

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
УНИВЕРСИТЕТА  
ИЗДАТЕЛЬСТВО

**МАТЕРИАЛЫ  
XVIII МОЛОДЕЖНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ  
ПО ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ  
И ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКЕ**

Научный совет по оптике и лазерной физике Российской академии наук  
Научный совет по люминесценции Российской академии наук  
Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
Институт геохимии СО РАН  
Иркутский государственный университет  
Иркутский научный центр СО РАН  
Сибирское отделение Российской академии наук  
Совет научной молодежи ИЛФ СО РАН

**МАТЕРИАЛЫ  
XVIII МОЛОДЕЖНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ  
ПО ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ  
И ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКЕ**

Иркутск, Россия, 5–10 июля 2021 г.



УДК 535  
ББК 22.34+22.37  
М34

Публикуется по решению Оргкомитета  
XVIII молодежной конференции с международным участием  
по люминесценции и лазерной физике

**Научный редактор**

*Е. Ф. Мартынович*, д-р физ.-мат. наук, проф.

М34 **Материалы XVIII молодежной конференции с международным участием по люминесценции и лазерной физике.** Иркутск, Россия, 5–10 июля 2021 г. / Иркут. науч. центр СО РАН ; ФГБОУ ВО «ИГУ» ; [науч. ред. Е. Ф. Мартынович]. – Иркутск : Иркут. филиал ИЛФ СО РАН : Издательство ИГУ, 2021. – 163 с.  
**ISBN 978-5-9624-1943-5**

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, посвященных актуальным проблемам лазерной физики: взаимодействию интенсивных сверхкоротких лазерных импульсов с веществом; исследованию одиночных атомов, молекул и других квантовых систем; применению лазерных и люминесцентных методов для создания, исследования и модификации объектов, используемых в медицине, биологии, химии, экологии; фундаментальным исследованиям искусственных квантовых систем, получаемых методами нано- и радиационных технологий. Представлена информация о разработках новых перспективных материалов, приборов и оборудования.

Предназначено для научных сотрудников, инженеров, преподавателей и студентов.

УДК 535  
ББК 22.34+22.37

ISBN 978-5-9624-1943-5

© Иркутский филиал ИЛФ СО РАН, 2021  
© ФГБОУ ВО «ИГУ», 2021

## SIMILARITY OF NATURE OF MOLECULAR COMPLEXES WITH HYDROGEN BOND IN FLUORIDE CRYSTALLINE MATRICES LiF, NaF AND OPTICAL CERAMICS MgF<sub>2</sub>

L. I. Bryukvina, D. S. Glazunov

Irkutsk Branch of Institute of Laser Physics SB RAS  
Irkutsk, Russian Federation, [baikal@ilph.irk.ru](mailto:baikal@ilph.irk.ru)

An intense band of OH stretching vibrations at  $\nu = 3620 \text{ cm}^{-1}$  was found in the investigated OC MgF<sub>2</sub> in the IR spectrum (Fig. 1, curve 1).

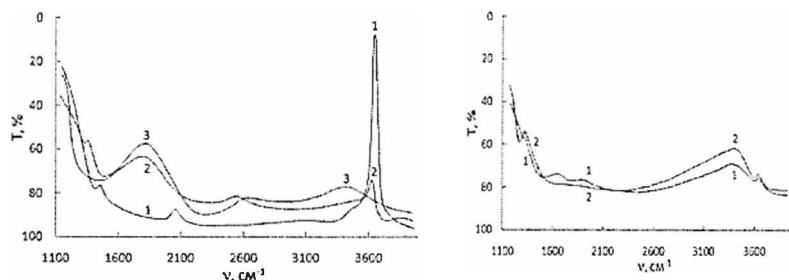


Fig. 1a. IR transmittance spectra of OC MgF<sub>2</sub>: 1 – an unirradiated sample, 2 – irradiated with a dose of  $10^{16}$  electron/cm<sup>2</sup> at 300 K, 3 –  $\gamma$ -irradiated with a dose of  $2 \cdot 10^{17}$  C/kg at 300 K

Fig. 1b. IR transmittance spectra of OC MgF<sub>2</sub>: 1 – after annealing for 20 minutes at 475 K, 2 – after annealing for 10 minutes at 575 K

Irradiation with ionizing radiation induces in the IR spectrum (similarly to LiF and NaF [1, 2]) a band of complexes with a strong H-bond of the type (OHF)<sup>-</sup> or (FHF)<sup>-</sup> at  $\nu = 1600\text{--}2000 \text{ cm}^{-1}$  (Fig. 1a, curves 2 and 3). A wide band of complexes with a weak H-bond OH...O, OH...F, FH...O and FH...F at  $\nu = 2600\text{--}3800 \text{ cm}^{-1}$  also appears (Fig. 1a, curves 2 and 3).

During of annealing changes occur in the IR spectra (similarly of LiF and NaF) (Fig. 1b). Thus, the similarity of the IR spectra of  $\gamma$ -irradiated OC MgF<sub>2</sub> and single crystals of LiF and NaF with OH<sup>-</sup>, which have the same anions – fluorine ions, shows that the complex with a strong H-bond contains, most likely, the F<sup>-</sup> ion, and not radiation-created atom F<sub>1</sub><sup>0</sup>. The complex has an off-center position, which allows its structural elements to regulate mutual internal distances, as evidenced by the identical position of the maxima of the IR bands of complexes with hydrogen bonds in different crystal matrices.

### References

1. L.I. Bryukvina, N.A. Ivanov, *J. Fluor. Chem.*, 192A, 124–130 (2016).
2. L.I. Bryukvina, *Phys. Sol. State*, 61 (10), 1808–1814 (2019).

## UP-CONVERSION PHOSPHORS BASED ON ALKALINE EARTH FLUORIDES

S. V. Kuznetsov<sup>1</sup>, E. I. Madirov<sup>2,4</sup>, V. A. Konyushkin<sup>1</sup>,  
A. N. Nakladov<sup>1</sup>, P. P. Fedorov<sup>1</sup>, T. Bergfeldt<sup>3</sup>, D. Busko<sup>4</sup>,  
I. A. Howard<sup>1</sup>, B. S. Richards<sup>4</sup>, A. Turshatov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Prokhorov General Physics Institute RAS  
Moscow, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Kazan Federal University  
Kazan, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Institute for Applied Materials, Karlsruhe Institute of Technology  
Karsruhe, Germany*

<sup>4</sup>*Institute of Microstructure Technology, Karlsruhe Institute of Technology  
Karsruhe, Germany*

Up-conversion (UC) of near-infrared radiation to visible light has great interest due to applications in the conversion of solar radiation, thermometry, biosensing, and anti-counterfeiting.

The aims of this work are i) to provide a more detailed understanding of UC mechanism in the BaF<sub>2</sub> and SrF<sub>2</sub> host (via the study of both UC and DS luminescent properties) and ii) to assess the highest possible UC efficiency via measurements of absolute quantum yield in an integrating sphere ( $\phi_{UC}$ ) for different concentrations of the doping ions and matrix.

The BaF<sub>2</sub>:Yb:Er and SrF<sub>2</sub>:Yb:Er single crystals were grown by the Bridgman technique in a vacuum furnace with CF<sub>4</sub> fluorinating atmosphere.

The very high quantum yield value of 10.0% (at 490 W/cm<sup>2</sup>) was observed for the BaF<sub>2</sub>:Er (2 mol. %):Yb (3 mol. %). The quantum yield (6.5 %) was registered for SrF<sub>2</sub>:Er(2 mol. %):Yb(3 mol. %) at 230 W/cm<sup>2</sup>.

These single crystals were tested as an up-conversion luminescence standard and for increasing of efficiency of perovskite solar cells.

*The reported study was funded by RFBR (project number 21-53-12017 for S.V.K., V.A.K., and A.N.N.) and DFG (project number TU 487/8-1 for A.T. and B.S.R.).*

## DIAMOND X-RAY LUMINESCENCE COMPOSITE WITH EMBEDDED YAG:Sc:Ce NANOPARTICLES

S. Kuznetsov<sup>1</sup>, V. Sedov<sup>1</sup>, I. Kamenskikh<sup>2</sup>, A. Martyanov<sup>1</sup>,  
D. Vakalov<sup>3</sup>, S. Savin<sup>4</sup>, E. Rubtsova<sup>2</sup>, V. Tarala<sup>3</sup>, S. Omelkov<sup>6</sup>,  
A. Kotlov<sup>7</sup>, V. Ralchenko<sup>1,5</sup>, V. Konov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

<sup>3</sup>*North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation*

<sup>4</sup>*MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia*

<sup>5</sup>*Harbin Institute of Technology, Harbin, China*

<sup>6</sup>*Institute of Physics, University of Tartu, Tartu, Estonia*

<sup>7</sup>*Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) Research Center  
Hamburg, Germany*

Development of high-intensity X-ray free-electron lasers (XFEL) has introduced the challenge of synthesizing durable scintillation and visualizer materials. Strict requirements are set for visualizers due to the intense energetic action that leads to their rapid destruction. Diamond is a unique material that is able to withstand high radiation doses and heat loads. Earlier in [1], composite diamond visualizer based on  $\beta$ -NaGdF<sub>4</sub>: Eu nanoparticles embedded in a diamond matrix was proposed.

Nowadays, X-ray luminescent diamond composite films with embedded yttrium-aluminum nanoparticles doped scandium and cerium were designed. The most intense X-ray luminescence was achieved for [Y<sub>2.98</sub>Ce<sub>0.02</sub>]{Al<sub>2</sub>}Al<sub>3</sub>O<sub>12</sub>. The composition-optimized nanoparticles were embedded into a polycrystalline diamond matrix to form a diamond-YAG:Ce composite. For the obtained composite, an X-ray luminescence from the Ce<sup>3+</sup> ions near 550 nm was demonstrated. The designed composites may be used as adjustable and durable scintillating materials for a wide range of applications.

*The reported study was funded by RFBR (project number 20-32-70074).*

### References

1. V. Sedov, S. Kouznetsov, A. Martyanov et al., *ACS Appl. Nano Mater.*, 3, 1324–1331 (2020).

## CHARACTERIZATION OF DEFECT LUMINESCENCE IN ALUMINOBOROSILICATE GLASSES

E. Malchukova<sup>1</sup>, B. Boizot<sup>2</sup>, E. Terukov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Ioffe Physical-Technical Institute RAS  
St. Petersburg, Russian Federation, [e.malchukova@mail.ioffe.ru](mailto:e.malchukova@mail.ioffe.ru)*

<sup>2</sup>*Service de Recherches de Metallurgie Physique CEA,  
Centre de Saclay, France, [bruno.boizot@cea.fr](mailto:bruno.boizot@cea.fr)*

It's known that the available structural information on the defects existing in glass matrix derives mainly from the results of electron paramagnetic resonance (EPR) spectrometry. But one should consider that this method is directly applicable only to the subclass of the defects which are paramagnetic. A more formidable problem is the pre-existing intrinsic point defects, which are not of paramagnetic nature. According to the literature examples of intrinsic diamagnetic defects believed to occur in silica glass include neutral oxygen vacancies ( $\equiv\text{Si-Si}\equiv$ ), two-coordinated silicone (O-Si-O-), and peroxy linkages ( $\equiv\text{Si-O-O-Si}\equiv$ ) [1]. At the same time the most common extrinsic defects are associated with hydroxyl and chloride impurities. It is obvious the defect designation in multicomponent glasses is extremely complex. Thus the combined information obtained from EPR- and optical (absorption and photoluminescence (PL)) spectra can give an additional data both on the structure of the glasses and of the pre-existing/radiation-induced imperfections. Often some defects can provide large EPR signal but the induced optical extinction (transmission loss) is very low and vice versa. A compendium of EPR/optical correlations was reported in the literature [2] and pointed to the most likely origins of many defect-related optical absorption bands in the visible, ultraviolet and vacuum-ultraviolet spectral regions. But the assignment of the bands is still controversial in some cases.

