Чибранов А.А., Руменских М.С., Березуцкий А.Г., Посух В.Г., Трушин П.А., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ СО РАН

e-mail: mikle3496@gmail.com

В данной работе приведен анализ взаимодействия плазменных потоков в эксперименте по моделированию натекания звездного ветра на атмосферу горячего Юпитера. В вакуумную камеру стенда КИ-1 подается излучение импульсного CO_2 -лазера, которое разделяется на два пучка и фокусируется на парно расположенных на корпусе магнитного диполя ($10^6 \text{ Гс} \cdot \text{см}^3$) C_2H_4 -мишенях. Получающийся поток лазерной плазмы моделирует сверхзвуковое истечение верхней атмосферы горячего Юпитера. Данная схема опытов была впервые реализована в [1]. Моделирование звездного ветра происходит посредством облучения третьим лазерным пучком мишени, расположенной в 53 см от диполя. Возмущения плазменных потоков регистрировались зондами Ленгмюра и магнитными зондами. Также измерялся полный продольный ток, замыкающийся в полярных областях магнитосферы и трансполярный потенциал, с использованием поясом Роговского и медных пластин, расположенных непосредственно в местах абляции лазерного излучения на диполе, способом описанном в [2].

Полученные данные показывают, что величина дипольного магнитного поля оказывает прямое влияние на трансполярные токи и потенциалы, генерируемые облаками лазерной плазмы. Были измерены угловые распределения взаимодействующих плазменных сгустков, проанализированы относительные концентрации сформированного вокруг диполя облака плазмы к натекающему потоку плазмы на разных расстояниях и при разной величине дипольного поля. При анализе углового распределения обнаружена асимметрия взаимодействующих потоков, что свидетельствует о сложной нелинейной структуре взаимодействия.

Результаты работы позволяют лучше понимать структуру и динамику взаимодействующих плазменных сгустков и токов в магнитосфере горячих Юпитеров, и в дальнейшем

могут быть полезны при численном моделировании процессов протекающих в магнитосферах подобных планет.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 18-12-00080 и при поддержке грантов РФФИ № 18-2921018, 20-02-00520 и гранта Минобрнауки 075-15-2020-780, а также Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема No AAAA-A17-117021750017-0).

Список литературы

1. Shaikhislamov, I. F., Posukh, V. G., Melekhov, A. V., Prokopov, P. A., Boyarintsev, E. L., Zakharov, Y. P., & Ponomarenko, A. G. (2016). Interaction of counter-streaming plasma flows in a dipole magnetic field. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 58(11), 115002.
2. Shaikhislamov, I. F., Antonov, V. M., Zakharov, Y. P., Boyarintsev, E. L., Melekhov, A. V., Posukh, V. G., & Ponomarenko, A. G. (2014). Field-aligned currents and magnetospheric generator in experiments on a laser-produced plasma flowing around a magnetic dipole. *Cosmic Research*, 52(4), 278-288.

Моделирование обтекания упрощенной модели автомобиля методом моделирования крупных вихрей с пристеночными функциями

Колмогоров Д. К.¹, Гарбарук А.В.¹

¹СПбПУ

e-mail: dkolmogorov@cf.d.spbstu.ru

Метод моделирования крупных вихрей (LES) на сегодняшний момент является одним из самых точных методов для моделирования турбулентных течений. Однако при использовании LES для решения большинства прикладных задач требуются большие вычислительные ресурсы. Одним из способов понизить требования на вычислительные ресурсы является метод LES с пристеночными функциями (WFLES)[1]. Однако на сегодняшний момент влияние пристеночных функций на точность пристеночного моделирования в реальных отрывных течениях остается все ещё малоизученным.

В работе представлен опыт применения WFLES для предсказания течения вокруг упрощенной модели автомобиля (Ahmed body) [2] с углом скоса на задней кромке, равном 25°, при числе Рейнольдса $Re=2.8 \cdot 10^6$ согласно эксперименту [3]. Численное моделирование проводится на декартовых сетках с возможностью локального измельчения. Результаты расчетов показывают, что несмотря на простоту тестовой конфигурации исследуемое течение обладает рядом важных физических особенностей: наличие скачка давления на верхней задней кромке, ускорение потока перед отрывом, небольшая величина отрыва и др. Однако WFLES способен с удовлетворительной точностью предсказать основные характеристики течения: коэффициент трения, период колебания вихревого следа, профили скорости и др. Подробные результаты численного моделирования будут представлены в докладе и статье.

Результаты текущей работы получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского Политехнического Университета Петра Великого (<http://www.scc.spbstu.ru/>).

Список литературы

1. Werner, H., and H. Wengle. «Large-eddy simulation of turbulent flow over and around a cube in a plate channel.» *Turbulent shear flows* 8. Springer, Berlin, Heidelberg, 1993. 155-168.
2. Ahmed S. R., Ramm G., Faltin G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. *SAE Transactions*. – 1984. – С. 473-503.
3. Lienhart, H., C. Stoots, and S. Becker. «Flow and turbulence structures in the wake of a simplified car model (ahmed modell).» *New results in numerical and experimental fluid mechanics III*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002. 323-330.

Электроэрозионная стойкость электродов из различных материалов для плазмогенирующих устройств

Мурашов Ю. В.¹, Жилиготов Р.И., Образцов Н.В., Куракина Н.К., Аверьянова С.А.

¹СПбПУ

e-mail: iurimurashov@gmail.com

Широкое применение плазмогенирующих устройств в аддитивных технологиях для диспергирования металлических порошков [1], нанесения покрытий и в области переработки токсичных отходов [2] требует надежного функционирования плазмотронов при их длительной непрерывной работе. Повышение эксплуатационных характеристик электродов с учетом мощного термического воздействия плазмы при использовании различных материалов и композитных псевдосплавов [3] является актуальным направлением исследований для обеспечения бесперебойного цикла работы плазменных установок.

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований электроэрозионной стойкости электродов, выполненных из вольфрама, железа, меди, меди с напыленным порошком никель+железо. Описывается электрическая схема экспериментальной установки для анализа эрозии контактов различной геометрии в импульсном разрядном токе и сопровождающего тока до 2 кА промышленной частоты. Приводятся экспериментально полученные рентгенограммы поверхности контактов. По полученным осциллограммам путем интегрирования тока разряда определяется электрический заряд для последующей оценки коэффициента эрозии. Проведенные исследования показывают, что применение вольфрама в качестве материала электрода наиболее эффективно для использования в плазменных технологиях.

Список литературы

1. A A Kadyrov *et al* 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1753** 012019
2. Obraztsov N.V. Plasma technology based on high-voltage ac plasma torch/ Kumkova I., Popov V., Subbotin D.// AIP Conference Proceedings **2179**, 020022 (2019)
3. Budin, A.V., Pinchuk, M.E. & Kurakina, N.K. Erosion Characteristics of Copper-Based Composite Electrodes in an Electric Arc of Variable Length with Transverse Gas Blowing. *Tech. Phys. Lett.* **44**, 808–810 (2018)

Дизайн экспериментальной модели течения для исследования сложного турбулентного искривленного следа, подверженного воздействию неблагоприятного градиента давления, на основе RANS расчетов

Гусева Е. К.¹, Никулин Д.А.¹, Травин А.К.¹, Radespiel R.², Scholz P.²

¹СПбПУ

²Technische Universität Braunschweig

e-mail: katia.guseva@inbox.ru

В современных пассажирских самолетах используются механизированные крылья с системой предкрылков и закрылков, обеспечивающей достижение высоких значений коэффициента подъемной силы при низких скоростях полета (на стадиях взлета и посадки). Следы предкрылков и основного крыла, формирующиеся при обтекании механизированных крыльев, подвергаются воздействию неблагоприятного градиента давления (НГД) и продольной кривизны линий тока, индуцированных отклоненными закрылками. НГД приводит к сильному увеличению поперечной ширины следа и, в некоторых случаях, даже к формированию внутри следа замкнутой зоны возвратного течения. Это, в свою очередь, влечет за собой снижение максимальной подъемной силы. Достаточно точное количественное предсказание указанных эффектов в настоящее время невозможно из-за отсутствия надежных данных по характеристикам сложных турбулентных следов, которые необходимы для валидации расчетных моделей, используемых при конструировании современных авиалайнеров. Настоящая работа представляет собой часть исследовательского проекта, целью которого является создание исчерпывающей базы экспериментальных и расчетных данных, полученных с помощью современных методов экспериментальной диагностики и надежных вихреразрешающих подходов к численному моделированию турбулентности в искривленном следе при наличии сильного НГД и высоких числах Рейнольдса.

В работе представлены результаты серии RANS расчетов сложного турбулентного искривленного следа под воздействием НГД, направленных на аэродинамический дизайн эксперимента с криволинейным следом. Расчеты проводились с использованием вычислительных ресурсов СКЦ СПбПУ (www.spbstu.ru). Исследовалось влияние ключевых геометрических параметров новой экспериментальной модели криволинейного следа (угол атаки плоской пластины, генерирующей след; форма и угол атаки второго верхнего управляющего профиля; длины и углы отклонения закрылков верхнего и нижнего управляющих профилей) при числе Рейнольдса 1.6 миллиона. В результате была найдена геометрия модели, которая, согласно 2D RANS расчетам, обеспечивает сильную асимметрию и кривизну следа, а также его значительное замедление под воздействием НГД, приводящее к формированию протяженной зоны с близкой к нулю скоростью, с одной стороны, и безотрывное обтекание всех элементов модели, с другой. Сравнение результатов расчетов с использованием SA[1] и SA-RC [2] RANS моделей показало, что в предложенной конструкции имеет место существенное влияние на след эффектов кривизны линий тока.

Работа выполнена при поддержке фондов DFG и RBRF (грант No. 21-58-12002).

Список литературы

1. Spalart, P. R. and Allmaras, S. R., A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows, Recherche Aerospatiale, No. 1, 5-21, 1994 г.

2. Shur, M. L., Strelets, M. K., Travin, A. K., Spalart, P. R., Turbulence Modeling in Rotating and Curved Channels: Assessing the Spalart-Shur Correction, AIAA Journal, том. 83, No. 5, 784-792, 2000 г.

Анализ применимости одномерной модели для описания тепловых и термоэлектрических процессов в анизотропных термоэлементах из висмута

Попов П. А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: pavel.popov@mail.ioffe.ru

Анизотропные термоэлементы широко применяются в генераторах термоэдс, устройствах охлаждения, датчиках теплового потока и приемниках излучения. Основным параметром, определяющим режим работы, является распределение температуры в термоэлементе. Когда термоэлементы применяются в качестве генераторов термоэдс или устройств охлаждения, основным является стационарный тепловой режим, а переходные состояния рассматриваются как нежелательные. В случае использования термоэлементов, как чувствительных элементов датчиков, основными будут нестационарные тепловые режимы.

Детальный анализ тепловых и термоэлектрических явлений является весьма сложной задачей, что обусловлено анизотропным характером кинетических коэффициентов и нелинейностью системы уравнений. По этой причине, широко применяется одномерное приближение для описания основных термоэлектрических процессов в анизотропных термоэлементах. Основным недостатком такого подхода является невозможность оценки погрешностей используемых приближений.

В данной работе, на основе численного решения полной системы уравнений теплопроводности и электропроводности представлен анализ применимости одномерного приближения в условиях нестационарных тепловых режимов, характерных для использования анизотропных термоэлементов в качестве чувствительных элементов тепловых датчиков. Рабочие времена и тепловые нагрузки соответствуют типичным условиям газодинамических экспериментов на ударных трубах ~ 1 мкс - 10 мс.

Список литературы

1. Иорданишвили Е.К., Бабин В.П. Нестационарные процессы в термоэлектрических и термомагнитных системах преобразования энергии. М.: Наука, 1983, 216 с.
2. Rowe D. M. Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. CRC Press, 2006, pp 954

Проведение прямого численного моделирования течения в CS0 диффузоре

Стабников А. С.¹, Колмогоров Д.К.¹, Гарбарук А. В.¹

¹СПбПУ

e-mail: an.stabnikov@gmail.com

Прямое численное моделирование (DNS, Direct Numerical Simulation) это наиболее точный способ расчёта турбулентных течений в рамках которого отсутствует какое-либо моделирование и уравнения Навье-Стокса решаются напрямую. В связи с тем, что для проведения DNS необходимо очень подробное пространственное и временное разрешение течения, и, следовательно, гигантский объём вычислительных ресурсов, использование этого подхода для решения практических задач в ближайшее время не представляется возможным. В настоящее время расчёты DNS используются для подробного изучения структуры различных простых течений, отладки/калибровки эмпирических методов расчёта турбулентных течений и валидации натуральных экспериментов.

Течение в CS0 диффузоре это хорошо известная тестовая задача для моделирования турбулентности. Проведённые в данной работе расчёты повторяли постановку в эксперименте [1, Driver et al], в котором рассматривалось обтекание круглого цилиндра при неблагоприятном градиенте давления при числе Рейнольдса $Re = 1.4 \cdot 10^5$, построенном по радиусу цилиндра $R = 0.07$ м.

Полученные в работе результаты хорошо совпадают с экспериментальными.

Результаты получены с использованием ресурсов СКЦ "Политехнический "СПбПУ".

Список литературы

1. Driver D. M., Reynolds shear stress measurements in a separated boundary layer flow, AIAA Paper, 1787, 1991 г.

Роль приэлектродных областей в процессе взаимодействия газового разряда с ударной волной

Сахаров В. А.¹, Барышников А.С.¹, Басаргин И.В.¹, Безверхний Н.О.¹, Бобашев С.В.¹, Монахов Н.А.¹, Попов П.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: v.sakharov@mail.ioffe.ru

Движение ударной волны поперек оси тлеющего разряда сопровождается газодинамическим сжатием газа, и приобретением им скорости в направлении движения ударной волны. Механическое воздействие на разряд, в свою очередь, приводит к изменению его электрических параметров.

Исследования, проведенные в положительном столбе тлеющего разряда с помощью двойного электрического зонда [1-2], показали, что концентрация заряженных частиц перед фронтом ударной волны остается практически постоянной. В то же время потенциал пространства до прихода ударной волны в точку измерения меняется немонотонно. Анализ экспериментальных данных показывает, что сложный характер изменения потенциала

пространства обусловлен, в том числе, и взаимодействием ударной волны с областью вблизи электродов разрядного промежутка.

Настоящая работа посвящена выяснению роли приэлектродных областей при взаимодействии разряда с ударной волной.

Список литературы

1. Барышников А.С., Басаргин И.В., Безверхний Н.О., Бобашев С.В., Монахов Н.А., Попов П.А., Сахаров В.А., Чистякова М.В., ЖТФ, 2020, том 90, вып. 2, с. 206-210
2. Барышников А.С., Басаргин И.В., Безверхний Н.О., Бобашев С.В., Монахов Н.А., Попов П.А., Сахаров В.А., Чистякова М.В., ЖТФ, 2019, том 89, вып. 10, с.1524-1528

К вопросу о создании магнитного поля заданной геометрии в ускорительном канале МПД ускорителя.

Ташаев Ю. Н.¹

¹МГУПП

e-mail: tashayevyn@mgupp.ru

При проектировании плазменных ускорителей и стационарных плазменных двигателей важная роль отводится подбору и размещению источников магнитного поля. Ускоряющие свойства магнитного поля зависят как от геометрии его силовых линий, так и от пространственного распределения модуля его напряжённости. В рассматриваемых устройствах многосекционный соленоид создаёт расходящееся магнитное поле в ускорительном канале, в который подаётся плазмообразующий газ со стороны катода. Соосно соленоиду размещается анод, выполненный в виде профилированного сопла, подобного магнитному соплу. Плазменный поток, расширяясь через сопло в вакуум, ускоряется как под действием объёмной электромагнитной, так и под действием термоэлектронной ЭДС, связанной с градиентом давления. При малых токах разряда электромагнитные силы малы. Главную роль в ускорении плазменного потока играют газодинамические силы и замагниченная плазма, обладающая диамагнитными свойствами, двигаясь вдоль силовых линий, ускоряется в направлении убывания модуля магнитной индукции. В представленной работе проводится численный эксперимент, позволяющий оценить возможность использования специального многосекционного соленоида для создания в ускорительном осесимметричном канале магнитного поля заданной геометрии. Варьирование токов в изолированных секциях катушки, как показывает расчёт, позволяет изменять геометрию магнитного поля от преимущественно осевого (слабо расходящегося) до сильно расходящегося - радиального. Степень неоднородности осесимметричного магнитного поля соленоида в области ускорения плазмы характеризуется безразмерным параметром

формы магнитного поля [1]: $\propto R \cdot \left| \frac{dB_0}{dz} \right| / B_0 \sim R / L$, где R и L – характерные поперечный

и продольный размеры изменения магнитного поля; r, z – координаты цилиндрической системы координат; $B_0 = B_0(z)$ – магнитная индукция на оси симметрии. Таким образом, параметр формы внешнего магнитного поля $\propto$ однозначно определяет функциональную зависимость $B_0(z)$, которая в свою очередь является функцией линейной плотности тока в секциях электромагнитной катушки. Создать магнитное поле нужной геометрии можно

возбуждая в витках соленоида электрический ток соответствующей линейной плотности. Для нахождения распределения линейной плотности тока вдоль оси соленоида $J(s)$ решалось уравнение Фредгольма первого рода: $\int_0^L J(s) \cdot K(z-s) = B_0(z)$, с постоянными пределами интегрирования и разностным ядром

$$K(z-s) = \frac{1}{R_2 - R_1} \cdot \left(\ln \left| \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (z-s)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (z-s)^2}} \right| - \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (z-s)^2}} + \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + (z-s)^2}} \right),$$

где R_1 внутренний радиус соленоида, R_2 внешний радиус обмотки, L - длина соленоида, а магнитная индукция на оси симметрии $B_0(z) = B_a \cdot \exp\left(-\int_0^z a e(z) dz\right)$ вычислялась по заданной на некотором отрезке $[a, b]$ функции $a e(z)$. В результате численных расчётов был установлен класс функций $a e(z)$ для которых метод регуляризации Тихонова позволял найти хорошую аппроксимацию функций $J(s)$. Для проверки точности найденных распределений линейной плотности тока, магнитное поле на оси симметрии рассчитывалось по найденным $J(s)$ аналитически и сравнивалось с соответствующими значениями $B_0(z)$ в выбранных контрольных точках. Анализ результатов расчёта показывает, что используя электромагнитную катушку с числом секций ~ 10 , можно создавать магнитное поле требуемой геометрии с точностью, порядка $\sim 5\%$.

Список литературы

1. Миронов О.М., К определению сил, действующих на стационарные холловские ускорители плазмы, ЖТФ, том. 44, вып.3, 525-535, 1974.

Исследование прямого и обратного статического флексоэлектрического эффекта в монокристаллах KTaO_3

Обозова Е. Д.¹, Полушина А. Д.¹, Сырников П. П.¹, Залесский В. Г.¹

¹ФТИ им. А. Ф. Иоффе

e-mail: oed1990@gmail.com

Флексоэлектрическим эффектом называется взаимная связь между поляризацией диэлектрической среды и ее неоднородной деформацией [1]. Этот электромеханический эффект мал в макроскопическом масштабе, но становится значительным при переходе к объектам микро- и наноскопического масштаба, поэтому вызывает интерес для фундаментальных и прикладных исследований. В настоящей работе представлены результаты исследований прямого флексоэлектрического эффекта (ПФЭ), при котором поляризация индуцирована неоднородной деформацией и обратного эффекта (ОФЭ), связанного с появлением неоднородной деформации в результате поляризации монокристаллов KTaO_3 .

При исследовании ПФЭ измерялась величина поляризации, индуцированной сферическим изгибом тонких $140 \text{ }\mu\text{m}$ пластин KTaO_3 под воздействием периодических импульсов (4-5с) внешней механической нагрузки от 0 до 1.1 N. При исследовании ОФЭ измерялась величина сферического изгиба, индуцированная импульсами внешнего поля от 0 до 150 V длительностью до 15 s. Величина деформации измерялась интерферометрическим методом с точностью до 10 nm [2], а величина индуцированного тока поляризации – электрометрическим усилителем чувствительностью до 0.1 pA и временным разрешением 0.05 s.

Получены линейные зависимости флексоэлектрического поляризационного или деформационного отклика от величин внешнего механического или электрического поля, соответственно, а также временные зависимости этого отклика на импульсы поля. По полученным данным измерений произведены оценки эффективных поперечных флексоэлектрических коэффициентов в KTaO_3 , которые для двух взаимных эффектов дали следующий результат $\mu_{12}=7 \text{ }\mu\text{C/m}$ (ПФЭ) и $12 \text{ }\mu\text{C/m}$ (ОФЭ). Кроме того, оказалось, что флексоэлектрические отклики после выключения внешних полей имеют примерно одинаковые времена релаксации: $\tau_{\text{relax}}=1.7 \text{ s}$ - для релаксации поляризации (ПФЭ) и 1.8 s – для релаксации неоднородной деформации (ОФЭ).

Полученные экспериментальные результаты и оценки могут представлять интерес для той части феноменологической теории флексоэлектричества, которая посвящена проблеме симметрии во взаимосвязи прямого и обратного эффекта и проблеме расчета флексоэлектрических тензоров.

Список литературы

1. Tagantsev A. K., Yudin P. V., Flexoelectricity in solids: from theory to applications, 396 p., 2017 г.
2. Залесский В. Г., Обозова Е. Д., Полушина А. Д., Сканирующий интерферометрический метод исследования обратного флексоэлектрического эффекта в тонких пластинках сегнетоэлектриков и родственных материалов, Приборы и техника эксперимента. том 6, 90-97, 2019 г.

Статический флексоэлектрический эффект в монокристаллах SrTiO_3 .

Залесский В. Г.¹, Обозова Е.Д.¹, Полушина А.Д.¹,

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: nsh@mail.ioffe.ru

Флексоэлектрический эффект отвечает за взаимную связь между поляризацией и градиентами деформации диэлектрической среды [1]. Эффект наиболее ярко проявляется в диэлектрических тонких пластинках и пленках микро- и наноскопического масштаба и становится соизмерим по величине с пьезоэлектричеством. Несмотря на развитую феноменологическую модель флексоэлектричества, существует определенный дефицит в экспериментальных результатах. К настоящему моменту можно выделить два главных направления исследований: проблема расхождения экспериментальных и теоретических величин флексоэлектрических тензоров и проблема симметрии во взаимной связи между прямым и обратным флексоэлектрическим эффектом (ПФЭ и ОФЭ). В качестве модельного флексоэлектрического материала наиболее часто рассматриваются кристаллы SrTiO_3 , сегнетоэлектрика в параэлектрической фазе с достаточно большой ~ 300 диэлектрической восприимчивостью, что благоприятно для изучения флексоэлектричества, а его структура перовскита достаточно удобна для расчетов параметров решетки. В настоящей работе предложен подход, при котором с помощью прямого и обратного статического (низкочастотного) флексоэлектрического эффекта исследуются индуцированные поляризация и неоднородная деформация в одном и том же кристалле.

При исследовании ПФЭ в тонких $140\text{--}150\text{ }\mu\text{m}$ пластинах SrTiO_3 измерялась величина поляризации, индуцированная сферическим изгибом под воздействием импульсов низкой частоты (период $4\text{--}5\text{ s}$) внешней механической нагрузки до 1.1 N , а при исследовании ОФЭ измерялась величина сферического изгиба, индуцированная импульсами внешнего поля до 750 V длительностью до 15 s [2]. Получены линейные зависимости флексоэлектрического поляризационного (деформационного) отклика от величины механического (электрического) поля, а также временные зависимости этого отклика на импульсы внешнего поля. Произведены оценки флексоэлектрических тензоров: $\mu_{11} \approx 0.075$ и $\mu_{12} \approx 2.6\text{ }\mu\text{C m}^{-1}$ (ПФЭ), $\mu_{11}=0.46$ и $\mu_{12}=6.64\text{ }\mu\text{C m}^{-1}$ (ОФЭ) и времена релаксации флексоэлектрического отклика: 5 и 12 s (ПФЭ), 5 и 9 s (ОФЭ), которые для двух эффектов оказались близкими по величине.

Полученные результаты показали, что величина статического флексоэлектричества в SrTiO_3 определяется релаксационным процессом, механизм которого обсуждается с привлечением моделей поверхностного пьезоэффекта и электромеханического эффекта, связанного с транспортом электронов, ионов и заряженных дефектов.

Список литературы

1. Tagantsev A. K., Yudin P. V., Flexoelectricity in solids, World Scientific Publishing Co., Singapore, 2017
2. Залесский В. Г., Обозова Е. Д., Полушина А. Д., Приборы и техника эксперимента, No. 6, 90, 2019.

Динамика ТГц индуцированных фононных мод в сегнетоэлектрическом кристалле $\text{Pb}_5(\text{Ge}_{0.74}\text{Si}_{0.26})_3\text{O}_{11}$

Билык В. Р.¹, Мишина Е.Д.¹, Овчинников А.В.², Чефонов О.В.²

¹РТУ МИРЭА

²ОИВТ РАН

e-mail: vrbilyk@mail.ru

Сверхбыстрый отклик среды на воздействие интенсивных импульсов ТГц диапазона частот представляет огромный интерес в физике конденсированного состояния [1]. В сегнетоэлектриках воздействие ТГц импульсов приводит к смещению ионов и возбуждению фононных мод, в том числе "мягкой" фононной моды, что в свою очередь может способствовать динамическому переключению диэлектрической поляризации [2,3]. Экспериментальная методика основана на детектировании ТГц-индуцированных изменений интенсивности генерации второй оптической гармоники (ВГ), чувствительной к изменению пространственной симметрии, и является эффективным инструментом для исследования такого отклика. В работе представлен результат воздействия широкополосного ТГц импульса на сегнетоэлектрический кристалл германата силиката свинца $\text{Pb}_5(\text{Ge}_{0.74}\text{Si}_{0.26})_3\text{O}_{11}$ при детектировании сигнала ВГ.

Кристалл $\text{Pb}_5(\text{Ge}_{0.74}\text{Si}_{0.26})_3\text{O}_{11}$ находится в сегнетоэлектрической фазе и претерпевает переход в парафазу при 73°C. Фононный спектр исследуемого кристалла позволяет эффективно возбуждать сразу несколько частот колебаний кристаллической решетки, лежащих в диапазоне возбуждающего ТГц излучения, в том числе частоту мягкой фононной моды. Методом ТГц возбуждения – нелинейно оптического зондирования продемонстрирована модуляция сигнала ВГ в поле терагерцового импульса при различных напряженностях вплоть до 23 МВ/см в импульсе.

Анализ спектральных зависимостей прошедшего через образец ТГц импульса также показал, что в монокристалле германата свинца присутствует резонансный пик поглощения на частоте близкой к 1 ТГц, характерный для мягкой фононной моды и лежащий в спектре возбуждающего ТГц импульса. Также в спектре прошедшего импульса наблюдаются ярко выраженные максимумы на частотах 2,5; 3,6 и 5,1 ТГц.

Предложены механизмы, описывающие такое поведение интенсивности ВГ.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта №20-72-10178 Российского научного фонда, а также РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00043.

Список литературы

1. Kampfrath T., Tanaka K., Nelson K.A. Resonant and nonresonant control over matter and light by intense terahertz transients // Nat. Photonics. 2013. Vol. 7, № 9. P. 680–690.
2. Grübel S. et al. Ultrafast x-ray diffraction of a ferroelectric soft mode driven by broadband terahertz pulses. // ArXiv.org. 2016.
3. Li X. et al. Terahertz field-induced ferroelectricity in quantum paraelectric SrTiO_3 // Science. 2019. Vol. 364, № 6445. P. 1079–1082.

Дисперсия магнитостатических и обменных спиновых волн в системе связанных ферромагнитных слоёв

Геревенков П. И.¹, Бессонов В. Д.², Телегин А. В.², Rushforth A. W.³, Калашникова А. М.¹, Хохлов Н. Е.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²ИФМ УрО РАН им. М.Н. Михеева

³School of Physics and Astronomy, The University of Nottingham

e-mail: petr.gerevenkov@mail.ioffe.ru

В настоящее время создание элементов магноники для передачи и обработки информации является активно развивающимся направлением исследований. Недавно была продемонстрирована возможность вычислений на спиновых волнах в системе магнитостатически связанных волноводов [1]. Для таких вычислений крайне важным является понимание и управление распространением спиновых волн в таких системах, что определяется дисперсионными соотношениями для них. Однако экспериментальное получение информации о дисперсии спиновых волн в структурах с магнитостатической связью является сложной задачей.

В представляемой работе методом Мандельштам — Бриллюэновского рассеяния света получены дисперсионные зависимости магнонов в диапазоне волновых векторов - 20 -- 20 рад/мкм в системе двух магнитостатически связанных ферромагнитных слоёв в структуре $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ (7 нм)/Cu(5 нм)/ $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ (4 нм)/GaAs а также в одиночной ферромагнитной металлической плёнке $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ (20 нм)/GaAs. Важным результатом оказалось то, что в многослойной структуре была обнаружена дисперсионная ветвь, соответствующая коллективной динамике намагниченности двух ферромагнитных слоёв и не наблюдающаяся в одиночной плёнке. Кроме того, в многослойной структуре были обнаружены дисперсионные ветви, соответствующие волнам Дэймона-Эшбаха в отдельных магнитных слоях.

Все дисперсионные ветви, наблюдаемых в эксперименте как в многослойной структуре, так и в одиночной пленке, удалось описать на основе теоретического подхода, предложенного в [2]. Данный подход позволяет определить дисперсию магнитостатических и спиновых волн методом численного поиска решений уравнений Ландау-Лифшица и Максвелла для исследуемого материала, удовлетворяющих граничным условиям исследуемой структуры. Достоинствами данного подхода являются: возможность получения дисперсионной зависимости в случаях, когда получение аналитического выражения невозможно и возможность получения распределения амплитуд прецессии по толщине структуры. Также результаты экспериментов и теории согласуются с численным расчетом на основе микромагнитного моделирования [3].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 19-32-50141 и РНФ 20-12-00309.

Список литературы

1. Wang Q. et al. Nat Electron **3**, 765–774 (2020)
2. Carlotti G., Gubbiotti G. La Rivista del Nuovo Cimento **22** (12), 1-60 (1999)
3. Mumax3 <https://mumax.github.io>

Исследование диэлектрических свойств тонких пленок титаната бария, легированных ионами редкоземельных металлов

Мыльников И. Л., Белявский П.Ю., Буровихин А.П., Мишнёв М.А.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: mylnikov.il@gmail.com

Разработка новых функциональных материалов с заданными свойствами для различных специальных применений является одной из актуальнейших проблем современной микроэлектроники и электротехники. Особо остро данная проблема стоит при разработке новых типов твердотельных преобразователей энергии, таких как: устройства прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, твердотельные устройства охлаждения и термостатирования, устройства генерации электроэнергии из окружающего электромагнитного фона. Для эффективного преобразования энергии и охлаждения используются устройства на электрокалорическом эффекте (ЭКЭ), то есть температура поляризуемого материала изменяется под действием переменного электрического поля. На сегодняшний день наибольшее внимание было уделено исследованию твердых растворов на основе свинца, таким как PZT и PMN-PT. К недостаткам таких материалов можно отнести малую стабильность, высокие значения электрической проводимости, использование неэкологичных материалов (свинец). Все это ограничивает возможности эффективного применения известных материалов в твердотельных преобразователях энергии.

Технология перовскитоподобных сегнетоэлектриков хорошо отработана, и они давно успешно применяются в микроэлектронике. Современная керамическая технология предоставляет исследователям широкие возможности для разработки новых материалов различного стехиометрического состава и уровня легирования. Синтезируя твердые растворы перовскитоподобных сегнетоэлектриков с различным уровнем легирования возможно получения необходимых свойств и уровня нелинейности в заданных интервалах температур.