In this report some preliminary results on optical study of pristine aluminoborosilicate glasses are presented. The spectroscopic characteristics of intrinsic oxygen-deficient centers (ODCs) in glasses and models of the centers are suggested and discussed. New and original results are also presented from experiments on the formation of radiation-induced color centers and the destruction of the ODCs in pure and RE-doped aluminoborosilicate glasses. These results are interpreted in terms of the ODCs being an assembly of defects of the 'oxygen vacancy'-type.

### References

1. L. Skuja, M. Hirano, H. Hosono, K. Kajihara, *Phys.Stat.Solidi C*, 2(1), 15-24, (2005).
2. L. Skuja, *J. Non-Cryst. Sol.*, 239(1-3), 16-48, (1998).

## TIME-RESOLVED LUMINESCENCE AND VUV EXCITATION SPECTROSCOPY OF CERIUM DOPED GARNET SCINTILLATOR MATERIALS

V. Pankratov

*Institute of Solid State Physics, University of Latvia  
Riga, Latvia, [vladimirs.pankratovs@cfi.lu.lv](mailto:vladimirs.pankratovs@cfi.lu.lv)*

In last decade it was demonstrated that the cerium doped garnet crystals ( $Gd_3(Ga,Al)_5O_{12}$ ,  $Lu_3(Ga,Al)_5O_{12}$ ,  $(Lu,Gd,Y)_3(Ga,Al)_5O_{12}$ ,  $(Lu,Gd)_3(Ga,Al)_5O_{12}$ ) have a huge interest for application as a scintillator. Due to the superior scintillation properties garnet compounds are perspective for high-energy physics as well as in medical applications in emission tomography, in particular in time-of-flight positron emission tomography (TOF PET).

In current research the primary attention was focused on cerium doped  $Gd_3Ga_3Al_2O_{12}$  (or GGAG) single crystals as well as GGAG:Ce single crystals co-doped by divalent ( $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ) and tetravalent ( $Zr^{4+}$ ,  $Ti^{4+}$ ) ions have been studied by means of time-resolved luminescence as well as the excitation luminescence spectroscopy in vacuum ultraviolet (VUV) and soft X-ray (XUV) spectral range. Tunable laser excitation was applied for time-resolved experiments in order to obtain luminescence decay curves under excitations in  $Ce^{3+}$ ,  $Gd^{3+}$  and excitonic absorption bands. The influence of the co-dopant ions on the  $Ce^{3+}$  luminescence decay kinetics is elucidated. The fastest luminescence decay was observed for the  $Mg^{2+}$  co-doped crystals under any excitation below bandgap energy indicating the perturbation of the  $5d$  states of  $Ce^{3+}$  by  $Mg^{2+}$  ions.

Synchrotron radiation from 1.5 GeV storage ring of MAX IV synchrotron facility (Lund, Sweden) was utilized for the luminescence excitation in the energy range from 4.5 to 800 eV. The excitation and emission spectra have been measured on the luminescence endstation [1; 2] of FinEstBeAMS beamline [3]. Special attention was paid to the analysis of  $Ce^{3+}$  excitation spectra in VUV and XUV spectral range where multiplication of electronic excitation (MEE) processes occurs. Our results demonstrated that GGAG:Ce single crystals co-doped by  $Mg^{2+}$  ions as well as the GGAG:Ce crystal annealed in vacuum reveal the most efficient excitation of  $Ce^{3+}$  emission in VUV-XUV excitation range and, therefore, exhibit the best scintillation performance. The role of intrinsic defects in MEE processes in the co-doped as well as in the annealed GGAG:Ce single crystals is clearly demonstrated and discussed [4].

Another important topic of our study is the understanding of the mechanisms of energy transfer processes in cerium doped garnets. In garnets of simpler compositions, e.g. YAG exciton emission is well-known and energy transfer to rare-earth ions is established [5]. However, in GGAG:Ce single crystals no emission from excitons was detected so far, while excitation spectra of  $Gd^{3+}$  and  $Ce^{3+}$  still contained excitation peaks characteristic for excitons [6]. That

can be attributed to complete energy transfer from excitons to  $Gd^{3+}$  ions. Our study demonstrates that when part of the lattice of garnets is substituted with Lu ions (for instance in  $(Lu,Gd)_3(Ga,Al)_5O_{12}$ ),  $Ce^{3+}$  luminescence is enhanced via  $exciton \rightarrow Gd^{3+} \rightarrow Ce^{3+}$  energy transfer [7]. The energy transfer from excitons is clearly visible in excitation spectra for both  $Ce^{3+}$  and  $Gd^{3+}$  emissions of  $(Lu,Gd)_3(Ga,Al)_5O_{12}$ . On the other hand, if  $(Lu,Gd)_3(Ga,Al)_5O_{12}$  garnet contains a high concentration of  $Ce^{4+}$  ions the  $exciton \rightarrow Gd^{3+} \rightarrow Ce^{3+}$  energy transfer path is interrupted, which could be one of the reasons for lowered  $Ce^{3+}$  X-ray excited luminescence in  $Mg^{2+}$  co-doped garnets.

*The work was supported by the Latvian Science Council grant "The study of radiation damage in novel garnet scintillators for high energy physics and medical applications" No. LZP 2020/2-0074 and National Research Program in cooperation with the European Organization for Nuclear Research (CERN) under the topic "High-Energy Physics and Accelerator Technologies".*

### References

1. V. Pankratov, A. Kotlov, *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B*, 474, 35 (2020).
2. V. Pankratov et al., *Radiat. Meas.*, 121, 91 (2019).
3. R. Pärna, et al., *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A*, 859, 83 (2017).
4. V. Pankratova et al., *Sci. Rep.*, 10, 20388 (2020).
5. V. Pankratov et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 55, 1509 (2008).
6. A.P. Kozlova et al., *Results Phys.*, 16, 103002 (2020).
7. V. Khanin et al., *J. Lumin.*, 237, 118150 (2021).

## OPTICAL CHARACTERISTICS OF LiF CRYSTAL LAYERS CONTAINING MAGNESIUM AND LITHIUM NANOPARTICLES

V. L. Paperny

*Irkutsk State University, 664003, Karl Marx st. 1, Irkutsk, Russia,  
[papermy@math.isu.runnet.ru](mailto:papermy@math.isu.runnet.ru)*

A review of recent experimental studies of the optical characteristics of LiF crystals irradiated with a beam of high-energy (50–100 keV) Li and Mg ions is presented. It is shown that nanosized metal particles (NPs) are formed in the surface layer of the crystal ~ 100 nm thick. The optical characteristics of these layers differ significantly from the layers obtained by similar methods and containing nanoclusters of heavy metals (Ag, Cu, Au). In particular, the maximum of the absorption band due to surface plasmon resonance (SPR) for Mg significantly exceeds the maximum of the SPR band for Ag and Cu at the same irradiation dose. Therewith, the average size of Mg NPs is significantly less than the size of the latter NPs. Surface structures with periodically varying luminescent properties, which can be applied in photonics, have been obtained.

## STRIKING LATTICE PARAMETER-DEPENDENT FEATURES IN THE DELOCALIZATION OF SELF-TRAPPED HOLE CENTERS $V_k$ IN BINARY AND COMPLEX HALIDES

A. I. Popov, E. A. Kotomin

*Institute of Solid State Physics, University of Latvia, Riga, Latvia*  
[popov@latnet.lv](mailto:popov@latnet.lv), [popov@cfi.lu.lv](mailto:popov@cfi.lu.lv)

The self-trapped hole (STH) polarons (also called also  $V_k$  centres) where a hole is shared by two nearest halogens,  $X_2^-$ , are very common color centers created in alkali halides and alkaline-earth halides under all kinds of irradiation (UV light, electrons, gamma rays, neutrons, heavy swift ions). The hole polarons start to migrate and recombine above certain critical temperatures. Their thermally induced decay has been observed by different experimental techniques (optical absorption, EPR, thermostimulated luminescence and etc) in almost all alkali halides, as well as in some other metal halides and more complex halides, such as perovskite halides, ammonium halides, halide sodalites etc [1].

In this report, we review and analyse the self-trapped hole center migration temperatures for a whole series of alkali and alkaline-earth halides, and also for  $MgF_2$ ,  $CdF_2$ ,  $SrI_2$ ,  $CaI_2$ , fluoroperovskites such as  $KMgF_3$ ,  $RbMgF_3$ ,  $BaLiF_3$  etc, fluorohalides such  $BaFBr$ ,  $BaFI$ ,  $PbFCl$  and etc as a function of halogen-halogen distance in a regular crystalline lattice as well as of halogen-halogen distance in isolated molecular ions. We will also report new results on TSL of  $ScF_3$ . We will discuss similar situation in some other metal halides, such as  $CeF_3$  or  $PbF_2$ , where  $V_k$  have not been observed.

### References

1. A.I. Popov, E.A. Kotomin, J. Maier, *Solid State Ion.*, 302, 3-6 (2017).

## METAL HALIDE PEROVSKITES: OXYGEN SENSITIVITY

Yangyang Ju, Haizheng Zhong

*Beijing Institute of Technology*  
*Beijing, China, [7520190174@bit.edu.cn](mailto:7520190174@bit.edu.cn)*

Recently, metal halide perovskites (MHPs) emerging as a new photoelectric material, while its poor environmental stability limits its large-scale application [1]. Oxygen is one of the critical factors induced instability of perovskite materials [2]. On the other hand, oxygen instability of MHPs implies the sensitivity to oxygen. It was found that the oxygen can reversibly modulate the photoelectric properties of perovskites [3]. In particular, reperorovskite-based resistive oxygen sensor with excellent performance has been reported [4]. Nevertheless, the toxicity of lead places large obstacle on their further practical applications. Tin halide perovskites (THPs) are recognized as ideal lead-free materials, the low redox potential of Sn(II)/Sn(IV) makes them extremely sensitive to oxygen, implying the potential to achieve ultra-low oxygen detection. Nevertheless, the interaction between tin-based perovskite and oxygen has been less studied.

In this context, a home-built experimental setup based on specially customized small glove box was designed. The evolution of optical property of two-dimensional (2D) layered tin-based perovskite thin film of  $\text{PEA}_2\text{SnI}_4$  under a wide range of oxygen concentration was systematically investigate in -situ. It was found a different PL responses to low and high oxygen concentrations. The underlying interaction mechanism of  $\text{PEA}_2\text{SnI}_4$  film was confirmed by Density Functional Theory (DFT) calculation. By optimizing material and combining optical fiber sensing technology, trace oxygen sensor of  $\text{PEA}_2\text{SnI}_4$  combining with tilted fiber Bragg grating (TFBG) was demonstrated.

### References

1. J. Yang, B.D. Siempelkamp, D. Liu, T.L. Kelly, *ACS Nano*, 9, 1955–1963 (2015).
2. N. Aristidou, I. Sanchez-Molina, T. Chotchuangchutchaval, M. Brown, I. Martinez, T. Rath, S.A. Haque, *Angew. Chem., Int. Ed.*, 54, 8208–8212 (2015).
3. H.H. Fang, S. Adjokatse, H. Wei, J. Yang, G.R. Blake, J. Huang, J. Even, M.A. Loi, *Sci. Adv.*, 2, E1600534 (2016).
4. M.-A. Stoeckel, M. Gobbi, S. Bonacchi, F. Liscio, L. Ferlauto, E. Orgiu, P. Samori, *Adv. Mater.*, 29, 1702469 (2017).