Для увеличения ЭКЭ в сегнетоэлектриках, в том числе для расширения диапазона рабочих температур, широко используются различные добавки редкоземельных металлов, например, лантана (La).

В данной работе проведено исследование электрофизических свойств тонких пленок титаната бария с добавлением лантана. Для исследования свойств тонкопленочных структур на их поверхность наносится металлизация и формируются конденсаторные структуры. С помощью автоматизированной установки измерены следующие зависимости:

- 1) Температурные зависимости емкости и тангенса угла диэлектрических потерь.
- 2) Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) и зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от приложенного напряжения. По результатам измерения вольт-фарадных характеристик проводится оценка диэлектрической проницаемости материала и фактора управляемости.
- 3) Вольт-амперные характеристики (ВАХ). По омическим участкам ВАХ проводится оценка удельной проводимости материала.

Уравнение состояния сегнетоэлектрика, легированного металлами, в рамках модели Вейсса

Старков И.А.¹, Мишнёв М.А.¹, Старков А.С.^{1,2}

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

²Университет ИТМО

e-mail: mamishnev@gmail.com

Системы преобразования энергии и термостабилизации предусматривают весьма существенные капиталовложения в оборудование и инфраструктуру в любой развитой экономике. На настоящий момент основным недостатком подобных устройств является их высокая стоимость по причине дорогостоящих составляющих и низкая эффективность. Нет никаких сомнений в том, что кардинальное усовершенствование технологии преобразования энергии принесло бы огромную экологическую и экономическую выгоду. Такое улучшение должно идти в двух направлениях. Во-первых, повышение эффективности имеющихся методов преобразования. Во-вторых, создание принципиально новых подходов и реализация уже имеющихся теоретических разработок. Использование термопреобразователей энергии на основе наноструктурированных сегнетоэлектрических материалов соответствует перечисленным критериям [1].

Наиболее простым вариантом с точки зрения технологического процесса изготовления подобных материалов является использование различных легирующих добавок к сегнетоэлектрической матрице. Несмотря на простоту самой технологии, установившаяся теория для описания легированных керамических материалов на сегодняшний день отсутствует. При легировании происходит замещение одного атома кристаллической решётки на другой. При этом рассчитать свойства конечной структуры оказывается чрезвычайно трудной задачей. Имеющиеся методы нахождения усреднённых физических характеристик в этом случае не работают [2]. Это связано как с нелинейностью уравнений, так и с тем фактом, что легирование не является чисто механическим процессом, а приводит к качественному изменению кристаллической решётки.

Для нахождения уравнения состояния легированного сегнетоэлектрика предлагается использовался подход Вейсса [3]. Параметры модели Вейсса можно считать аддитивными величинами (аддитивности напряжения и дипольного момента). Коэффициенты Ландау-Гинзбурга (ЛГ) аддитивными не являются, но могут быть пересчитаны по этим параметрам. Зависимость коэффициентов ЛГ для смеси материалов от аналогичных коэффициентов её составляющих является алгебраической и при слабом легировании является линейной по концентрации добавок. В качестве примера использования и верификации предложенного теоретического подхода, было рассмотрено влияние включений лантана при легировании титаната бария. Полученные зависимости с хорошей точностью воспроизводят экспериментальные результаты, изложенные в литературе.

Список литературы

1. Karmanenko S., Semenov A., Dedyk A., Es'kov A., Ivanov A., Belavskiy P., Pavlova Yu., Nikitin A., Starkov I., Starkov A., Pakhomov O. New Approaches to Electrocaloric-Based Multilayer Cooling. -- in the book *Electrocaloric Materials*. Springer Berlin Heidelberg -- 2014, chapter VIII, P.183-223.
2. Gonzalo, J. A. (2006). Effective field approach to phase transitions and some applications to ferroelectrics (Vol. 76). World Scientific.
3. Старков, А. С., Старков, И. А. (2014). Применение обобщенного матричного метода усреднения для расчета эффективных свойств тонких слоев

мультиферроиков. Журнал экспериментальной и теоретической физики, 146(5), 980-989.

Лазерно-индуцированное изменение обменного взаимодействия и ТГц когерентная спиновая динамика в антиферромагнетиках

Федянин А. Е.¹, А. М. Калашникова¹, J. Mentink²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²IMM, Radboud University, Nijmegen

e-mail: fedianin.a.e@mail.ru

Фемтосекундные лазерные импульсы открывают новые возможности для воздействия на магнитные системы, например, для реализации полностью-оптического переключения намагниченности в отсутствии внешнего магнитного поля [1-2]. Однако как экспериментальное, так и теоретическое описание влияния коротких лазерных импульсов на обменное взаимодействие - доминирующее взаимодействие в магнитных материалах, и последующую спиновую динамику остается открытой проблемой [3-4].

Ожидается, что даже слабое возмущение обменного взаимодействия может привести к возбуждению спиновой динамики на терагерцовых частотах, что действительно наблюдалось в экспериментах, в которых лазерный импульс индуцировал когерентные двухмагнетонные возбуждения [5-7]. Такие возбуждения обладают длинами волн порядка нанометров, и частотами 10-100 ТГц. Однако, из-за малого числа успешных экспериментальных наблюдений таких процессов, остается открытым вопрос о том, как эффективнее их детектировать, и как связать параметры возбуждающего импульса, динамическое изменение обменного взаимодействия в материале и наблюдаемую макроскопическую динамику оптического отклика среды. В частности, теоретическое предсказание оптимальных поляризаций возбуждающих и детектирующих двухмагнетонные моды лазерных импульсов является крайне важной задачей для дальнейшего экспериментального изучения когерентной ТГц спиновой динамики.

В данной работе проведен теоретический анализ возбуждения когерентных двухмагнетонных мод в кубических антиферромагнитных диэлектриках со слабой анизотропией, вызванного импульсным возмущением обменного взаимодействия. В качестве исследуемого объекта был выбран кубический гейзенберговский антиферромагнетик с вектором Нееля и легкой осью магнитной анизотропии либо вдоль главной диагонали куба, либо вдоль одной из его граней. Влияние линейно-поляризованного фемтосекундного лазерного импульса длительностью 7 фс представлено в виде мгновенного возмущения обменного взаимодействия между ближайшими соседями вдоль электрического поля импульса. Была рассчитана динамика спиновых корреляций для соседних узлов решетки, и на их основе получены временные зависимости для диэлектрической проницаемости.

Рассмотрена зависимость спиновых возбуждений от поляризации оптического лазерного импульса, а также их влияние на оптические свойства материала. Показано, что для возбуждения двухмагнетонной моды необходимо воздействовать на антиферромагнетик лазерным импульсом, поляризованным вдоль направления одной из связей между ближайшими соседями. Проведено сравнение результатов теоретического анализа с имеющимися экспериментальными данными [5-7].

Работа выполнена при поддержке фонда БАЗИС (грант № 20-1-5-95-1) и программы EU COST Action CA17123 "Magnetofon".

Список литературы

1. T. Ostler et al., Nature Comm. 3,666 (2012)
2. A. Stupakiewicz et al., Nature 542, 71 (2017)
3. J. H. Mentink, J. Phys.: Condens. Matter 29, 453001 (2017)
4. M. Fechner et al., Phys. Rev. Materials 2, 064401 (2018)
5. J. Zhao et al., Phys. Rev. Lett. 93 (10), 107203 (2004).
6. D. Bossini et al., Nat Commun. 7, 10645 (2016).
7. D. Bossini et al., Phys. Rev. B 100 (2), 024428 (2019).

Исследование влияния амплитуды и смещения постоянной составляющей управляющего сигнала на величину электрокалорического отклика в сегнетоэлектрических материалах

Анохин А. С.^{1,2}, Еськов А. В.¹, Пахомов О. В.¹, Семенов А.А.²,

¹Университет ИТМО

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: asanokhin@itmo.ru

Одной из наиболее актуальных проблем в современной электронике является проблема охлаждения мощных и термостабилизации температурно-чувствительных электронных компонентов. В связи с постоянно возрастающими требованиями энергоэффективности, микроминиатюризации и надежности особенно актуальной становится задача разработки твердотельных охлаждающих устройств, обеспечивающих как высокую удельную мощность, так и высокий КПД [1]. Одной из наиболее перспективных технологий твердотельного преобразования тепла является использование электрокалорического эффекта в твердотельных структурах. Во многих лабораториях мира ведутся исследования, направленные на разработку электрокалорических охладителей и преобразователей, а так же новых материалов с большими величинами электрокалорического эффекта [2-3].

Наибольшие значения электрокалорического эффекта достигаются в материалах, обладающих ярко выраженной нелинейной температурной зависимостью диэлектрической проницаемости и вольт-фарадной характеристикой. Такими свойствами обладают сегнетоэлектрические материалы. Сегнетоэлектрики, вследствие наличия доменной структуры, проявляют неоднозначную петлеобразную зависимость поляризации от внешнего электрического поля при его циклическом изменении. Подобные гистерезисные явления серьезно осложняют работу с подобными материалами при температурах вблизи фазового перехода. В большинстве ранее опубликованных работ исследование электрокалорического эффекта методом прямых измерений при циклическом воздействии выполнялось без учета особенностей сегнетоэлектрического гистерезиса, а именно, исследования температурного отклика проводились при подаче периодического сигнала вида $E_{min} = 0$, $E_{max} > 0$ [4-5]. В данной работе проведено экспериментальное исследование электрокалорического отклика при подаче управляющего периодического сигнала прямоугольной формы различной амплитуды при различных значениях постоянной составляющей. Показано,

что правильный выбор амплитуды сигнала и величины постоянной составляющей может приводить как к увеличению самого электрокалорического эффекта, так и к увеличению разницы величин электрокалорического отклика при поляризации и деполяризации сегнетоэлектрического образца. Установлено, что в сегнетофазе понижение E_{min} до величины порядка коэрцитивного поля приводит к увеличению электрокалорического теплового отклика как при поляризации, так и при деполяризации образца, дальнейшее повышение величины обратного смещения приводит к снижению величины электрокалорического теплового отклика как в сегнето-, так и в парафазе, однако при этом величина $|\Delta T_{depol.}| - |\Delta T_{pol.}|$ увеличивается. Экспериментальные исследования электрокалорического отклика были проведены в керамических образцах титаната бария и в образцах на основе твердых растворов титаната бария – стронция.

Список литературы

1. Ožbolt M. et al. Electrocaloric refrigeration: thermodynamics, state of the art and future perspectives //International journal of refrigeration. – 2014. – Т. 40. – С. 174-188.
2. Valant M. Electrocaloric materials for future solid-state refrigeration technologies //Progress in Materials Science. – 2012. – Т. 57. – №. 6. – С. 980-1009.
3. Karmanenko S. et al. New approaches to electrocaloric-based multilayer cooling //Electrocaloric Materials. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. – С. 183-223.
4. Patel S., Chauhan A., Vaish R. Electrocaloric Behavior and Temperature-Dependent Scaling of Dynamic Hysteresis of Ba_{0.85}Ca_{0.15}Ti_{0.9}Zr_{0.1}O₃ Ceramics //International Journal of Applied Ceramic Technology. – 2015. – Т. 12. – №. 4. – С. 899-907.
5. Suchaneck G., Gerlach G. The impact of the PE hysteresis on the performance of electrocaloric cooling //Ferroelectrics. – 2017. – Т. 516. – №. 1. – С. 1-7

Пироэлектрические измерения конденсаторных структур на основе керамики ВТ и BST

Буровихин А. П.¹, Мишнёв М. А.¹, Мыльников И. Л.¹, Дедык А. И.¹, Белявский П. Ю.¹,
Павлова Ю. В.¹, Пахомов О. В.²

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

²Университет ИТМО

e-mail: antonburovihin@mail.ru

Идеи о принципиально новом поколении охлаждающих устройств на электрокалорическом эффекте (ЭКЭ) стимулируют огромное количество результатов, опубликованных в последнее десятилетие. Основным препятствием для использования эффекта в технике являются низкие значения электрокалорического изменения температуры (ΔT). Как правило, информацию о величине ЭКЭ получают косвенными методами [1]. К ним относятся измерения петель диэлектрического гистерезиса при различных температурах, измерения температурно – полевых зависимостей диэлектрической проницаемости, измерения пироэлектрических токов структур на основе сегнетоэлектриков и сегнеторелаксоров. Настоящая работа посвящена исследованию пирооткликов сегнетоэлектрических конденсаторных структур

В предыдущей работе [2] нами была предложена оригинальная методика измерения пиротоков ($j_{\text{пир}}$), возникающих в результате теплового воздействия импульсов лазерного излучения на образцы СЭ материалов. Методика позволяет получать информацию о пирокoeffициентах (p), определяющих величину ЭКЭ, по измеряемым пироткликам $U(t)$ ($dU(t)/dt \sim j_{\text{пир}}$). При этом пирозлектрический коэффициент определяется как:

$$p = \frac{dP}{dT} = \frac{C_0}{S} \frac{dU(t)}{dt} \frac{dt}{dT},$$

где C_0 – ёмкость эталонного конденсатора, S – площадь электродов исследуемого конденсатора, T – температура исследуемого конденсатора, t – время.

В работе проведены измерения пироткликов плоскопараллельных конденсаторных структур, на основе керамики титаната бария BaTiO_3 (BT) и керамики твёрдого раствора титанатов бария и стронция (BST), причём BST соответствовал составу $\text{Ba}_{0,62}\text{Sr}_{0,38}\text{TiO}_3$. Это позволило исследовать пиротклики образцов, находящихся в сегнето- и в парафазах при изменениях температуры и напряжённости поля. Обсуждаются отличия пирозлектрических откликов для образцов, находящихся в разных фазах. Получены зависимости пирозлектрических коэффициентов этих материалов от температуры и напряжённости поля. Температурное поведение пироткликов хорошо согласуется с температурной зависимостью диэлектрической проницаемости. Проведены измерения ВАХ для оценки вклада проводимости в измерения пироткликов и в оценку пирокoeffициентов.

Список литературы

1. Liu Y., Scott J. F., Dkhil B. Direct and indirect measurements on electrocaloric effect: Recent developments and perspectives // *Applied Physics Reviews*. – 2016. – Т. 3. – №. 3. – С. 031102.
2. Mylnikov I. L. et al. Methods for assessing pyroelectric current in ferroelectrics with first order phase transition by dielectric measurements // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1400. – №. 7. – С. 077006.

Сверхбыстрое лазерно-индуцированное размагничивание в тонких пленках ферромагнитного металла галфенола

Кунту Д. В.^{1,2}, Шелухин Л. А.¹, Rushforth A.W.³, Калашникова А. М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Университет ИТМО

³School of Physics and Astronomy, University of Nottingham, Nottingham

e-mail: dasha_kuntu@mail.ru

В настоящий момент, управление намагниченностью материала рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений в области усовершенствования и создания новых способов обработки и хранения информации. Использование оптического излучения позволяет изменять магнитное состояние веществ на очень малых пространственных и временных масштабах [1]. Возможность полностью-оптического переключения намагниченности одиночными лазерными импульсами была впервые продемонстрирована в 2007 году в ферромагнитном сплаве GdFeCo [2]. Было показано теоретически, что в основе этого процесса лежит сверхбыстрое (менее 1 пс) лазерно-индуцированное размагничивание [3], которое впервые было обнаружено в 1996 году в тонких пленках ферромагнитного никеля [4]. Процесс сверхбыстрого размагничивания до сих пор не получил

строгой теоретической интерпретации, а для его описания были предложены конкурирующие физические модели [5,6]. Таким образом, изучение сверхбыстрой лазерно-индуцированной динамики намагниченности представляет собой актуальную научную проблему.

Задачей данной работы было экспериментальное исследование процесса сверхбыстрого лазерно-индуцированного размагничивания и выявление факторов, влияющих на его величину и динамику. Объектом исследования стали тонкие пленки ферромагнитного металла галфенола $\text{Fe}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}$ (FeGa) – материала, представляющего большой интерес для исследований лазерно-индуцированной магнитной динамики [7]. В работе использовалась серия образцов с толщиной слоя галфенола от 4 до 100 нанометров, а также многослойные структуры FeGa/Cu/GaAs и FeGa/Cu/FeGa/GaAs, выращенные методом магнетронного распыления на подложке арсенида галлия. Эксперимент проводился по методике фемтосекундной магнитооптической накачки-зондирования. Динамика намагниченности возбуждалась при помощи лазерного импульса накачки длительностью 170 фс, длиной волны 1030 нм и плотностью энергии в импульсе от 2 до 14 мДж/см². Поворот плоскости поляризации отраженного импульса зондирования за счет меридионального магнитооптического эффекта Керра (170 фс, 515 нм, 0.4 мДж/см²) при различных временах задержки между импульсами накачки и зондирования позволял детектировать динамику изменений величины намагниченности.

Были выявлены следующие особенности динамики размагничивания: сначала за время менее 1 пс происходит существенное уменьшение намагниченности, а затем следует частичное восстановление намагниченности, происходящее на временной шкале в несколько пикосекунд. Во всех исследованных пленках и многослойных структурах, кроме пленки FeGa толщиной 4 нм, наблюдался аналогичный характер размагничивания. В пленке FeGa толщиной 4 нм наблюдалась отличная от пленок большей толщины динамика намагниченности, в частности размагничивание происходило в два этапа, и достигало максимальной величины на временах задержки около 10 пс.

На данный момент показано [1], что в основе сверхбыстрого размагничивания лежит сложная динамика электронной, решеточной и спиновой подсистем материала, возникающая при оптическом возбуждении. Нами было проведено моделирование процесса сверхбыстрого размагничивания в пленках FeGa с толщинами от 4 до 100 нм в рамках микроскопической трех-температурной модели (МЗТМ-модели) [5]. Качественное согласие с экспериментальными данными, а также соответствие степени размагничивания по порядку величины наблюдалось для пленок всех исследованных толщин, кроме 4 нм. Для последней пленки двухэтапное размагничивание в расчетах в рамках МЗТМ-модели можно было получить, лишь предположив изменение микроскопических характеристик материала. Мы предполагаем, что такое несоответствие указывает на то, что в пленке с малой толщиной существенное влияние на размагничивание оказывают такие факторы, как спин-орбитальное взаимодействие на границе раздела с GaAs, отличное от объемного, и супердиффузионный транспорт, который не учитывается в МЗТМ-модели.

Автор благодарит за частичную поддержку при выполнении данной работы гранты РФФИ 20-32-70149 и РФФИ 20-12-00309.

Список литературы

1. A. Kirilyuk, A. V. Kimel, and T. Rasing, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 2731 (2010).
2. Stanciu C. D. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 047601 (2007).
3. Ostler T.A. *et al.* *Nature Commun.* **3**, 1–6 (2012).
4. E. Beaupre et al., *Phys. Rev. Lett.* **76**, 4250 (1996).
5. B. Koopmans *et al.*, *Nature Mater.* **9**, 259 (2010).

6. Battiato M., Carva K., and Oppeneer P. M. Phys. Rev. Lett. **105**, 027203 (2010)
7. N.E. Khokhlov et al., Phys. Rev. Appl. **12**, 044044 (2019).

Рациональный дизайн мультиферроидных гексагональных ферритов с точки зрения симметрии

Михейкин А. С.¹, Широков В.Б.^{1,2}, Разумная А.Г.¹

¹ЮФУ

²Южный научный центр РАН

e-mail: amikheykin@sfnedu.ru

Магнитные материалы на основе гексагональных ферритов широко используются в различных отраслях промышленности и микроэлектроники [1,2]. Из-за их устойчивости к нагреванию, коррозии и высокой коэрцитивной силе они используются в качестве постоянных магнитов в двигателях, генераторах, трансформаторах, компонентах высокочастотных устройств, для магнитной записи и хранения данных (магнитная память) [3].

Интерес к соединениям гексаферритов вновь повысился после сообщений об открытии спонтанной поляризации в Y-феррите $\text{Ba}_2\text{Mg}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$, индуцированной небольшим магнитным полем, приложенным перпендикулярно гексагональной оси [4]. Эффект наблюдался для продольной конической магнитной структуры, которая формируется ниже 50 К. Два года спустя магнитоэлектрический (МЭ) эффект был также обнаружен при комнатной температуре в гексаферрите Z-типа, в котором поперечная коническая магнитная структура вдоль гексагональной оси с ниже 400 К [5]. В 2010 г. МЭ эффект при комнатной температуре наблюдался для легированного гексаферрита бария M-типа [6], хотя он был несколько слабее, чем в Z-типе. В дальнейшем было предпринято множество попыток модифицировать магнитные и дипольные свойства и создать полноценный однофазный мультиферроик на основе гексагональных ферритов.

Рациональный дизайн кристаллов магнетиков со структурой гексагональных ферритов затруднен модульностью кристаллических структур и наличием множества неэквивалентных подрешеток в магнитной подсистеме. Предложен симметричный подход к проектированию и изготовлению магнитоэлектрических и мультиферроидных соединений на основе гексагональных ферритов различных типов. Благодаря универсальному подходу на основе анализа симметрии кристаллической и магнитной структуры гексаферритов M-, W- и Z-типов удалось выделить подрешетки магнитной системы, замещение ионов в которых способно привести к переходу в сегнетоэлектрическое состояние, превратив магнитные потенциальные сегнетоэлектрики в полноценные мультиферроики.

Выполнено теоретико-групповое исследование гексагонального сегнетомагнетика. Получен полный набор возможных низкосимметричных фаз с двумя трехкомпонентными параметрами порядка (ПП) - магнитным моментом и поляризацией. Построен целый рациональный базис инвариантов с этими двумя ПП и записана производящая функция, которая позволяет получить инвариантное разложение в любой степени. Построена термодинамическая модель фазовых переходов сегнетоферримангнетика с поляризацией и двумя магнитными компонентами, направленными вдоль гексагональной оси. Найден устойчивый потенциал модели минимальной степени. Рассчитаны фазовые диаграммы в плоскости коэффициентов, управляющих магнитными ферри и сегнетоферрисостояниями.

Магнитные структуры гексаферритов исторически интерпретируются в рамках коллинеарной модели. Однако, как следует из теоретико-группового анализа, магнитные

моменты не во всех подрешетках коллинеарны. Это является следствием симметрии - некоторые линейные комбинации компонент векторов магнитных моментов в плоскости ab в (g)- и (k)- подрешетках, заселенных ионами железа, преобразуются под действием элементов симметрии так же, как и компоненты векторов магнитного момента вдоль гексагональной оси. Поэтому между этими компонентами существует линейная связь, обусловленная симметрией: как только появляется компонента вектора магнитного момента вдоль гексагональной оси, сразу же вынужденно появляется линейная комбинация с компонентами в плоскости, перпендикулярной гексагональной оси. Замещение ионов в этих подрешетках может привести к разбиению магнитной подсистемы на большее количество неэквивалентных подрешеток. В этом случае симметрия магнитной подсистемы будет существенно ниже кристаллохимической. При понижении температуры кристаллическая структура таких гексаферритов с замещением в указанных подрешетках будет испытывать смещения ионов, обусловленные симметрией магнитной подсистемы, что способно привести к возникновению собственного сегнетоэлектричества в области вещественных температур.

Список литературы

1. Pullar R.C., Hexagonal ferrites: a review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics, *Prog. Mater. Sci.* V. 57, 1191–1334, 2012.
2. Pereira F. M. M. and Sombra A. S. B., A Review on $Ba_xSr_{1-x}Fe_{12}O_{19}$ Hexagonal Ferrites for use in Electronic Devices, *Solid State Phenomena* Vol. 202, 1-64, 2013.
3. Harris V. G., Chen Z., Chen Y., Yoon S., Sakai T., Gieler A., Yang A., He Y., Ziemer K. S., Sun N. X., and Vittoria C., Ba-hexaferrite films for next generation microwave devices (invited), *J. Appl. Phys.* 99, 08M911, 2006.
4. Ishiwata S., Taguchi Y., Murakawa H., Onose Y., Tokura Y., Low-magnetic-field control of electric polarization vector in a helimagnet, *Science* V. 319, 1643-1646, 2008.
5. Kitagawa Y., Hiraoka Y., Honda T., Ishikura T., Nakamura H. and Kimura T., Low-field magnetoelectric effect at room temperature, *Nature Mat.* V. 9, 797-802, 2010
6. Tokunaga Y., Kaneko Y., Okuyama D., Ishiwata S., Arima T., Wakimoto S., Kakurai K., Taguchi Y. and Tokura Y., Multiferroic M-Type Hexaferrites with a Room-Temperature Conical State and Magnetically Controllable Spin Helicity, *Physical Review Letters* V. 105, 257201, 2010

Properties of $\rho(770)0$, $K^*(892)$, $\phi(1020)$, $\Sigma(1385)$,
 $\Lambda(1520)$ and $\Xi(1530)0$ resonances in heavy-ion collisions at
 $\sqrt{s_{NN}} = 4-11$ GeV and their reconstruction using the MPD
detector at NICA

Kotov D.O.^{1,2}, Ivanishchev D.A.¹, Malaev M.V.¹, Riabov V.G.^{1,3}, Riabov Yu.G.¹

¹NRC «Kurchatov Institute» – PNPI

²Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU)

³National Research Nuclear University MEPhI

e-mail: kotov_do@pnpi.nrcki.ru

The short-lived hadronic resonances are used to study properties of the hot and dense medium produced in relativistic heavy-ion collisions. Due to their short lifetimes, the resonance yields measured in the hadronic channels are sensitive to rescattering and regeneration effects in the hadronic phase. The mesonic and baryonic resonances with strangeness content are used to study the strangeness enhancement phenomenon predicted as one of the signatures for the QCD phase transition. Being particles with different masses and baryonic numbers, the resonances are useful in the study of hadronization mechanisms in the low-to-intermediate transverse momentum range. The measurements of resonances are foreseen in the physical program of the MPD experiment at NICA in heavy-ion collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 4-11$ GeV, in the range of energies where extensive measurements of resonances are not experimentally available.

In this contribution, we explore the sensitivity of the $\rho(770)0$, $K^*(892)$, $\phi(1020)$, $\Sigma(1385)$, $\Lambda(1520)$ and $\Xi(1530)0$ resonances measured in the hadronic decay channels to different stages of the heavy-ion collisions at NICA energies and report the feasibility studies for the reconstruction of resonances in the MPD setup. The results are presented and discussed as a function of collision energy and centrality.

This work was funded by RFBR according to the research project №18-02-40038.

Способ и система стабилизации позиционно-чувствительного спектрометра на базе стрипового полупроводникового детектора

Тубольцев Ю. В.¹, Богданов А.А.¹, Чичагов Ю.В.¹, Ерёмин В.К.¹, Ерёмин И.В.¹,
Вербитская Е.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: tuboltsev@mail.ioffe.ru

В ядерной физике, астрофизике, физики высоких энергий и масс-спектрометрии широко используются позиционно-чувствительные системы для регистрации траекторий и энергий заряженных частиц. Разработки в этом направлении ведутся и в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. В работах [1],[2] и [3] описаны позиционно-чувствительные системы, основу которых составляют спектрометрические тракты на базе полупроводниковых стриповых детекторов. При длительной работе, при воздействии температуры окружающей среды и нагреве радиоэлементов происходит изменение характеристик преобразования трактов.

Стабилизация характеристик преобразования обычно осуществляется подачей реперных сигналов на специальный вход предусилителя или по выбранным в измеряемом энергетическом спектре пикам.

При первом способе система не отрабатывает изменение характеристик самого детектора, при втором – во-первых, не всегда в распределении можно выбрать пики в начале диапазона и в конце для стабилизации нуля и крутизны характеристики преобразования соответственно. Кроме того, в позиционно-чувствительном спектрометре реперные пики будут измеряться детекторами в силу их пространственного расположения с разной чувствительностью.

В данной работе предложен способ и система стабилизации характеристик преобразования всех элементов, входящих в позиционно-чувствительный спектрометр, включая стриповые детекторы.

Для этого в известную конструкцию стрипового детектора мы предложили ввести изолированный металлический контакт, расположенный ортогонально всем стрипам и изолированный от них слоем диэлектрика SiO_2 [4]. На данный металлический контакт подаются импульсы от генератора, осуществляя индукцию электрических зарядов одновременно на все стрипы. Сигналы со стриповых электродов регистрируются спектрометрическими трактами, в состав которых входят последовательно включённые предусилитель, усилитель-формирователь, масштабирующий усилитель и амплитудно-цифровой преобразователь АЦП. Все АЦП связаны с процессорным узлом. Амплитуды этих сигналов используются для определения смещения характеристик преобразования трактов. Для стабилизации используются реперные сигналы в начале характеристики преобразования и в конце. По первому сигналу в цифровом виде путём сравнения с начальным положением определяется изменение базовой линии ("нуля") характеристики, по второму – крутизны преобразования. В зависимости от величины смещения на масштабирующий усилитель подаются управляющие напряжения для корректировки положения нуля и коэффициента преобразования всего тракта. Управляющие напряжения так же, как в работе [5] формируются с помощью цифро-аналоговых преобразователей.

В предложенной системе стабилизации обратной связью охватываются все спектрометрические тракты, включая каждый стриповый электрод, являющийся детектором ионизирующего излучения. Кроме того, перед началом эксперимента подачей реперных сигналов на ортогональный контакт может осуществляться проверка неразрывности

металлизации стрипов, качества и надежности ультразвуковой разварки стрипов с регистрирующей электроникой, а также калибровка всех измерительных трактов.

Список литературы

1. Zhang Fei, Fan Rui-Rui, Peng Wen-Xi, Dong Yi-Fa, Gong Ke, Liang Xiao-Hua, Liu Ya-Qing and Wang Huan-Yu. *Readout electronics of silicon detectors used in space cosmic-ray charges measurement.* // *Chinese Physics C*, 2013
2. Тубольцев Ю.В., Богданов А.А., Ерёмин И.В., Чичагов Ю.В., Фомичев А.С., Киселёв О. А., Костылева Д. А., Безбах А. А. *Многоканальная спектрометрическая система регистрации сигналов со стриповых полупроводниковых детекторов* // *ПТЭ*. 2019. Вып. 6, С. 39-45.
3. Тубольцев Ю.В., Богданов А.А. Чичагов Ю.В., Ерёмин В.К., Ерёмин И.В. *Устройство регистрации ионизирующего излучения для позиционно-чувствительных систем.* // *Патент РФ #192980 от 10.08.2019.*
4. Ерёмин В.К., Ерёмин И.В., Вербицкая Е.М., Тубольцев Ю.В., Богданов А.А. *Планарный полупроводниковый детектор ионизирующего излучения.* // *Патент РФ #193082 от 14.10.2019.*
5. Tuboltsev Yu.V, Bogdanov A. A, Chichagov Yu.V, Eremin I.V, Eremin V.K, Verbitskaya E. M. // *Method and unit for dynamic control of conversion characteristics of spectrometric paths for multichannel charged particle registration systems.* // *International Conference PhisicA. SPb/2020 J. Phys.: Conf. Ser.*, v1697, 1 ArtNo: #012137 2020.

Влияние облучения α -частицами на свойства и рабочие параметры кремниевых полупроводниковых детекторов

Микулич М. С.¹, Базлов Н. В.^{1,2}, Бахланов С. В.¹, Дербин А. В.¹, Драчнев И. С.¹, Котина И. М.¹,
Коньков О. И.^{1,3}, Кузьмичев А. М.¹, Муратова В. Н.¹, Трушин М. В.¹, Унжаков Е. В.¹,
Чернобровкин И. Д.²

¹НИИ «Курчатовский институт» — ПИЯФ

²СПбГУ

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: mikulich_ms@pnpi.nrcki.ru

Полупроводниковые детекторы широко используются в различных экспериментах по ядерной физике и физике высоких энергий [1, 2]. Они обладают уникальными характеристиками для решения разнообразных экспериментальных задач — тонким входным окном, достаточным временным и хорошим энергетическим разрешением. Однако применение полупроводниковых детекторов может быть ограничено их предельной радиационной стойкостью. Известно, что радиационные дефекты в кремнии электрически и рекомбинационно активны. Увеличение концентрации радиационных дефектов приводит к значительным ухудшениям электрических характеристик р-п-переходов и приборов на их основе: изменяется концентрация и время жизни электронов и дырок, увеличивается ток утечки и удельное сопротивление объема кремния, меняется концентрация и даже знак заряда в области пространственного заряда прибора [3]. Таким образом, исследование свойств радиационных дефектов с целью повышения радиационной стойкости полупроводниковых детекторов является важной задачей для успешной реализации ряда ядерно-

физических экспериментов, в которых детекторы должны работать при сильных уровнях облучения.

Данная работа посвящена комплексному исследованию влияния длительного облучения α -частицами на свойства и рабочие параметры кремний-литиевого Si(Li) p-i-n детектора и кремниевого поверхностно-барьерного детектора изготовленного на основе кремния p-типа проводимости. Одной из причин использования кремния p-типа проводимости для изготовления детекторов является более высокая радиационная стойкость, ожидаемая по сравнению с кремнием n-типа [4]. В фокусе исследований находилось установление взаимосвязи между дозой облучения и эксплуатационными признаками деградации детектора (ухудшение энергетического разрешения и отношения сигнал / шум, рост обратного тока детектора и т. д.). Облучение детекторов проводилось при комнатной температуре, суммарная доза достигала величины $6 - 8 \times 10^9$ α -частиц. В результате проведенных исследований был обнаружен рост обратного тока детекторов, который может быть описан линейной функцией флюенса Φ с наклонами $\Delta I/\Delta \Phi = (1.5 - 2.7) \times 10^{-16}$ A/(см² α). Ухудшение энергетического разрешения α -пиков связанное с увеличением обратного тока детектора может быть описано также описано линейной функцией с наклоном $\Delta \sigma/\Delta \Phi = (4 - 5) \times 10^{-9}$ кэВ/ α . Проведенные исследования показывают, что исследованные детекторы могут сохранять приемлемые значения энергетического разрешения вплоть до значений флюенса не менее 10^{10} α -частиц. Дополнительная серия экспериментов была направлена на изучение типа и концентрации радиационных дефектов, образующихся при облучении. Подробное обсуждение полученных результатов будет представлено на конференции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №20-02-00571).

Список литературы

1. С. Е. Aalseth, F. Acerbi, P. Agnes, I. F. M. Albuquerque, T. Alexander, A. Alici, A. K. Alton, P. Antonioli, S. Arcelli, R. Ardito, I. J. Arnuist, D. M. Asner, M. Ave, H. O. Back, A. I. Barrado, Olmedo et al., DarkSide Coll., DarkSide-20k: A 20 tonne two-phase LAr TPC for direct dark matter detection at LNGS, Eur. Phys. J. Plus 133, 131 (2018)
2. G. Apollinari et al., "High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC), technical design report v.0.1," CERN, Tech. Rep. CERN-2017-007-M, 2017
3. M. Moll, IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(8), pp. 1561–1582, 8331152
4. L.F. Makarenko, S.B. Lastovskii, H.S. Yakushevich, M. Moll, I. Pintilie, J. Appl. Phys. 123, 161576 (2018)

Model calculations of phi-meson production in small collision systems

Митранкова М. М.¹, Я.А. Бердников¹

¹СПбПУ

e-mail: mashalario@gmail.com

Investigation of medium with partonic degrees of freedom, so-called quark-gluon plasma (QGP) [1], is one of the most significant directions of research in relativistic ion collision physics. It was established that QGP is formed in large collision systems such as Au+Au [2], whereas

$p+p$ collisions dynamics is well described with pQCD calculations [3]. The recent observation of the collective behavior in small collision systems such as $p+Au$, $d+Au$, ^3He+Au provides the possibility to assume that QGP could be formed in these collisions [4]. Further study is required to reveal the minimal conditions for the QGP formation in small collision systems.

One of the theoretical models widely used for describing the relativistic ions collision evolution is AMPT model [5], which provides a possibility to study the process of the possible QGP formation. The AMPT default model consists of the following components: the initial conditions; partonic cascade, considering confined state of quarks and gluons; the conversion from the partonic to the hadronic matter based on Lund string fragmentation model [6]; and hadronic interactions. In the extended string melting version of the AMPT model, the strings melt into partonic degrees of freedom (QGP phase is being formed) and a quark coalescence model [5] is used to combine partons into hadrons.

Among the large variety of light hadrons, ϕ -meson is of particular interest since it contains strange quarks ($s\bar{s}$), has relatively small hadronic interaction cross-section, and longer than QGP lifetime (42 fm/c vs. 5 fm/c [1]) [7].

Current report presents the comparison of the experimental results on ϕ -meson production in small collision systems ($p+Al$, $p+Au$) at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV to default and string melting versions of the AMPT model predictions. The $p+Al$ results are in a good agreement with the default version of the AMPT calculations, whereas the string melting version of the AMPT model calculations do not describe them. In contrast $p+Au$ results are well described in the frame of the string melting model, but the default model calculations underpredicts the experimental data. This indicate that the minimal conditions (temperature and baryon density) for a QGP formation may lie in between in $p+Al$ and $p+Au$ collisions.

We acknowledge support from Russian Ministry of Education and Science, state assignment for fundamental research (code 0784-2020-0024)

References

1. K. Adcox et al. (PHENIX Collaboration), Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus–nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration, Nucl. Phys. 103 A757, 184, 2005
2. A. Adare et al. (PHENIX Collaboration), Nuclear modification factors of ϕ -mesons in $d+Au$, $Cu+Cu$, and $Au+Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Phys. Rev. C 83, 024909, 2011
3. D. Sahu et al., Role of event multiplicity on hadronic phase lifetime and QCD phase boundary in ultrarelativistic collisions at energies available at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider and CERN Large Hadron Collider, Phys. Rev. C 101, 014902, 2020
4. C. Aidala et al. (PHENIX Collaboration), Creation of quark–gluon plasma droplets with three distinct geometries, Nature Phys. 15, 214, 2019
5. Z. Lin et al., Multiphase transport model for relativistic heavy ion collisions, Phys. Rev. C 72, 064901, 2005
6. B. Andersson et al., Parton fragmentation and string dynamics, Phys. Rep. 97, 2-3, 31, 1983
7. A. Shor, ϕ -Meson Production as a probe of the Quark-Gluon Plasma, Phys. Rev. Lett. 54, 1122, 1985

Production of the isotope copper-64 by using natural nickel target with proton energy 17 Mev and beam current 10 μ A at cyclotron

TIBA A. ¹, Berdnikov Ya. A., Egorov A.Yu.

¹Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

e-mail: alitiba1991@gmail.com

A calculation method is developed and numerical simulation of the production ^{64}Cu isotope from the $^{64}\text{Ni}(p,n)$ nuclear reaction is performed. The required radionuclide is produced by irradiating a natural nickel target with a proton beam 17 Mev and beam current 10 μ A on a cyclotron.

The copper isotope ^{64}Cu is unique, since in the process of radioactive decay it can emit β^+ (0.65 Mev, 17.5%), β^- (0.57 Mev, 38.5%) particles, and Auger electrons. Therefore, this isotope can be used both in positron emission tomography (PET) and for radionuclide therapy [1,2]. The great advantages of this isotope over others isotopes are not only its chemical properties, but also a long half-life (12.7 h), which makes it easier to obtain, transport and use radiopharmaceuticals labeled with it, compared to those widely used at present.

Isotope ^{64}Cu can be produced in nuclear reactors by the capture of either thermal neutrons $^{63}\text{Cu}(n,\gamma)$, or fast neutrons $^{64}\text{Zn}(n,p)$. Currently, for the production of ^{64}Cu there are two cyclotron methods. One is based on $^{64}\text{Ni}(p,n)$ and the other is based on $^{68}\text{Zn}(p,\alpha n)$ [4,5].

The depth of proton penetration into the target material was studied, and the maximum concentration of the nuclei of the accumulated radionuclide was determined. The analysis of the obtained data allowed us to determine the optimal thickness of the nickel target, it was 0.54 mm.

By using the equations from [6] and the result of combining the experimental data presented in the paper [7], the dependence of the cross section on the depth $\sigma(x)$ and the production of ^{64}Cu at different depths in the target were determined. Also results of calculating the number of produced ^{64}Cu atoms depending on the irradiation time, for targets of various thicknesses were obtained.

References

1. Y. Fujibayashi et al. Ann. Nucl. Med. Vol 9, No 1, 1-5 (1995);
2. G. W. Philpott et al J. Nucl. Med. Vol 36, No 10, 1818-1824 (1995);
3. S M Qaim Radiochim. Acta. Vol 100, No 9, 635-651 (2012);
4. Van So Le. Appl. Radiat. Isot. Vol 67, No 7, 1324-1331 (2009);
5. J Zweit. Appl. Radiat. Isot. Vol 42, No 2, 193-197 (1991);
6. M Tanabashi. Phys. Rev. D. Vol 98, No 3, 446-461 (2018);
7. M N Aslam. Radiochim. Acta Vol 97, No 12, 669-686 (2009).

Charged pion, kaon, proton and antiproton production in large collision systems

Larionova D. M.¹, Kotov D.O.¹

¹СПбПУ

e-mail: dashalario@gmail.com

Charged pion (π -meson), kaon (K-meson), proton and antiproton production has been previously studied [1] in elementary proton-proton collisions at the energies of Relativistic Heavy-

Ion Collider [2]. In such collisions, protons are produced three times less than π -mesons due to a larger mass and a requirement of non-zero baryon number for the formation of a proton. However, in a large collision system such as Au+Au at $p/\pi = 200$ GeV the value of proton to π meson ratio (p/π) obtained by PHENIX experiment [3] reaches the value of 0.8 [4]. Moreover, the value of p/π ratio in Au+Au collisions increases with the size of the nuclear overlap region, which is usually characterized by the number of nucleons, participating in the interaction (N_{part}). The larger N_{part} the more central becomes the interaction of two nuclei. At the same time kaon to pion ratio (K/π), does not show any dependence on N_{part} . One of the ways to describe such behavior is to use recombination models [4,5]. According to these models, the difference between baryons and mesons might come from baryons getting a larger kick in momentum than mesons due to the presence of three quarks instead of two [5].

Although π -meson, K-meson, proton and antiproton production has been well taken care of in elementary proton-proton collisions and symmetric heavy-ion collisions, it has never been studied before in the large asymmetric collisions systems or the collisions of large deformed nuclei. The use of such large collisions systems allows to study features of baryon and meson production versus collision geometry and system size.

This report presents results of charged π -meson, K-meson, proton and antiproton production as well as the values of (p/π) and (K/π) ratios versus N_{part} obtained in asymmetric Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and collisions of deformed uranium nuclei (U+U) at $\sqrt{s_{NN}} = 193$ GeV. At similar N_{part} values (p/π) and (K/π) ratios measured in large collision systems (Cu+Au, Au+Au and U+U) are in agreement within uncertainties regardless the type of the colliding system. This observation might indicate that QGP hadronization process does not depend on the shape of collision geometry and charged π -meson, K-meson, proton and antiproton production is predominantly determined by the size of nuclear overlap region. New experimental data of that kind can help further develop recombination models and adjust its quantitative parameters.

References

1. A. Adare et al. (PHENIX Collaboration), Identified charged hadron production in p+p collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ and 62.4 GeV, Phys. Rev. C 83, 064903, 2011
2. M. Harrison, T. Ludlam and S. Ozaki, The Relativistic Heavy Ion Collider Project: RHIC and its Detectors, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 499, 2–3, EX1-EX4, 235-880, 2003
3. K. Adox et al. (PHENIX Collaboration), PHENIX detector overview, Nucl. Instrum. Meth. A. 499, 469, 2005
4. A. Adare et al. (PHENIX Collaboration), Spectra and ratios of identified particles in Au+Au and d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Phys. Rev. C 88, 024906, 2013
5. R. Fries, V. Greco, P. Sorensen, Coalescence models for hadron formation from Quark Gluon Plasma, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 58, 177-205, 2008.

Comparative analysis of strange meson production in heavy ion collisions

Borisov V. S.¹, Berdnikov A. Ya.¹

¹Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU)

e-mail: borisov_vs@spbstu.ru

The study of deconfinement state of nuclear matter called quark-gluon plasma (QGP) and phase transition of QGP to hadronic gas is the main goal of high energy physics. In the laboratory conditions QGP evolution can be investigated at Relativistic Heavy-Ion Collider in heavy-ion collisions at ultra-relativistic energies [1].

Some of the important signatures of QGP formation in heavy-ion collisions include strangeness enhancement [2, 3] at intermediate values of the transverse momentum (pT) and jet quenching effect [4, 5] at high pT values. Nuclear modification factors (R_{AB}) for light hadrons are used to quantify these effects [6]. The K^* and ϕ mesons can serve as a good probe to investigate QGP properties, because these mesons contain (anti)strange quark and its yields can be measured in a wide pT range.

Comparison of experimental data with theoretical model calculations is important for understanding the evolution of heavy-ion collision. One of the most commonly used event generators to describe experimental results of collider experiments is Pythia8 [7]. This generator includes the model Angantyr [8] which allows to study hadron spectra of strange particles in heavy-ion collisions. This model combines several nucleon-nucleon collisions into a one heavy ion collision. It does not take into account the quark-gluon phase, but considers cold nuclear matter effects e.g., multiparton interaction, high string density [9].

This report presents the comparison of R_{AB} values of K^* and ϕ mesons to the theoretical calculations of Pythia8 in Cu+Au and U+U collisions. The current version of Angantyr cannot completely describe the collective effects in heavy-ion collisions. It underpredicts K^* and ϕ R_{AB} values in the intermediate pT range and overestimates them in the high pT range. It is necessary to compare the production of strange particles to other model predictions (especially those which include quark-gluon phase [10]) in order to better describe the hot and cold nuclear matter effects.

References

1. K. Adcox et al. Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration. *Nuclear Physics A*. 103, V.757, 184, 2005
2. V.P. Kondratyev and G. A. Feofilov. Strange particles production in relativistic heavy-ion collisions. *Elementary Particle and Nuclear Physics* 42(6). 2011
3. A.Ya. Berdnikov et al. Production of $K^*(892)^0$ mesons in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 192$ GeV 2020. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1697(1), 012139, 2020
4. A.Ya. Berdnikov et al. Studying the mechanisms of the hadron jets production in U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 192$ GeV. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1400 055052, 2019
5. I. Mitrakov. Scaling properties of highpT light hadrons from small to large systems by PHENIX. *Proceedings of Science*. Vol. 345, No.1, P.0108, 2018
6. A. Adare et al. Nuclear modification factors of phi mesons in d+Au, Cu+Cu and Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV, *Physical Review C* 83(2) 024909, 2011

7. T. Sjöstrand et al. An introduction to PYTHIA 8.2. Computer Physics Communications. 191, Pp.159-177, 2015
8. C. Bierlich et al. Diffractive and non-diffractive wounded nucleons and final states in pA collisions. *JHEP*. 1610, 139, 2016
9. T. Song et al. Tomography of the quark-gluon plasma by charm quarks. Phys. Rev. C 92, 014910, 2015
10. Z. Lin et al., Multiphase transport model for relativistic heavy ion collisions, Phys. Rev. C 72, 064901, 2005

Новый предел на резонансное поглощение солнечных аксионов, полученный с помощью ^{169}Tm -содержащего болометрического детектора.

Унжаков Е. В.¹, А.Н. Abdelhameed¹, A. Bento^{1,7}, E. Bertoldo¹, P. Bauer¹, L. Canonica¹, A.B. Дербин², И.С. Драчнёв², N. Ferreiro Iachellini¹, D. Fuchs¹, D. Hauff¹, M. Laubenstein³, Д.А. Лис⁴, И.С. Ломская², М. Mancuso¹, В.Н. Муратова², S. Nagorny⁵, S. Nisi³, F. Petricca¹, F. Proebst¹, J. Rothe¹, В.В. Рябченко⁶, С.Е. Саркисов⁶, Д.А. Семёнов², К.А. Субботин⁴, Е.В. Жариков⁴

¹ Max-Planck-Institut für Physik, München, Germany

² Петербургский Институт Ядерной Физики - НИЦ «Курчатовский Институт», Россия

³ Laboratori Nazionali del Gran Sasso, INFN, Assergi, Italy

⁴ Институт Общей Физики им. Прохорова, РАН, Москва, Россия

⁵ Queen's University, Physics Department, Kingston, Canada

⁶ НИЦ «Курчатовский Институт», Москва, Россия

⁷ Departamento de Física, Universidade di Coimbra, Coimbra, Portugal

e-mail: unzhakov_ev@pnpi.nrcki.ru

Экспериментальные поиски аксиона (гипотетической слабовзаимодействующей частицы) продолжаются уже не одно десятилетие и изначально были обусловлены предложенным в 1977 г. решением проблемы отсутствия СР-нарушения в сильных взаимодействиях [1]. Предложенный механизм состоял в том, что при некоторой энергии f_A имеет место спонтанное нарушение некой дополнительной симметрии, компенсирующее СР-несимметричный член в лагранжиане КХД. Как следствие такого нарушения, предположительно должен возникать Намбу-Голдстоуновский бозон, который и был назван *аксионом* [2, 3]. Масса аксиона m_A и его эффективные константы взаимодействия с веществом ($g_{A\gamma}$, g_{Ae} , g_{AN}) оказываются обратно пропорциональны масштабу нарушения симметрии f_A .

Исходная аксионная гипотеза предполагала, что нарушение новой симметрии происходит на электрослабом масштабе, но в последовавшей серии экспериментов по поиску "классического" аксиона частица так и не была обнаружена. В последующих модифицированных теоретических моделях аксиона верхний предел на величину f_A был снят, что уменьшило его ожидаемую массу и подавило его взаимодействия с обычным веществом [4-7]. Такие "невидимые" аксионы стали выгодными кандидатами на роль частиц тёмной материи, что вызвало дополнительный интерес к их экспериментальному обнаружению.

Из предполагаемых взаимодействий аксиона следует, что звёзды и, в частности, Солнце должны быть интенсивными источниками аксионов. Регистрация солнечных аксионов в лаборатории возможна за счёт этих же взаимодействий, в том числе —

резонансного поглощения атомными ядрами (аксион-нуклонное взаимодействие g_{AN}), у которых имеются подходящие по типу переходы на возбуждённые состояния. Разрядка возбуждённого аксионом ядерного уровня приведёт к возникновению обыкновенного гамма-кванта, регистрируемого стандартными методами. Одним из подходящих ядер-мишеней для резонансного поглощения солнечного аксиона является стабильный изотоп туля ^{169}Tm с энергией первого возбуждённого состояния 8.41 кэВ.

Новая методика с использованием кристаллов туллий-содержащего граната ($\text{Tm}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) и гелиевого криостата позволила создать низкофоновую установку с болометрическим детектором [8]. Внедрение рабочего вещества (изотопа ^{169}Tm) внутрь рабочего объёма детектора существенно улучшила чувствительность установки по сравнению с предыдущими экспериментами по поиску резонансного поглощения аксионов, реализованных по раздельной схеме "мишень+детектор" [9-11].

Измерения проведённые в течение 6.6 суток с кристаллом массой 8.18 г позволили установить следующие пределы на эффективные константы взаимодействия аксиона: $|g_{Ay}(g_{AN}^0 + g_{AN}^3)| \leq 1.44 \times 10^{-14} \text{ ГэВ}^{-1}$ и $|g_{Ac}(g_{AN}^0 + g_{AN}^3)| \leq 2.81 \times 10^{-16}$ [12].

Список литературы

1. R. D. Peccei and H. R. Quinn, *Phys. Rev. Lett.* 38, 1440 (1977).
2. S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.* 40, 223 (1978).
3. F. Wilczek, *Phys. Rev. Lett.* 40, 279 (1978).
4. J. E. Kim, *Phys. Rev. Lett.* 43, 103 (1979).
5. M. Shifman, A. Vainshtein, and V. Zakharov, *Nuclear Physics B* 166, 493 (1980).
6. M. Dine, W. Fischler, and M. Srednicki, *Physics Letters B* 104, 199 (1981).
7. A. Zhitnitskii, *Sov. J. Nucl. Phys. (Engl. Transl.)*; (United States) 31:2 (1980).
8. E. Bertoldo et al., *Nuclear Instruments and Methods: Sec. A* 949, 162924 (2020).
9. A. Derbin et al., *Physics Letters B* 678, 181 (2009).
10. A. Derbin et al., *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 74, 481 (2010).
11. A. V. Derbin et al., *Phys. Rev. D* 83, 023505 (2011).
12. A. H. Abdelhameed et al., *EPJ C* 80, 1-7 (2020).

Новое измерение β -спектра ^{210}Bi с кремниевым 4 π -спектрометром.

Ниязова Н. В.¹, Алексеев И.А.², Бахланов С.В.¹, Дербин А.В.¹, Драчнев И.С.¹, Котина И.М.¹, Кузьмичев А.М.¹, Ломская И.С.¹, Микулич М.С.¹, Муратова В.Н.¹, Семенов Д.А.¹, Трушин М.В.¹, Унжаков Е.В.¹

¹ ПИЯФ им. Б.П. Константинова НИЦ «КИ»

² Радиевый институт им. В.Г. Хлопина

e-mail: niyazova_nv@pnpi.nrcki.ru

Интерес к прецизионным измерениям β -спектров, связан, в настоящее время, с поиском эффектов, выходящих за рамки Стандартной модели (СМ) в области низких энергий. В данной работе представлены результаты измерений спектра электронов при распаде ядра ^{210}Bi , выполненные с помощью спектрометра на основе $\text{Si}(\text{Li})$ -детекторов, обладающего 4 π -геометрией [1]. Как продукт распада радиоактивного газа ^{222}Rn изотоп ^{210}Bi присутствует внутри или на поверхности практически всех конструкционных материалов. Точное знание формы β -спектра ^{210}Bi необходимо для моделирования фона современных

детекторов нейтрино и частиц темной материи. В частности, форма β -спектра ^{210}Bi очень похожа на спектр электронов отдачи, возникающих при рассеянии солнечных CNO-нейтрино, поэтому для выделения сигнала CNO-нейтрино необходимо с достаточной точностью определить форму β -спектра.

Безносительный источник ^{210}Pb был специально приготовлен для данного эксперимента и начинал цепочку распадов, частицы которой регистрировалась в эксперименте: $^{210}\text{Pb}(\beta, 22 \text{ л}) \rightarrow ^{210}\text{Bi}(\beta, 5 \text{ д}) \rightarrow ^{210}\text{Po}(\alpha, 138 \text{ д})$. Для измерений использовалась пара Si(Li)-детекторов диаметром 16 мм и толщиной 6 мм, что обеспечивает полное поглощение электронов вплоть до энергии 2 МэВ. Источник наносился в небольшую лунку, вышлифованную в центре одного из детекторов, второй детектор присоединялся вплотную, обеспечивая 4π геометрию. Si(Li)-детекторы устанавливались внутри вакуумного криостата и охлаждались до температуры жидкого азота. Энергетическое разрешение детекторов, предварительно определенное по линии конверсионных электронов ^{207}Bi с энергией 480 кэВ, составляет 1.8 кэВ (FWHM) [2,3]. Электронная схема, основанная на использовании многоканального 14-разрядного АЦП с частотой выборки 250 МГц, позволяет отбирать (анти)совпадающие события с обоих детекторов. С помощью спектрометра полного поглощения можно провести прямое измерение β -спектров, не требующее поправок функции отклика на обратное рассеяние электронов от поверхности кристалла.

Распределение по энергии электронов, испускаемых в процессе β -распада, может быть выражено как $S(W) = PW(W-W_0)^2 \times F(W,Z) \times C(W)$, где $W = T/mc^2 + 1$ - полная энергия электрона, $W_0 = T_0/mc^2 + 1$ - граничная энергия β -спектра, P и T - импульс и энергия электрона, $F(W,Z)$ - функция Ферми, которая учитывает электромагнитное взаимодействие образующегося электрона с атомом, $C(W)$ - ядерный форм-фактор, который параметризовался аналогично предыдущим работам: $C(W) = 1 + C_1 W + C_2 W^2$.

Измеренный спектр с общей статистикой 1.5×10^7 событий подгонялся в интервале (150 - 1600) кэВ. Спектр хорошо описывается выбранной теоретической формой - величина $\chi^2/\text{n.d.f.} = 4155/4179$ соответствует $P = 0.60$. Определенные значения параметров ядерного форм-фактора составляют $C_1 = (-0.4434 \pm 0.0052)$ и $C_2 = (0.0534 \pm 0.0014)$. Важно, что данные результаты находятся в согласии с предыдущими измерениями [4], выполненными с использованием кремниевого полупроводникового β -спектрометра в классической схеме "мисень-детектор" с существенно отличающейся функцией отклика детектора.

Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: гранты РФФИ 19-02- 00097 и 20-02-00571.

Список литературы

1. Алексеев И. Е., Бахланов С.В., Дербин А.В., Драчнев И.С., Котина И.М., Муратова В.Н., Ниязова Н. В., Семенов Д. А., Трушин М. В., Унжаков Е. В., Чмель Е. А., Кремниевый 4π - спектрометр электронов β -распада с энергией до 3 МэВ, ПТЭ, 2021, № 2
2. Alekseev I.E., Bakhlanov S.V., Bazlov N.V., Chmel E.A., Derbin A.V., Drachnev I.S., Kotina I.M., Muratova V.N., Pilipenko N.V., Semenov D.A., Unzhakov E.V., Yeremin V.K., Beta-spectrometer with Si-detectors for the study of ^{144}Ce - ^{144}Pr decays, NIM, 2018, v. A890. p. 64.
3. Базлов Н.В., Бахланов С.В., Дербин А.В., Драчнев И.С., Еремин В.К., Котина И.М., Муратова В.Н., Пилипенко Н.В., Семенов Д.А., Унжаков Е.В., Чмель Е.А., В-спектрометр на основе кремниевых детекторов, ПТЭ, 2018, № 3. С. 5
4. Alekseev I.E., Bakhlanov S.V., Derbin A.V., Drachnev I.S., Kotina I.M., Lomskaya I.S., Muratova V.N., Niyazova N.V., Semenov D.A., Trushin M.V., and Unzhakov E.V., Precision measurement of the ^{210}Bi β spectrum, Phys. Rev. C 102, 064329 (2020)

Elliptic flow for phi-mesons in Cu+Au and U+U collisions

Митранков Ю. М.¹

¹СПбПУ

e-mail: mitrankovy@gmail.com

An important goal of current ultra-relativistic heavy ion research is the investigation of Quark Gluon Plasma (QGP). Study of elliptic flow (v_2) has played a pivotal role in the discovery of QGP at the Relativistic Heavy Ion Collider RHIC [1]. Measurements of v_2 lend insight on reaction dynamics and are important for defining parameters of viscous hydrodynamic, which can describe QGP behavior [2].

In this report elliptic flow for ϕ -mesons in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and in U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 193$ GeV is studied as a function of kinetic properties, i.e. transverse momentum and transverse kinetic energy KE_T . The obtained results are compared to hydrodynamic model predictions.

According to the Okubo-Zweig-Izuka (OZI) rule [3] ϕ -mesons have a relatively large mean free path, compared to the transverse size of the emitting system [4]. Also, the ϕ -mesons mostly decay after QGP phase [4], therefore its kinematic properties are not affected by late hadronic stage and bring information of QGP properties.

Elliptic flow is strongly coupled to the medium density, initial geometry shape, therefore angular anisotropy v_2 for ϕ -mesons was studied in asymmetric Cu+Au collisions and collisions of deformed uranium nucleus U+U. New FVTX detector [6] and combinations of different methodics of flow measurements provide a possibility to measure the v_2 for the ϕ -mesons for the first time as a function of centrality at PHENIX.

The elliptic flow for ϕ -mesons in Cu+Au and U+U collisions as function of KE_T / n_q follows the trend for other hadrons with respect to the number of quarks in hadrons n_q , regardless of centrality. The observed ϕ -meson v_2 in different centrality bins of Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and in U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 193$ GeV scales with participant eccentricity. This result along with agreement of obtained data to hydrodynamic model iEBE-VISHNU [7] predictions suggests that QGP can be described with viscous hydrodynamic with specific viscosity $\eta / s = 0.08$.

Список литературы

1. K. Adcox et al. (PHENIX Collaboration), Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus–nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration, Nucl. Phys. 103 A757, 184, 2005
2. P. Romatschke, New Developments in Relativistic Viscous Hydrodynamics, Int. J. Mod. Phys. E 19, 1, 2010
3. S. Okubo, ϕ -meson and unitary symmetry model, Phys. Lett. 5, 2, 165, 1963
4. R. A. Lacey and A. Taranenko, What do elliptic flow measurements tell us about the matter created in the little Bang at RHIC?, PoSCFRNC2006 021, 2006
5. K. Adcox et al. (PHENIX Collaboration), Elliptic flow for phi mesons and (anti)deuterons in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Phys.Rev.Lett. 99, 052301, 2007

6. C. Aidala, et al. (PHENIX Collaboration), The PHENIX Forward Silicon Vertex Detector, Nucl. Instrum. Meth. A. 755, 44, 2014
7. C. Shen et al. Collectivity and electromagnetic radiation in small systems, Phys. Rev. C 95, 014906, 2017

Деградация кремниевых полупроводниковых детекторов при длительном облучении осколками деления изотопа ^{252}Cf

Трушин М. В.¹, Базлов Н.В.^{1,2}, Бахланов, С.В.¹, Дербин А.В.¹, Драчнев И.С.¹, Котина И.М.¹,
Коньков О.И.^{1,3}, Кузьмичев А.М.¹ Микулич М.С.¹, Муратова В.Н.¹, Унжаков Е.В.¹

¹НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ

²СПбГУ

³ФТИ им.А.Ф Иоффе

e-mail: trushin_mv@pnpi.nrcki.ru

Функция отклика ядер отдачи в детекторах, предназначенных для обнаружения нейтрино или частиц темной материи, может быть определена только с помощью источника нейтронов с известным энергетическим спектром. В связи с этим, разработка и создание калибровочного источника нейтронов является важной задачей для ряда текущих и будущих ядерных и астрофизических экспериментов [1, 2]. Калибровочный источник должен позволить определить эффективность подавления фона, время жизни нейтронов и функцию отклика детекторов к нейтронам и гамма-квантам, возникающим в результате захвата нейтронов. Возможным вариантом компактного калибровочного источника нейтронов является комбинация изотопного источника нейтронов ^{252}Cf и полупроводникового детектора, который обнаруживает осколки деления, и, тем самым, фиксирует момент появления нейтронов.

Кремниевые полупроводниковые детекторы обладают необходимыми характеристиками для регистрации осколков деления - тонкое входное окно, достаточное временное и хорошее энергетическое разрешение. Ограничения на использование полупроводниковых детекторов накладываются их конечной радиационной стойкостью. Поскольку в предлагаемых экспериментах [1, 2] полупроводниковые детекторы должны работать в условиях интенсивного облучения осколками деления и α -частицами, неизбежно сопровождающих процесс спонтанного деления ядер, исследования радиационной стойкости полупроводниковых детекторов имеют большое значение для успешной реализации данных экспериментов.

Настоящая работа посвящена исследованию деградации параметров работы кремниевых полупроводниковых детекторов при облучении осколками деления изотопа ^{252}Cf . Для этих исследований была разработана экспериментальная установка для одновременного измерения спектра осколков деления и определения эксплуатационных признаков деградации детектора (снижение энергетического разрешения и отношения сигнал / шум, рост обратного тока и т. д.). Исследовались два типа Si-детекторов - кремниеволитиевые Si (Li) p-i-n-детекторы и кремниевые поверхностные барьерные детекторы. В результате измерений определены максимально допустимые дозы облучения для корректной работы детекторов обоих типов и соотношение полученной дозы облучения со спектроскопическими характеристиками детекторов. Подробное обсуждение полученных экспериментальных результатов будет представлено на конференции.