## COMBINATION OF PLASMON-ACTIVE STRUCTURE AND WO<sub>3</sub>-CdS PHOTOCATALYST FOR ENHANCED WATER SPLITTING PROCESS

D. Zabelin, A. Zabelina, A. Tulupova, O. Lyutakov

*University of Chemistry and Technology, Prague, Czech Republic*  
[zabelind@vscht.cz](mailto:zabelind@vscht.cz)

In this work a combined material which consists of a plasmon active gold grating and WO<sub>3</sub>-CdS photocatalyst is created. The combination of WO<sub>3</sub> nanoflakes and CdS quantum dots semiconductors is one of the best for the photocatalytic formation of hydrogen and oxygen by overall water splitting process based on the Z-scheme mechanism. The plasmon-active structure of gold grating is able to accelerate the transition of “hot electrons” from one semiconductor to another and thus increase the efficiency of hydrogen and oxygen production. The purpose of the plasmon active structure is to create localized surface plasmon resonance (LSPR), which occurs due to excitation of collective electronic vibrations on the metal nanostructure surface by incident light, leading to significant optical amplification of the near electromagnetic field and multiple increase in WO<sub>3</sub>-CdS efficiency.

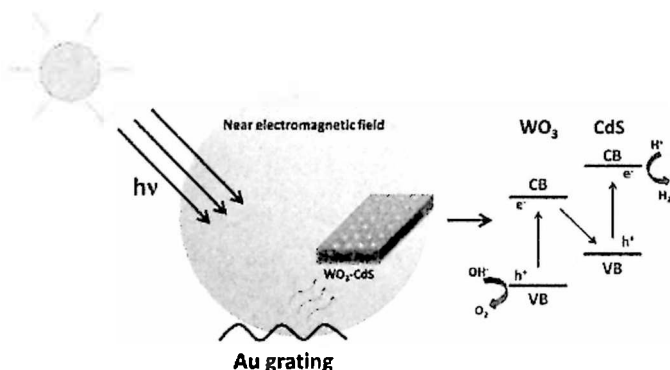


Fig. Schematic representation of overall water splitting process

*This work was supported from the grant of Specific university research – grant No A2\_FCHT\_2021\_096.*

### References

1. L. Lin, H. Ou, Y. Zhang, *ACS Catalysis*, 6(6), 3921-3931 (2016).
2. M. Faraji, N. Naseri, A.Z. Moshfegh, M. Yousefi, S. Yousefzadeh, M. Zirak, T.H. Jeon, W. Choi, *Energy Environ. Sci.*, 12(1), 59-95 (2019).

## PHOTOCATALYTIC SELECTIVE HYDROGENATION OF PHENYLACETYLENE TO STYRENE

A. Zabelina, D. Zabelin, O. Lyutakov

University of Chemistry and Technology, Prague, Czech Republic  
[zabelina@vscht.ru](mailto:zabelina@vscht.ru)

In this work a highly selective photocatalytic hydrogenation of  $C\equiv C$  groups was performed. Au@Pt core-shell multimetallic particles were the catalyst. The hydrogenation under laser illumination at a wavelength corresponding to the absorption band of the plasmon was performed. We showed that the selectivity of the sequential reaction can be controlled under visible light illumination. The model transformation was shown on phenylacetylene for the  $C\equiv C$  group. The catalytic conversions in an environmentally friendly environment under visible light lighting and with a source of hydrogen from sodium borohydride was performed (Fig.).

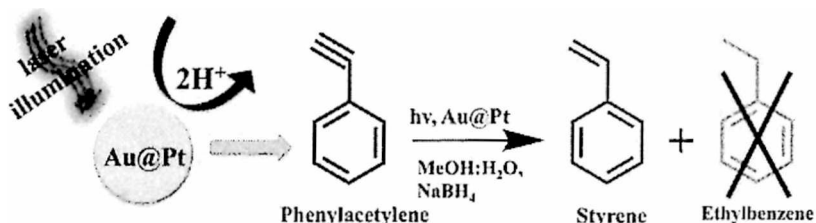


Fig. Schematic representation of this work: a highly selective photocatalytic hydrogenation of phenylacetylene under laser illumination

*This work was supported from the grant of Specific university research – grant No A2\_FCHT\_2021\_086.*

### References

1. C.P. Phasanth, J. Ebbin, A. Abhijith, D.S. Nair, I. Ibnusaud, J. Raskatov, B. Singaram, *J. Org. Chem.*, 83(3), 1431-1440 (2018).
2. Y. Huang, Z. Liu, G. Gao, Q. Xiao, W. Martens, A. Du, H. Zhu, *Catal. Sci. Technol.*, 8(3), 726-734 (2018).
3. X. Fan, Y. Yao, Y. Xu, L. Yu, C. Qiu, *ChemCatChem*, 11 (11), 2596-2599 (2019).
4. J. Quiroz, E.C. Barbosa, T.P. Araujo, J.L. Fiorio, Y.C. Wang, Y.C. Zou, S.J. Haigh, *Nano Lett.*, 18 (11), 7289-7297 (2018).

## НОВЫЕ InGaSb/AIP КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ: ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ПАМЯТИ

Д. С. Абрамкин, А. А. Блошкин, М. О. Петрушков,  
Е. А. Емельянов, М. А. Путьято, Е. С. Коптев, М. Ю. Есин,  
А. К. Гутаковский, В.В. Преображенский

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирск, Россия, [dalamber.07@mail.ru](mailto:dalamber.07@mail.ru)*

Одним из перспективных направлений для создания универсальной памяти, сочетающей в себе быстродействие DRAM с возможностью длительного энергонезависимого хранения данных, является флеш-память, использующая в качестве плавающего затвора полупроводниковые самоорганизованные квантовые точки (КТ) на основе материалов  $A^{III}B^V$  [1]. В то время как быстродействие такой памяти ограничено временами энергетической релаксации дырок в КТ ( $> 10^{-12}$  с), достижение необходимой длительности хранения заряда (10 лет) остаётся открытым вопросом. На данный момент рекордным значением является хранение заряда в течение 4 дней в структурах на базе GaSb/GaP КТ [2]. Увеличение энергии локализации дырок ( $E_{loc}$ ), а значит и времени хранения заряда, в КТ возможно за счёт замены материала матрицы на AIP, потолок валентной зоны которого на 500 мэВ ниже по энергии, чем в GaP. На данный момент сообщений о детальном расчёте энергетического спектра InGaSb/AIP КТ в научной литературе нет. В докладе приводятся результаты расчётов энергетического спектра дырочных состояний в таких КТ.

Проведены расчёты энергетического спектра  $Ga_xAl_{1-x}Sb_yP_{1-y}$ ,  $In_xAl_{1-x}Sb_yP_{1-y}$  и  $In_xGa_{1-x}Sb_yP_{1-y}$  КТ, сформированных в AIP, в ходе которых осуществлялось варьирование состава и размеров КТ. Показано, что КТ могут обеспечить  $E_{loc}$  до 2 эВ для GaSb/AIP, в то время как GaSbP/AIP с долей Sb 0,55–0,65 и высотой КТ 4–5 нм обеспечивают  $E_{loc}$  1,35–1,50 эВ, достаточную для хранения заряда в течение 10 лет при комнатной температуре [1]. Отметим, что деформация в таких КТ составляет 6–7 %, что близко к хорошо изученным InAs/GaAs КТ. Добавление атомов Al или In в состав КТ при условии сохранения необходимого значения  $E_{loc}$  приводит к увеличению деформации до 10,5 % для AlSbP/AIP и до 12% для InSbP/AIP. Вариации состава  $In_xAl_{1-x}Sb_yP_{1-y}$ /AIP КТ при сохранении необходимого значения  $E_{loc}$  также демонстрируют высокие значения деформаций (10–12,5 %). Таким образом, продемонстрировано, что гетеросистема GaSb/AIP наиболее перспективна для изготовления ячеек универсальной памяти.

### *Литература*

1. A. Marent, et al., *Semicond. Sci. Technol.*, 26, 014026 (2011).
2. L. Bonato, et al., *Phys. Stat. Solidi*, 253, 1877 (2016).

## ДАЛЬНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ В ГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ ЖИДКОСТЕЙ

Ю. В. Аграфонов, И. С. Петрушин, Д. В. Халанмов

*Иркутский государственный университет*

*Иркутск, Россия, [agrafonov@phvsdep.isu.ru](mailto:agrafonov@phvsdep.isu.ru)*

Свойства молекулярных систем на границе раздела фаз определяются асимптотическим поведением корреляционных функций с убывающим дальним осциллирующим порядком. Характерные примеры: граница раздела жидкость – насыщенный пар, жидкость в контакте с твердой поверхностью, поверхность расплава вблизи температуры кристаллизации.

Нами рассмотрена молекулярная система твердых сфер в контакте с твердой поверхностью. Одночастичная функция  $G(z_1)$  распределения, задающая локальный профиль плотности, зависит, в силу аксиальной симметрии системы, только от координаты  $z_1$  – удаление от поверхности.

Нами предложено линейное интегральное уравнение для одночастичной функции распределения [1; 2], которое записывается в форме уравнения Фредгольма второго рода

$$e^{a(z_1)} - 1 = 2\pi n \int_0^{\infty} dz_2 (e^{a(z_2)} - 1) \int_{|z_1|}^{\infty} r_{12} dr_{12} C_{12}^{(1)}(r_{12}) - 2\pi n \int_{z_1}^{\infty} dz_{12} \int_{|z_{12}|}^{\infty} r_{12} dr_{12} C_{12}^{(1)}(r_{12})$$

Правая часть и ядро уравнения определяются из решения нелинейного уравнения Перкус – Йевики [3; 4] для пространственно-однородной жидкости с плотностью  $n$ , задающей граничное условие вдали от поверхности. Показано, что асимптотическое поведение  $G(z_1)$  имеет вид:

$$G(z_1) = e^{-k_1 z_1} (A \sin k_2 z_1 + B \cos k_2 z_1),$$

где волновые числа  $k_1$ ,  $k_2$  находятся из системы трансцендентных уравнений.

### *Литература*

- 1 Yu.V. Agrafov, I.S. Petrushin, *Condensed Matter and Interphases*, 22(2), 291–302 (2020).
- 2 Y.V. Agrafov, I.S. Petrushin, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 84, 783–787 (2020).
- 3 G.A. Martinov *Fundamental theory of liquids; method of distribution functions*. Bristol: Adam Hilger, 1992, 470 p.
- 4 F.J. Rogers, D.A. Young, *Phys. Rev. A.*, 30(2), 999 (1984).

## ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В ПРОЦЕССЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И УСИЛЕНИЯ ЧИРПИРОВАННОГО ИМПУЛЬСА

С. В. Алексеев, В. Ф. Лосев, Д. М. Лубенко, А. Г. Ястремский

*Институт сильноточной электроники СО РАН  
Томск, Россия, [sergev100@sibmail.com](mailto:sergev100@sibmail.com)*

Лазерная система THL-100, работающая на второй гармонике (ВГ) Ti:Sa стартового комплекса ( $\lambda = 475$  нм), является в настоящее время одной из наиболее мощных систем в видимой области спектра [1; 2]. Для эффективного усиления импульса излучения в выходном XeF(C-A) усилителе и последующей его компрессии важно иметь оптимальный спектральный состав излучения. Для его получения требуется проведение исследований, направленных на поиск условий формирования требуемого спектра в нелинейном кристалле и в активной среде XeF(C-A) усилителя. При этом следует отметить, что усиление импульса излучения в XeF(C-A) усилителе может осуществляться при его длительности более 2 пс, чтобы не допустить нелинейных эффектов и разрушения оптических элементов. Удлинение спектрально ограниченного импульса осуществляется за счёт придания импульсу положительного или отрицательного чирпа.