Работа была выполнена в рамках гранта РФФИ 20-02-00571

Список литературы

1. C. E. Aalseth, F. Acerbi, P. Agnes, I. F. M. Albuquerque, T. Alexander, A. Alici, A. K. Alton, P. Antonioli, S. Arcelli, R. Ardito, I. J. Arnuist, D. M. Asner, M. Ave, H. O. Back, A. I. Barrado, Olmedo et al., DarkSide Coll., DarkSide-20k: A 20 tonne two-phase LAr TPC for direct dark matter detection at LNGS, Eur. Phys. J. Plus 133, 131 (2018)
2. R. Ajaj et al., DEAP Coll., Search for dark matter with a 231-day exposure of liquid argon using DEAP-3600 at SNOLAB, Phys. Rev. D 100, 022004 (2019)

Измерение спектра ^{144}Ce - ^{144}Pr с помощью 4 π бета-спектрометра

Ломская И. С.¹, Бахланов С.В.¹, Дербин А.В.¹, Драчнев И.С.¹, Котина И.М.¹, Микулич М.С.¹, Муратова В.Н.¹, Пилипенко Н.В.¹, Семенов Д.А.¹, Унжаков Е.В.¹

¹ПНИЯФ

e-mail: lomskaya_is@npni.nrcki.ru

Прецизионное измерение бета-спектров всегда играло важную роль в некоторых проблемах фундаментальной физики, в том числе и в физике нейтрино. Магнитные и электростатические спектрометры обладают высоким энергетическим разрешением, но в то же время, использование таких установок сопряжено с трудностями связанными с их размерами и стоимостью. Так как свободный пробег электронов с энергией в 3 МэВ (которая, в основном, является максимальной энергией бета-перехода в долго-живущих ядрах) не превышает 2 г/см², твердые сцинтилляторы и детекторы ионизации могут быть эффективно использованы для регистрации электронов. В случае полупроводниковых детекторов существует значительная вероятность обратного рассеяния от поверхности детектора, которая зависит от материала из которого он изготовлен. Такая проблема может быть решена созданием детектора с 4 π геометрией, который полностью покрывает источник и способен регистрировать электроны обратного рассеяния. В этой работе представлена технология, позволяющая изготовить бета-спектрометр основанный на кремниевых детекторах и имеющий геометрию 4 π . При помощи такого спектрометра был измерен бета-спектр ядер ^{144}Ce - ^{144}Pr , являющиеся перспективным источником анти-нейтрино благодаря своей граничной энергии в 3 МэВ, который может использоваться в экспериментах по поиску осцилляций нейтрино в стерильное состояние. Были получены параметры ядерного форм-фактора: $C(W) = 1 + (-0.02877 \pm 0.00028)W + (-0.11722 \pm 0.00297)W^{-1}$. Точность измерения бета-спектра была существенно повышена по сравнению с предшествующими экспериментами.

Список литературы

1. Alekseev I., Bakhlanov S., Derbin A., et al., Beta-spectrometer with Si-detectors for the study of ^{144}Ce - ^{144}Pr decays, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 890, 64-67, 2018.
2. Derbin A.V., Drachnev I.S., Lomskaya I.S., Muratova V.N., et al., Monte-Carlo sensitivity study for sterile neutrino search with ^{144}Ce - ^{144}Pr source and liquid scintillation detectors of various geometries, arXiv:1905.06670

О математической модели системы электрохимической защиты от коррозии

Никулин С. А.¹, Ларцов С.В.¹, Карнавский Е.Л.¹, Репин Д.Г.¹

¹ООО "Газпром проектирование"

e-mail: s.nikulin.ggc@gmail.com

Защита магистральных трубопроводов от коррозии осуществляется пассивными и активными методами. К пассивным методам относится нанесение изоляционных покрытий, а активные методы заключаются в смещении собственного потенциала металла трубопровода в отрицательную сторону, которое обеспечивается в основном с помощью установок катодной защиты, располагаемых вдоль трубопровода с определенной периодичностью. На данный момент контроль за состоянием защищенности объекта и состоянием элементов системы электрохимической защиты от коррозии, а также своевременное и рациональное управление совокупностью установок катодной защиты является трудновыполнимой задачей для эксплуатирующих организаций, требующих огромных трудовых и материальных затрат. В настоящее время на объектах нефтегазотранспортной системы происходит активное внедрение оборудования дистанционного коррозионного мониторинга, которое позволяет получать огромный массив информации о степени защищенности объекта от коррозии, режимах работы оборудования электрохимической защиты от коррозии, скорости коррозионных процессов и внешних влияющих на объект факторах. При этом, наблюдается необходимость в автоматизации обработки получаемого массива информации и выделении аналитических задач, направленных на повышение эффективности управления системой электрохимической защиты объекта от коррозии. Авторами предложен методологический подход по созданию математической модели системы электрохимической защиты от коррозии объекта нефтегазотранспортной системы, который заключается в получении системы уравнений, описывающих зависимости между величинами силы тока станций катодной защиты объекта и величиной защитных потенциалов в контрольных точках. Предложен подход по созданию математической модели системы электрохимической защиты от коррозии без отключения станций катодной защиты и деполяризации трубопровода, который позволил, на базе системы дистанционного коррозионного мониторинга, получать данную модель без проведения натурных измерений на трассе трубопровода. Полученная математическая модель позволила разработать методики, направленные на решение аналитических задач, направленных на повышение эффективности и надежности работы системы противокоррозионной защиты от коррозии. Была решена задача оптимального регулирования совокупности станций катодной защиты на участке нефтегазопровода, в зависимости от внешних влияющих факторов и состояния оборудования электрохимической защиты от коррозии. Данные подходы пошли апробацию на всех типах объектов магистрального транспорта газа. Были разработаны подходы по определению текущего технического состояния и прогнозирования его изменения для элементов системы противокоррозионной защиты, таких как: анодные заземлители и изоляционные покрытия трубопроводов, определение которых производится на основе оценки изменения коэффициентов математической модели системы

электрохимической защиты от коррозии во времени. Математическая модель позволила разработать подходы по определению показателей надежности для системы ЭХЗ, где критерием отказа системы принят показатель невозможности обеспечения защитного потенциала в любой точке трубопровода. Рассмотренные принципы решения аналитических задач системы дистанционного коррозионного мониторинга реализованы на базе программно-аппаратного комплекса по управлению оборудованием электрохимической защиты от коррозии. Использование возможностей системы дистанционного коррозионного мониторинга позволяет повысить комплексный показатель защищенности объектов транспорта нефти и газа от коррозии, а также повысить их производственную надежность.

Список литературы

1. Никулин, С. А. Интеллектуализация процедур управления системой защиты от коррозии / С. А. Никулин, Е. Л. Карнавский, В. Р. Милов, В. Г. Баранов // Нейрокомпьютеры: разработка применение. – 2014. – № 11. – С. 73-79.
2. Никулин, С. А. Оптимизация режимов работы оборудования систем электрохимической защиты в зависимости от внешних факторов и с учетом текущего состояния газопровода / С. А. Никулин, К.А. Борнуковская, Е. Л. Карнавский, Д. С. Мартыненко // Территория НЕФТЕГАЗ. - №9. – 2019. – С. 26 – 35.
3. Никулин, С. А. Определение первоочередности вывода в ремонт оборудования противокоррозионной защиты на участке газопровода в условиях ограничения финансирования / С. А. Никулин, С.В. Сабанов, Е. Л. Карнавский // Практика противокоррозионной защиты. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 7-17.
4. Никулин, С. А. Основные показатели надежности системы противокоррозионной защиты / С. А. Никулин, Е. П. Богачев, Е. Л. Карнавский, Ю. М. Свердлик // Газовая промышленность. - №1 (795). – 2020. С. 30 – 36.
5. Никулин, С. А. Разработка методики оценки состояния изоляционного покрытия участка нефтегазопровода / С. А. Никулин, Е. Л. Карнавский, А.Н. Воробьев // Территория НЕФТЕГАЗ. - №1-2. – 2020. – С. 20 – 25.

Система квантового распределения ключей на непрерывных переменных с гауссовским типом модуляции на поднесущих частотах

Гончаров Р. К.¹, Самсонов Э.О.¹, Киселев А.Д.¹

¹Университет ИТМО

e-mail: rkgoncharov@itmo.ru

Системы квантового распределения ключей на непрерывных переменных (НПКРК) отличаются от более известных систем на дискретных переменных (ДП) не только теоретическими подходами к рассмотрению, но также и конструктивными особенностями. Так, вместо детектора одиночных фотонов, в них используется блок когерентного детектирования, основным компонентом которого является вычитающий балансный детектор [1]. Сам когерентный приём может осуществляться как известными методами гомо- и гетеродинирования, так и их аналогами, при учёте, что продемонстрирована эквивалентность и эффективность.

Метод, использующий в качестве носителей информации ослабленные многомодовые когерентные состояния, был предложен в работе [2] и в дальнейшем получил своё

развитие в ряде прочих работ [3,4,5]. Суть метода заключается в кодировании информации в фазе поднесущих (боковых) спектральных компонент, в то время как центральная мода является опорной по фазе. Секретность системы КРК на боковых частотах (КРКБЧ) была успешно продемонстрирована против когерентных (общих) атак [6].

Аналог КРКБЧ на непрерывных переменных также является предметом изучения. Так, в работе [7] описывается концепция и обосновывается стойкость протокола против коллективных атак с учётом конечной длины секретных ключей. Следует отметить, что в продемонстрированной системе используется подход с дискретным набором базисов и пар состояний в них, то есть относительно работы, был изменён только подход к реализации детектирования.

Так как самыми эффективными и криптографически стойкими среди схем НПКРК являются схемы, использующие генерацию состояний с гауссовской модуляцией [8], реализация КРКБЧ с таким типом модуляции также представляет большой интерес. В настоящей работе демонстрируется схема системы НПКРКБЧ с гауссовской модуляцией, описывается подход к экспериментальной реализации гауссовской модуляции с гомодинным методом приёма, аналогичным [7], демонстрируется стойкость предложенного протокола против коллективных атак. Схема также может быть расширена до двойного гомодинирования, таким образом позволяя расширить доказательство стойкости до учёта когерентных атак [9].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант No МК-777.2020.8).

Список литературы

1. Weedbrook C. et al. Gaussian quantum information //Reviews of Modern Physics. – 2012. – Т. 84. – №. 2. – С. 621.
2. Merolla J. M. et al. Quantum cryptographic device using single-photon phase modulation //Physical review A. – 1999. – Т. 60. – №. 3. – С. 1899.
3. Gleim A. V. et al. Secure polarization-independent subcarrier quantum key distribution in optical fiber channel using BB84 protocol with a strong reference //Optics express. – 2016. – Т. 24. – №. 3. – С. 2619-2633.
4. Kynev S. M. et al. Free-space subcarrier wave quantum communication //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 917. – №. 5. – С. 052003.
5. Miroshnichenko G. P. et al. Security of subcarrier wave quantum key distribution against the collective beam-splitting attack //Optics express. – 2018. – Т. 26. – №. 9. – С. 11292-11308.
6. Kozubov A., Gaidash A., Miroshnichenko G. Finite-key security for quantum key distribution systems utilizing weak coherent states //arXiv preprint arXiv:1903.04371. – 2019.
7. Samsonov E. et al. Subcarrier wave continuous variable quantum key distribution with discrete modulation: mathematical model and finite-key analysis //Scientific Reports. – 2020. – Т. 10. – №. 1. – С. 1-9.
8. Laudenbach F. et al. Continuous-variable quantum key distribution with gaussian modulation—the theory of practical implementations //Advanced Quantum Technologies. – 2018. – Т. 1. – №. 1. – С. 1800011.
9. Leverrier A. Security of continuous-variable quantum key distribution via a Gaussian de Finetti reduction //Physical review letters. – 2017. – Т. 118. – №. 20. – С. 200501.

Phase states of a non-Heisenberg ferrimagnet

Matyunina Ya.Yu.¹, Kosmachev O.A., Yarygina E.A., Fridman Yu.A.

¹КФУ им. В. И. Вернадского

e-mail: yuriiifridman@gmail.com

It is of interest to study the phase states and dynamic properties of an isotropic non-Heisenberg ferrimagnet [1], in which one of the sublattices contains spin-1 magnetic ions, and the other – spin-1/2. When $S=1$, one should account not just the bilinear exchange interaction, but also the biquadratic exchange. The Hamiltonian of such a system is given by

$$\hat{H} = -\frac{1}{2} \sum_{m,m'} J_1(m-m') \vec{\sigma}_m \vec{\sigma}_{m'} - \frac{1}{2} \sum_{n,n'} J_2(n-n') \vec{S}_n \vec{S}_{n'} - \\ - \frac{1}{2} \sum_{n,n'} K(n-n') (\vec{S}_n \vec{S}_{n'})^2 - \frac{1}{2} \sum_{m,n} A(m-n) \vec{\sigma}_m \vec{S}_n,$$

where J_1 is the constant of exchange interaction for the sublattice with spin $\sigma = \frac{1}{2}$; J_2, K are the constants of bilinear and biquadratic exchange interactions for spin-1 sublattice; $A < 0$ is the constant of inter-sublattice interaction. Further evaluations will be carried out for the low-temperature case (TT_N , T_N is the Neel temperature).

Analysis of the free energy density shows that at $J_2 K$ the ferrimagnetic (FiM) order realizes in the system. In this state, both sublattices reach saturation, but the magnetization vectors are anticollinear. The total magnetization of the system in the FiM phase equals to 1/2.

In the second possible case ($J_2 K$), in the first sublattice the effect of quantum spin reduction takes place. Let us call this state quadrupolar-ferrimagnetic (QFiM). The magnetization vectors of the first and the second sublattices are anticollinear, thus the point of compensation of the magnetic moments of sublattices is possible.

The results obtained make it possible to construct a phase diagram of the system under study. The phase transition line FiM - QFiM - the phase is determined by the equation $|A| = 4(K(0) - J_2(0))$, and the compensation line is implemented in the QFiM - phase $|A| = 2(J_2(0) - K(0))$. On this line, the magnetic moments of the first and second sublattices coincide in magnitude and completely compensate each other. To determine the type of the QFiM - FiM phase transition, we use the Landau thermodynamic theory of phase transitions, which shows that the QFiM - FiM phase transition is of the second kind. Moreover, an analysis of the spectra of elementary excitations shows that this phase transition occurs along the "longitudinal" branch of excitations, that is, along the branch associated with longitudinal vibrations of the magnetic moment in the first sublattice. It should be noted that the problem under consideration can serve as a fairly adequate model of a magnetic film consisting of two nonequivalent monolayers.

The research was funded by RFBR and Republic of Crimea, project № 20-42-910003.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 20-32-90027.

Список литературы

1. B. A. Ivanov, Low Temp. Phys. 45, 935 (2019)

Электрические и магнитные свойства монокристаллов SmSb в температурном интервале 2–300 К и в магнитном поле до 14 Тл.

Степанов Н. Н.¹, Каменская Г.А., Н.В. Шаренкова, Волков М.П.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: nikolaj_stepanov@mail.ru

На аттестованных рентгенографическим методом монокристаллах моноантимонида самария (SmSb) проведены исследования температурных и полевых зависимостей магнитных характеристик соединения (намагниченность M , магнитная восприимчивость χ) и электросопротивления R в интервале 2–300 К и в магнитном поле с индукцией B до 14 Т. Образцы для исследований с размерами $\approx 6 \times 3 \times 3$ мм выкалывались из исходного слитка, приготовленного методом синтеза из элементов [1].

Согласно данным рентгеноструктурного анализа кристаллическая решетка SmSb относится к структурному типу B1. Ее параметр $a_{\text{SmSb}} = 6.27$ Å, область когерентного рассеяния (ОКР) рентгеновского излучения $L = 2695 \pm 300$ Å, а углы разориентации атомных плоскостей в направлении $\langle 100 \rangle \Delta\Theta$, не превышают 0.017° .

Электросопротивление R SmSb измерялось в омической области четырехзондовым методом на постоянном токе величиной $I = 2.5$ mA. Температурные зависимости SmSb характеризуют металлический тип проводимости. Антиферромагнитный фазовый переход (АФТ) в SmSb проявляет себя резким падением R в испытуемых образцах при температуре Нееля $T_N = 2.1$ К. С ростом индукции внешнего магнитного поля R

На температурной зависимости обратной магнитной восприимчивости χ^{-1} SmSb также обнаруживается перегиб в области $T \approx 50$ К. Можно предположить, что указанные особенности связаны с началом перестройки магнитного спектра соединения перед АФТ.

В температурном интервале 2–8 К выше и ниже температуры АФТ на полевых зависимостях $M(B)$ SmSb наблюдаются осцилляции де Газа-ван Альфена (dHvA). Посредством FFT-анализа осцилляций изучен их спектр частот и построена температурная зависимость амплитуд колебаний. Обнаружено необычное уширение амплитуд колебаний $M(H)$, обусловленное разориентацией атомных плоскостей в направлении $\langle 100 \rangle$ в кристаллах. Показано, что эффект dHvA проявляется в SmSb как выше, так и ниже T_N , что свидетельствует о неизменности структуры зонного спектра материала в результате АФТ по обе стороны его границы, исключая, разумеется, из рассмотрения перестройку системы спинов.

Список литературы

1. Волков М.П., Степанов Н.Н. /ФТТ (2019) 61 1470.

Фазовые состояния двухподрешеточного анизотропного негеизенберговского магнетика

Ярыгина Е.А.¹, Клевещ Ф.Н.¹, Космачёв О.А.¹, Кривцова А.В.¹

¹КФУ им. В.И. Вернадского

e-mail: phklevets@yandex.ru

Как было показано в [1], при определенном соотношении обменных интегралов в двухподрешеточном изотропном негеизенберговском магнетике помимо антиферромагнитной фазы, характеризующейся дипольными параметрами порядка, может реализоваться ортогонально нематическая фаза. В этой фазе средний магнитный момент на узле в каждой из подрешеток равен нулю. В настоящей работе мы изучили фазовые состояния и динамические свойства анизотропного негеизенберговского магнетика со спином магнитного иона равным единице. Такое значение спина является минимальным, при котором в системе может существовать, как биквадратичное обменное взаимодействие, так и одноионная анизотропия (ОА). Поскольку мы рассматриваем произвольное соотношение между константами билинейного и биквадратичного обмена, рассматриваемая нами модель может быть разбита на две подрешетки. В общем случае, гамильтониан такой системы имеет следующий вид:

$$\hat{H} = \frac{1}{2} \sum_{n_1, n_2} [J_{n_1, n_2} ((\vec{S}_{n_1} \cdot \vec{S}_{n_2})) + K_{n_1, n_2} (\vec{S}_{n_1} \cdot \vec{S}_{n_2})^2] - \frac{\beta}{2} \sum_n (S_n^z)^2,$$

где J и K - константы билинейного и биквадратичного обмена, соответственно; β - константа ОА, причем положительные значения ($\beta 0$) соответствуют легкоосной ОА, а отрицательные значения ($\beta 0$) - легкоплоскостной ОА. Все вычисления проводятся в низкотемпературном приближении (TT_C).

Результаты нашего исследования позволяют утверждать, что фазовые состояния изотропного негеизенберговского магнетика со спином магнитного иона равным единице [1] реализуются как в модели с легкоосной ОА, так и в случае легкоплоскостной ОА. Однако, и тип фазовых переходов, и фазовая диаграмма системы существенно зависят от симметрии ОА. Кроме того, учет ОА существенно меняет динамические свойства системы. Так, в магнетике с легкоосной ОА фазовая диаграмма полностью совпадает с фазовой диаграммой изотропного негеизенберговского магнетика со спином магнитного иона равным единице, а фазовые переходы являются вырожденными переходами первого рода. При этом спектр магнонов в легкоосном магнетике существенно отличается от спектра в изотропном случае. Это связано с тем, что учет легкоосной анизотропии снимает вырождение возбужденных энергетических уровней магнитного иона, что проявляется в появлении "поперечной" ветви возбуждений. Более того, все фазовые переходы идут вдоль "продольной" ветви элементарных возбуждений.

В легкоплоскостном негеизенберговском магнетике наблюдается принципиально другая ситуация. Хотя в системе реализуются те же фазовые состояния, что и в изотропном или легкоосном случаях, фазовые переходы между дипольными и нематическими фазами являются фазовыми переходами первого рода без вырождения. Кроме того, в такой системе также имеется фазовый переход первого рода между нематической и ортогонально нематической фазами. В изотропном случае вместо этого перехода реализуется, так называемая $SU(3)$ точка, в которой энергии всех четырех фаз совпадают.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Крым в рамках научного проекта № 20-42-910003. Ярыгина Е.А. благодарит РФФИ за финансовую поддержку в рамках научного проекта № 20-32-90027.

Список литературы

1. Yu. A. Fridman, O. A. Kosmachey, and Ph. N. Klevets, JMMM 325 (2013), p. 125

Влияние атомов замещения Nd, Pr и Co на магнитные и магнитострикционные свойства фаз Лавеса (Tb,Dy)Fe₂

Политова Г. А.^{1,2}, Ганин М.А.¹, Морозов Д.А.¹, Панков К.Е.³, Михайлова А.Б.¹, Терешина И.С.⁴

¹ИМЕТ РАН

²СПбПУ

³РГСУ

⁴МГУ им. М. В. Ломоносова

e-mail: gpolitova@gmail.com

Кубические соединения со структурой фаз Лавеса RFe₂ (R - редкоземельные (РЗ) элементы) демонстрируют гигантскую анизотропную магнитострикцию при комнатной температуре. Наиболее известные из них, система (Tb,Dy)Fe₂ (Терфенол-D), широко используются в качестве источников ультразвука, датчиков перемещений, датчиков уровня раздела сред и т.п. [1,2]. Для технического использования таких материалов важным фактором является достижение высоких магнитоупругих деформаций в малых магнитных полях, другими словами, необходима высокая магнитострикционная восприимчивость (dl/dH). Повышенные значения dl/dH можно получить путем частичного замещения как РЗ элементов (Tb и Dy), так и железа, достигая, тем самым, компенсации магнитокристаллической анизотропии (МКА).

Целью работы явился поиск новых материалов, обладающих высокими магнитострикционными характеристиками в заданном интервале температур и магнитных полей на базе замещенных составов RFe₂. В данной работе проведено изучение влияния на магнитные свойства (Tb,Dy)Fe₂ таких замещающих элементов, как Nd, Pr и Co. Поскольку константа МКА K₁ как NdFe₂, так и DyFe₂ положительна, а K₁ для TbFe₂ отрицательна, в системе (Tb,Dy,Nd)Fe₂ должна наблюдаться компенсация МКА, при которой значения магнитострикции даже в небольших полях достигают высоких значений. Так было показано ранее, что в системе Tb_xDy_{0.9-x}Nd_{0.1}Fe_{1.93} компенсация анизотропии наблюдается при x = 0.25 [3]. Также немаловажным аспектом является то, что тяжелые редкоземельные элементы Tb и Dy являются дорогостоящими, и частичное их замещение менее дорогими легкими РЗ металлами, например, Pr и Nd экономически выгодно. Частичное замещение Fe на Co также приводит к улучшению магнитных и магнитострикционных свойств псевдобинарных (R,R')Fe₂ сплавов (так, например, такое замещение увеличивает температуру спиновой переориентации (СПП) терфенола-D [4-6]).

Соединения Tb_xDy_{1-x}Nd (Pr)_{0.1}Fe_{2-z}Co_z (x = 0.2, 0.3; z = 0, 1.3) были синтезированы с использованием высокочистых РЗ металлов методом дуговой плавки в атмосфере аргона при избыточном давлении с последующим гомогенизирующим отжигом. Фазовый состав и параметры элементарной ячейки определялись при комнатной температуре на

порошковом дифрактометре Rigaku Ultima IV (Япония) с $\text{CuK}\alpha$ -излучением. Установлено, что все замещенные составы имеют кубическую структуру типа MgCu_2 , содержание основной фазы в сплавах составляет 90–96 %. Для определения основных закономерностей формирования магнитных и магнитоупругих характеристик исследованных соединений в зависимости от состава, а также выяснения особенностей влияния различных замещений на температурную зависимость магнитострикции, были исследованы как температурные, так и полевые зависимости намагниченности и магнитострикции образцов. Намагниченность образцов измерялась с помощью индукционного магнетометра (вставка к установке MagEq MMS 901, ООО "ПМТиК", г.Троицк (Москва)). Данная установка позволяет получать петли гистерезиса в магнитных полях до 1.8 Т в температурном интервале от 80 до 350 К. Магнитострикция изучалась тензометрическим методом в том же диапазоне температур 80–350 К в магнитных полях до 1.2 Т. Измерения деформации проводились вдоль направления магнитного поля (продольная магнитострикция) и перпендикулярно ему (поперечная магнитострикция).

Установлено, что частичное замещение Tb и Dy на Nd и Pr (0.1 ат.дол.) в сплаве $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$ позволяет увеличить значение магнитострикционной восприимчивости при температурах ниже 250 К в 2 и более раза, при этом магнитострикционные характеристики этих составов при комнатной температуре меняются незначительно. Частичное замещение Fe на Co (1.3 ат.дол.) смещает положение максимума магнитострикции в область комнатной температуры, однако значения анизотропной магнитострикции и магнитострикционной восприимчивости значительно снижаются. Отличительной особенностью этих составов является смена знака магнитострикции при температурах ниже 200 К.

Работа выполнена в рамках госзадания 075-00328-21-00

Список литературы

1. Koon N.C., Williams C.M., Das B.N. // J. Magn. Magn. Mater. 1991. V. 100. 173.
2. Clark A.E. // in: E.P. Wohlfarth (Ed.) Ferromagnetic Materials. V. 1, North-Holland, Amsterdam. 1980. P. 531.
3. Jammalamadaka S.N., Markandeyulu G., Balasubramaniam K. //Appl. Phys. Lett. 2010. 97242502.
4. Wang N.J., Liu Y., Zhang H.W., Chen X., Li Y.X. // China Foundry. 2016. V. 13. P. 75–84.
5. И.С. Терешина, А.П. Туляков, С.А. Никитин, Г.А. Политова, К.П. Скоков, Физика твердого тела, 2007, 49(2), 304–308
6. Y.G. Shi, L. Wang, W.G. Zheng, Z.Y. Chen, D.N. Shi, JMMM, 2017, 433, 116–119

Cyanate Ester Resin/Silica subnanocomposites and their superiority over nanocomposites due to fundamental role of constrained interfacial dynamics

Bershtein V.A.¹, Fainleib A.M.², Kirilenko D.A.¹, Yakushev P.N.¹

¹Ioffe Institute, Russia

²Institute of Macromolecular Chemistry, Ukraine

e-mail: vbersht.polmater@mail.ioffe.ru

Nanostructure and properties of a series of the Cyanate Ester Resin (CER)/ SiO_2 polymer composites with 0.01 to 10 wt.% SiO_2 introduced via a sol-gel process were studied by HAADF

STEM, EDXS, DMA, DSC, FTIR and Far-IR spectroscopies [1-3]. These composites were synthesized through the reactions of CE polymerization into the heterocyclic network, hydrolysis and polycondensation of added silanes into SiO_2 units, and the chemical hybridization of organic and inorganic constituents. Depending on SiO_2 content, its ambivalent influence on molecular dynamics, thermal, relaxation and elastic properties of CER matrix was revealed. The most positive impact was attained at ultralow SiO_2 contents, e.g., at 0.1%. In this case the most “suppressive” influence of SiO_2 on CER vibrational dynamics was observed (Far-IR). Glass transition temperature, T_g , transition onset temperature, T_g' , and dynamic modulus, E' , increased from 250°C, 170°C and from 2 GPa to 300°C, 250°C and 3 GPa, respectively. When increasing SiO_2 content the effects decreased, and at 10% SiO_2 the negative effects were observed: suppression of dynamics disappeared, and three T_g values, at ~100°, 150° and 200°C were observed (DSC, DMA).

The structural analysis by HAADF-STEM, the maps and histograms of Si nanoscale distribution in composites (EDXS analysis), and the additional calculations allowed us to clarify the origin of diverse impact of SiO_2 units on dynamics and properties of these composites. At 0.1 % SiO_2 the composite was nanohomogeneous, without features of clusterization, despite the presence of Si in all the analysed nanovolumes. This led to conclusion about formation only of SiO_2 nodes of subnanometric size L where $0.5 \text{ nm} < L < 1 \text{ nm}$. To our knowledge, the term “*polymer subnanocomposite*” was introduced in [1-3] for the first time. Nanoclusterization started at 0.5% SiO_2 , and nanocluster size increased with SiO_2 content; their aggregates of ~ 400 nm in size were registered at 10% SiO_2 . EDXS maps of Si nanoscale distribution were in agreement with HAADF-STEM images. The histograms of Si content in nanovolumes of composites provided the evidence of the quasi-regular distribution of SiO_2 nodes in the amorphous CER matrix of the subnanocomposite. Meantime, the histograms indicated the pronounced structural nanoheterogeneity in the nanocomposites.

The calculations of the interfacial surface in one cm^3 of composite S and the average distance between SiO_2 units d showed as follows: for the composite with 10% SiO_2 and submicroclusters of 400 nm in size $S = 0.8 \text{ m}^2$ and $d = 480 \text{ nm}$; for the nanocomposite with 1% SiO_2 and nanoclusters of 25 nm in size $S = 1.2 \text{ m}^2$ and $d = 92 \text{ nm}$ but for the subnanocomposite with 0.1% SiO_2 as nodes of 0.5-1.0 nm in size $S = (3-6) \text{ m}^2$ and $d = (4-8) \text{ nm}$ only. It means that any atomic group in the subnanocomposite is located at the distance of not more than 2-4 nm from the points of covalent grafting matrix to SiO_2 nodes. Therefore, the superiority of the studied subnanocomposites over the nanocomposites is explained by the extremely strong “constrained dynamics effect” [4, 5] when the matrix on the whole is in the state of *constrained interfacial dynamics*.

References

1. V.A. Bershtein, A.M. Fainleib, K.G. Gusakova, D.A. Kirilenko, P.N. Yakushev, L.M. Egorova, N. Lavrenyuk, V.A. Ryzhov. *Europ. Polym J.* 85, 375-389 (2016).
2. V.A. Bershtein, A.M. Fainleib, D.A. Kirilenko, P.N. Yakushev et al. *Polymer* 103, 36-40 (2016).
3. V.A. Bershtein, A.M. Fainleib, D.A. Kirilenko, P.N. Yakushev, K.G. Gusakova, V.A. Ryzhov. *AIP Conference TOP-2016 Proceedings*, Italy, 4 pp.
4. E. P. Giannelis, R. Krishnamoorti, E. Manias. *Adv. Polym. Sci.* 138, 107-147 (1999).
5. V.A. Bershtein, P.N. Yakushev: *Adv. Polym. Sci.* 230, 73–219 (2010).

Исследование влияния когерентного излучения на свойства арамидных волокон и тканей

Науман Л.В.¹, Овечкин С. В.¹, Андрухова О.В.¹, Андрухова Т.В.², Жуковская Т.М.¹,
Кустов С.Л.¹

¹АлтГТУ им. И.И. Ползунова

²АлтГУ

e-mail: ova17@yandex.ru

Одной из задач создания новых материалов является поиск иных методов модификации уже имеющихся компонентов. Широкий спектр применения обуславливает необходимость модификации свойств поверхности и тонкого приповерхностного слоя арамидного волокна и тканей без изменения их объемных характеристик. Ранее были предложены несколько методов активации поверхности волокон: радиационно-химической обработкой [1,2]; плазменной модификацией поверхности [3-5]. К недостаткам этих способов обработки поверхности можно отнести ухудшение либо потерю одних свойств волокон, при видимом улучшении других, а их применение усложняет технологический процесс и влечет за собой ухудшение экологической ситуации на производстве. Целью работы стал поиск новых методов модификации арамидных волокон (СВМ), лишенных этих проблем.

В работе проводилась экспериментальная оценка капиллярности и смачиваемости, упруго-прочностных и трибометрических характеристик СВМ волокон и тканей (максимальная нагрузка, модуль упругости и др. при деформации растяжения, коэффициент трения нити о нить и максимальная прикладываемая нагрузка при вытягивании волокон из ткани), подвергнутых предварительной обработке в поле лазерного излучения (ЛИ) мощностью 300 мВт и 500 мВт с длинами волн 532 нм и 410 нм соответственно в зависимости от времени экспозиции образца. Для проверки длительности эффекта исследовались образцы непосредственно сразу после облучения и через 12 часов, 24 часа и 456 часов (≈ 19 дней) после воздействия.

Установлено, что при облучении не зависимо от длины волны когерентного электромагнитного излучения наблюдается рост капиллярности образцов до 20-25% по сравнению с необлученным материалом, что обусловлено уменьшением краевого угла смачивания. Для одиночных нитей прочность на разрыв уменьшается не более чем на 3%, упругие свойства при этом возрастают. В образцах ткани наблюдается рост исследуемых параметров. Таким образом, при облучении происходит улучшение смачиваемости арамидных волокон, что ведет к улучшению пропитки арамидного наполнителя связующим компонентом и созданию прочного соединения между волокном и матрицей. Обработка арамидного волокна в поле когерентного лазерного излучения в течение всего нескольких минут приводит к улучшению адгезионной способности и гидрофилизации поверхности, при этом не изменяются, а возможно и улучшаются упруго-прочностные характеристики материала. Кроме того, выявлена стабилизация наблюдаемого эффекта после некоторого снижения в течение первых 12 часов после облучения.

На основе проведенных исследований предложен метод фотоактивации поверхности арамидного волокна с использованием когерентного лазерного излучения малой мощности.

Список литературы

1. Плескачевский Ю.М., Смирнов В.В., Макаренко В.М. Введение в радиационное материаловедение полимерных композитов //АН БССР, Ин-т механики металлополимер. систем / Минск.: Наука и техника, 1991 – 190 с.

2. Иванова А.С, Кривенко Е.А., Головина Е.А. Технология создания силовой оболочки корпуса твердотопливного ракетного двигателя с модификацией поверхности арамидных волокон и теплозащитой, Ползуновский альманах, 2017, №1-2 – С. 66-71.
3. Абдуллин, И.Ш. Модификация нанослоев в высокочастотной плазме пониженного давления /И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, И. Р. Сагбиев, М.Ф. Шаехов. — Казань: Изд-во Казан.технол. ун-та, 2017. — С. 280-324.
4. Сергеева Е.А., Гайнутдинова А.Р. Плазменная гидрофилизация арамидной ткани для создания баллистических композитов // Дизайн. Материалы. Технология. - 2016. - №1. - С. 80-83.
5. Сергеева Е.А., Гришанова И.А., Абдуллин И.Ш. Влияние плазмы ВЧЕ-разряда на физико-механические свойства волокон и композиционных материалов // Вестник Казан. Технологического университета. - 2015. - №7. - С. 109-112.

Об устойчивости стационарных состояний диода со встречными потоками электронов и ионов

Бакалейников Л. А.¹, Кузнецов В.И.¹, Флегонтова Е.Ю.¹,

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: bakal51@mail.ru

При работе многих плазменных устройств важное место занимают режимы, для которых характерно существование нелинейных колебаний [1], [2]. Подобное явление было обнаружено нами теоретически при изучении стационарных состояний бесстолкновительного плазменного диода со встречными потоками электронов и ионов [3], где при плотностях тока, превышающих некоторую пороговую величину, вместо стационарных решений в диоде реализовались решения с нелинейными колебаниями [4]. Этот результат был получен численно с использованием модифицированного Е,К-кода [5]. В представляемом докладе для изучения устойчивости решений указанного диода предлагается аналитический подход. Метод является развитием теории устойчивости, предложенной в работе [6].

Изучаются процессы, в которых электроны преодолевают межэлектродный промежуток быстрее, чем ионы успевают сдвинуться на расстояние порядка длины Дебая-Хюккеля. В этом случае электроны в каждый момент времени успевают “мгновенно” подстроиться под распределения электрического поля и ионов, существующих в этот момент, и достаточно учесть только эффекты, связанные с нестационарным движением ионов. При изучении устойчивости решений проводится линеаризация уравнения Пуассона, в котором концентрация электронов рассчитывается по стационарным формулам, а в аналитической формуле для концентрации ионов учитываются малые поправки, связанные с нестационарностью электрического поля. Для амплитуды возмущения потенциала выведено интегро-дифференциальное уравнение. Для частного случая однородного невозмущенного распределения потенциала найдено аналитическое решение. Построено дисперсионное уравнение и проанализированы его решения. Оказалось, что главной модой неустойчивости является аperiодическая мода. Определен порог неустойчивости по величине межэлектродного зазора. Развитие неустойчивости исследовано также с использованием численного метода, предложенного в работе [4]. Результаты, полученные с

помощью аналитического подхода, с хорошей точностью совпали с данными численных расчетов.

Список литературы

1. T. Klinger, F. Greiner, A. Rohde, and A. Piel, Phys. Plasmas. 2, 1822 (1995).
2. В.И. Бабанин, И.Н. Колышкин, В.И. Кузнецов и др. ЖТФ. 64(12) 61 (1994).
3. А.Я. Эндер, В.И. Кузнецов, А.А. Груздев. Физика плазмы. 42(10), 891 (2016).
4. V.I. Kuznetsov, E.Yu. Flegontova, and L.A. Bakaleinikov. Phys. Plasmas. 27, 092304 (2020).
5. V.I. Kuznetsov, A.Ya. Ender, H. Schamel, and P.V. Akimov. Phys. Plasmas. 11(6), 3224 (2004).
6. В.И. Кузнецов, А.Я. Эндер. Физика Плазмы, 41 (11), 979 (2015).

Изучение порошкообразных образцов LiFePO_4 дифракционными рентгеновскими методами с применением искусственных нейронных сетей

Бойко М. Е., Шарков М.Д., Бойко А.М., Бобыль А.В., Николаев В.И.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: boikomix@gmail.com

Серия образцов LiFePO_4 , состоящая из 4 промышленных образцов и одного образца, синтезированного химическими методами, проанализирована с помощью методик рентгеновской дифрактометрии (РД) и малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (МУРР). Методом искусственных нейронных сетей восстановлен вид кривых дифракционного отражения с учетом аппаратной функции. Получена оценка характерных размеров и формы однородностей в изучаемых образцах LiFePO_4 .

Ранее от образцов были получены картины просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Гистограмма размеров частиц, полученная из обработки фотографий ПЭМ, показывает, что для изучаемого порошкообразного образца LiFePO_4 наиболее характерны размеры около 150 нм. Однако при этом разброс зерен в образце по пространственным размерам, наблюдаемым на фотографии ПЭМ, очень велик и частицы могут различаться по габаритам на порядки.

При этом важно отметить, что однородности нано-масштаба (100 нм и меньше) могут формировать частицы-агломераты, наблюдаемые на картинах ПЭМ в виде крупных образований. Это обстоятельство способно усложнить интерпретацию статистических данных, полученных из анализа фотографий ПЭМ. Поэтому в настоящей работе используются методики РД и МУРР, чувствительные к непосредственным размерам однородностей в материале [1].

Обработка кривых МУРР проводилась с помощью вновь разработанной методики, основанной на применении аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС). Кривые МУРР формируются композицией эффектов исследуемого материала и падающего на образец пучка и представляют собой свертку функции интенсивности падающего пучка с кривой рассеяния, которая могла бы быть получена от образца в гипотетическом случае идеального пучка. Для того, чтобы восстановить форму кривой пропускания образца на основании кривой МУРР и функции рассеяния пучка, требуется применить операцию

обратной свертки, которая в общем случае сводится к интегральному уравнению Фредгольма первого рода [2].

Обычно для сигналов в области относительно высоких шумов регуляризация подавляет полезный сигнал вместе с шумами. В работе предлагается рассмотреть как классический метод восстановления кривой рассеяния через преобразование обратной свертки, так и метод прямого восстановления кривой рассеяния. Метод прямого восстановления состоит в поиске модельной кривой рассеяния, минимизирующей ошибку (L2 норму). Этот метод фактически является методом многопараметрической оптимизации. По сути это означает, что эта оптимизация эквивалентна "обучению" однослойной искусственной нейронной сети, что и применялось на практике при проведении расчетов [3].

Помимо оптимизатора с методом градиентного спуска, был применен метод координатного спуска, который не сходил к модели с сингулярностями, а осциллировал вблизи минимума ошибки. Такой подход позволил получить несколько сотен наборов весов с равными ошибками, а затем эти значения были усреднены (учитывая линейность задачи). Суммарная ошибка усредненной модели не превосходила ошибку каждой расчетной модели, полученной методом координатного спуска, но при этом обработанная дифракционная кривая была лишена сингулярностей.

Кривая, которая является результатом расчетов с координатным спуском, модулем относительной ошибки и усреднением по 50 вариантам процедуры калькуляции приобретает сглаженный вид и допускает анализ по обоим моделям – Гинье и Порода.

Таким образом, для решения задачи восстановления формы кривой МУРР были предложены два пути: восстановление кривой рассеяния через регуляризованную процедуру обратной свертки и использование математического аппарата ИНС.

Сравнение данных, полученных при помощи рентгеновской дифрактометрии, и данных МУРР от набора образцов LiFePO_4 показывает, что в кривой малоуглового рассеяния помимо центрального пика, содержащего информацию о соотношении размера и плотности частиц, удалось выделить из-под шумов методом ИНС [4] структурные пики, которые коррелируют уже непосредственно с размерами частиц из различных экспериментов.

Список литературы

1. Small-Angle X-Ray Scattering. / Ed. by O. Glatter and O. Kratky. London: Academic Press, 1982. 516 p.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М., Наука, 1979.
3. Simon S.Haykin «Neural Networks and Learning Machines», New York, 2011
4. Yu Hen Hu, Jenq-Neng Hwang, «Handbook of Neural Network signal processing» 2002

Синтез и исследование электропроводящих свойств $\text{Cs}_2\text{Fe}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$ в различных газовых средах

Рогова Д. А.¹, Синельщикова О.Ю.², Беспрозванных Н.В.², Морозов Н.А.²

¹СПбГТИ (ТУ)

²ИХС РАН

e-mail: polzarogova14@gmail.com

Сложный оксид $\text{Cs}_2\text{Fe}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$ относится к структурному типу минерала голландита. Каркасная структура данного соединения имеет тетрагональную (пр. гр. $I4/m$) сингонию и построена из октаэдров $(\text{Fe}/\text{Ti})\text{O}_6$, сочлененных между собой зигзагообразно по ребрам с формированием блоков, “сшивка” которых осуществляется по вершинам октаэдров. В результате подобной компоновки полиэдров образуются квадратные туннели со стороной 2×2 октаэдра, содержащие кристаллографические позиции, в которых располагаются атомы цезия [1]. Соединения голландитовой структуры, в зависимости от состава могут быть использованы как катализаторы [2], матрицы для захоронения радиоактивных отходов [1,3], ионные либо смешанные проводники [3,4]. При этом электрические свойства ряда титанатных голландитов чувствительны к присутствию водорода [5], что делает их перспективными материалами для использования в водородных топливных элементах.

Несмотря на достаточно подробное изучение электрофизических свойств калиевых голландитов, исследования электропроводности цезиевых соединений данной структуры имеет крайне ограниченный характер, поэтому задачей представленной работы являлось получение методом твердофазных реакций керамических образцов голландитовой фазы состава $\text{Cs}_2\text{Fe}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$ и исследование ее электропроводности в атмосфере воздуха и в присутствии водорода.

Синтез образцов проводился путем твердофазных реакций из смесей, приготовленных механическим измельчением и смешиванием оксидов и карбонатов. В качестве реактивов использовались: Cs_2CO_3 (чда), TiO_2 (осч), Fe_2O_3 (осч). Смешивание исходных реактивов, взятых в стехиометрических соотношениях, проводилось в шаровой планетарной мельнице Pulverisette 6 при скорости 350 об/мин в течение 20 мин. с использованием яшмовой размольной garnитуры. Исходная смесь прессовалась в таблоты, подвергались ступенчатому обжигу при температурах 650, 1050 и 1250°C с промежуточным перетиранием и прессованием спеков. Фазовый состав полученных керамических образцов контролировался при помощи рентгенофазового анализа (ДРОН 3М, $\text{CuK}\alpha$ – излучение).

В результате синтеза была получена однокомпонентная тетрагональная голландитовая фаза с параметрами элементарной ячейки: $a=10,2285(12) \text{ \AA}$, $c=2,9567(5) \text{ \AA}$, $V=309,34(8) \text{ \AA}^3$.

Для изучения электрофизических характеристик синтезированных голландитовых фаз были использованы цилиндрические таблетки высотой 2-3 мм и диаметром ~ 10 мм. Перед измерением электропроводности на торцевые грани образцов вжиганием Ag-содержащей проводниковой пасты (ООО «Элма-пасты») при 650°C были нанесены металлические контакты. Электропроводность исследовалась двухконтактным методом в интервале температур 50 – 800°C на воздухе и в аргон-водородной смеси (3 % H_2) на переменном токе частотой 1 кГц и при кратковременном приложении постоянного тока, напряжение, подаваемое на контакты измерительной ячейки составляло 0,12 В (LCR-метр Fluke 6063).

По характеру температурной зависимости электропроводности образца состава $\text{Cs}_2\text{Fe}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$ можно сделать вывод о ее преимущественно ионном характере, на что

указывает линейная температурная зависимость электропроводности и наличие дисперсии значений, измеренных на постоянном и переменном токе в области средних температур (до 400 °C). При температуре 650°C синтезированная керамика имеет проводимость $\sigma \approx 2.1 \cdot 10^{-3}$ См/см в атмосфере воздуха и $\sigma \approx 7.94 \cdot 10^{-3}$ См/см в аргон-водородной смеси. При подаче водорода изменяется наклон данных зависимостей, что свидетельствует об изменении энергии активации процесса переноса заряда. Значения энергии активации составили

0.57 эВ на воздухе и 0.91 эВ в присутствии водорода.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХС РАН при поддержке Минобрнауки России (тема № АААА-А19-119022290092-5)

Список литературы

1. Ладенков, И.В., Синтез, строение и физико-химические свойства тройных титаносодержащих оксидов, образующихся в системе $M^I_2O-A^{III}_2O_3-TiO_2$ (где M^I – щелочные элементы; A^{III} – Al, Cr, Fe, Ga): автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра хим. наук / Ладенков Игорь Владимирович ; Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. – Н. Новгород, 2013, 24.
2. Watanabe M., Catalytic property of the hollandite-type 1-D ion-conductors: Selective reduction of NO_x / W. Mamoru, M. Toshiyuki, Y. Syoichi, Y. Hiroshi, Solid State Ionics, 1995, 79, 376-381.
3. Xu, Y.; Wen, Y.; Grote, R.; Amoroso, J.; Shuller, N. L.; Brinkman, K. S., A-site compositional effects in Ga-doped hollandite materials of the form $BaxCs_yGa_{2x+y}Ti_{8-2x-y}O_{16}$: implications for Cs immobilization in crystalline ceramic waste forms. Sci. Rep., 2016, 6, 27412.
4. Weber H.-P., Schulz H., Ionic conduction in one dimension: A structural study of the hollandite $K_{1.54}Mg_{0.77}Ti_{7.23}O_{16}$ over the range $133 \leq T \leq 919$ K, Journal of Chemical Physics, 1986, 85, 1, 475-484.
5. Cao C., Singh K., Hay Kan W., Avdeev M., and Thangadurai V. Electrical properties of hollandite-type $Ba_{1.33}Ga_{2.67}Ti_{5.33}O_{16}$, $K_{1.33}Ga_{1.33}Ti_{6.67}O_{16}$, and $K_{1.54}Mg_{0.77}Ti_{7.23}O_{16}$, Inorganic Chemistry, 2019, 58, 8., 4782-4791.

Изучение фазовых переходов в кулоновских структурах из микроразмерных частиц

Романова А. В.¹, Рудый С.С.¹, Костерной И.А.¹, Рождественский Ю.В.¹

¹ИТМО

e-mail: anromanna98@gmail.com

Кулоновские структуры – это квазиупорядоченные структуры, которые формируются из заряженных частиц, локализованных в ионных ловушках. На протяжении нескольких десятилетий основное внимание уделяется структурам из ионов – кулоновским кристаллам – и процессам фазовых переходов между возможными устойчивыми конфигурациями [1-3]. Логичным развитием данного направления представляется исследование формирования кулоновских структур из микрочастиц, однако образование кулоновских кристаллов из микроразмерных заряженных частиц ранее не было исследовано. Так, неизвестно, существуют ли устойчивые конфигурации из микрочастиц, как в случае ионных кристаллов, и можно ли наблюдать фазовые переходы между в структурах из микрочастиц.

Формирование той или иной кулоновской структуры зависит от параметров системы, таких как количество ионов, геометрия ловушки (радиус запирающих электродов, количество силовых электродов, рабочая длина ловушки), а также частота и величина напряжений, подаваемых на электроды ловушки. Так, можно продемонстрировать фазовые переходы в кулоновской структуре, локализованной в квадрупольной ловушке с двумя запирающими электродами, при изменении длины ловушки (остальные параметры системы принимаются неизменяемыми) [4]. С другой стороны, от радиуса запирающих электродов, длины ловушки и напряжения на запирающих электродах зависит форма эффективного потенциала одиночной (центральной) частицы. Принимая радиус электродов постоянным, можно показать, что при уменьшении длины ловушки (или при увеличении напряжения на запирающих электродах) эффективный потенциал одиночной частицы трансформируется к double-well форме, что соответствует фазовому переходу в кулоновском кристалле [4]. Таким образом, форма кулоновской структуры зависит от формы эффективного потенциала одиночной частицы. Следовательно, при экспериментальной реализации можно наблюдать фазовые переходы в кулоновской структуре, изменяя длину ловушки или напряжение на запирающих электродах.

Стоит отметить, что экспериментальная реализация кулоновских структур из микрочастиц в воздушной среде сопровождается определенными сложностями. Так, основными проблемами являются: 1) микродвижение заряженных частиц, затрудняющее наблюдение формы кулоновской структуры; 2) нелинейный характер движения частиц в воздушной среде, который приводит к возникновению zero-crossing орбит [5]. Для решения этих проблем была спроектирована экспериментальная установка, состоящая из: 1) DPSS-лазера с длиной волны излучения 532 нм для визуализации траекторий локализованных частиц; 2) рассеивающей линзы; 3) оптического прерывателя (ОП); 4) радиочастотной ионной ловушки с четырьмя силовыми цилиндрическими и двумя запирающими электродами; 5) источника постоянного напряжения; 6) источника переменного напряжения; 7) высокоскоростной камеры. Отличия от классической экспериментальной установки с квадрупольной линейной ловушкой [6] состоят в следующем: 1) радиочастотная ловушка устанавливается таким образом, чтобы ось симметрии ловушки совпадала с направлением вектора гравитации; 2) по ходу следования лазерного луча устанавливается ОП. Частота вращения ОП выбирается таким образом, чтобы можно было наблюдать колебания частиц только в определенной точке их траектории.

В результате настоящей работы были экспериментально реализованы кулоновские структуры, формирующихся из микроразмерных частиц в линейной квадрупольной ловушке при нормальных условиях. Кроме того, наблюдались фазовые переходы между различными устойчивыми конфигурациями. Исследована зависимость конфигурации кулоновских структур из микрочастиц от формы эффективного потенциала, обусловленного длиной рабочей области и напряжением на запирающих электродах. Были определены значения постоянного напряжения, при которых происходят фазовые переходы в системе из N частиц, локализованных в ловушке выбранной длины.

Список литературы

1. Schiffer J. P. Phase transitions in anisotropically confined ionic crystals, *Physical review letters*, 70(6), 818, 1993.
2. Fishman S., De Chiara G., Calarco T., Morigi G., Structural phase transitions in low-dimensional ion crystals, *Physical Review B*, 77(6), 064111, 2008.
3. Yan L. L., Wan W., Chen L., Zhou F., Gong S. J., Tong X., Feng M., Exploring structural phase transitions of ion crystals, *Scientific reports*, 6(1), 1-9, 2016.

4. Романова А.В., Рождественский Ю.В., Формирование пространственных структур заряженных микрочастиц в радиочастотных ловушках, Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ бакалавров Университета ИТМО, 151-157, 2020.
5. Vinitsky E. A., Black E. D., Libbrecht K. G., Particle dynamics in damped nonlinear quadrupole ion traps, American Journal of Physics, 83(4), 313-319, 2015.
6. Marcianti M., Champenois C., Calisti A., Pedregosa-Gutierrez J., Knoop M., Ion dynamics in a linear radio-frequency trap with a single cooling laser, Physical Review A, 82(3), 033406, 2010.

Диоды Шоттки на основе эпитаксиальных слоев 4H-SiC

Стрельчук А. М.¹, Калинина Е.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: anatoly.strelchuk@mail.ioffe.ru

Диоды Шоттки на основе карбида кремния в настоящее время предлагаются на рынке и могут быть использованы как, например, выпрямительные диоды, приемники ультрафиолетового излучения, датчики коротко-пробежных частиц. В большинстве случаев речь идет о диодах Шоттки на основе слабо-легированных эпитаксиальных слоев 4H-SiC.

Ранее, исследование диодов Шоттки на основе сильно-легированных ($\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$) эпитаксиальных слоев или подложек Лели 6H-SiC показало, что свойства диодов Шоттки и в первую очередь, по-видимому, высота барьера Шоттки, определяются целым рядом факторов (способ подготовки поверхности полупроводника, температура напыления металла, температура отжига сформированных диодов, ориентация кристалла и др.) и их нельзя спрогнозировать, учитывая только работы выхода из металла и полупроводника. Более того, даже при прочих равных условиях, - на одной и той же подложке, - может наблюдаться значительный разброс вольт-амперных (I-V) характеристик соседних диодов (до 4 и более порядков по току в области экспоненциальной зависимости тока от напряжения $I=I_0 \exp(qU(nkT))$) [1]. Исследование He^+ - облученных диодов Шоттки на основе также сильно-легированного эпитаксиального слоя, но 4H-SiC, обнаружило разброс до 10 и более порядков величины последовательного сопротивления диодов [2]. Выдвинуто предположение об обусловленности такого эффекта шунтированием диода Шоттки.

В данной работе представлены результаты исследования I-V характеристик диодов Шоттки на основе коммерчески-доступных слабо-легированных эпитаксиальных слоев 4H-SiC с концентрацией нескомпенсированных доноров $N_d - N_a = (0,4-2)10^{15} \text{ см}^{-3}$. Пленка Si для создания Шоттки контакта (толщина пленки 0.1 мкм, диаметр контакта 300 мкм) наносилась термическим распылением в вакууме при температуре, близкой к комнатной. I-V характеристики измерялись в диапазоне температур 300-500 К.

Установлено, что прямой ток в области малых токов зависит от напряжения экспоненциально $I=I_0 \exp(qU(nkT))$, коэффициент идеальности n для различных диодов на одном и том же эпитаксиальном слое близок к 1, однако I-V характеристики не совпадают и могут быть заметно сдвинуты друг относительно друга (до 0.4 В по оси напряжений и до 5 порядков по току). Таким образом, в диодах Шоттки на основе слабо-легированных эпитаксиальных слоев 4H-SiC наблюдается эффект, обнаруженный ранее в диодах Шоттки на основе сильно-легированного 6H-SiC. Прямые I-V характеристики при повышенных температурах остаются экспоненциальными. Энергия активации предэкспоненциального

множителя I_0 диодов различается и зависит от исходной (до нагрева) величины I_0 . В результате нагрева наблюдается отжиг диодов, проявляющийся в необратимом смещении прямых I-V характеристик в сторону меньших напряжений. В работе также обсуждаются обратные I-V характеристики различных диодов Шоттки на одном эпитаксиальном слое.

Т.о., исследуемые диоды Шоттки на основе слабо-легированных эпитаксиальных слоев 4H-SiC демонстрируют возможность заметного различия (до 1,5 раз) высоты потенциального барьера даже для диодов на одном эпитаксиальном слое, а также уменьшение высоты барьера вследствие относительно низкотемпературного отжига.

Список литературы

1. A.M. Strel'chuk, M.G. Rastegaeva, Characterization Schottky barriers occurring at the metal - 6H-SiC contact based on results of studies of current-voltage characteristics. Mat. Sci. Eng. B46, 379-382, 1997.
2. A.M. Strel'chuk et al., Anomalous scatter of forward current-voltage characteristics of He^+ - irradiated Ni/4H-SiC Schottky diodes. Mater. Sci. Forum 858, 749-752, 2016...

СОКРАЩЁННЫЕ НАИМЕНОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИЙ

АГЭУ

Азербайджанский государственный
экономический университет

Алфёровский университет

Санкт-Петербургский национальный
исследовательский Академический
университет им. Ж. И. Алфёрова
РАН

ВГСПУ

Волгоградский государственный
социально-педагогический
университет

ВКА

Военно-космическая академия
имени А.Ф.Можайско

ВМедА

Военно-медицинская академия
имени С.М. Кирова» МО РФ

ВНИИА

Всероссийский научно-
исследовательский институт
автоматики имени Н. Л. Духова

ВНИИФ

Всероссийский научно-
исследовательский институт
фитопатологии

ВолгГТУ

Волгоградский государственный
технический университет

ДГУ

Дагестанский государственный
университет

ИАП РАН

Институт аналитического
приборостроения Российской
академии наук,

ИвГУ

Ивановский государственный
университет

ИВС РАН

Институт высокомолекулярных
соединений РАН

ИГЕМ РАН

Институт геологии рудных
месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии Российской
академии наук

ИЛФ

Институт Лазерной Физики СО РАН

ИМЕТ РАН

Институт металлургии и
материаловедения имени А.А.
Байкова Российской академии наук

ИМСС УрО РАН

Институт механики сплошных сред
Уральского отделения РАН

ИОНХ РАН

Институт общей и неорганической
химии имени Н. С. Курнакова РАН

ИОФ РАН

Институт общей физики имени А.М.
Прохорова Российской академии
наук

ИПЛИТ РАН

Институт проблем лазерных и
информационных технологий РАН

ИПМаш РАН

Институт проблем машиноведения
РАН

ИПМех

Институт проблем механики им.
А.Ю. Ишлинского РАН

ИПМех РАН

Институт проблем механики им. А.
Ю. Ишлинского Российской
академии наук

ИПТМУ РАН

Институт проблем точной механики
и управления РАН

ИПФ РАН

Институт прикладной физики РАН

ИРНИТУ

Иркутский национальный
исследовательский технический
университет

ИСОИ

Институт систем обработки
изображений – филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника» РАН

ИФМ УрО РАН

Институт физики металлов имени М.
Н. Михеева УрО РАН

ИФП СО РАН

Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН

ИЭЭ РАН

Институт электрофизики и
электроэнергетики РАН

ИЯФ СО РАН

Институт ядерной физики имени Г.
И. Будкера СО РАН

КазНИТУ

Казахский национальный
исследовательский технический
университет имени К. И. Сатпаева,
Казахстан

КазНУ

Казахский национальный
университет имени аль-Фараби,
Казахстан

КГЭУ

Казанский государственный
энергетический университет

КубГАУ

Кубанский государственный
аграрный университет имени И. Т.
Трубилина

КубГМУ

Кубанский государственный
медицинский университет

КубГУ

Кубанский государственный
университет

КФУ

Казанский федеральный университет

КФУ им. В. И. Вернадского

Крымский федеральный университет
им. В. И. Вернадского

МАИ

Московский авиационный институт

МГУПП

Московский государственный
университет пищевых производств

Московский политех

Московский политехнический
университет

МТУСИ

Московский технический
университет связи и информатики

НГТУ им. Р. Е. Алексеева

Нижегородский государственный
технический университет им. Р. Е.
Алексеева

НИИИС

НИИ измерительных систем им.
Ю.Е. Седакова

НИИСК

Научно-исследовательский институт
синтетического каучука им.
академика С. В. Лебедева

НИФХИ им. Л.Я. Карпова

Научно-исследовательский физико-
химический институт им. Л. Я.
Карпова

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Национальный исследовательский
Нижегородский государственный
университет им. Н. И. Лобачевского

ОИВТ РАН

Объединённый институт высоких
температур РАН

ОИФ РАН

Институт общей физики им. А.М.
Прохорова РАН

ПНИПУ

Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет

РГРТУ

Рязанский государственный
радиотехнический университет им.
В. Ф. Уткина

РГСУ

Российский государственный
социальный университет

РНХИ им. проф. А. Л. Поленова

Российский нейрохирургический
институт им. проф. А. Л. Поленова

РТУ МИРЭА

МИРЭА – Российский
технологический университет

Самарский университет

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва

СГУ

Саратовский национальный
исследовательский государственный
университет имени Н. Г.
Чернышевского

СГУ им. Питирима Сорокина

Сыктывкарский государственный
университет им. Питирима Сорокина

СГУГиТ

Сибирский государственный
университет геосистем и технологий

СибГУТИ

Сибирский государственный
университет телекоммуникаций и
информатики

СКГА

Северо-Кавказская государственная
академия (СКГА)

Сколтех

Сколковский институт науки и
технологий

СПбГЛТУ им. С.М. Кирова

Санкт-Петербургский
государственный лесотехнический
университет им. С. М. Кирова

СПбГТИ (ТУ)

Санкт-Петербургский
государственный технологический
институт (технический университет)

СПбГУ

Санкт-Петербургский
государственный университет

СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова

СПбПУ

Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра
Великого

ТвГУ

Тверской государственный
университет

ТИСНУМ

Технологический институт
сверхтвёрдых и новых углеродных
материалов

ТУСУР

Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники

УлГТУ

Ульяновский государственный
технический университет

Университет ИТМО

Национальный исследовательский
университет ИТМО

Университет Лобачевского

Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского

УрГПУ

Уральский государственный
педагогический университет

УрФУ

Уральский федеральный
университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина

**УФИРЭ им. В.А. Котельникова
РАН**

Ульяновский филиал института
радиотехники и электроники им.
В.А. Котельникова РАН

ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

Федеральный исследовательский
центр «Коми научный центр
Уральского отделения Российской
академии наук»