В настоящей работе экспериментально исследуются возможности изменения спектрального состава второй гармоники в процессе её формирования в нелинейном кристалле КДП в зависимости от величины чирпа, и теоретически исследуется поведение спектрального состава на выходе лазерной системы после усиления чирпированного импульса излучения в XeF(C-A) усилителе. Проведен анализ и обсуждение полученных результатов, показана деформация спектра после усиления в газовом усилителе за счёт так называемого «красного» или «синего» смещения, и отмечена аналогичная деформация спектра второй гармоники после нелинейного кристалла.

*Работа была поддержана грантом РФФ № 19-19-00241.*

### *Литература*

1. S. Alekseev, A. Aristov, N. Ivanov, B. Kovalchuk, V. Losev, G. Mesyats, L. Mikheev, Y. Panchenko, N. Ratakhin, *Laser Part. Beams*, 31 (1), 17–21 (2013).
2. С.В. Алексеев, Н.Г. Иванов, В.Ф. Лосев, Г.А. Месяц, Л.Д. Михеев, Н.А. Ратахин, Ю.Н. Панченко, *Квант. электрон.*, 49 (10), 901-904 (2019).

## ДЕТЕКТОРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ И ОКСИДОВ АЛЮМИНИЯ И КРЕМНИЯ

Н. Л. Алукер, А. С. Артамонов

*Кемеровский государственный университет*

*Кемерово, Россия, [naluker@gmail.com](mailto:naluker@gmail.com)*

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,*

*Москва, Россия, [asartamonov1@mephi.ru](mailto:asartamonov1@mephi.ru)*

Материалы на основе оксидов кремния и алюминия относятся к радиационно-стойким материалам, имеют близкие ширины запрещенной зоны  $\sim 9$  эВ, многообразное техническое применение и широкое распространение в окружающей среде. Нитрид алюминия – довольно широко зонный материал ( $\sim 6$  эВ), является в настоящее время одним из наиболее перспективных материалов, применяемым в микроэлектронике. Энергии смещения алюминия, кремния и кислорода в междоузлия велики, поэтому их облучение ИИ ниже пороговых энергий не приводит к созданию стабильных собственных дефектов в регулярной решетке, в отличие от ШГК [1, 2]. Тем не менее, на их основе изготавливаются эффективные высокочувствительные детекторы ИИ и УФ. Это означает, что возбуждение видоизменяет существующую в материале дефектную и примесную структуру, а люминесцентная считка позволяет фиксировать эти изменения на уровне очень незначительных дозовых воздействий  $\sim 2$  мкГр (ТЛД-500 ( $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ )) [3, 4]. Линейный характер люминесцентного отклика сохраняется в очень широком диапазоне доз до 2 кГр (ТЛД-К ( $\text{SiO}_2$ )) [5]. Обеспечение их блестящих дозиметрических характеристик выполняется за счет специальных условий синтеза, предусматривающих создание в материалах больших концентраций устойчивых ростовых дефектов в виде кислородных вакансий в разных зарядовых состояниях [3–5]. При нагреве кристалла в восстановительных условиях в присутствии углерода обеспечивается диффундирование атомов решеточного кислорода в газовую фазу, создавая дефицит кислорода с образованием вакансий в анионной подрешетке  $\text{V}_\text{o}^{++}$ , которые захватив электроны, становятся стабильными центрами F-типа. Созданные таким путем F-центры устойчивы вплоть до температуры 1600 К, однако изменение их концентрации после предварительного облучения чрезвычайно эффективно формирует ТЛ (рекомбинационный процесс) при температуре  $\sim 450$  К или OSL при ИК подсветке, что свидетельствует о том, что в формировании сигнала учувствуют существующие в решетке вакансионные и примесные дефекты, а облучение переводит систему в иное метастабильное состояние, благодаря перезарядке существующих центров. Примеси играют, скорее, второстепенную роль (роль компенсаторов заряда) в этих процессах, так как конечным этапом рекомбинационного взаимодействия является внутрицентровое возбуждение и

люминесценция F и F<sup>+</sup>-центров в необходимом для ТЛ временном диапазоне ~ мс. Ряд примесей с переменной валентностью (Cr, Mn, Ce и др.) обладающих собственной люминесценцией в аналогичном временном диапазоне также могут вносить вклад в формирование люминесцентного сигнала.

В данном исследовании изучаются основные оптические характеристики: спектры поглощения, спектры возбуждения, люминесценции, кинетики люминесценции при фото возбуждении микросекундными импульсами, ТЛ детекторов и керамических материалов на основе нитрида и оксида алюминия, которые могут быть перспективны в дозиметрии. Изучается влияние на эти характеристики ИИ в диапазонах доз от фоновых до 100 кГр при воздействии излучений разных типов (свет, электроны, рентгеновское, гамма излучение, протоны высоких энергий, нейтроны) при существенно разных плотностях энергии. Мы полагаем, что проведенные исследования позволяют приблизиться к пониманию механизмов взаимодействия излучения с материалами и снять некоторые противоречия в столь противоречивых свойствах оксидов как высокая радиационная стойкость и высокая чувствительность к излучению. Интересно, что многие закономерности, обнаруженные на кристаллических системах, сохраняются при изменении состояния до порошкообразных, стеклообразных, керамических, тонкопленочных структур.

Проводятся оценка возможности применения исследованных материалов для регистрации слабо проникающего излучения с минимизацией размеров детекторов до приемлемого минимума и подбору подложек для них. Задача разработки ТЛ дозиметров с характеристиками эквивалентными материалам микроэлектроники, способными обеспечить требуемую чувствительность в настоящее время стоит довольно остро. Применяемые подложки должны соответствовать целому ряду специальных требований. Интересно, что можно попытаться использовать в качестве детектора и подложки одни и те же материалы с разной дефектностью.

### Литература

1. Ч.Б. Лушник, А.Ч. Лушник. М.: Наука, 264 с (1989).
2. G.P. Pells, D.C. Phillips, *J. Nucl. Mater.*, 80, 207–214 (1979).
3. M.S. Akselrod, V.S. Kortov, D.J. Kravetsky, V.I. Gotlib, *Radiat. Prot. Dosim.*, 32, № 1, 15–20 (1990).
4. В.С. Кортов, А.И. Сюрдо, Ф.Ф. Шарафутдинов, *ЖЭТФ*, 67, № 7, (1997).
5. N.L. Aluker, Y.M. Suzdaltseva, M.E. Hermann, A.S. Dulepova, *Instruments and techniques of the experiment*, 59(5), 733–739 (2016)

## ТЕРАГЕРЦОВАЯ И ИНФРАКРАСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГИБРИДНОГО ПЕРОВСКИТА $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

К. Н. Болдырев<sup>1</sup>, В. Е. Аникеева<sup>1,2</sup>, О. И. Семенова<sup>3</sup>, М. Н. Попова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт спектроскопии РАН

Москва, Троицк, Россия, [anikeeva.ve@phystech.edu](mailto:anikeeva.ve@phystech.edu)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирск, Россия

В течение последнего десятилетия гибридные металлорганические перовскиты  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$  ( $X = \text{I}, \text{Br}, \text{Cl}$ ), продемонстрировали свою эффективность в качестве материалов для солнечных элементов, а также для светодиодов, лазеров, фотодетекторов и термоэлектрических устройств. Большинство функциональных свойств этого класса соединений тесно связано с особенностями фононного спектра и электрон-фононного взаимодействия.

В Институте спектроскопии РАН на уникальной аппаратуре высокого разрешения проведено исследование динамики решетки кристалла  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Большой монокристалл хорошего оптического качества был выращен в Институте физики полупроводников СО РАН. Исследована температурная зависимость (5 – 350 К) спектров отражения в терагерцовом диапазоне и спектров пропускания в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне. 12 низкочастотных мод и торсионная мода молекулярного катиона  $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$  ( $306 \text{ см}^{-1}$ ) обнаружены впервые. Модовые параметры Грюнайзена для наиболее сильных мод отрицательны, что указывает на взаимодействие с мягкой модой. При фазовом переходе из тетрагональной в орторомбическую фазу ( $\sim 160 \text{ К}$ ) в многофононных спектрах наблюдаются выраженные особенности и гистерезис. Спектральные особенности при температурах ниже 70 К коррелируют с переходом к туннельной динамике. Расщепление спектральной линии при этой температуре предположительно связано с туннельным расщеплением [1].

*Работа поддержана грантом РФФ № 19-72-10132 и Министерством науки и высшего образования РФ (ГЗ 0039-2019-0004 и 0306-2019-0015 – рост кристаллов, О.И.С.).*

### Литература

1. K.N. Boldyrev, V.E. Anikeeva, O.I. Semenova, M.N. Popova, *J. Phys. Chem. C*, 124 (42), 23307-23316, (2020).

## ДИФРАКЦИЯ ВИХРЕВЫХ ГАУССОВЫХ ПУЧКОВ НА ДВУМЕРНОЙ РАМАНОВСКОЙ РЕШЕТКЕ

В. Г. Архипкин, С. А. Мысливец

*Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН  
Красноярск, Россия, [avg@iph.krasn.ru](mailto:avg@iph.krasn.ru)*

Уже в течение более двух десятилетий оптические вихри (или пучки с фазовой сингулярностью) представляют огромный интерес и активно исследуются благодаря их уникальным свойствам [1]. В лекции рассматривается дифракция вихревого гауссова пучка на двумерной (2D) рамановской дифракционной решетке, которая формируются при рамановском (комбинационном) взаимодействии пробного излучения со стоячей волной накачки [2]. Пробная волна распространяется перпендикулярно стоячей волне. Рассмотрена дифракция вихревого пучка как в ближней, так и в дальней зоне. Показано, что в ближнем поле на расстоянии  $Z_T$  от решетки, которое соответствует классической длине Тальбота [3], возникают квазитальботовские изображения [4]. Дифракционные картины в плоскостях Тальбота представляют собой периодический двумерный массив локальных кольцевых вихревых пучков (бимлетов) с топологическими зарядами, равными заряду освещающего зондирующего пучка. Боковые (внеосевые) бимлеты состоят из нескольких перекрывающихся вихрей с топологическими зарядами  $l = 1$  и  $l = -1$ , а их центры (особые точки) смещены друг относительно друга. Показано, что в ближней зоне ТС сохраняется, а полное дифракционное поле представляет собой единый (глобальный) вихрь с эффективным топологическим зарядом, равным заряду вихревого зондирующего пучка. В дальней зоне дифракционные картины также представляют собой двумерный массив кольцевых локальных вихрей с периодом, зависящим от координаты  $z$ . Их топологические заряды равны заряду пробного поля. Показано, что в дальнем поле полный топологический заряд дифрагированного поля также равен топологическому заряду пробного поля. Выбирая параметры поля накачки, можно эффективно управлять интенсивностью дифракционных порядков.

### *Литература*

1. G. Gbur, *Singular Optics* (Boca Raton, FL: CRC Press).
2. V.G. Arkhipkin, S.A. Myslivets, *Phys. Rev. A*, **98**, 013838 (2018).
3. J. Wen, Y. Zhang, M. Xiao, *Adv. Opt. Photon.*, **5**, 83 (2013).
4. V.G. Arkhipkin, S.A. Myslivets, *Laser Phys.*, **31**, 065 (2021).