ФТИАН им. К.А. Валиева РАН

Физико-технологический институт
РАН

ЦАГИ

Центральный
аэрогидродинамический институт
имени профессора Н. Е. Жуковского

ЧГУ

Череповецкий государственный
университет

ЧувГУ

Чувашский государственный
университет имени И. Н. Ульянова

ЮНЦ РАН

Южный исследовательский центр
РАН

ЮУрГУ

Южно-Уральский государственный
университет

Астрономия и астрофизика	3
Исследование генетических связей метеорного потока h-Виргиниды с околоземными астероидами <i>Сергиенко М. В. I, Соколова М. Г.</i>	3
Моделирование фундаментальных параметров для лунного телескопа <i>Андреев А. О., Петрова Н. К., Нефедьев Ю. А.</i>	4
Модель метеоритной опасности для космической миссии к Марсу <i>Демина Н. Ю., Нефедьев Ю. А., Андреев А. О.</i> , ...	5
Структурный анализ кометы 45P/Honda на основе изотопного моделирования <i>Чуркин К. О., Андреев А. О., Нефедьев Ю. А.</i> , ...	7
Разрушающее напряжение в коре нейтронной звезды <i>Кожберов А. А.</i>	8
Hybrid simulation of the rotational discontinuity interaction with the Earth bow shock <i>Кропотина Ю. А., Быков А. М., Артемьев А. В.</i>	9
Изучение фрактальных свойств Цереры <i>Мубаракшина Р. Р., Ахмедшина Е. Н., Андреев А. О.</i>	9
Стохастический анализ динамических процессов солнечной активности <i>Костина Е. Ю., Демина Н. Ю., Хусаенова Э. В.</i>	11
Анализ современных наблюдений метеорных потоков на основе методов ФТМ <i>Шарафутдинова А. А., Нефедьев Ю. А., Сергиенко М. В.</i>	12
Метод анализа комплекса спорадических метеоров <i>Скворцова М. Н., Андреев А. О., Нефедьев Ю. А.</i>	14
Влияние негравитационных эффектов на вернувшийся к Земле разгонный блок «Центавр» космического аппарата «Сервейер-2» <i>Мартюшева А. А.</i>	16
Разработка детекторных пикселей на основе кремниевых фотоумножителей для черенковского гамма-телескопа TAIGA-IACT <i>Богданов А. А., Тубольцев Ю. В., Чичагов Ю. В., Красильщиков А. М., Хилькевич Е. М.</i>	16
Анализ физической поверхности Титана с использованием методов мультифрактальной геометрии <i>De La Morena С. ., Ахмедшина Е. Н., Андреев А. О.</i>	17
Влияние температуры фотосферы и более глубоких слоев Солнца на спектр гамма-квантов с энергиями более 511 кэВ во время солнечных вспышек. <i>Васильев Г. И.</i>	19

О возможном влиянии 11-летнего цикла солнечной активности на климат южной Фенноскандии. <i>Огурцов М. Г.</i>	19
Магнитная турбулентность в остатках сверхновых: перспективы поляриметра IXPE <i>Уваров Ю. А., Быков А.М.</i>	20
Analytic approximations to photoabsorption cross sections of once-ionized helium in magnetar atmospheres <i>Demidov I. V., Potekhin A. Yu.</i>	21
Оптимизированная галактическая модель: следствия для астрономии, астрофизики и космогонии <i>Баренбаум А. А., Титоренко А.С.</i>	22
Изотопы бериллия в космических лучах из данных космического эксперимента PAMELA <i>Богомолов Э. А., Васильев Г.И., Менн. В.,</i>	23
Структура и вещественный состав Луны на основе построения моделей лунных сейсмических процессов <i>Кронрод Е. В., Андреев А.О.</i>	24
The candidates for Class I methanol masers <i>Nesterenok A. V.</i>	25
Long-term evolution of coronal holes on the Sun and occurrence frequencies of magnetic storms with gradual commencements <i>Veretenenko S. V., Ogurtsov M.G., Obridko V.N., Tlatov A.G.</i>	26
Dark matter as a multi-scale gravity phenomenon: Testing superfluid vacuum theory using galactic rotation curves <i>Zloshchastiev K. G.</i>	26
Аномальное ускорение вращения Земли летом 2020-ого года: возможные причины и следствия <i>Трофимов Д. А., Петров С.Д., Желтова К.В., Кияев В.И.</i>	27
Рукотворный астероид 2020 SO: исследования орбиты вернувшегося к Земле фрагмента разгонного блока американской ракеты «Centaur» <i>Петрова С. Н., Горшанов Д.Л., Девяткин А.В., Русов С.А., Львов В.Н.</i>	28
Поиск переменности жесткого рентгеновского излучения пульсарной туманности в созвездии Парусов <i>Красильщиков А. М., Быков А.М., Пширков М.С.</i>	29
Piezostack deformable mirror with high technological effectiveness <i>V. V. Toporovsky, A.V. Kudryashov, V.V. Samarkin, A.L. Rukosuev, A.A. Panich, A.I. Sokallo, A. Yu. Malykhin</i>	30
Структура МГД течений в приосевой подветренной зоне двухторовой туманности пульсара <i>Пономарёв Г. А., Левенфиш К. П., Петров А. Е.</i>	31

Большой мерджинг галактик в многокомпонентных численных моделях: перемешивание и потери газа <i>Хоперсков А. В., Титов А.В., Храпов С.С.</i>	32
Изменение солнечной активности на основе радиоуглеродных данных и вариации климата в интервале 8000–1000 лет до нашей эры <i>Дергачев В. А., Кудрявцев И.В.</i>	33
Моделирование орбитального движения пылевых частиц в процессе сублимации около белого карлика G29-38 <i>Кенжебекова А. , Шестакова Л.И.</i>	34
Динамика ленгмюровских волн при индуцированном рассеянии на тепловых электронах солнечной плазмы <i>Кудрявцев И. В.</i>	35
Подробное исследование спектральных задержек в гамма- всплеске GRB 190114C в диапазоне энергий 5 кэВ – 2 МэВ. <i>Драневич В. А., Дмитриев П.Б.</i>	35
Влияние темпа фотоионизации позитрониев на нагрев полярной шапки радиопульсара J0250+5854 <i>Барсуков Д. П., Воронцов М.В., Морозов И.К., Попов А.Н., Матевосян А.А.</i>	36
Вращение солнечной короны по данным мягкого рентгеновского излучения Солнца в течение 22, 23 и 24 циклов солнечной активности <i>Дмитриев П. Б.</i>	36
Формулировка варианта теории вложения Фаддеева в виде ОТО с дополнительной материей <i>Купцов С. С., Пастон С. А.</i>	37
Processes of solar wind-magnetosphere-ionosphere interaction and geomagnetically induced currents in the high voltage transmission systems <i>P.A. Sedykh, N.P. Konovalov</i>	38
Самосогласованная модель Монте-Карло ускорения частиц релятивистскими ударными волнами <i>Осипов С. М., Быков А.М.</i>	39
Численное моделирование поглощений в линии метастабильного гелия: случай транзита HD-189733b <i>Руменских М. С., Шайхисламов И. Ф., Березуцкий А. Г.</i>	40
Эффект поглощения гамма-квантов от далеких источников тормозным излучением горячего газа в скоплениях галактик <i>Попов А. Н., Бобашёв С. В., Иванчик А. В., Барсуков Д. П.</i>	41
Восстановление параметров солнечной активности по глубинному профилю изотопа ^{14}C и других космогенных радионуклидов в лунном грунте. <i>Фролов Д. А., Павлов А.К., Остряков В.М., Васильев Г.И, Кудрявцев И.В., Константинов А.Н., Дергачев. В.А.</i>	42

Кинетическое PIC-моделирование неустойчивостей в релятивистских ударных волнах сверхновых звезд <i>Романский В. И., Быков А.М.</i>	43
Моделирование сцинтилляционной установки Tunka-Grande через инструментарий Geant4 <i>Монхоев Р. Д., Терновой М.Ю., от коллаборации TAIGA</i>	44
Структура МГД течений в области остановки пульсарного ветра в туманностях типа Крабовидной <i>Петров А. Е., Быков А.М., Левенфиш К.П., Пономарёв Г.А.</i>	45
Несферические нуклонные кластеры в мантии нейтронной звезды: капельная модель, основанная на потенциалах типа Скирма <i>Земляков Н. А., Чугунов А.И., Щечилин Н.Н.</i>	45
Структура ветра молодой массивной звезды, сталкивающегося с оболочкой остатка сверхновой <i>Бадмаев Д. В., Быков А. М.</i>	46
Штормовая активность в северной Атлантике и вариации геомагнитного поля за последние 10 тыс. лет. Исследование причинно-следственных связей. <i>Васильев С. С., Дергачев В. А</i>	47
О проблеме непрерывного спектра г-мод <i>Краав К. Ю., Гусаков М. Е., Кантор Е. М.</i>	48
Модели обогащения космических лучей ^{22}Ne в компактных скоплениях массивных звезд <i>Каляшова М. Е., Быков А.М., Бадмаев Д.В.</i>	48
Определение эффективности пофотонной регистрации кремниевых фотоумножителей для нового детекторного кластера черенковского гамма-телескопа TAIGA-IACT с применением УФ фильтров <i>Кулешов Д. О., Симонян В.А., Богданов А.А., Тубольцев Ю.В., Чичагов Ю.В., Холупенко Е.Е., Красильщиков А.М.</i>	49
Ограничения на параметры эффективного уравнения состояния с учётом пространственной структуры облаков межгалактической среды <i>Теликова К. Н., Балашев С.А., Штернин П.С.</i>	50
Modeling of excitation of auroral kilometric radiation in a mirror-confined laboratory plasma <i>Викторов М. Е., Чернышев А.А., Чугунин Д.В., Мансфельд Д.А., Могилевский М.М.</i>	52
Сравнение различных источников гамма-излучения, доступных в лабораторных условиях <i>Рачков К. И., Попов А. Н., Бобашёв С. В., Безверхний Н. О., Сорокин А. А.</i>	52
Физические условия в диффузной фазе межзвездной среды <i>Косенко Д. Н., Балашев С.А.</i>	53

Моделирование горячего Юпитера HD-209458b и интерпретация наблюдательных проявлений <i>Шайхисламов И. Ф.</i> , Ходаченко М.Л., Мирошниченко И.Б., Руменских М.С., Березуцкий А.Г.	54

Биофизика	55

Исследование фрактальной структуры МЭГ сигналов человека при воздействии световых стимулов разных цветовых комбинаций <i>Демин С.А.</i> , Русанова И.А., Юнусов В.А., Минкин А.В.	55
Поиск статистических паттернов патологической активности на ЭЭГ-сигналах человека при фокальной эпилепсии <i>Юнусов В.А.</i> , Демин С.А., Панищев О.Ю.	56
ФШС-параметризация магнитоэнцефалограмм человека для диагностики светочувствительной эпилепсии <i>Хайруллина Р.Р.</i> , Демин С.А., Юнусов В.А., Панищев О.Ю.	58
Влияние эффекта лазерно-индуцированной термокоагуляции на оптические спектры тканей головного мозга <i>Исрапов Э. Х.</i> , Гираев К.М., Ашурбеков Н.А., Магомедов М.А.	60
Исследование низкотемпературного воздействия на биоткани животного происхождения с использованием протяженного криоаппликатора <i>Пушкарев А.В.</i> , Андреев Н.А.	61
Physical model for effects of microwaves on nucleoids in living cells: role of carrier frequency, modulation and DC and AC magnetic field <i>Matronchik A.Y.</i> , Belyaev I.Y.	62
Исследование применимости Silastic T-4, PlatSet 30 и Lasil-C для микрофлюидных устройств <i>Гермаш Н. Н.</i> , Есикова Н.А., Афоничева П.К., Евстапов А.А.	64
Конформационные переходы филамента RecA на однонитевой ДНК в присутствии белка RecX <i>Сердаков М. Д.</i> , Алексеев А.А. , Побегалов Г.Е. , Якимов А.П. , Байтин Д.М. , Ходорковский М.А.	65
Разработка и исследование линейки миниатюрных электрохимических сенсоров обучаемой медико-биологической диагностической системы <i>Созинова О. Ю.</i> , Зайцева А.Ю.	67
Использование самообучающихся нейронных сетей и метода главных компонент для автоматизации оптического анализа кислородного статуса тканей человека <i>Мазинг М. С.</i> , Зайцева А.Ю.	68
Protein secondary structure analysis of serum from patients with oncohematological diseases <i>Mikhailits E.S.</i> , Chernyshev D.A., Telnaya E.A., Plotnikova L.V., Garifullin A.D., Kuvshinov A.Yu., Voloshin S.V., Polyanichko A.M.	69

Численное исследование тепловой динамики в многокомпонентных биологических тканях <i>Поляков М. В., Хоперсков А.В.</i>	70
Создание микро- и наноканалов на поверхности кремниевых чипов методами литографии и исследование ионного транспорта в каналах. <i>Афоничева П. К., Лебедев Д.В., Букатин А.С., Мухин И.С., Евстапов А.А.</i>	71
Спектральная оценка тканей зубов при пародонтите до и после открытого кюретажа <i>А.Ю. Ионов, П.Е. Тимченко, Е.В. Тимченко, О.О. Фролов, И.В. Бажутова, Л.Т. Волова, М.А. Зыбин</i>	73
Использование формализма комплексного электрического модуля для мониторинга онкологических заболеваний <i>Сальникова Ж. А., Кастро Р.А.</i>	74
Параметрическая модель плавления ДНК оптимального порядка <i>Белов Д. А., Белов Ю.В., Буляница А.Л.</i>	75
Модификация поверхности полиимидной пленки в барьерном разряде для клеточных технологий <i>Целуйко К. С., Камалов А.М., Диденко А.Л., Борисова М.Э., Бондаренко П.Н., Колбе К.А., Смирнова Н.В., Юдин В.Е.</i>	77
Изучение эффективности оптического просветления кожи <i>in vivo</i> и <i>ex vivo</i> биосовместимыми оптическими просветляющими агентами в сочетании с физическими усилителями проницаемости <i>Зайцев С. М., Генина Э. А., Тучин В. В.</i>	78
Наносекундная динамика и особенности разрушения компактной костной ткани <i>Махмудов А. Х., Махмудов Х. Ф., Файзуллаева Ш. Х.</i>	80
Рентгеноспектральная диагностика локального окружения ионов цинка в липидных слоях арахидоновой кислоты <i>Кременная М. А., Пронина Е.В., Недоедкова О.В., Лысенко В.Ю., Новикова Н.Н., Якунин С.Н., Рогачев А.В., Яловега Г.Э.</i>	82
Роль механических напряжений в дорсальной аорте Данио-рерио в процессе производства стволовых клеток <i>Голушко И. Ю., Чалин Д.В.</i>	83
Адаптация технологии ECIS для исследования суспензионных клеток <i>Ступин Д. Д., Абелит А.А.</i>	85
Влияние копияности компонент системы рестрикции-модификации II типа на бактериальную защиту <i>Кириллов А. А., Морозова Н. Е., Ходорковский М.А., Северинов К.В.</i>	86
Инактивация бактерий с возбуждением высоких электронных состояний молекул-красителей в растворах <i>Ишемгулов А. Т., Летута С.Н., Раздобреев Д.А.</i>	87

Молекулярное моделирование постдиффузионной стадии процесса оптического просветления биотканей под действием водного раствора йогексола <i>Шагаутдинова И. Т., Березин К. В., Дворецкий К. Н., Нечаев В.В., Лихтер А.М., Тучин В.В.</i>	88
Сравнительный анализ вторичной структуры негистоновых белков хроматина HMGB1 и HMGB2 <i>Осинникова Д. Н., Чихиржина Е.В., Поляничко А.М.</i>	90
Влияние концентрации дезоксирибонуклеотидтрифосфатов на кинетику флуоресцентного сигнала полимеразной цепной реакции: теоретическая оценка <i>Федоров А. А.</i>	91
Multi factor analysis of infrared spectra of blood serum of patients with multiple myeloma <i>Chernyshev D.A., Mikhailets E.S., Telnaya E.A., Plotnikova L.V., Garifullin A.D., Kuvshinov A.Y., Voloshin S.V., Polyanichko A.M.</i>	93
Коллективные эффекты в электрической активности коры головного мозга человека при когнитивной деятельности <i>Панищева С. Н., Панищев О.Ю., Дёмин С.А., Исаева А.Г., Латыпов Р.Р.</i>	94
Коллективные возбуждения в активных жидкостях: нарушение спектрального равновесия кинетической энергии из-за микропотоков <i>Крючков Н. П., Юрченко С.О.</i>	95
Study of hydrodynamic interaction in tunable chiral colloids in rotating electric fields <i>Яковлев Е. В., Либет П.А., Юрченко С.О.</i>	96
Матфизика и численные методы	99
Модель микро-/наномотора с магнитным приводом <i>Мартынов С. И., Ткач Л.Ю.</i>	99
Физическое моделирование масштабно-структурного усталостного разрушения материалов лопаток газотурбинных двигателей при осевом многоцикловом нагружении с несимметричным циклом <i>Завойчинская Э. Б.</i>	100
Regular electrically charged objects in Nonlinear Electrodynamics coupled to Gravity <i>Dymnikova I. , Galaktionov E.</i>	102
Моделирование распространения пульсовой волны с использованием одномерных моделей гемодинамики <i>Кривовичев Г. В., Егоров Н. В.</i>	103

Устойчивость волн супратрансмиссии в кристалле стехиометрии A_3B при взаимодействии с одиночными дислокациями <i>Захаров П. В., Луценко И.С., Старостенков М.Д.</i>	104
Торможение малых заряженных тел в разреженной плазме <i>Гулько Н. А., Гулько Ю.Ф.</i>	105
О квантовом аналоге неустойчивых осциллирующих состояний перевернутого осциллятора в полигармоническом внешнем поле <i>Чистяков В. В.</i>	106
Применение теории жидких мостов для нахождения формы менисков расплава при выращивании цилиндрических кристаллов <i>Галактионов Е.В., Бахолдин С.И., Галактионова Н.Е., Тропп Э.А.</i>	107
Математическая оптимизация технологии уменьшения шероховатости металлических поверхностей <i>Константинова А. А., Якупов З.Я., Галимова Р. К.</i>	108
Моделирование процессов теплообмена при выращивании кристаллов сплава FeNiGaCo <i>Васильев М.Г., Крымов В.М., Носов Ю.Г., Бахолдин С.И.,</i>	111
Алгоритм расчета плотности состояний трехмерной модели Изинга <i>Егоров В. И., Крыжановский Б.В.</i>	112
Вязкоупругая релаксация волн деформации в полимерных телах <i>Гарбузов Ф. Е., Бельтюков Я. М.</i>	113
Обобщение задачи Фурье о колебаниях температуры земной коры <i>Бахрачева Ю. С., Афанасьев А.А</i>	114
Особенности подавления широкополосных помех в нейросетевой адаптивной антенной решётке с калмановской фильтрацией <i>Забелин А. Н., Литвинов О.С.</i>	115
Наноструктурированные и тонкопленочные материалы 117	
Многофотонные межподзонные переходы в кресельной ленте графена в поле сильной электромагнитной волны <i>Монозон Б. С., Федорова Т. А., Шмельхер П.</i>	117
НЧ шумовая спектроскопия как метод диагностики солнечных элементов типа НІТ <i>Ермачихин А. В., Воробьев Ю.В., Трусов Е.П., Литвинов В.Г.</i>	119
Исследование фотокаталитической активности наноструктурированного оксида цинка <i>Гриценко Л. В., Палтушева Ж.У., Кедрук Е.Ю., Абдуллин Х.А.</i>	120
Влияние термической обработки на гальваномагнитные свойства объемных наноструктурированных образцов твердого раствора $Bi_{85}Sb_{15}$ <i>Taghiyev M. M., Abdinova G. C, Abdullayeva I. A.</i>	122

Особенности процесса формирования состояния памяти в тонких пленках халькогенидного полупроводника $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ <i>Фефелов С. А., Казакова Л.П., Богословский Н.А., Былев А.Б., Якубов А.О.</i>	123
Исследование нелинейных оптических явлений в кремниевых и оксидных сферических частицах <i>Масталиева В. А., Николаева А. А., Неплох В.В., Еуров Д. А.,Макаров С.В., Курдюков Д.А.,Стовляга Е.Ю., Голубев В.Г., Мухин И.С.</i>	124
Исследование оптических свойств рекристаллизованных неорганических перовскитных наночастиц CsPbBr_3 в нетканых фторполимерных волокнах <i>Баева М. Г., Неплох В.В., Маркина Д.И., Павлов А.М., Кириленко Д.А., Мухин И.С., Пушкарёв А.П., Макаров С.В., Сердобинцев А.А.</i>	126
Nanostructuring of ultra-high-molecular-weight polyethylene in thermal and mechanical fields as revealed by DSC technique <i>Myasnikova L., Egorov V., Borisov A., Boiko Yu., Ivan'kova E., Marikhin V., Radovanova E.</i>	127
Адсорбционные сенсоры на основе нитевидных нанокристаллов кремния для детектирования угарного газа и аммиака <i>Кондратьев В. М., И. А. Морозов', Е. А. Вячеславова', А. С. Гудовских', С. С. Налимова, В. А. Мошников, Д. А. Кириленко и А. Д. Большаков'</i>	128
Построение барьерных гетероструктур на основе углеродных и металлоорганических соединений <i>Мазин А. С., Гурченко В.С.,Тютюник А.С., Ильина В.Ю., Дмитриев А.И.</i>	130
Теплопроводность РСМ-материалов на основе композита, состоящего из н-алкана и наноразмерных добавок <i>Борисов А. К., Егоров В.М., Марихин В.А.</i>	131
Влияние конформационных дефектов на развитие структурных фазовых переходов в тетракозане $\text{C}_{24}\text{H}_{50}$ <i>Гурьева С. А., Марихин В.А., Волчек Б.З., Медведева Д.А.</i>	133
Новые сорбенты для электрохроматографии на основе полимерно-неорганических диэлектрических композиционных материалов <i>Шмыков А. Ю., Мякин С.В., Бубис Н.А., Есикова Н.А., Кузнецов А.М., Федоров А.А., В.Е. Курочкин</i>	134
Влияние механизма зародышеобразования на кинетику кристаллизации тонких пленок материалов фазовой памяти в условиях линейного нагрева <i>Воробьев Ю. В., Ермачихин А.В., Лазаренко П.И., Козюхин С.А.</i>	136
Влияние химического травления в растворе КОН на морфологию GaN ННК выращенных пространственно-селективным методом МПЭ <i>Лендяшова В. В., Котляр К.П., Гридчин В.О., Резник Р.Р., Лихачев А.И., Сошников И.П., Цырлин Г.Э.</i>	137
Изучение влияния различных факторов на структуру и магнитные свойства сплавов $(\text{Sm},\text{Er})_2\text{Fe}_{17}$ <i>Терёшина И. С., Веселова С.В., Акимова О.В., Карпенков Д.Ю., Вербцкий В.Н.</i>	138

Исследование характеристик наночернил на водной основе для цифровой струйной печати на керамике <i>Климатов К. А., Ваганов В.В., Круглов А.И.,.....</i>	139
Диэлектрические и тепловые свойства органического сегнетоэлектрика (R)-3-хинуклидинола, внедренного в пористое стекло <i>Милинский А. Ю., Барышников С.В., Чарная Е.В., Ускова Н.И.</i>	140
Низкотемпературные особенности тепловых и магнитных свойств нанокompозита свинец-пористое стекло в магнитном поле <i>Шитов А. Е., Михайлин Н. Ю., Кумзеров Ю.А., Шамшур Д. В.</i>	142
Неравновесные методы синтеза и модификации свойств оксида галлия <i>Никольская А. А., Королев Д.С., Е.В. Окулич, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.В. Нежданов, В.Н. Трушин, Д.Е. Николичев, Ю.И. Чигиринский, А.В. Алмаев, М. Kumar, R. Giulian, Д.И. Тетельбаум.....</i>	143
Водостойкие галогенидные перовскитные нанокристаллы для визуализации апконверсии в живой клетке <i>Тальянов П. М., Пельтек О.О., Машарин М.А., Хубежов С.А., Баранов М.А., Драбавичюс А., Тимин А.С., Зеленков Л.Е., Пушкарев А.П., Макаров С.В., Зюзин М.В.....</i>	145
Исследование модификации при электролизе пленок графена, предназначенных для изготовления биосенсоров <i>Елисеев И. А., Усиков А.С., Лебедев С.П., Роенков А.Д., Пузык М.В., Зубов А.В., Макаров Ю.М., Лебедев А.А., Гущина Е.В., Воронина А.А., Шабунина Е.И., Шмидт Н.М.</i>	146
Модуляция состава в гетеросистеме $Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}-InP$ при спиновом распаде в условиях внутреннего энергетического резонанса <i>Кузнецов В. В., Москвин П.П., Скуратовский С.И., ...</i>	148
Тонкие нанокристаллические полупроводниковые пленки в качестве селективных химических сенсоров аммиака, ацетона, пропана и гексана <i>Чистяков В. В., С.А. Казаков, М.А.Гревцев, С.М. Соловьёв</i>	149
Electrical properties of CdFeSe, CdMnTe epitaxial films <i>М.А. Mehrobova, Н.Н. Nuriyev, Н.Н. Hasanov, R.М. Sadigov, V.G. Guluzade, А.М. Nazarov, N.I. Huseynov, N.R. Gasimova</i>	151
Магнитные и резонансные свойства поликристаллов $Y_{0.5}Sr_{0.5}Cr_{0.5}Mn_{0.5}O_3$ <i>Патрин Г. С., М.М. Матаев, К.Ж. Сейтбекова, Я.Г. Шиян, В.Г. Плеханов.....</i>	152
Наноразмерная автоэмиссионная ячейка на основе графеновых пленок на SiC <i>Ревенко Я. О., Житяев И. Л., Светличный А. М.</i>	153
Фазовые переходы в решетке полосовых доменов пленки феррита-граната <i>Безус А. В., Сирюк Ю.А., Капшуков Р.А., Кононенко В.В.....</i>	154
Ultra-heat resistant phthalonitrile nanocomposites based on heterocyclic networks: structure, properties, origin of thermal stability <i>Якушев П. Н., Bershtein V.A., Fainleib A.M., Kirilenko D.A., Melnychuk O.G.</i>	156

Синтез гексагональной фазы 9R-Si при вариации режимов ионной имплантации <i>Королев Д. С., А.А. Никольская, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, Д.И. Тетельбаум</i>	157
Влияние магнитного поля на формирование и свойства нанокompозитов поливиниловый спирт - многостенные углеродных нанотрубки <i>Васин С. В., Низаметдинов А.М., Ефимов М.С., Сергеев В.А.</i>	158
Особенности роста наноструктур InP на подложках Si(111) в квазиравновесных условиях <i>Власов А. С., Карлина Л.Б., И.В. Илькив, А.В. Вершинин, И.П. Сошников</i>	160
Контактная литография тонких слоёв дихалькогенидов переходных металлов <i>Бородин Б. Р., Бенимецкий Ф. А., Алексеев П. А.</i>	161
Критическое поведение двумерной ферромагнитной пленки на немагнитной подложке <i>Белим С. В., Мальцев И.В., Бычков И.В.,</i>	163
Кластеризация в тонких пленках серебра при нагреве <i>Казаков В. А., Разина А.Г., Смирнов А.В.</i>	164
Влияние обработки поверхностной электромагнитной волной на электрооптические свойства ИТО плёнок с углеродными нанотрубками <i>Тойка А. С., Каманина Н.В.</i>	165
Исследование поверхности разрушения титана VT1-0 в различных структурных состояниях, в том числе с нанесенными МДО покрытиями <i>Нарыкова М. В., Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Колобов Ю.Р.</i>	167
Способ определения средней длины углеродных нанотрубок на основе измерения сопротивления случайно ориентированного массива <i>Воробьев А.А., Митин Д.М., Бердников Ю.С., Можаров А.М., Мухин И.С.</i>	168
Исследование электрофизических и газочувствительных свойств тонких пленок ZnO-SnO ₂ , сформированных золь-гель методом <i>Старникова А. П., Гуляева И.А., Стороженко В.Ю., Волкова М.Г., Баян Е.М., Петров В.В.</i>	170
Лазерный синтез сферических наночастиц нитрида галлия <i>Черников А. С., Кочуев Д. А., Чкалов Р. В.</i>	171
Зависимость морфологии поверхности эпитаксиальных пленок топологического изолятора PST от ростовой температуры <i>Кавеев А. К., Бондаренко Д.Н., Терещенко О.Е.</i>	172
Исследование фотоэлектрохимических свойств фотоанодов на основе массивов нанотрубок анодного оксида титана <i>Савчук Т. П., Гаврилин И.М., Дронов А.А.</i>	173
Методика анализа угловых зависимостей критического тока сверхпроводящих лент <i>Гурьев В. В., Шавкин С.В., Круглов В.С.,</i>	174

Анизотропные нанокластеры золота на кристаллических поверхностях GaAs(001), пассивированных азотом или серой: создание, структурная диагностика, плазменная спектроскопия. <i>Берковиц В. Л., Кособукин В.А., Улин В.П., Алексеев П.А., Солдатенков Ф.Ю., Левицкий В.А.</i>	175
Субмикронные кристаллические частицы кремния, полученные на нановолокнистом нетканом материале <i>Захаренко Н. Д., И.С. Ожогин, А.А. Сердобинцев, А.В. Стародубов, И.О. Кожевников, А.М. Павлов.</i>	176
Исследование упругих напряжений в конических нанопроводах <i>Дунаевский М. С., Алексеев П.А.</i>	177
Изучение электропроводящих свойств растворов аспарагината хитозана для получения наночастиц <i>Луговицкая Т. Н., Зудина И.В., Шиповская А.Б.</i>	178
Влияние обработки подложки Si фокусированными ионными пучками на эпитаксиальный рост GaAs <i>Ерёменко М. М., Черненко Н.Е., Балакирев С.В., Солодовник М.С., Агеев О.А. ...</i>	180
Изучение диффузии алюминия в тонких пленках аморфного кремния под воздействием лазерного излучения <i>Солодовникова С. О., Волковойнова Л.Д., Сердобинцев А.А., Стародубов А.В., Кожевников И.О., Павлов А.М.</i>	181
Эволюция кристаллографической текстуры в сплавах системы Cu-Zn, подвергнутых интенсивной пластической деформации <i>Зайнуллина Л. И., Ситдилов В.Д., Александров И.В.</i>	182
Текстурообразование в крупнозернистом и ультрамелкозернистом сплаве Cu-0,5Cr при плоской прокатке <i>Саркеева Е. А., Ситдилов В. Д., Александров И. В.</i>	184
Исследование кинетики релаксации заряда в полиэтилене с нанонаполнителями <i>Павлов А. А., Камалов А. М., Борисова М. Э., Грешняков Г. В.</i>	185
Исследование оптических свойств эпитаксиальных гранатовых пленок, активированных Ce^{3+} <i>Васильева Н. В., Спасский Д.А., Куросава Ш., Омельков С.И., Кочурихин В.В., Васильев Д.А.</i>	186
Резистивное переключение в наноструктурированных слоях LiTaO_3 <i>Белов А. Н., Солнышкин А.В., Пестов Г.Н.</i>	188
Метод получения композиционных материалов на динамической платформе из магнитоуправляемых частиц <i>Шорсткий И. А., Соснин М.Д.</i>	189
Structure of GaN grown from vapor phase on seeded layer of gallium melt <i>Мынбаева М. Г.</i>	190