## ПЛАЗМОН ИНДУЦИРОВАННЫЙ РОСТ КОВАЛЕНТНО ОРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСНЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА И ЕГО ДАЛЬНЕЙШЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

П. Баинова, В. Шворчик, А. Лютаков

*University of Chemistry and Technology  
Prague, Czech Republic, [hainovao@vscht.cz](mailto:hainovao@vscht.cz)*

Ковалентные органические каркасы (COF – covalent organic framework) представляют собой развивающийся класс кристаллических материалов, ковалентно образованных из органических компонентов. COF характеризуется такими свойствами, как низкая плотность, четко определенный размер пор, большая площадь поверхности, собственная пористость и упорядоченная структура каналов. Помимо других применений, соединения COF могут использоваться для обнаружения  $\text{CO}_2$ . Известно, что приготовление соединений COF обычно связано с энергозатратными экспериментальными условиями (высокое давление, инертная атмосфера и высокая температура). В данной работе был предложен альтернативный метод приготовления COF на поверхности оптического волокна при нормальном давлении и температуре. Экспериментальная концепция реализует рост COF за счет плазмонного резонанса. Длина волны лазера соответствовала полосе поглощения плазмонного абсорбционного пика в растворе прекурсора COF. Сформированные на поверхности оптического волокна структуры COF впоследствии были использованы для оптической детекции  $\text{CO}_2$  в органических растворителях.

## АВТОБАЛАНСНЫЙ МЕТОД ДЕТЕКТИРОВАНИЯ РЕЗОНАНСА КОГЕРЕНТНОГО ПЛЕНЕНИЯ НАСЕЛЕННОСТЕЙ В ОПТИЧЕСКИ ПЛОТНОЙ СРЕДЕ

К. А. Баранцев, А. Н. Литвинов

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, [kostmann@yandex.ru](mailto:kostmann@yandex.ru)*

В данной работе исследованы особенности детектирования резонанса когерентного пленения населенностей методами автобалансной спектроскопии [1] и комбинированного сигнала ошибки [2] для квантовых стандартов частоты на оптически плотных атомных ансамблях. Одним из основных факторов, снижающих точность атомных часов, является световой сдвиг опорного резонанса ввиду его флуктуаций при изменении различных параметров, таких как интенсивность, фаза лазерного поля и др. Современные методы спектроскопии, основанные на методе Н. Ф. Рэмси импульсного опроса атомов [3], позволяют скомпенсировать световой сдвиг. Однако основная часть исследований этих методов проведена без учета эффектов поглощения и фазового набега лазерного излучения [4–6] в оптически тонких атомных ансамблях.

В настоящей работе проведено исследование влияния эффектов оптически плотной среды на световой сдвиг сигнала опорного резонанса для автобалансной схемы детектирования и метода комбинированного сигнала ошибки. Проведено сравнение данных методов. Показано, что в оптически плотной среде возникает дополнительный световой сдвиг, предложены методы его компенсации путем корректировки нормализующего коэффициента при формировании сигнала ошибки.

*Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (проект МК-1452.2020.2).*

### *Литература*

1. C. Sanner, N. Huntemann, R. Lange, C. Tamm and E. Peik, *Phys. Rev. Lett.*, 120, 053602 (2018).
2. V. Yudin, A. Taichenachev, M.Y. Basalaeв, T. Zanon-Willette, T.F. Mehlstubler, J. Pollock, M. Shuker, R. Boudot, E. Donley and J. Kitching, *New J. Phys.*, 20, 123016 (2018).
3. N.F. Ramsey, *Phys. Rev.*, 78, 6 (1950).
4. K.A. Barantsev, A. N. Litvinov, *Quant. Electr.*, 49 (9), 863-867 (2019).
5. K.A. Barantsev, T. Zanon-Willette, A.N. Litvinov, *Quant. Electr.*, 50 (10), 934-938 (2020).
6. K.A. Barantsev, A.N. Litvinov, *Quant. Electr.*, 48 (7), 615 (2018).

## ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ $\text{Ce,Pr:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$

В. И. Барышников, Ю. А. Суханова  
Т. А. Колесникова, О. Л. Никонович

*Иркутский государственный университет путей сообщения*  
*Иркутск, Россия, [vibh@rambler.ru](mailto:vibh@rambler.ru)*  
*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН*  
*Иркутск, Россия, [vibh@rambler.ru](mailto:vibh@rambler.ru)*

При облучении кристаллов  $\text{Pr,Ce:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  ( $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$  0,1 вес. %) фемтосекундными (50 фс) импульсами  $2\omega\text{Ti:Sp}$  лазера (440 нм) с интенсивностью  $I < 0,5$  МВт/см<sup>2</sup> наблюдается фотолюминесценция (ФЛ)  $\text{Ce}^{3+}$  при  $\lambda_m = 530$  нм с  $\tau = 60$  нс, 300 К. С увеличением  $I$  до 1,5 МВт/см<sup>2</sup> имеет место двухступенчатая ионизации  $\text{Ce}^{3+}$ . Механизм возбуждения  $\text{Ce}^{3+}$  по реакции:  $2\nu \rightarrow \text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Ce}^{4+} + e$ ,  $\text{Ce}^{4+} + e \rightarrow (\text{Ce}^{3+})^* \rightarrow h\nu_{\text{Ce}^{3+}} + \text{Ce}^{3+}$ .

При увеличении  $I$  до 10 МВт/см<sup>2</sup> ( $\sim 5$  ГВт/см<sup>3</sup>) наблюдается “замедление” ФЛ  $\text{Ce}^{3+}$  до 90 нс. Такой же результат получен при интенсивном рентгеновском облучении  $\text{Pr,Ce:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  и [1] когда в возбуждении  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Pr}^{3+}$  участвуют наведенные зонные электроны ( $e$ ) и дырки ( $h$ ). При рентгеновском и лазерном возбуждении (50 фс, 440 нм, более 5 МВт/см<sup>2</sup>) обнаружена РЛ и антистоксовая ФЛ с полосой при 380 нм. Время затухания РЛ и ФЛ в данной полосе составило 40 нс. Эти параметры РЛ и ФЛ соответствуют излучательным  $5d-f$  электронным переходам в ионах  $\text{Pr}^{3+}$ .

Полученные результаты указывают, что в кристаллах  $\text{Pr,Ce:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , возбуждаемых  $2\omega\text{Ti:Sp}$  лазерным (50 фс, 440 нм,  $I > 5$  МВт/см<sup>2</sup>), наводятся зонные  $e$  и  $h$  по механизму трехфотонной ионизации собственного вещества  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , которые участвуют в возбуждении ФЛ  $\text{Pr}^{3+}$  по реакции:  $\text{Pr}^{3+} + h \rightarrow \text{Pr}^{2+} + e \rightarrow (\text{Pr}^{3+})^* \rightarrow h\nu_{\text{Pr}^{3+}} + \text{Pr}^{3+}$ .

Установлено, что при рентгеновском и лазерном возбуждении (50 фс, 440 нм, более 5 МВт/см<sup>2</sup>) кристаллов  $\text{Pr,Ce:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  РЛ и ФЛ  $\text{Ce}^{3+}$  имеет более высокий выход, чем в  $\text{Ce:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  ( $\text{Ce}^{3+}$  0,1 вес. %). Данный результат указывает на вклад реабсорбционного возбуждения  $\text{Ce}^{3+}$  в  $\text{Pr,Ce:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  вследствие перекрытия полос поглощения  $\text{Ce}^{3+}$  на 360 нм и излучения  $\text{Pr}^{3+}$  при 380 нм.

### Литература

1. В.И. Барышников, А.В. Болондзь. *Известия вузов. Физика*, 54 (2/2), 53–56 (2011).

## СПЕКТРЫ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МЕЗОРЕЗОНАТОРОВ

А. В. Белоновский<sup>1,2</sup>, К. М. Морозов<sup>1,2</sup>,  
Е. И. Гиршова<sup>1,2,3</sup>, М. А. Калитеевский<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова РАН*

*Санкт-Петербург, Россия, [belonovskii@spbau.ru](mailto:belonovskii@spbau.ru)*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский университет ИТМО*  
*Санкт-Петербург, Россия*

<sup>3</sup>*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН*  
*Санкт-Петербург, Россия*

Исследованы спектры излучения структур, характерные размеры которых соответствуют нескольким длинам волн экситонного излучения в материале, а частотный интервал между собственными модами сравним или меньше расщепления Раби между экситонной и фотонной модами. Благодаря высокой плотности мод резонатора по энергии, в таких структурах возможно одновременное взаимодействие экситонной моды с несколькими модами резонатора. Показан формализм расчета спектров излучения в таких структурах. Построен гамильтониан системы, описывающий взаимодействие одной экситонной моды с несколькими модами мезорезонатора. Данный гамильтониан при наличии диссипации в системе модернизируется до описания с помощью Лиувиллиана (супероператора Лиувилля) для матрицы плотности. Показано, что в мезорезонаторах соседние оптические моды могут иметь добротности, различающиеся на порядки по величине. Существует небольшая вероятность появления мод с высоким значением добротности и, как следствие, с высоким значением фактора Парселла. Такие моды могут эффективно взаимодействовать с экситонами в полости. Анализ спектров люминесценции показал, что в мезополостях взаимодействие экситонной и фотонной мод может происходить в режиме слабой и сильной связи, несмотря на высокую плотность мод резонатора, обусловленную большим размером систем. В случае сильной связи в спектре появляется ярко выраженное расщепление пиков излучения [1].

### *Литература*

1. A.V. Belonovski, I.V. Levitskii, K.M. Morozov, G. Pozina, and M.A. Kaliteevski, *Opt. Express*, 28(9), 12688-12698, (2020).

## ФОРМЫ ФРОНТОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ТЕПЛОВАЯ ИСТОРИЯ КРИСТАЛЛОВ ПРИ ИХ ПОЛУЧЕНИИ ИЗ РАСПЛАВОВ

В. С. Бердников, В. А. Винокуров, В. В. Винокуров,  
В. А. Гришков, С. А. Кислицын, К. А. Митин

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН  
Новосибирск, Россия, [berdnikov@itp.nsc.ru](mailto:berdnikov@itp.nsc.ru)  
Новосибирский государственный технический университет  
Новосибирск, Россия, [berdnikov@itp.nsc.ru](mailto:berdnikov@itp.nsc.ru)*

Выполнен цикл экспериментальных и численных исследований, направленный на выяснение особенностей основных методов получения кристаллов из расплавов. Основные методы направленной кристаллизации отличаются разнообразием размеров и геометрий тепловых узлов. Методы Чохральского, Киропулоса, Степанова, Бриджмена, бестигельной зонной плавки (БЗП), горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК) существенно отличаются ориентацией фронта кристаллизации (ФК) относительно направления вектора силы тяжести и соответственно направлением градиентов температуры по нормали к ФК. От абсолютных размеров и от особенностей геометрии области, занятой расплавом в каждом конкретном методе, зависят пространственные формы, интенсивность течений расплавов и закономерности конвективного теплообмена в объеме расплавов и в пограничных слоях (ПС) у ФК. От особенностей локального теплообмена зависят формы ФК и поля температуры, градиентов температуры и термических напряжений в кристаллах. При наличии свободных границ расплавов рост кристаллов происходит в условиях сопряженного конвективного теплообмена в режимах нестационарной гравитационно-капиллярной конвекции. В режимах смешанной конвекции при вращении кристаллов или кристаллов и тиглей дополнительно влияют центробежные силы и силы Кориолиса. При увеличении размеров кристаллов и объемов расплавов течения расплавов во всех режимах теряют устойчивость. Ориентация ФК относительно вектора силы тяжести сильно влияет на механизмы потери устойчивости в пограничных слоях у ФК и на амплитудно-частотные характеристики возмущений в режимах ламинарно-турбулентных переходов в ПС. От особенностей нестационарного локального теплообмена зависят мгновенные формы фронтов кристаллизации и поля температуры и градиентов температуры в затвердевшем материале, от которых зависит однородность кристаллографических характеристик кристаллов. Не менее важны режимы теплоотдачи от кристаллов газовую среду в ростовых камерах.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН 0257-2021-0003, номер гос. регистрации 121031800213-0 и при частичной поддержке грантом РФФИ 19-08-00707.*

## КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В МЕТОДЕ ЧОХРАЛЬСКОГО В РЕЖИМАХ ВРАЩЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ И ТИГЛЕЙ

В. С. Бердников, В. А. Винокуров, В. В. Винокуров

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН*

*Новосибирск, Россия, [berdnikov@itp.nsc.ru](mailto:berdnikov@itp.nsc.ru)*

*Новосибирский государственный технический университет*

*Новосибирск, Россия, [berdnikov@itp.nsc.ru](mailto:berdnikov@itp.nsc.ru)*

Выполнены экспериментальные исследования и численное моделирование гидродинамики и конвективного теплообмена в процессах выращивания кристаллов методом Чохральского. Исходным режимом в методе Чохральского всегда является естественная конвекция тепловой гравитационно-капиллярной природы. Численные исследования выполнены с жидкостями-имитаторами расплавов при значениях чисел Прандтля равных 10, 16 и 45. В экспериментах это вода, этиловый спирт, как аналог расплава ортогерманата висмута, гептадекан, как аналог многих расплавов оксидов и щелочногалодных материалов. Естественная конвекция численно исследовалась в режимах термогравитационной, термокапиллярной и тепловой гравитационно-капиллярной конвекции расплава. В результате можно оценить относительную роль механизмов генерации течения расплавов, обладающих различными зависимостями плотности и поверхностного натяжения от температуры. Исследована связь локальных особенностей гидродинамики расплавов с локальным теплообменом. При заданных стартовых значениях параметров, характеризующих естественную конвекцию, исследовались режимы смешанной конвекции при включении и увеличении угловой скорости вращения кристалла. При заданных скоростях вращения кристалла исследовано влияние вращения тигля в ту же сторону и противоположную. Результаты численных исследований позволяют более детально понять сценарии развития пространственных форм течения и связанные с этим изменения полей температуры и локальных тепловых потоков. Определены диапазоны параметров подобия, соответствующих стационарным и нестационарным режимам течений и теплообмена, режимам с наиболее равномерными радиальными распределениями тепловых потоков.

Экспериментально на физических моделях метода Чохральского в режимах свободной и смешанной конвекции в однофазных системах и при наличии кристаллизации легкоплавкого вещества – гептадекана исследовано влияние конвективного теплообмена и масштабного фактора на формы фронта кристаллизации. Определены диапазоны параметров подобия, соответствующих режимам с плоскими фронтами кристаллизации.

*Работа выполнена в рамках Гос. задания ИТ СО РАН 0257-2021-0003, номер гос. регистрации 121031800213-0 и при частичной поддержке грантом РФФИ 19-08-00707.*

## КВАНТОВОХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СПЕКТРОВ ПРИРОДНЫХ МИНЕРАЛОВ

А. И. Богданов<sup>1,2</sup>, Р. Ю. Шендрик<sup>1</sup>, Е. В. Канева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН  
Иркутск, Россия, [alex.bogdanov2012@gmail.com](mailto:alex.bogdanov2012@gmail.com)*

<sup>2</sup>*Иркутский национальный исследовательский технический университет  
Иркутск, Россия*

В данной работе представлены результаты экспериментального и теоретического изучения колебательных свойств природного минерала фторкарлтонита  $\text{KNa}_4\text{Ca}_4\text{Si}_8\text{O}_{18}(\text{CO}_3)_4\text{F}\cdot\text{H}_2\text{O}$ , открытого нашими соотечественниками в 2020 году [1].

Спектры фторкарлтонита были смоделированы в рамках теории функционала плотности с помощью пакетов для квантовохимических расчетов VASP (v. 5.4.1) и ORCA (v. 4.2.1). Результаты расчетов с привлечением указанных методов характеризуются хорошим согласием с экспериментом, что позволяет использовать их для установления происхождения линий в спектре. Так, было установлено, на каких частотах происходят валентные, деформационные колебания структурных элементов матрицы фторкарлтонита, а также валентные, деформационные и либрационные колебания молекул воды.

### *Литература*

1. Е. Канева, Т. Radomskaya, L. Suvorova, I. Sterkhova, M. Mitichkin, *Eur. J. Mineral.*, 32 (1), 137 (2020).

## ЛАЗЕРНАЯ СКАНИРУЮЩАЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ МИКРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ МОЛЕКУЛ: УСЛОВИЯ ИНВАРИАНТНОСТИ ФОРМЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ АЗИМУТАЛЬНОМ ВРАЩЕНИИ ЭМИТТЕРОВ

С. В. Бойченко

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
Иркутск, Россия, [ste89@yandex.ru](mailto:ste89@yandex.ru)*

В некоторых приложениях ориентационной флуоресцентной микроскопии одиночных квантовых эмиттеров с использованием остророфокусированных лазерных лучей требуется свойство инвариантности формы изображений при азимутальном вращении эмиттеров. Это свойство заключается в следующем: вращение дипольного момента перехода эмиттера вокруг оси объектива микроскопа приводит к аналогичному вращению изображения эмиттера, но не к изменению формы изображения (рис.). Наиболее широко известным примером луча, обеспечивающего данное свойство, являются радиально- и азимутально-поляризованный лучи [1]. Их произвольная линейная суперпозиция (цилиндрический векторный пучок) также способна обеспечить данное свойство [2]. Другим примером, обеспечивающим данное свойство, является произвольная суперпозиция вихревых цилиндрических векторных пучков с единичным топологическим зарядом [3].

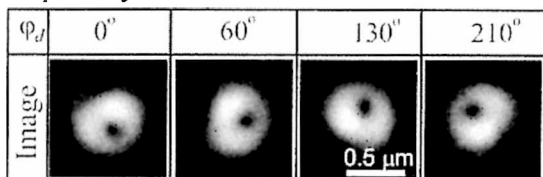


Рис. К объяснению инвариантности формы изображений при азимутальном вращении;  $\varphi_d$  -- азимут дипольного момента эмиттера

В настоящей работе выведена математически общая структура входного возбуждающего лазерного луча, способного обеспечить данное свойство. Получен следующий результат: единственным семейством пучков, обеспечивающим желаемое свойство, является семейство пучков, представитель которого выражается математически как линейная комбинация суперпозиция циркулярно-поляризованного вихревого пучка со спином  $s = 1$  и целочисленным орбитальным угловым моментом  $l$  и циркулярно-поляризованного вихревого пучка со спином  $s = -1$  и орбитальным угловым моментом  $l + 2$ .

### Литература

1. L. Novotny, B. Hecht, Principles of nano-optics, Cambridge University Press, 2012.
2. S. Boichenko, Phys. Rev. A 97 (4) (2018) 043825.
3. S. Boichenko, Phys. Rev. A 101 (4) (2020) 043823.

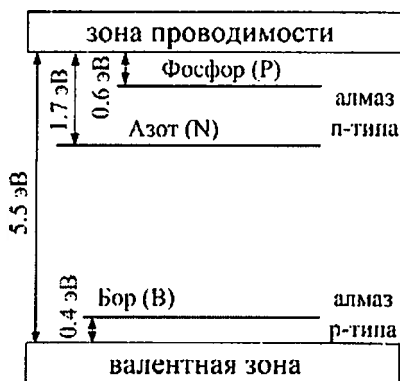
## ФОТОХРОМНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЛЕГИРОВАННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ АЛМАЗАХ

К. Н. Болдырев

*Институт спектроскопии РАН, Москва, Россия*

*[kn.baldyrev@gmail.com](mailto:kn.baldyrev@gmail.com)*

Алмаз является сверхширокозонным полупроводником с запрещенной зоной 5,47 эВ, обладающим множеством уникальных свойств и пригодным для различных целей, от силовой электроники до квантовых вычислений. Высокая подвижность электронов и дырок, а также высокая теплопроводность дают аллотропной модификации углерода с  $sp^3$ -гибридизацией потенциальные преимущества перед наиболее известными аналогами, такими как узкозонный кремний (Si), в радиационно-стойкой, высокоомощной и высокочастотной электронике, а также в оптоэлектронике, работающей в глубоком УФ-диапазоне, в устройствах квантовой информации и приложениях для работы в экстремальных условиях [1]. Кроме того, алмаз является отличным фотопроводником, и это свойство может быть использовано для УФ- и рентгеновских детекторов со сверхвысокой чувствительностью [2]. Известно, что полупроводниковый алмаз p-типа синтезируется путем его легирования примесью бора. Однако существует проблема алмаза n-типа. Азотные центры с нужным типом легирования лежат слишком глубоко. Использование же фосфора, по аналогии с полупроводниковым кремнием n-типа, имеет ряд проблем, в первую очередь, технологических. Р-доноры в алмазе могут использоваться для квантовых вычислений, в спин-фотонных преобразованиях, для фотонной памяти, интегрированных источников одиночных фотонов и полностью оптических переключателей, поскольку считывание/запись происходит в оптической области, показывающей чрезвычайно высокое время декогеренции, вплоть до часов [3]. Проведенные нами исследования спектров алмаза, легированного фосфором, позволили зарегистрировать полную картину электронных переходов вблизи 600 мэВ [4]. Эти исследования дали надежду на наличие фотохромных эффектов в алмазах, легированных фосфором, по аналогии с такими эффектами в кремнии [5]. Кроме того, на основе таких эффектов можно создать методику оптического контроля



переключателeй, поскольку считывание/запись происходит в оптической области, показывающей чрезвычайно высокое время декогеренции, вплоть до часов [3]. Проведенные нами исследования спектров алмаза, легированного фосфором, позволили зарегистрировать полную картину электронных переходов вблизи 600 мэВ [4]. Эти исследования дали надежду на наличие фотохромных эффектов в алмазах, легированных фосфором, по аналогии с такими эффектами в кремнии [5]. Кроме того, на основе таких эффектов можно создать методику оптического контроля

качества и концентрации легированных оптических и электроактивных примесей [5,6].

В данной работе мы сообщаем о подробных исследованиях фотохромных эффектов крупных высококачественных монокристаллах алмазов р- и п-типа, выращенных методом HPHT. Обнаружен значительный фотохромный эффект на электронных переходах фосфора, исследованных нами ранее в работе [4]. Наблюдается сильное изменение интенсивности в спектрах поглощения под действием внешнего оптического излучения. При этом происходило перераспределение интенсивностей в области поглощения бора, фосфора, и неизменного спутника алмазов – азота. Это связано с разрушением донорно-акцепторных пар под действием высокоэнергетических фотонов, по аналогии с легирующими электроактивными примесями в полупроводниковом кремнии [5,6]. На основе этого эффекта предлагается метод определения реальной концентрации бора и фосфора в алмазе. Кроме того, были проведены исследования фотопроводимости и фотоспротивления полупроводникового алмаза, которые показали возможность использования легированных фосфором и бором алмазов в качестве детекторов оптического излучения.

*Благодарим за финансовую поддержку Российский научный фонд (в рамках гранта № 19-72-10132).*

### *Литература*

1. J.Y. Tsao, S. Chowdhury, M.A. Hollis, D. Jena, N.M. Johnson, K.A. Jones, R.J. Kaplar, S. Rajan et al., *Adv. Electron. Mater.*, 4, 1600501 (2018).
2. F. Hochedez, W. Schmutz, Y. Stockman, M. Nesladek, Y. Stockman, U. Schühle, A. BenMoussa, S. Koller, K. Haenen, D. Berghmans, J.-M. Defise et al., *Adv. Space Res.*, 37(2), 303 312 (2006).
3. K. Saeedi, S. Simmons, J.Z. Salvail, P. Dluhy, H. Ricmann, N. V. Abrosimov, P. Becker, H.-J. Pohl, J.J.L. Morton, M.L.W. Thewalt, *Science*, 342, 830 (2013).
4. V.D. Blank, K.N. Boldyrev, V.N. Denisov, V.V. Denisov, A.S. Galkin, M.S. Kuznetsov, B.N. Mavrin, S.A. Nosukhin, D.D. Prikhodko, A.A. Sukhanov, S.A. Tarelkin, S.A. Terentiev, *Phys. Rev. B*, 102, 115153 (2020).
5. Test method for low temperature FT-IR analysis of single crystal silicon for III-V impurities SEMI MF 1630-0704 (2004).
6. K.N. Boldyrev, N.Yu. Boldyrev, R.V. Kirillin, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 77(12), 1420 (2013).