Разработка лабораторного стенда искрового спекания пористого кремния <i>Мирошниченко О. В., Спивак Ю.М., Мошников В.А.</i>	191
Исследование режимов осаждения Ga_2O_3 при газофазной эпитаксии <i>Сахаров А. В., Лундин В.В., Родин С.Н., Сахаров А.В., Артеев Д.С., Елисеев И.А., Давыдов В.Ю., Смирнов А.Н., Цацульников А.Ф., Яговкина М.А.</i>	193
Ab initio расчеты электронной структуры графена на поверхности Co_2FeSi <i>Лобанова Е. Ю., Михайленко Е.К., Дунаевский С.М., Гребенюк Г.С.</i>	194
Формирование силицидов кобальта под графеном, выращенным на поверхности карбида кремния. <i>Гребенюк Г. С., Лобанова Е. Ю.</i>	196
Симметричные особенности сортировки углеродных нанотрубок <i>Коневцова О. В., Рошаль Д.С., Дмитриев В.П., Рошаль С.Б.</i>	197
Изготовление и комплексное исследование LAFE на основе УНТ методом PECVD с островковым катализатором <i>Чумак М. А., Рокачева А.А., Филатов Л.А., Колоско А.Г., Филиппов С.В., Попов Е.О.</i>	198
Фокусировка диаметров в ансамблях нитевидных нанокристаллов фосфида галлия при эпитаксиальном росте на подложках кремния без литографической подготовки <i>Бердников Ю. С., Н.В. Сибирев, В. В. Фёдоров, С. В. Федина, Г. А Сапунов, А. Д. Большаков, И.С. Мухин</i>	200
Электрохимическое формирование модифицированных оловом нитевидных нанокристаллов Ge из водных растворов <i>Гаврилин И. М., Захаров А.Н., Мартынова И. К.</i>	201
Исследования методом спектроскопии КРС свойств наноуглерода, применяемого в качестве электродного материала литий-ионных аккумуляторов <i>Смирнов А. Н., Елисеев И. А., Давыдов В.Ю., Платонов А.В., Явсин Д.А., Гуревич С.А.</i>	203
Энергетический спектр, оптическое поглощение эндоэдральных комплексов $Er_2C_2@C_{90}$ на основе изомеров №21 и №44 <i>Жуманазаров А. П., Мурзашев А.И., Кокурин М.Ю.,</i>	205
Неаффинные деформации аморфных наноструктур <i>Семенов А. А., Конюх Д.А., Бельтюков Я.М.</i>	206
Изготовление острия зондов методом ФИП для нанодиагностики поверхности твердых тел методом атомно-силовой микроскопии. <i>Родригес Д.Х., Баллоук А.Х., Котосонова А.В., Осотова О.И., Коломийцев А.С.</i> ..	208
Исследование фотокаталитических свойств гетероструктур Cu_xO-TiO_2 на основе массивов нанотрубок анодного оксида титана <i>Пинчук О. В., Савчук Т.П., Иванова Е.А., Дронов А.А.</i>	209

Исследование фотоэлектрических свойств наноструктурированных барьеров шоттки Au- Pd-n-GaP <i>Давыдов Р. В., Мелебаев Д., Шамухаммедова М., Рудь В.Ю.</i>	211
Изучение оптических свойств нанокompозитного покрытия NiO/AuNP/NiO, перенесенного на прозрачное гибкое основание <i>Эннс Я. Б., Кондратьева А.С., Комаревцев И.М., Казакин А.Н., Мишин М.В.</i>	212
Исследование электрофизических параметров тонких пленок пористого анодного оксида алюминия <i>Муратова Е. Н., Налимова С.С., Бобков А.А., Мошников В.А.</i>	213
Стабильность и устойчивость звездообразного палладийсодержащего катализатора по отношению к реакции щелочного окисления метанола <i>Пушанкина П. Д., Луценко И.С., Глазкова Ю.С., Мальков Т.И., Барышев М.Г., Петриев И.С.</i>	215
Синтез гетероструктурированных InGaN нитевидных нанокристаллов методом молекулярно-пучковой эпитаксии на кремнии <i>Гридкин В. О., Резник Р.Р., Котляр К.П., Лендяшова В.В., Драгунова А.С., Крыжановская Н.В., Кириленко Д.Ю., Цырлин Г.Э.</i>	216
Гибридные III-V наноструктуры комбинированной размерности на кремнии <i>Резник Р. Р.</i>	217
Молекулярно-пучковая эпитаксия массивов самокаталитических вертикальных нитевидных нанокристаллов GaP с заданной морфологией и высокой поверхностной плотностью на подложках Si (111) <i>Федина С. В., Сапунов Г. А., Бердников Ю. С., Федоров В. В., Мухин И. С.</i>	219
Разработка подходов к формированию планарного электровакуумного диода на основе массива из УНТ, синтезированных на торце пленки Co-Nb-N-(O) <i>Ерищян Г. С., Громов Д.Г., Дубков С.В., Кицюк Е.П., Савицкий А.И., Дудин А.А.</i> 3	220
Optical and electrical properties of CdSe/CdS/ZnS quantum dots Langmuir monolayer <i>AL-ALwani A. J., Mironyuk V.N., Begletsova N.N., Glukhovskoy E.G.</i>	221
Плазмохимическое осаждение фосфида галлия при низких температурах <i>Уваров А. В., Баранов А.И., Вячеславова Е.В., Максимова А.А., Морозов И.А., Кудряшов Д.А., Гудовских А.С.</i>	222
Влияние температуры субфазы на морфологию пленки Ленгмюра-Блоджетт арахидоновой кислоты, содержащей наночастицы меди <i>Беглецова Н. Н., Миронюк В. Н., Аль-Алвани А.Ж.К., Глуховской Е. Г.</i>	223
Influence of plasmon resonance on the luminescence of thin oxide films doped with rare earth ions <i>Lapinski Marcin , Sadowski Wojciech , Kuznetsov Vladimir V., Charykov Nikolay, Koscielska Barbara</i>	224

Подавление релаксации высших поляризационных моментов щелочных атомов в сверхчастых спин-обменных столкновениях <i>Окуневич А. И.</i>	226
Оптические свойства монокристаллов $\text{CsGd}(\text{MoO}_4)_2$ с двойным допированием ионами Tb^{3+} - Yb^{3+} <i>Рядун А. А., Рахманова М.И., Трифанов В.А., Павлюк А.А.</i>	227
Оптимизация структур кремниевых наносфер для фокусировки света <i>Устименко Н. А., Барышникова К. В., Мельников Р. В., Корнован Д. Ф., Ульянцев В. И., Евлюхин А. Б.</i>	228
Спектральный метод исследования структуры сигнала ядерного магнитного резонанса <i>Макеев С. С.</i>	229
Численное моделирование плазмонной линзы для фокусировки лазерного излучения <i>Козлова Е. С., Котляр В. В.</i>	231
NEXAFS исследования карбонат-замещенного биоапатита <i>Петрова О.В., Бакина К.А.</i>	232
Спектральная фурье-микроскопия переодических структур на основе аморфных и кристаллических пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ <i>Соломонов А. И., С.И. Павлов, П.И. Лазаренко, В.В. Ковалюк, А.Д. Голиков, А.И. Проходцов, Г.Н. Гольцман, С.А. Козюхин, С.А.Дьяков, Н.А.Гиппиус, С.Г.Тиходеев, А.Б. Певцов</i>	234
Нелинейная оптическая динамика двумерных сверхрешёток квантовых Λ -излучателей <i>Рыжов И. В., Маликов Р. Ф., Малышев А. В., Малышев В. А.</i>	235
Новая методика исследования магнитной дорожки от подвижного объекта <i>Логунов С. Э.</i>	237
Температурная зависимость оптического пропускания монокристаллов германия <i>Иванова А. И., Третьяков С.А., Иванов А.М., Мариничева К.А., Молчанов С.В., Каплунов И.А.</i>	238
Исследование нелинейно-оптических характеристик кристалла $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ <i>Ерушин Е. Ю., Костюкова Н.Ю., Грибачёва Ю.С., Бойко А.А., Колкер Д.Б., Бадиков Д.В., Бадиков В.В.</i>	239
Спектральные исследования висмутосодержащих керамик со структурой пироклора <i>Некипелов С. В., Жук Н.А., Петрова О.В., Сивков Д.В., Бакина К.А., Богачук Д.В., Скандаков Р.Н., Сивков В.Н.</i>	241
C_{60} optical constants in the NEXAFS C1s region <i>Sivkov D. V., Nekipelov S. V., Petrova O. V., Bogachuk D. V., Skandakov R. N., Sivkov V. N.</i>	242

Анизотропия оптических и электронных свойств в объемном Ga_2O_3 Дементьева Е. В., Дементьев П.А., Д. Ю. Панов, А.Е. Романов, В.Е. Бугров, Заморянская М.В.	243
Моделирование плазмонного резонанса наночастиц серебра на поверхности кремния Большаков В.О., Жарова Ю.А., Толмачев В.А., Ерина А.А.	244
Применение спектроскопии комбинационного рассеяния для исследования процессов поверхностной графитизации алмаза фемтосекундным лазерным излучением в одноп импульсном режиме Хомич А. А., Кононенко В. В., Козлова М. В., Поклонская О. Н., Хмельницкий Р. А.	245
Исследование физических свойств объемных кристаллов $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ полученных из расплава методом Чохральского Спиридонов В. А., Панов Д.Ю., Закгейм Д.А., Кремлева А.В., Смирнов А.М., Бауман Д.А., Романов А.Е., Бугров В.Е.	247
Влияние малых добавок германия на оптические свойства халькогенидного стекла $\text{As}_{30,5}\text{S}_{44,5}\text{I}_{25}$ Клинков В. А.	248
Микромеханические устройства управления световыми потоками посредством магнитного поля Корнеев В. С., Шергин С.Л.	250
Кинетика экситонного излучения атомарно тонких слоев дисульфида молибдена Елисеев И. А., Галимов А. И., Рахлин М. В., Давыдов В. Ю., Thiele S., Pezoldt J., Шубина Т. В.	251
Оптические исследования плёнок оксида индия на сапфировых подложках Тихий А. А., Жихарева Ю.И. и Жихарев И.В.	252
Нелинейная оптическая динамика сверхрешёток квантовых V-излучателей Байрамдурдыев Д. Я., Маликов Р. Ф., Рыжов И.В., Малышев В.А.	254
Влияние затухания на генерацию оптических вихрей в мультигеликоидальных волокнах Лапин Б. П., Алексеев К.Н., Алиева С.С., Баршак Е.В., Яворский М.А.	255
Исследование воздействия сульфата меди на спектральные характеристики гречихи посевной Горяинов В. С., Бузников А.А.	258
Интегральный радиофотонный фильтр на основе селективного элемента в виде Брэгговской решетки и фотонного кольцевого резонатора Зарецкая Г. А., Дроздовский А.В.	260
Особенности оптической активности неидеальных молекулярных кристаллов, обусловленные наличием структурных дефектов Румянцев В.В., Рыбалка А.Е., Федоров С.А., Гуменник К.В.	261

Влияние квантовых флуктуаций на солитонные режимы в микролазерах <i>Федоров С. В., Веретенев Н. А., Розанов Н. Н.</i>	262
The Rayleigh wave scattering on a rectangular discontinuities lattice of an isotropic solid three-dimensional roughness in the Laue-Bragg-Wulff limit <i>Чуков В. Н.</i>	264
Исследование градиентного Yb,Er:PPLN усилителя <i>Строганова Е. В., Галуцкий В.В., Куплевич М. А., Понетаева И.Г., Пузановский К.В.</i>	266
Анализ деформаций и оптических возмущений прозрачных материалов с помощью датчика волнового фронта на эффекте Тальбота <i>Музыка А. Ю., Андреев С.Н., Казанцев С.Ю.,</i>	267
Разработка волоконно-оптической линии связи с кодовым разделением каналов <i>Поповский Н. И.</i>	268
Стационарный режим работы одноатомного лазера в Q-представлении <i>Ларионов Н. В.</i>	270
Исследование мультчастотного зондирования оптической плотности жидких сред <i>Алексеев В.А., Усольцев В.П., Юран С.И., Бузилов С.В.</i>	272
Структурные, оптические и люминесцентные свойства кристаллов $Gd_3Al_xGa_{5-x}O_{12}$ ($x = 0,1,2,3$) <i>Спаский Д.А., Федюнин Ф.Д., Морозов В.А., Забелина Е.В., Касимова В.М., Козлова Н.С., Бузанов О.А.</i>	274
Frequency shift of the magnetic resonance at the spin exchange collisions between K and Li atoms. <i>Kartoshkin V. A.</i>	275
О временной задержке сигнала при использовании пучка Гаусса <i>Галинский М. К., Румянцев В.В., Фёдоров С.А.</i>	276
Трубчатые топологические светло-темные и темные лазерные солитоны <i>Розанов Н. Н., Веретенев Н.А., Федоров С.В.,</i>	277
Оптическое детектирование магнитного резонанса в наночастицах карбида кремния гексагонального поли типа <i>Лихачев К. В.¹, Бреев И.Д.², Нагалюк С.С.², Анкудинов А.В.², Анисимов А.Н.²</i>	278
Разработка методики количественного сравнения светимости самосветящихся кристаллов - основных элементов источника малого тока <i>Мягих М. К., Дементьев П.А., Заморянская М.В.</i>	279
Спектральный анализ биоматериалов из ювенильного дентина <i>Шипко С. С., Тимченко Е.В., Тимченко П.Е., Волова Л.Т., Фролов О.О., Власов М.Ю.</i>	280

Исследования липидного состава минерального компонента компактной костной ткани с помощью оптического метода <i>Самигуллин Р. Т., П.Е. Тимченко, Е. В. Тимченко, Е.В. Писарева, М. Ю. Власов, О. О. Фролов, Л. Т. Волова, Д.А. Романова, С.С. Сергеева, А.Ю. Ларина</i>	281
Спектроскопия комбинационного рассеяния для оценки структурных изменений твердых тканей зубов после офисного отбеливания <i>Козлова Т. В., Тимченко Е.В., Тимченко П.Е., Фролов О.О., Магсумова О.А., Волова Л.Т., Постников М.А., Полканова В.А., Оруджов Н.М.</i>	283
Разработка методов оптического просветления пигментированной кожи человека <i>in vivo</i> <i>Серебрякова И. А., Сурков Ю.И., Лазарева Е. Н., Юссуф А. А. , Башкатов А.Н. , Генина Э.А. , Тучин В. В.</i>	284
Лауэ дифракция рентгеновских микропучков в многослойных структурах <i>Пунегов В. И.</i>	286
Нестационарные голографические токи в кристалле β -Ga ₂ O ₃ на длине волны света $\lambda=457$ nm <i>Брюшинин М. А., Соколов И.А.</i>	287
Исследование центров окраски в радиационно-модифицированных алмазах <i>Козлова М. В., Хомич А. А., Хмельницкий Р. А., Аверин А. А., Ковалев А. И., Хомич А. В., Ральченко В. Г.</i>	288
Исследование структурных превращений в облученных быстрыми нейтронами алмазах методами спектроскопии электронного спинового резонанса и комбинационного рассеяния света <i>Поклонская О. Н., Лапчук Н. М., Хомич А. А., Вырко С. А., Олешкевич А. Н., Хомич А. В., Поклонский Н. А.</i>	289
Применение рентген – флуоресцентного анализа для идентификации красочных пигментов русских икон XVI – XIX веков. <i>Васильева А. В., Парфенов В. А. , Соснова Н. С.</i>	291
Переключаемые суперрезонансные состояния в метаповерхностях на основе материалов с фазовой памятью <i>Кутузова А. А.</i>	292
Влияние легирования Sc ³⁺ на микроструктуру и прозрачность керамики (Y, Er) ₃ Al ₅ O ₁₂ <i>Жмыхов В. Ю., Добрецова Е.А., Кузнецов С.В., Хмельницкий Р.А., Чикулина И.С. , Никова М.С. , Тарала В.А. , Вакалов Д.С. , Пырков Ю.Н., Серегин В.Ф., Цветков В.Б.</i>	294
Инженерия дефектов в облученных быстрыми нейтронами синтетических алмазах <i>Ковалев А. И., Хмельницкий Р. А., Хомич А. А., Попович А. Ф. , Хомич А. В., Ральченко В. Г.</i>	295
Генерация оптического вихря с управляемым знаком топологического заряда в мультигеликоидальном оптическом волокне <i>Баршак Е. В., Алексеев К.Н., Викулин Д.В., Лапин Б.П., Яворский М.А.</i>	297

Влияние облучения аргоном на структурные и спектральные характеристики 4H-SiC фотоприемников Калинина Е. В., Кудояров М.Ф., Никитина И.П., Дементьева Е.В., Забродский В.В.....	298
Анализ тонкой структуры спектров рентгеновского поглощения за L_3 -краем лантана в стеклах системы $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-B}_2\text{O}_3$. Ермакова А. М., Алексеев Р.О., Шахгильдян Г.Ю., Сигаев В.Н., Тригуб А.Л., Велигжанин А.А., Сухарина Г.Б., Авакян Л.А., Бугаев Л.А.	300
Определение профиля показателя преломления и топографии поверхности оптически гладких объектов с помощью интерференции оптических вихрей Соколенко Б. В., Шостка Н.В., Полетаев Д.А.,.....	301
Экспериментальное исследование влияния мощности лазерного излучения на коэффициент отражения германия и кремния на длине волны 355 нм Каплунов И. А., Железнов В. Ю., Малинский Т. В., Рогалин В. Е.....	303
Оптоакустические эффекты в композитах прозрачная матрица – наночастицы металлов при наличии остаточной пористости Звеков А. А., А.В. Каленский, А.С. Зверев, Помесячная Е.С.....	304
Исследование характера распределения тепловых полей при лазерном воздействии на поверхность алюминиевых пластин, ориентированных под различными углами Фролов К. А., Люхтер А.Б., Кочуев Д.А., Чкалов Р.В.	305
Исследование катодoluminesцентных свойств тантало-ниобата гадолиния, активированного редкоземельными ионами Гусев Г.А., Маслобоева С.М., Заморянская М.В.	306
Исследование спектральных свойств калиево-алюмо-боратного стекла с нанокристаллами $\text{CuCl} - \text{CuBr}$ Бабкина А. Н., Зырянова К.С., Егорова Я.Б., Гаврилов Р.Р., Моногарова А.А.	307
Исследование сенсibilизации европия тербием в кубическом диоксиде циркония Шакирова А. А., Гусев Г.А., Заморянская М.В.....	309
Выращивание объемных кристаллов оксида галлия из расплава методом Чохральского в кислородосодержащей атмосфере Панов Д. Ю., Спиридонов В.А., Закгейм Д.А., Кремлева А.В. , Смирнов А.М., Бауман Д.А., Романов А.Е., Бугров В.Е.	310
Решетки разности населенностей, создаваемые в квантовых системах с помощью предельно коротких световых импульсов, не перекрывающихся в среде Архипов Р. М., Архипов М.В., Розанов Н.Н.,.....	312
Цифровой метод измерения хаотической спекл картины лазерного излучения Акимов А. Е., Брецко М. В., Егоров Ю. А., Воляр А. В.	313
Исследование изменений оптических и термических свойств кожи человека при ультразвуковом воздействии <i>in vivo</i> Сурков Ю. И., И.А. Серебрякова, А.Н. Башкатов, Э.А. Генина, В.В. Тучин.....	314

Острая фокусировка света круговой поляризации, ограниченного полукруглой апертурой <i>Зайцев В. Д., Стафеев С.С., Котляр В.В.</i>	316
Совмещение магнитно-резонансной и флуоресцентной томографии, как метод регистрации молекулярных событий <i>in vivo</i> . <i>Соловьев И. Д., Коновалов А.Б., Власов В.В., Богданов А.А., Тучин В.В., Савицкий А.П.</i>	317
Исследование трансформации оптических вихревых пучков при фокусировке зонными пластинками <i>Савельева А. А., Козлова Е.С., Котляр В.В.</i>	318
Волоконно-оптический датчик для продолжительного мониторинга радиационной обстановки в зонах с высокой дозой экспозиционного излучения <i>Дмитриева Д. С., Давыдов В.В., Пилипова В.М., Дудкин В.И., Рудь В.Ю.</i>	320
Исследование и контроль модового состава микроструктурированного волокна <i>Пчелкин Г. А., Фадеев В.Б., Демидов В.В., Давыдов В.В.</i>	322
Развитие спектроскопии отогрева ядерных спинов в объемных кристаллах n-GaAs <i>Литвяк В. М., Чербунин Р.В., Калевич В.К., Кавокин К.В.</i>	323
Способ создания фазовых ДОО для гиперспектральной аппаратуры <i>Фомченков С. А.</i>	325
Восстановление структуры спиральных пучков за счет цифровой регистрации пространственных характеристик света <i>Брецько М. В., Акимова Я. Е., Егоров Ю. А., Воляр А. В.</i>	326
Анализ резкости интерфейсов в короткопериодных сверхрешетках GaN/AlN с использованием данных спектроскопии комбинационного рассеяния света <i>Давыдов В. Ю., Рогинский Е.М., Китаев Ю.Э., Смирнов А.Н., Елисеев И.А., Родин С.Н., Заварин Е.Е., Лундин В.В., Нечаев Д.В., Жмерик В.Н., Смирнов М.Б.</i>	327
Исследование спектрально-люминесцентных свойств наноразмерных кристаллов ортованадатов иттрия и диоксида циркония, легированных ионами Tm^{3+} , Ho^{3+} , Yb^{3+} <i>Хрущалина С. А., Рябочкина П.А., Юрлов И.А.</i>	329
Спектроскопия КРС, ИК поглощения и ФЛ нитрида алюминия, легированного бериллием. <i>Яковлева В. В., Бреев И.Д., Анисимов А.Н., Нагалюк С.С., Мохов Е.Н.</i>	331
Потоки энергии в остром фокусе оптических вихрей <i>Стафеев С. С., Котляр В. В.</i>	332
Выжигание провалов в спектрах ОДМР в изотопно-модифицированном карбиде кремния <i>Вейшторт И. П., Бреев И.Д., Баранов П.Г., Анисимов А.Н.</i>	333

Разработка ГКР-активных наноструктур на основе массива наностержней ZnO и Ag наночастиц для детектирования веществ малых концентраций Новиков Д. В., Громов Д. Г., Малахов Н., Савицкий А. И., Дубков С. В., Тарасов А. М., Еганова Е.	334

Синхронная модуляция накачки в Yb волоконных лазерах: особенности импульсной генерации Корель И.И., Ньюшков Б.Н., Кутищева А.Ю., Смирнов С.В., Иваненко А.В.	335

Исследование воздействия механических напряжений в области интерфейса в гетероструктурах AlN/SiC на спиновые свойства V_{Si} -центров. Бреев И. Д., В.В. Яковлева, К.В. Лихачев, Е.Н. Мохов, С.С. Нагалюк, П.Г. Баранов, А.Н. Анисимов	336

Оптоэлектронные приборы 337

Индукцированные электронные явления в кристаллах перспективного для оптоэлектроники полупроводника p-GaSe Бабаева Р. Ф.	337

Исследование характеристик светодиодов на основе InGaN/GaN квантовых ям при кратковременных электрических воздействиях, сопровождающихся джоулевым разогревом Иванов А. М., Клочков А.В.	338

Исследование радиофотонной линии передачи на основе фотодетектора с высоким фототоком Таценко И. Ю. , Иванов А. В., Устинов А. Б.	340

Вертикально-излучающий лазер на основе сверхрешетки InGaAs/InGaAlAs, спектрального диапазона 1310 нм Рочас С. С., Карачинский Л.Я., Бабичев А.В., Новиков И.И., Гладышев А.Г., Колодезный Е.С., Блохин С.А., Егоров А.Ю.	341

Неохлаждаемые Air-Bridge фотоприемники на основе двойных InAs/InAsSbP гетероструктур Пивоварова А.А., Куницына Е.В., Андреев И.А ,Коновалов Г.Г., Слипенченко С.О., Пихтин Н.А., Ильинская Н.Д., Яковлев Ю.П.	342

Технология диффузии Zn для лавинных фотодиодов InP-InGaAs Андрюшкин В. В., Карачинский Л.Я., Бабичев А.В., Новиков И.И., Гладышев А.Г., Колодезный Е.С., Малеев Н.А., Хвостиков В.П., Бер Б.Я., Кузьменков А.Г., Кижяев С.С., Бугров В.Е.	344

Исследование оптической бистабильности в кремниевых микрокольцевых резонаторах Рябцев И. А., Никитин А. А.,Кондрашов А. В., Витько В. В., Зарецкая Г. А., Ершов А. А., Конкин Д. А., Коколов А. А., Бабак Л. И. и Устинов А. Б.....	345

Особенности формирования волноводных структур в градиентном ниобате лития Галуцкий В. В., Пузановский К.В., Строганова Е.В., Шмаргилов С.А.	346

Конструктивно-технологические особенности формирования металлических волноводов, контактных площадок и сварных соединений на подложках LiTaO ₃ <i>Коняев И. В., Бородкин И.И., Бормонтов Е.Н.,</i>	348
Разработка растяжимого гибкого синего светодиода на основе массива GaN/InGaN ННК <i>Кочетков Ф. М., Неплох В.В., Мухангали С., Масталиева В.А., Мухин М.С., Мухин И.С.</i>	349
Лабораторный макет установки беспроводной оптической подводной связи с квантовым распределением ключей <i>Мирошникова Н. Е., Титовец П.А., Казанцев С.Ю., Подгорный А.А.,</i>	350
Фотоприемники на основе InAsSb _{0,22} для спектральной области 3-5 мкм <i>Климов А. А., Кунков Р. Э., Лухмырина Т.С., Матвеев Б.А., Ременный М.А.</i>	352
Плазменная полупроводниковая антенна <i>Титовец П. А., Н.Н. Богачев, А.С. Брусенцев, С.Г. Догаев, С.Ю. Казанцев, А.И. Сатарова</i>	353
Особенности технологии спекания для источников излучения ближнего ИК-диапазона <i>Рочас С. С., Новиков И.И., Бабичев А.В., Воропаев К.О., Егоров А.Ю.</i>	354
Модель деградации InGaN/GaN светодиода при токовых испытаниях с учетом неоднородного распределения концентрации дефектов в гетероструктуре <i>Фролов И. В., Радаев О.А., Ходаков А.М., Сергеев В.А.</i>	356
Исследования GaAs фотопреобразователей с InAs квантовыми объектами при мощном подзонном облучении <i>Паньчак А. Н., Минтаиров С. А., Минтаиров М. А., Салий Р. А., Калужный Н. А., Нахимович М. В. и Шварц М. З.</i>	357
Исследование энергетических возможностей AlGaInN светодиодов в режиме больших импульсных токов <i>Иванов А. Е., Черняков А.Е.</i>	358
Проверка в безэховой камере диаграммы направленности активной фазированной антенной решетки в дальней зоне с помощью использования волоконно-оптической системы. <i>Мороз А. В.</i>	360
Конструкция инжекционного источника одиночных фотонов спектрального диапазона 1.3 мкм на основе вертикального микрорезонатора с внутрирезонаторными контактами и оптическими оксидными апертурами <i>Блохин С. А., М.А. Бобров, Н.А. Малеев, А.А. Блохин, А.П. Васильев, А.Г. Кузьменков, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, S. Reitzenstein, В.М. Устинов</i>	361

Исследование влияния прорастающих дислокаций на характеристики фотодиодных гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}/\text{AlN}$ с высоким содержанием Al ($x>0.6$), выращенных на различных темплейтах <i>Буренина Д. С., Нечаев Д.В., Семенов А.Н., Ратников В.В., Жмерик В.Н., Нагорный А.В., Ржеуцкий Н.В., Луценко Е.В.</i>	363
Повышение фоточувствительности солнечно-слепых фотокатодов $\text{AlGaIn}:\text{Mg}$ за счёт введения варизонной активной области <i>Николаева А. В., Д.В. Нечаев, В.Н. Жмерик</i>	364
Исследование дефектов в структурах на основе гетероперехода BP/Si <i>Макимова А. А., Баранов А.И., Гудовских А.С., Уваров А.В.</i>	366
Светоизлучающие $p-i-n$ GaP/GaPAs ННК инкапсулированные в гибкую мембрану из полидиметилсилоксана <i>Мухангали С.М., Неплох В.В., Кочетков Ф.М., Моисеев Э.И., Мирошниченко А.С., Дерябин К.В., Насибулин А.Г., Исламова Р.М., Мухин И.С.</i>	367
Исследования шумовых характеристик вертикально-излучающих лазеров с ромбовидной токовой апертурой для применений в атомных магнетометрах на парах Cs^{133} <i>Бобров М. А., С.А. Блохин, Н.А. Малеев, А.А. Блохин, А.П. Васильев, А.Г. Кузьменков, В.М. Устинов, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский</i>	368
Разработка высокоточной системы идентификации сложнокомпонентных озоноразрушающих веществ <i>Тюрикова Е. П., Кустикова М.А., Фахртдинова С.З.</i>	370
Газонаполненные ячейки с парами щелочных металлов, изготовленные с использованием технологий МЭМС <i>Казакин А. Н., Клейманов Р.В., Комаревцев И.М., Кондратьева А.С., Эннс Я.Б., Шашкин А.В., Глуховской А.В.</i>	371
Оптические и структурные свойства эпитаксиальных слоев InAsSb , выращенных на подложке InAs <i>Семакова А. А., Смирнов А.М., Мынбаев К.Д., Баженов Н.Л.</i>	372

Поверхностные явления 374

Проявление универсальности в температурных зависимостях поверхностной диффузии молекулярных жидкостей <i>Галимзянов Б. Н., Мокшин А. В., Яруллин Д. Т.,</i>	374
Investigation of the influence of switching tests on the surface characteristics of coatings of magnetically controlled contacts <i>Баскакова А. В., Логинов Д.С., Литвинов В.Г., Холомина Т.А., Рыбин Н.Б.</i>	375
Полевая десорбционная диагностика углеродных наноструктур на поверхности иридия и рения <i>Павлов В. Г., Бернацкий Д.П.</i>	376

Молекулярная подвижность в объеме и приповерхностных нанослоях сверхвысокомолекулярного полиэтилена <i>Siklitsky V.I., Gladkov A., Lebedev D., Marikhin V., Myasnikova L., Solov'eva O., Ivan'kova E.</i>	377
Влияние параметров шероховатости поверхности и температуры на коэффициент излучения монокристаллов германия <i>Третьяков С. А., Молчанов С.В., Каплунов И.А., Иванова А.И., Вайсбург Н.Я. ...</i>	379
Электронно-стимулированная десорбция атомов лития из адсорбированного слоя лития на вольфраме, покрытом плёнкой золота <i>Лапушкин М. Н., И.А.Громов, Т.Э. Кулешова, Ю.А. Кузнецов, Н.С.Самсонова</i>	380
Хиральность структурных образований в сильно разбавленных водных растворах этанола <i>Шостка В. И., Шостка Н.В., Вершицкий В.И., Халилов С.И.</i>	382
Influence of the temperature gradient on the process of microparticle transfer in a thin liquid layer <i>Al-Muzaiqer M. ., Flyagin V. and Ivanova N.....</i>	383
Электронная структура термически окисленного вольфрама <i>Тимошнев С. Н., Дементьев П.А., Дементьева Е.В., Лапушкин М.Н., Смирнов Д.А.</i>	384
Исследование влияния адсорбции на ориентационные и релаксационные свойства полимерной цепи конечной длины вблизи поверхности твердого тела. <i>Максимова О.Г., Максимов А.В., Смирнов В.В., Егоров В.И., Осипов С.В., Меньшиков Е.В.</i>	385
Экспериментальная установка для изучения протекания химических реакций в условиях электрораспылительной ионизации <i>Кулешов Д. О., Громов И.А., Соловьева А.В., Есикова Н.А., Галль Н.Р., Галль Л.Н.</i>	386
Исследование способов управления работой выхода нитевидных нанокристаллов фосфида галлия <i>Шаров В. А., Алексеев П.А., Федоров В.В., Мухин И.С.....</i>	388
Генерация тока при трении контакта металл-полупроводник <i>Алексеев П. А., Шаров В.А., Дунаевский М.С.....</i>	389
Модификация поверхности AlN под действием адсорбции К <i>Бенеманская Г.В., Тимошнев С. Н.....</i>	390
Синтез пентагонально структурированных пленок палладия и их применение в мембранных приложениях <i>Петриев И. С., Пушанкина П.Д., Луценко И.С., Глазкова Ю.С., Мальков Т.И., Барышев М.Г.</i>	391