## ОСОБЕННОСТИ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ГИБРИДНОГО ПЕРОВСКИТА $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ В ОБЛАСТИ СТРУКТУРНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

В. Е. Аникеева<sup>1,2</sup>, К. Н. Болдырев<sup>1,2</sup>, М. Н. Попова<sup>1</sup>, О. И. Семенова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт спектроскопии РАН, Москва, Россия

[kn\\_boldyrev@gmail.com](mailto:kn_boldyrev@gmail.com)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирск, Россия

Гибридные металлорганические перовскиты  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$  ( $X = \text{I}, \text{Br}, \text{Cl}$ ) являются перспективными материалами для фотовольтаических устройств, в особенности для применения в солнечных элементах [1]. Несмотря на огромный интерес к данному классу соединений, остаются вопросы, связанные с особенностями фундаментального поглощения. Большинство работ по исследованию поглощения выполнено на плёнках, что может приводить к завышенным значениям коэффициента поглощения из-за различных потерь в поликристаллической плёнке [2].

В данной работе были исследованы монокристаллы  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  хорошего оптического качества, что позволило определить точные значения коэффициента поглощения вблизи края зоны и в области экситонного поглощения. Также был проведён анализ зависимости спектров пропускания от температуры. Наблюдался значительный сдвиг края поглощения (на 0,11 эВ) при фазовом переходе из тетрагональной фазы в ромбическую.

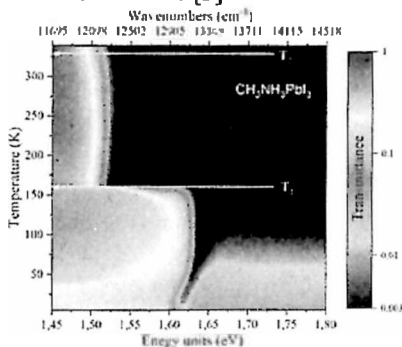


Рис. Карта интенсивностей спектров пропускания  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ .

*Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (ГЗ 0039-2019-0004 и 0306-2019-0015 – рост кристаллов, О.И.С.).*

### Литература

1. National Renewable Energy Laboratory. Best Research-Cell Efficiency Chart. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
2. C.L. Davies, M.R. Filip, J.B. Patel, T.W. Crothers, C. Verdi, A.D. Wrigth, R.L. Milot, F. Giustino, M.B. Johnston, L.M. Herz, *Nat. Commun.*, № 9, 293 (2018).

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В АЛМАЗЕ

А. Г. Бураченко, К. П. Артемов, Е. И. Липатов,  
В. С. Рипенко, М. А. Шулепов

*Институт сильноточной электроники СО РАН  
Томск, Россия, [bag@loi.hcei.tsc.ru](mailto:bag@loi.hcei.tsc.ru)  
Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, Томск, Россия  
ООО «Высокотехнологичные алмазные устройства», Томск, Россия*

Для детектирования высокоэнергетичных частиц широко используются черенковские детекторы (ЧД). Анализ излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ) позволяет с высокой точностью получать необходимую информацию о параметрах регистрируемых частиц (энергия, заряд и масса частицы и т.д.). ЧД используются в различных областях науки и техники. Однако существуют области применения ЧД, например, термоядерные реакторы и космические аппараты, где к материалу радиатора предъявляются особые требования. Одним из перспективных материалов радиатора, обладающим высокой температурной и радиационной стойкостью, является алмаз. Алмаз также имеет низкий порог возникновения ИВЧ, что позволяет регистрировать электроны с энергией  $\sim 50$  кэВ и выше.

Исследованы спектральные характеристики излучения различных образцов синтетических алмазов под действием пучков электронов с энергией десятки-сотни кэВ. На основе полученных данных были отобраны наиболее подходящие образцы алмаза для использования их в качестве радиатора ЧД. Было зарегистрировано ИВЧ в алмазе. Однако интенсивность ИВЧ была не высокой, и в спектрах излучения также присутствовала катодолюминесценция, которую необходимо учитывать при создании ЧД на основе алмаза.

*Исследование было выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0048.*

## ПЛАЗМОННАЯ ХИМИЯ В МИКРОФЛЮИДНОМ РЕЖИМЕ: ГИДРИРОВАНИЕ ФЕНИЛАЦЕТИЛЕНА ДО СТИРОЛА

**В. Бурцев, В. Шворчик, А. Лютаков**

*University of Chemistry and Technology  
Prague, Czech Republic, [hurtsev@vscht.cz](mailto:hurtsev@vscht.cz)*

В последние годы появился новый, потенциально очень полезный способ введения внешней энергии в химическую реакцию, так называемый плазмонный катализ. Высокое значение электрического поля, связанного с плазмонами, приводит к огромному расширению молекулярных связей и потенциальной инжекции горячих электронов в окружающую диэлектрическую среду, что снижает потребление энергии и упрощает сложный химический синтез.

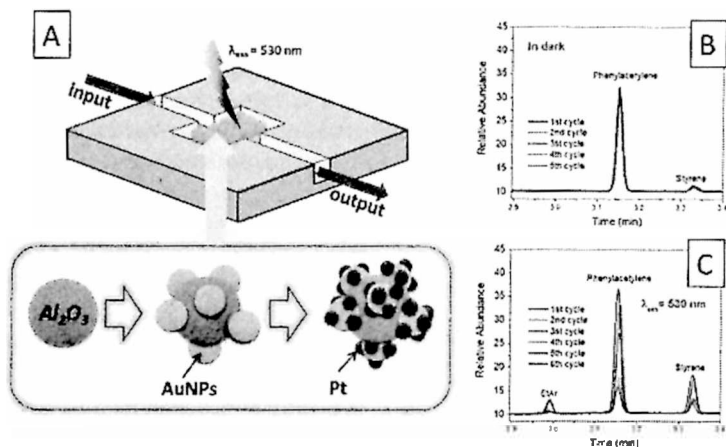


Рис. (А). Схематическое представление гибридного микрофлюидного сенсора. Данные хроматограммы после гидрирования в микрофлюидном чипе без возбуждения плазмонов (В) и с возбуждением ЛППР (С)

В этой работе мы представляем новый способ контролируемого плазмонного гидрирования фенилацетилена до стирола, выполненного в микрофлюидном режиме. Для этого нами разработан микрофлюидный чип наполненный плазмон-активными частицами ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -AuNPs-Pt). Частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  выполняют роль носителя, на который с помощью диазониевой химии прививаются наночастицы Au. В следующем шаге на наночастицах золота были покрыты Pt. На следующем этапе в микрофлюидный чип подавался раствор фенилацетилена и водный раствор  $\text{NaBH}_4$ . Рабочая поверхности освещалась с помощью лазера с длиной волны, соответствующей максимуму поглощения полученных гибридных частиц ( $\approx 550 \text{ nm}$ ). AuNPs наночастицы и Pt поглощали излучение из-за их высокого коэф-

фициента фотоэлектрического поглощения, приводящего к испусканию фотоэлектронов и оже-электронов. Было доказано, что эти высокоэнергетические электроны гидрируют фенилацетилен до стирола после нескольких циклов в микрофлюидном чипе.

## ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРИСТОГО АНОДИРОВАННОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, АКТИВИРОВАННОГО ИОНАМИ РЗЭ

А. А. Васин, Ю. В. Юферов, И. Д. Попов, Н. А. Попов, М. Г. Зуев

*Институт химии твердого тела УрО РАН*

*Екатеринбург, Россия, [andrey-hit@yandex.ru](mailto:andrey-hit@yandex.ru)*

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России*

*Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, [yuferovvv@yandex.ru](mailto:yuferovvv@yandex.ru)*

В данной работе исследованы покрытия, полученные путем электрохимического окисления сплавов Al–Eu с различным массовым содержанием европия (0,01, 0,05, 0,24, 0,8 и 1,25%) и подложки из чистого алюминия, пропитанного в 0,5 М водном р-ре  $DuCl_3 \cdot 6H_2O$ . Сплавы алюминия и европия были раскатаны в пластины площадью  $\approx 2,5 \text{ см}^2$ , которые затем в качестве анода были погружены в электрохимическую ячейку. Состав электролита в ячейке – 0,1 М р-р  $C_2H_2O_4$ , 0,1 М р-р  $C_6H_8O_7$ , 0,1 М р-р  $H_3BO_3$ , изопропиловый спирт (10% по объему). Анодирование производилось в течение 110 мин при напряжении 75 В. После анодирования покрытия были промыты дистиллированной водой и высушены при температуре 180 °С.

Люминесценция покрытий на основе Al–Eu сплавов происходит от переходов между энергетическими уровнями, лежащими внутри запрещенной зоны, и формируемыми кислородными вакансиями, и оксалат-ионами, в качестве точечных дефектов присутствующими в структуре, а также от переходов между 4f подуровнями иона  $Eu^{3+}$  (узкие линии в красно-оранжевой области спектра). Максимальная интенсивность свечения матрицы и ионов  $Eu^{3+}$  соответствует составу Al–Eu (0,24 мас.%).

Покрытие для насыщения ионами диспрозия было получено способом аналогичным ранее описанному, но продолжительность финальной стадии анодирования составила 1 ч при напряжении 50 В. Данное покрытие прокипятили в 0,5 М р-ре  $DuCl_3 \cdot 6H_2O$  в течение 2 ч. Люминесценция полученного материала образована свечением матрицы (390–725 нм) и узкими линиями, соответствующими переходам  ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$  (пик 572 нм) и  ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$  (два пика – 478 и 489 нм) иона  $Dy^{3+}$ .

*Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ (грант № 20-03-00851).*

## НАНОЧАСТИЦЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ, ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В SERS

А. В. Волокитина, И. Н. Лапин, В. А. Светличный

*Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Томск, Россия, [nvv0404@gmail.com](mailto:nvv0404@gmail.com)*

SERS спектроскопия – актуальный метод исследования строения вещества на основе детектирования специфических колебательных связей. Усиление сигнала комбинационного рассеяния (КР) при помощи плазмонных наноструктур значительно повышает чувствительность, поэтому данный метод позволяет проводить анализ малых количеств веществ в пробе. В настоящее время SERS спектроскопия применяется для количественного и качественного анализа лекарственных препаратов, пищевых продуктов, биологических объектов. Одним из приоритетов в развитии SERS спектроскопии является создание качественных и доступных плазмонных наноструктур и SERS-активных подложек на их основе. Наиболее доступным способом формирования таких объектов – это нанесение коллоидных растворов плазмонных наночастиц (НЧ) на диэлектрические подложки. Одним из перспективных методов получения коллоидных растворов является импульсная лазерная абляция (ИЛА) в жидкости, которая позволяет получать чистые (без использования дополнительных стабилизаторов) суспензии наночастиц, а также влиять на размер частиц, изменяя характеристики лазерного излучения.