Приборы и материалы ТГц и СВЧ диапазона 393

Изучение оптических свойств халькогенидных стекол на основе теллура по данным терагерцовой ИК спектроскопии <i>В.А. Рыжов, Б.Т. Мелех, Л.П. Казакова</i>	393
Исследования нелинейных колебаний намагниченности касательно-намагниченных плёночных ЖИГ-резонаторов <i>Гапончик Р. В., Гото Т., Устинов А.Б.</i>	394
Спонтанная терагерцовая генерация ультракоротких волновых импульсов в терагерцовом частотном диапазоне <i>Опарина Ю. С., Савилов А.В.</i>	395
Новые возможности коллекторов с азимутальным магнитным полем для многоступенчатой рекуперации в гиротронах <i>Лукиша О.И. , Трофимов П.А. , Ушеренко Б.Д.</i>	396
Бистабильность активных кольцевых резонаторов на поверхностных спиновых волнах <i>Витько В. В., Гапончик Р.В., Никитин А.А., Устинов А.Б.</i>	398
Электродинамическое моделирование спин-волновых устройств <i>Зарецкая Г.А., Дроздовский А. В., Кустов И.Е.</i>	399
Влияние шероховатости границ интерфейсов на спектр усиления в сверхрешётках AlGaAs/GaAs <i>Дашков А. С., Горай Л.И.</i>	401
Особенности генерации ЭДС в структуре Pt/YIG на частотах дипольно-обменных резонансов при распространении поверхностной спиновой волны <i>Селезнев М. Е., Хивинцев Ю.В., Никулин Ю.В., Кожевников А.В., Сахаров В.К., Филимонов Ю.А., Высоцкий С.Л.</i>	402
Конкуренция трёх волн <i>Опарина Ю. С., Савилов А.В.</i>	403
Спин-волновой полосно-заграждающий фильтр 9,8-10,8 ГГц <i>Мартынов М. И.</i>	404
Задержанный ударно-ионизационный пробой высоковольтных р-і-п диодов <i>Иванов М. С., Родин П. Б.</i>	405

Примеси и дефекты в твердом теле 406

Высокотемпературное облучение протонами с энергией 15 МэВ SiC JBS диодов. <i>Давыдовская К. С., А. А. Лебедев, М. Е. Левинштейн, В. В. Козловский, А. Е. Иванов</i>	406
Влияние примесных ионов церия на оптические свойства кристаллов $\text{Li}_2\text{Zn}_2(\text{MoO}_4)_3$ <i>Рахманова М. И., Рядун А.А., Трифонов В.А.</i>	408

Многоуровневая модель потока сигналов акустической эмиссии и нанотехнология прочностного контроля материалов <i>Носов В. В., Соавтор Махмудов Х.Ф.</i>	409
Поля внутренних механических напряжений в материалах, определенные по параметрам акустической эмиссии <i>Гиляров В. Л., Дамаскинская Е.Е.</i>	411
Определение объема дефекта <i>in situ</i> по параметрам сигналов акустической эмиссии <i>Дамаскинская Е. Е., В.Л. Гиляров, И.А. Пантелеев, Д.В. Корост, К.А. Дамаскинский</i>	412
Электрические свойства и теплопроводность монокристаллов теллурида олова с различными концентрациями катионных вакансий <i>Алиева Т. Д., Г.З. Багиева, Г.Д. Абдинова, Б.Ш.Бархалов, Д.Ш.Абдинов</i>	413
Влияние атомов легирования на морфологию поверхности плотных диффузионных фильтров-мембран на основе палладия <i>Акимова О. В., Терешина И.С., Каминская Т.П. оавтор А.А., Соавтор Б.Б.,</i>	414
Фото э.д.с. на контакте металл/слоистый полупроводник n-InSe при условиях разогрева носителей тока электрическим полем <i>Абдинов А. Ш., Бабаева Р.Ф.</i>	415
Определение времени локализации зарядов в пленках HfO_2 <i>Дементьев П. А., Дементьева Е.В., Заморянская М.В.</i>	416
Синтез ортофосфатов редких земель Y-, LuPO_4 активированных Er^{3+} и Ce^{3+} <i>Силантьева Е. А., Заморянская М. В., Бураков Б. Е.</i>	417
Бозе-Эйнштейновский конденсат экситонов в кристаллах с дефектами и фазовый синхронизм в нелинейных процессах <i>Заворотнев Ю. Д., Попова С.В., Румянцев В.В1., Федоров С.А.</i>	419
Влияние режимов селективного лазерного плавления и последующей обработки на получаемую структуру и внутренние дефекты <i>Разносчиков А. С., Вознесенская А.А., Кочуев Д.А., Герке М.Н., Жданов А.В</i>	420
Рамановское рассеяние и люминесценция в монокристаллах аминокислоты глицин $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$ с примесью кроконовой кислоты $\text{C}_5\text{H}_2\text{O}_5$ <i>Балашова Е. В., Смирнов А.Н., Давыдов В.Ю., Кричевцов Б.Б., Старухин А.Н.</i> ..	421
Оптические и структурные свойства твердых растворов $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$, синтезированных различными методами <i>Андрющенко Д. А., Ружевич М.С., Смирнов А.М., Баженов Н.Л., Мынбаев К.Д.</i> ..	423
Параметризация процесса переноса заряда в присутствии лавинного умножения в сильнооблученных <i>pin</i> структурах при $T=1.9\text{ K}$ <i>Шепелев А. С., Еремин В.К., Вербицкая Е.М.</i>	424
Исследование пространственного распределения изотопного состава алмаза по спектрам комбинационного рассеяния <i>Салказанов А. Т., Д.М. Арзамасцева, А.С. Гусев, М.О. Смирнова, С.А. Тарелкин</i>	425

К вопросу о расчетах спектроскопических свойств 3d-ионов в кристаллах с ковалентной связью <i>Тумаев Е. Н., Рудоман Н.Р., Куликова Н.Н., Андреева А.Р.</i>	427
Прогнозирование радиационной деградации кремниевых детекторов под воздействием релятивистских ионов различных масс <i>Митина Д. Д., Вербицкая Е.М., Еремин И.В., Киселев О.</i>	428
Взаимодействие серы с примесями в ОЦК-железе <i>Верховых А. В., Мирзоев А.А., Окишев К.Ю., Дюрягина Н.С.</i>	430
Стойкость к низкотемпературной деградации и способность к пластической деформации композиционной керамики на основе диоксида циркония <i>Дмитриевский А. А., Жигачева Д.Г., Васюков В.М., Овчинников П.Н.</i>	431
Влияние диамагнитной примеси на состав и структуру монокристаллов $\text{Fe}_{1-x}\text{Me}_x\text{VO}_3$ <i>Могиленец Ю. А., Селезнева К.А., Ягупов С.В., Селезнев К.А., Наухацкий И.А., Максимова Е.М., Стругацкий М.Б.</i>	432
Формирование функционально-градиентных материалов методом механо-термического инкорпорирования керамических частиц в приповерхностные слои алюминиевых сплавов <i>Желтов М. А., Дмитриевский А.А., Григорьев Г.В., Сульженко М.А.</i>	433
Катодолюминесценция углеродсодержащих дефектов в гексагональном нитриде бора <i>Петров Ю. В., Вывенко О.Ф., Гогина О. А., Bolotin K., Kovalchuk S.</i>	435
Дефектность 2D-графеновых структур, полученных самораспространяющимся высокотемпературным синтезом <i>Неверовская А. Ю., Возняковский А.П., Николаев Г.А.</i>	436
Фотоэлектрические свойства диодов $\text{Au}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ <i>Чернобровкин И. Д., О.Ф. Вывенко, Н.В. Базлов, В.И. Николаев, А.И. Печников.</i>	437
Алмазы полученные при высоком давлении и температуре без металла катализатора в присутствии фтора <i>Прилежаев К. С., Ручкин И.А., Шахов Ф.М.</i>	439
Коллективное взаимодействие структурных дефектов в условиях высокоскоростной деформации <i>Малашенко В. В., Малашенко Т.И.</i>	439
The Interpolation method: particle resolved experimental verification in model systems. <i>Корсакова С. А., Яковлев Е.В., Крючков Н.П., Юрченко С.О.</i>	441
Физика и технология преобразования энергии	443
Вольт-амперные характеристики соединительных туннельных диодов при температурном нагреве до 80°C <i>Контрош Е. В., Клишко Г.В., Ваулин Н.В., Б.Я. Бер, Калиновский В.С.</i>	443

Исследование характеристик радиоизотопного источника энергии на основе (Y,Eu)PO ₄ / ²³⁸ Pu и Al _x Ga _{1-x} As/GaAs фотопреобразователя <i>Прудченко К. К., Толкачёв И.А., Силантьева Е.А., Контрош Е.В.</i>	444
The highly efficient exciton channel of photo-activation for redox reactions on the surface of 2D ZnO/ZnO _{1-x} /O nanostructures type <i>Lisachenko A. A., Titov V. V., Akopyan I. K., Labzovskaya M. E., Novikov, B. V.</i>	445
О результатах моделирования и макетирования полоскового пассивного параметрического радиоответчика <i>Бабанов Н. Ю., Ларцов С.В., Самарин В.П. Ключев А.В.</i> ,.....	446
Four-terminal perovskite-silicon tandem solar cells for low light applications <i>Nikolskaia A. B., S.S. Kozlov, M.F. Vildanova, O.K. Karyagina, O.I. Shevaleevskiy</i> ...	448
Обеспечение надежного охлаждения камеры сгорания кислородно-водородного варианта жидкостного ракетного двигателя «Раптор» при глубоком дросселировании тяги <i>Мукамбетов Р. Я., Боровик И.Н.</i>	449
Новая параметризация скорости реакции синтеза d+ ³ He->p+ ⁴ He и уточнение критерия Лоусона для термоядерных устройств на ее основе <i>Годес А. И., Исхак А.Б., Шаблов В.Л.</i>	450
Детермализация рекомбинационных каналов в GaAs солнечных элементах с GaInAs квантовыми точками <i>Минтаиров М. А., Евстропов В.В., Минтиров С.А., Надточий А. М., Салий Р. А., Калюжный Н. А.</i>	452
Определение спектральной фоточувствительности многопереходных солнечных элементов при радиационных испытаниях <i>Левина С. А., В.М. Емельянов, М.А. Минтаиров, М.В. Нахимович, М.З. Шварц</i> ...	453
Влияние позиционирования массива квантовых точек в p-n переходе фотопреобразователя на его фотоэлектрические характеристики <i>Салий Р. А., Минтаиров М.А., Минтаиров С.А., Шварц М.З., Калюжный Н.А.</i>	455
Электрические свойства кремниевых высоковольтных фотопреобразователей на основе сквозных термомиграционных каналов <i>Середин Б. М., Ломов А.А., Заиченко А.Н., Гаврус И.В., Пащенко А.С.', Малибашев А.В., Рубан Л.В.</i>	456
Применение сегнтоэлектриков для повышения эффективности привода электротранспортных средств <i>Зубцов В. И.</i>	458

Физика квантовых структур 460

Спектроскопическое проявление туннельной связи между квантовыми ямами CdTe в гетероструктуре CdTe/ZnTe <i>Философов Н. Г., Агемян В.Ф., Будкин Г., Karczewski G., Серов А.Ю., Резницкий А.Н.</i>	460

Индукцированные переменным полем переходы “изолятор-полуметалл-изолятор” в 2D кристаллах со смещенными дираковскими точками <i>Кухарь Е. И., Крючков С.В.</i>	461
Теория эффектов оптического выстраивания и оптической ориентации в коллоидных наноплателетах. <i>Смирнова О. О., Родина А.В.</i>	463
Динамика массива лазеров на основе микростолбиков с квантовыми точками <i>Петренко А. А., Ковалев А.В.</i>	464
Electron transmission properties in a system of two orthogonal quantum rings <i>Smolkina M. O., Popov I.Yu., Vorobiev A.M.</i>	466
Квазистационарные состояния в топологических изоляторах с магнитными барьерами конечной проницаемости <i>Хомицкий Д. В., Лаврухина Е.А.</i>	468
Зонная структура и меж-трубочные электронные переходы в двустенных углеродных нанотрубках <i>Чалин Д. В.</i>	469
Эффект Холла в магнитокалорических сплавах на основе Ni-Mn-In <i>Емельянова С.М., Марченков В.В.</i>	470
Топологически запрещенные квазичастицы в системе с дисперсией, характерной для купратных высокотемпературных сверхпроводников, и сильным электрон-фононным взаимодействием: образование псевдощели. <i>Доронкина С. В., Мясникова А. Э.</i>	471
Влияние межминизонных переходов на нелинейный транспорт в квантовых полупроводниковых сверхрешетках в условиях воздействия высокочастотной электромагнитной волны <i>Глазов С. Ю., Носаева Т.А.</i>	472
Влияние неидеальности интерфейса AlN/GaN на свойства двумерного газа в гетероструктурах для полевых транзисторов <i>Артеев Д. С., Сахаров А. В., Лундин В. В., Заварин Е. Е., Цацульников А. Ф.</i>	473
Критическая температура генерации стимулированного излучения среднего ИК диапазона в серии HgCdTe структур с различным числом квантовых ям <i>Уточкин В. В., Морозов С.В., Фадеев М.А., Михайлов Н.Н.</i>	474
Нелинейная квантовая метрология на основе линейно связанных солитонов в интерферометре Маха-Цендера с диссипацией частиц <i>Алоджанц А. П., Царёв Д.В., Нго Т.В., Р.-К. Ли</i>	476
Физика плазмы, гидро- и аэродинамика	478
«Двойная» диффузия в бинарной системе аргон-азот <i>Поярков И. В.</i>	478

Неустойчивость местных сверхзвуковых зон при обтекании двойного клина постоянной ширины в средней части <i>Кузьмин А. Г.</i>	479
Первое применение кода GENE для определения областей стабильности микротиринговой неустойчивости в плазме сферического токамака Глобус-М/М2 <i>Патров М.И., Киселев Е.О.</i>	481
Об аналитическом вычислении коэффициента теплопроводности бинарных жидкостей <i>Гладков С.О., Побережский С.Ю.</i>	481
Пациент-ориентированные расчеты кровотока в проксимальном анастомозе при бедренно-подколенном шунтировании <i>Иванова Я. Ф., Тихомолова Л.Г., Юхнев А.Д., Врабий А.А., Калмыкова Р.В., Морозов А.Н., Супрунович А.А.2</i>	483
Особенности обтекания модели транспортного самолета с работающими воздушными винтами при моделировании отказа двигателя в аэродинамической трубе <i>Пигусов Е. А., Крутов А.А., Черноусов В.И.</i>	484
Обнаружение колебательных решений у вакуумного диода в режиме с полным отражением электронов <i>Кузнецов В. И., Морозов И.К.</i>	485
Исследования течения теплоносителя в кассетной тепловыделяющей сборке активной зоны реактора атомной станции малой мощности <i>Доронков Д. В., Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Добров А.А., Доронкова Д.С., Полуничев В.И., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Хробостов А.Е.</i>	486
Влияние контракции положительного столба цезиевого импульсно-периодического разряда на его светоотдачу <i>Богданов А. А., Гавриш С.В., Марциновский А.М., Столяров И.И.</i>	488
Спектральный и корреляционный анализ микротурбулентности плазмы в сферическом токамаке Глобус-М2 <i>Пономаренко А. М., В.В. Буланин, В.К. Гусев, В.Б. Минаев, А.В. Петров, Ю.В. Петров, А.Ю. Яшин</i>	490
О конвекции Релея-Бенара в сжимаемом газе <i>Палымский И. Б.</i>	491
Определение температуры за отраженной ударной волной по спектрам оксидов AlO и CaO <i>Безверхний Н. О., Лапушкина Т. А., Монахов Н. А., Петренко М. В., Поняев С. А.</i>	492
Моделирование распространения слабых ударных волн в водной пене <i>Гайнуллина Э.Ф., Болотнова Р.Х.</i>	493

Gas discharge sustained by powerful THz and sub-THz gyrotrons in the mixtures of noble gases with nitrogen <i>Сидоров А. В., Веселов А.П., Разин С.В., Бармашова Т.В., Водопьянов А.В., Лучинин А.Г., Орловский А.А., Глявин М.Ю.</i>	494
Использование технологий 3D-печати в импульсном газодинамическом эксперименте <i>Котов М. А., Монахов Н.А., Поняев С.А., Попов П.А., Твердохлебов К.В.</i>	495
Самоорганизация газоразрядной плазмы сильно электроотрицательных газов <i>Казанцев С. Ю., Андреев С.Н., Нижегородов В.В., Подлесных С.В.</i>	497
Построение первичных моделей процесса восстановления теплозащитного покрытия с низкой работой выхода электронов спускаемых аппаратов в полете <i>Колычев А. В., Ренев М.Е., Савелов В.А., Архипов П.А., Керножицкий В.А.</i>	498
Анализ динамики формирования сверхзвуковой струи водяного пара при истечении из тонкого сопла <i>Коробчинская В. А., Болотнова Р.Х., Файзуллина Э.А.</i> <i>Быков Н. В., Шестаков И.Е.</i>	499 500
Приближенно-аналитическая модель сверхзвукового течения с маховским отражением при наличии импульсного энергоподвода <i>Чернышов М. В., Алексеева М.М., Матвеев С.А., Савелова К.Э.</i>	501
Расчет параметров реального газа и измерение давления за отраженными ударными волнами различной интенсивности <i>Сахаров В.А., Резников Б.И., Лапушкина Т.А., Масюкевич А.В., Поняев С.А., Монахов Н.А.</i>	502
Эффективность использования переходов Н-подобных ионов для формирования активных сред источников излучения высокой яркости в мягком рентгеновском спектральном диапазоне <i>Тимишина М. В., Калинин Н.В., Бурцев В.А.</i>	503
Численное моделирование теплового состояния реактора по обезвоживанию плавиковой кислоты во фронте фильтрационного горения углерода в кислороде <i>Попов П.А., Талалов В.А., Пашкевич Д.С., Камбур П.С., Капустин В.В.</i>	504
Применение термоэлектрических преобразователей излучения для регистрации теплового потока за отраженной ударной волной <i>Котов М.А., Шемякин А.Н., Соловьев Н.Г., Якимов М.Ю., Глебов В.Н., Дуброва Г.А., Малютин А.М., Попов П.А., Поняев С.А., Лапушкина Т.А., Монахов Н.А., Сахаров В.А.</i>	505
О фотоэмиссии электронов с поверхности пылевой частицы в газоразрядной плазме <i>Сясько А. В., Голубовский Ю.Б., Карасев В.Ю.</i>	506
S-, P- и R- страты в инертных газах как аттракторы фазовых траекторий электронов в пространственно периодических полях <i>Гуркова Т. В., Голубовский Ю.Б., Валин С.В.,</i>	508

Численное исследование течения в венозном клапане при реконструктивной операции <i>Гатаулин Я. А.</i> , Юхнев А.Д., Росуховский Д.А.	509
Исследование дозвукового обтекания цилиндра с интерцепторами при различных числах Рейнольдса <i>Шевченко А. В.</i> , Пирогов С.Ю., Юрьев А.С., Поняев С.А.	510
Исследование взаимодействия выдуваемых струй аргона из тела с набегающим гиперзвуковым потоком <i>Яшков С. А.</i> , Шевченко А.В., Юрьев А.С., Поняев С.А., Ротэрмель А.Р.	511
Исследование гиперзвукового обтекания тела с газодинамическими органами управления, при движении в плотных слоях атмосферы <i>Сназин А.А.</i> , Шевченко А. В., Шевченко В.И., Поняев С.А.	513
Экспериментальное исследование течения в упругой модели бифуркации брюшной аорты <i>Синицына Д. Э.</i> , Зайцев Д. К.	514
Неустойчивость тонкой пленки магнитной жидкости под действием вибраций <i>Володин И. В.</i> , Алабужев А.А.	515
Численное исследование кавитации в жидкостях, содержащих растворённый газ <i>Махнов А. В.</i> , Шмидт А.А.	516
Double-well радиочастотная ловушка для заряженных микрочастиц <i>Кокорина О. О.</i> , Рыбин В.В., Рудый С.С., Рождественский Ю.В.	517
Об ограничении скорости движения плазмы в электродинамическом ускорителе <i>Горяинов В. Ю.</i> , Воронин А.В.	518
Эволюция полидисперсного облака пузырей при течении в трехмерном пузырьковом реакторе колонного типа <i>Чернышев А. С.</i>	519
Калибровка нейтронной диагностики токамака Глобус-М2 <i>Скрекель О. М.</i> , Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Ильясова М.В., Киселев Е.О., Корнев В.А., Курскиев Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Тельнова А.Ю., Тюхменева Е.А., Толстяков С.Ю., Хилькевич Е.М., Чернышев Ф.В., Шевелев А.Е., Щёголев П.Б.	520
Исследование эффективности лазерной абляционной обработки материалов в электростатическом поле <i>Егорова А. В.</i> , Кочуев Д. А., Черников А. С., Галкин А. Ф.	522
Процесс генерации вистлерных возмущений при взаимодействии сгустка лазерной плазмы с замагниченной плазмой <i>Березуцкий А. Г.</i> , Тищенко В.Н., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф.	523

Натекание плазменного потока на плотную внутримангнитосферную плазму в рамках лабораторного моделирования <i>Чибранов А. А., Березуцкий А.Г., Ефимов М.А., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Посух В.Г., Руменских М.А., Трушин П.А., Шайхисламов И.Ф.</i>	524
Мангнитосферные процессы, протекающие в атмосферах горячих Юпитеров и наблюдаемые при лабораторном моделировании <i>Ефимов М. А., Чибранов А.А., Руменских М.С., Березуцкий А.Г., Посух В.Г., Трушин П.А., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф.</i>	525
Моделирование обтекания упрощенной модели автомобиля методом моделирования крупных вихрей с пристеночными функциями <i>Колмогоров Д. К., Гарбарук А.В.</i>	526
Электроэрозионная стойкость электродов из различных материалов для плазмогенерирующих устройств <i>Мурашов Ю. В., Жилиготов Р.И., Образцов Н.В., Куракина Н.К., Аверьянова С.А.</i>	527
Дизайн экспериментальной модели течения для исследования сложного турбулентного искривленного следа, подверженного воздействию неблагоприятного градиента давления, на основе RANS расчетов <i>Гусева Е. К., Никулин Д.А., Травин А.К., Radespiel R., Scholz P.</i>	528
Анализ применимости одномерной модели для описания тепловых и термоэлектрических процессов в анизотропных термоэлементах из висмута <i>Попов П. А.</i>	529
Проведение прямого численного моделирования течения в CS0 диффузоре <i>Стабников А. С., Колмогоров Д.К., Гарбарук А. В.</i>	530
Роль приэлектродных областей в процессе взаимодействия газового разряда с ударной волной <i>Сахаров В. А., Барышников А.С., Басаргин И.В., Безверхний Н.О., Бобашев С.В., Монахов Н.А., Попов П.А.</i>	530
К вопросу о создании магнитного поля заданной геометрии в ускорительном канале МПД ускорителя. <i>Ташаев Ю. Н.</i>	531

Физика ферроиков

533

Исследование прямого и обратного статического флексоэлектрического эффекта в монокристаллах KTaO ₃ <i>Обозова Е. Д., Полушина А.Д., Сырников П.П., Залесский В.Г.</i>	533
Статический флексоэлектрический эффект в монокристаллах SrTiO ₃ . <i>Залесский В. Г., Обозова Е.Д., Полушина А.Д.,</i>	534
Динамика ТГц индуцированных фононных мод в сегнетоэлектрическом кристалле Pb ₅ (Ge _{0.74} Si _{0.26}) ₃ O ₁₁ <i>Билык В. Р., Мишина Е.Д., Овчинников А.В., Чефонов О.В.</i>	535

Дисперсия магнитостатических и обменных спиновых волн в системе связанных ферромагнитных слоёв <i>Геревенков П. И., Бессонов В. Д., Телегин А. В., Rushforth A. W., Калашникова А. М., Хохлов Н. Е.</i>	536
Исследование диэлектрических свойств тонких пленок титаната бария, легированных ионами редкоземельных металлов <i>Мыльников И. Л., Белявский П.Ю., Буровихин А.П., Мишнёв М.А.</i>	537
Уравнение состояния сегнетоэлектрика, легированного металлами, в рамках модели Вейсса <i>Старков И.А., Мишнёв М.А., Старков А.С.</i>	538
Лазерно-индуцированное изменение обменного взаимодействия и ТГц когерентная спиновая динамика в антиферромагнетиках <i>Федянин А. Е., А. М. Калашникова, J. Mentink</i>	539
Исследование влияния амплитуды и смещения постоянной составляющей управляющего сигнала на величину электрокалорического отклика в сегнетоэлектрических материалах <i>Анохин А. С., Еськов А. В., Пахомов О. В., Семенов А.А.</i>	540
Пироэлектрические измерения конденсаторных структур на основе керамики ВТ и BST <i>Буровихин А. П., Мишнёв М. А., Мыльников И. Л., Дедык А. И., Белявский П. Ю., Павлова Ю. В., Пахомов О. В.</i>	541
Сверхбыстрое лазерно-индуцированное размагничивание в тонких пленках ферромагнитного металла галфенола <i>Кунту Д. В., Шелухин Л. А., Rushforth A.W., Калашникова А. М.</i>	542
Рациональный дизайн мультиферроидных гексагональных ферритов с точки зрения симметрии <i>Михейкин А. С., Широков В.Б., Разумная А.Г.</i>	544
Атомная физика и физика элементарных частиц	546
Properties of $\rho(770)0$, $K^*(892)$, $\phi(1020)$, $\Sigma(1385)$, $\Lambda(1520)$ and $\Xi(1530)0$ resonances in heavy-ion collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 4\text{--}11$ GeV and their reconstruction using the MPD detector at NICA <i>Kotov D.O., Ivanishchev D.A., Malaev M.V., Riabov V.G., Riabov Yu.G.</i>	546
Способ и система стабилизации позиционно-чувствительного спектрометра на базе стрипового полупроводникового детектора <i>Тубольцев Ю. В., Богданов А.А., Чичагов Ю.В., Ерёмин В.К., Ерёмин И.В., Вербитская Е.М.</i>	547
Влияние облучения α -частицами на свойства и рабочие параметры кремниевых полупроводниковых детекторов <i>Микулич М. С., Базлов Н. В., Бахланов С. В., Дербин А. В., Драчнев И. С., Котина И. М., Коньков О. И., Кузьмичев А. М., Муратова В. Н., Трушин М. В., Унжаков Е. В., Чернобровкин И. Д.</i>	548

Model calculations of phi-meson production in small collision systems <i>Митранкова М. М., Я.А. Бердников</i>	549
Production of the isotope copper-64 by using natural nickel target with proton energy 17 Mev and beam current 10 μ A at cyclotron <i>TIBA A. , Berdnikov Ya. A., Egorov A.Yu.</i>	551
Charged pion, kaon, proton and antiproton production in large collision systems <i>Larionova D. M., Kotov D.O.</i>	551
Comparative analysis of strange meson production in heavy ion collisions <i>Borisov V. S., Berdnikov A. Ya.</i>	553
Новый предел на резонансное поглощение солнечных аксионов, полученный с помощью ^{169}Tm -содержащего болометрического детектора. <i>Унжаков Е. В., А.Н. Abdelhameed, A. Bento, E. Bertoldo1, P. Bauer, L. Canonica, A.B. Дербин, И.С. Драчнёв, N. Ferreira Iachellini, D. Fuchs, D. Hauff, M. Laubenstein, Д.А. Лис, И.С. Ломская, М. Mancuso, В.Н. Муратова, S. Nagorny, S. Nisi, F. Petricca, F. Proebst, J. Rothe, В.В. Рябченков, С.Е. Саркисов, Д.А. Семёнов, К.А. Субботин, Е.В. Жариков</i>	554
Новое измерение β -спектра ^{210}Bi с кремниевым 4 π -спектрометром. <i>Ниязова Н. В., Алексеев И.А., Бахланов С.В., Дербин А.В., Драчнев И.С., Котина И.М., Кузьмичев А.М., Ломская И.С., Микулич М.С., Муратова В.Н., Семенов Д.А., Трушин М.В., Унжаков Е.В.</i>	555
Elliptic flow for phi-mesons in Cu+Au and U+U collisions <i>Митранков Ю. М.</i>	557
Деградация кремниевых полупроводниковых детекторов при длительном облучении осколками деления изотопа ^{252}Cf <i>Трушин М. В., Базлов Н.В., Бахланов, С.В., Дербин А.В., Драчнев И.С., Котина И.М, Коньков О.И., Кузьмичев А.М. Микулич М.С., Муратова В.Н., Унжаков Е.В.</i>	558
Измерение спектра ^{144}Ce - ^{144}Pr с помощью 4 π бета-спектрометра <i>Ломская И. С., Бахланов С.В., Дербин А.В., Драчнев И.С., Котина И.М., Микулич М.С., Муратова В.Н., Пилипенко Н.В., Семенов Д.А., Унжаков Е.В.</i>	559

Другие вопросы физики 560

О математической модели системы электрохимической защиты от коррозии <i>Никулин С. А., Ларцов С.В., Карнавский Е.Л., Репин Д.Г.</i>	560
Система квантового распределения ключей на непрерывных переменных с гауссовским типом модуляции на поднесущих частотах <i>Гончаров Р. К., Самсонов Э.О., Киселев А.Д.</i>	561
Phase states of a non-Heisenberg ferrimagnet <i>Matyulina Ya.Yu., Kosmachev O.A., Yarygina E.A., Fridman Yu.A.</i>	563
Электрические и магнитные свойства монокристаллов SmSb в температурном интервале 2-300 К и в магнитном поле до 14 Тл. <i>Степанов Н. Н., Каменская Г.А., Н.В. Шаренкова, Волков М.П.</i>	564

Фазовые состояния двухподрешеточного анизотропного негезенберговского магнетика <i>Ярыгина Е.А., Клевец Ф.Н., Космачёв О.А., Кривцова А.В.</i>	565
Влияние атомов замещения Nd, Pr и Co на магнитные и магнитострикционные свойства фаз Лавеса (Tb,Dy)Fe ₂ <i>Политова Г. А., Ганин М.А., Морозов Д.А., Панков К.Е., Михайлова А.Б., Терешина И.С.</i>	566
Cyanate Ester Resin/Silica subnanocomposites and their superiority over nanocomposites due to fundamental role of constrained interfacial dynamics <i>Bershtein V.A., Fainleib A.M., Kirilenko D.A., Yakushev P.N.</i>	567
Исследование влияния когерентного излучения на свойства арамидных волокон и тканей <i>Науман Л.В., Овечкин С. В., Андрухова О.В., Андрухова Т.В., Жуковская Т.М., Кустов С.Л.</i>	569
Об устойчивости стационарных состояний диода со встречными потоками электронов и ионов <i>Бакалейников Л. А., Кузнецов В.И., Флегонтова Е.Ю.,</i>	570
Изучение порошкообразных образцов LiFePO ₄ дифракционными рентгеновскими методами с применением искусственных нейронных сетей <i>Бойко М. Е., Шарков М.Д., Бойко А.М., Бобыль А.В., Николаев В.И.</i>	571
Синтез и исследование электропроводящих свойств Cs ₂ Fe ₂ Ti ₆ O ₁₆ в различных газовых средах <i>Рогова Д. А., Синельщикова О.Ю., Беспрозванных Н.В., Морозов Н.А.</i>	573
Изучение фазовых переходов в кулоновских структурах из микроразмерных частиц <i>Романова А. В., Рудый С.С., Костерной И.А., Рождественский Ю.В.</i>	574
Диоды Шоттки на основе эпитаксиальных слоев 4H-SiC <i>Стрельчук А. М., Калинина Е.В.</i>	576
Сокращённые наименования организаций	578

Тезисы докладов
международной конференции
Физика.СПб

18–22 октября 2021 года

Подписано в печать 30.09.2021. Формат 70×100/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 50,21. Тираж 400. Заказ 429

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного оргкомитетом,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.