В данной работе были получены и исследованы SERS подложки на основе НЧ золота, полученных методом ИЛА в жидкости. Для этого на металлическую мишень, помещенную в этиловый спирт, воздействовали сфокусированным лазерным излучением Nd:YAG лазера (1064 нм, 7 нс, 150 мДж). Полученные коллоидные растворы золота с концентрацией порядка 100 мг/л наносили на стеклянные подложки методом погружения (окунания). SERS характеристики подложек исследовали на рамановском микроскопе Renishaw inVia Basis ( $\lambda_{ex} = 532$  нм). В результате исследования рост сигнала КР модельного вещества (красителя родамин 6Ж) происходил линейно до 5 слоев нанесения, что соответствует увеличению плотности упаковки НЧ на поверхности. С дальнейшим увеличением количества слоев однородность распределения НЧ на поверхности подложки ухудшается, появляются крупные агломераты, усиление сигнала становится неравномерным. В результате на разработанных простых SERS-подложках достигнуто усиление сигнала КР родамина 6Ж на 3 порядка.

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ФОРМУ И СДВИГИ РЕЗОНАНСОВ КОГЕРЕНТНОГО ПЛЕНЕНИЯ НАСЕЛЕННОСТИ, ДЕТЕКТИРУЕМЫХ МЕТОДОМ РЭМСИ, В ОПТИЧЕСКИ ПЛОТНОЙ СРЕДЕ**

**Г. В. Волошин, А. Н. Литвинов, К. А. Баранцев**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Санкт-Петербург, Россия, [odo@sphstu.ru](mailto:odo@sphstu.ru)*

В данной работе авторами была построена математическая модель взаимодействия бихроматического лазерного излучения с оптически плотной атомной средой, имеющей ненулевую температуру. В рамках данной модели квантовое состояние среды подвижных атомов описывается методом одночастичной матрицы плотности в представлении Вигнера, что позволяет одновременно учесть как эффект Доплера, так и столкновения активных атомов с атомами буферного газа. При описании энергетической структуры атома используется четырехуровневая модель, учитывающая сверхтонкое расщепление его основного и возбужденного состояний. Для учета оптической плотности среды система уравнений для матрицы плотности была дополнена укороченными уравнениями переноса электрических составляющих падающих полей.

Была предложена численная схема решения полученной в рамках рассматриваемой модели системы интегро-дифференциальных уравнений. Используя данную схему, было произведено моделирование взаимодействия с атомной средой двух разнесенных во времени лазерных импульсов (схема детектирования Рэмси [1]). Первый из них длительный накачивающий импульс, в течение которого система успевает перейти в стационарное состояние когерентного пленения населенности (КПН) [2,3]. Второй короткий микросекундный импульс детектирует систему в этом состоянии.

Результаты данного моделирования были проанализированы на предмет изменения формы и частотных сдвигов резонансов КПН при изменении температуры в зависимости от различных параметров среды и лазерной накачки.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России: Государственное задание (базовая часть), «Прецизионная спектроскопия квантовых систем и нанобъектов в широком диапазоне энергий», FSEG-2020-0024, 2020–2022.*

### *Литература*

1. N.F. Ramsey, *Phys. Rev.*, 78, 695-699 (1950)
2. G. Alzetta, A. Gozzini, L. Moi, G. Orriols, *Nuov. Cim. B*, 36, 5-20 (1976).
3. E. Arimondo, G. Orriols, *Lett. Nuovo Cimento*, 17, 333-338 (1976).

## ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧАСТНЫЕ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Н. А. Лю-ю<sup>1</sup>, А. С. Приятелев<sup>1</sup>, Н. В. Морозова<sup>1</sup>, С. Н. Малов<sup>2</sup>,  
А. В. Гаврилюк<sup>1</sup>, А. А. Гаврилюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Иркутский государственный университет  
Иркутск, Россия, [zubr@api.isu.ru](mailto:zubr@api.isu.ru)*

<sup>2</sup>*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
Иркутск, Россия, [filial@ilph.irk.ru](mailto:filial@ilph.irk.ru)*

В работе исследуется вопрос о влиянии лазерного излучения на динамические магнитные свойства быстрозакаленных ферромагнитных сплавов состава  $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{V}_{15}$ . Первоначальные образцы в виде лент были получены в ЦНИИ Чермет им. Л.И. Бардина (г. Москва), имели положительную константу магнитострикции  $\lambda_s \approx 30 \cdot 10^{-6}$ . Из исходных лент вырезались полоски толщиной 25–30 мкм, длиной 0,05 м, шириной 0,001 м.

Для обработки исходных образцов использовался твердотельный лазер. В зависимости от плотности мощности излучения и скорости продвижения лазерного луча по поверхности исследованных лент и структурные изменения, происходящие в приповерхностном слое лент, а, следовательно, и магнитные свойства обработанного материала существенно различаются. Данное обстоятельство связывается с сочетанием ряда факторов, определяющих магнитные параметры обработанной ленты. Среди них наиболее важными являются размер образующихся кристаллитов, различие геометрических параметров аморфной и кристаллической областей, разность их констант намагниченности, а также ориентация оси легкого намагничивания относительно оси прокатки ленты. Лазерная обработка приводит к изменению хода частных петель магнитного гистерезиса. Поведение частных петель гистерезиса (в частности, зависимости остаточной индукции  $B_r$  от максимальной величины индукции  $B_m$ ) позволяет установить характер протекания процессов намагничивания в быстрозакаленных ферромагнитных лентах, прошедших различные режимы предварительной лазерной обработки. На зависимостях  $B_r(B_m)$  имеется два характерных участка с различным углом наклона по отношению к оси максимальной магнитной индукции  $B_m$ . Различный характер зависимости  $B_r(B_m)$  связаны с процессами разделения процессов смещения доменных границ и поворота намагниченности. Получены зависимости величины коэрцитивной силы  $H_c$  и дифференциальной магнитной проницаемости частных петель магнитного гистерезиса от условий предварительной лазерной обработки. Предложены модели влияния кристаллизации поверхностной кристаллизации, вызванных лазерной обработкой на ход частных петель гистерезиса быстрозакаленных ферромагнитных лент на основе переходных металлов.

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КИСЛОРОДНО-ДЕФИЦИТНЫХ ЦЕНТРОВ В КВАРЦЕВЫХ СТЕКЛАХ

Т. Ю. Гармышева, Р. Ю. Шендрик, А. С. Паклин,  
А. А. Шалаев, А. И. Непомнящих

*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия*  
[sizova@igc.irk.ru](mailto:sizova@igc.irk.ru)

Исследованы спектры поглощения, люминесценции кислородно-дефицитных центров в стеклах, полученных из природного кварца различных модификаций:  $\alpha$ -кварца и кристобалита.

В спектре поглощения всех исследуемых образцов стекол наблюдается полоса с максимумом поглощения 240 нм. Эта полоса обусловлена дефектами типа «кислородная вакансия» рядом с примесью Ge (Ge-ODC(II)- (“germanium oxygen deficient center”)) [1]. В спектрах фотолюминесценции стекол, полученных из  $\alpha$ -кварца и стекол, которые получены из кварцевого сырья с небольшим содержанием фазы кристобалита (до 30 %) наблюдаются две полосы при 390 нм и 302 нм, обусловленные центрами Ge-ODC(II). В спектре фотолюминесценции стекла, полученного из  $\alpha$ -кварца, наиболее интенсивной является полоса при 390 нм, связанная с триплет-синглетными переходами ( $T_1-S_0$ ) в центрах Ge-ODC(II). С ростом содержания фазы кристобалита наблюдается рост интенсивности полосы люминесценции при 302 нм, соответствующей синглет-синглетным переходам ( $S_1-S_0$ ).

Также исследована люминесценция при возбуждении в области вакуумного ультрафиолета при синхротронном возбуждении при температуре 7 К. В стекле из  $\alpha$ -кварца помимо свечения Ge-ODC центров в спектре наблюдается люминесценция автолокализованного экситона (2,4 эВ), тогда как в стекле из кристобалита люминесценция автолокализованных экситонов не наблюдается. Обнаружены различия в высокоэнергетической полосе возбуждения Ge-ODC центров в стеклах из кварца и кристобалита в области 7 эВ, так же как в кристаллическом кварце и кристобалите [2], что обусловлено различием в геометрии окружения, и, соответственно, в конфигурации околопримесного экситона в кварце и кристобалите.

Таким образом, исследуемые различия в спектрах люминесценции кислородно-дефицитных центров в стекле возможно свидетельствует о различии в локальном порядке в стеклах из кристобалита и  $\alpha$ -кварца.

### *Литература*

1. A. N. Trukhin, A. Boukenter, Y. Ouerdane, *J. Non-Cryst. Solids*, 357, 3288–3291 (2011).
2. A. N. Trukhin, *J. Non-Cryst. Solids*, 149(1-2), 32–45 (1992).

## ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНАЯ ЖИДКОСТЬ В АЛМАЗАХ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Д. Е. Генин<sup>1,2</sup>, Е. И. Липатов<sup>1,2</sup>  
Д. В. Григорьев<sup>2</sup>, А. Г. Бураченко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН  
Томск, Россия [dm\\_genin@vtomske.ru](mailto:dm_genin@vtomske.ru)*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Томский государственный  
университет, Томск, Россия*

Электронно-дырочная жидкость (ЭДЖ) – это конденсированное состояние неравновесных носителей заряда, наблюдающееся в некоторых полупроводниках при низких температурах и высоких концентрациях носителей.

Для создания ЭДЖ в образце необходимо, чтобы он содержал минимально возможное количество дефектов и примесей. В связи с этим ЭДЖ неплохо исследована в германии и кремнии, однако в алмазе впервые была получена уже в 2000-х годах, и до сих пор исследована сравнительно слабо.

ЭДЖ представляет интерес с точки зрения создания электронных устройств на основе алмаза (например, оптоэлектронных переключателей). Ранее в своей работе [1] мы показали, что присутствие ЭДЖ существенно увеличивает фотопроводимость алмазного образца.

В докладе представлены последние результаты, полученные нашей группой при исследовании ЭДЖ в алмазе. Показано, что при в интервале температур от 80 К до комнатной поведение разных состояний носителей заряда (свободные экситоны, электронно-дырочная плазма, ЭДЖ) существенно различается в зависимости от конкретного образца.

*Исследование было выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0048.*

### *Литература*

1. E. I. Lipatov, D. E. Genin, V. F. Tarasenko, *JETP Lett.*, 103, 663–668 (2016).

## РОЛЬ ПОЛЯРНОСТИ ОКРУЖЕНИЯ ПРИ СВЯЗЫВАНИИ ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО МАРКЕРА С БИОПОЛИМЕРАМИ РАЗНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯДА

М. А. Герасимова, Н. В. Слюсаренко, Е. А. Слюсарева

*Сибирский федеральный университет  
Красноярск, Россия, [marina\\_2506@mail.ru](mailto:marina_2506@mail.ru)*

Красители флуоресцеинового ряда хорошо себя зарекомендовали в качестве оптических маркеров, которые позволяют следить за важными процессами в биомедицинских приложениях. К основным механизмам, отвечающим за связывание небольших красителей и макромолекул, можно отнести ионные (электростатические), гидрофобные, ван-дер-ваальсовы взаимодействия, образование водородных связей. В работе методами оптической спектроскопии изучена роль полярности окружения при связывании анионного красителя с биополимерами, поверхность которых имеет разный заряд. В качестве полианиона при pH 7,5 взят бычий сывороточный альбумин (БСА) с дзета-потенциалом -20 мВ. В качестве поликатиона при pH 5,6 синтезированы и использованы частицы полиэлектролитных комплексов (ПЭК) на основе двух полисахаридов с дзета-потенциалом +35 мВ. Молекулы флуоресцеина (фл) и его галогенпроизводных эозина ( $B_{12}$ -фл) и эритрозина ( $I_4$ -фл) в широком интервале pH сильно поляризуемы, поэтому были выбраны в качестве маркеров, чувствительных к изменению полярности окружения.

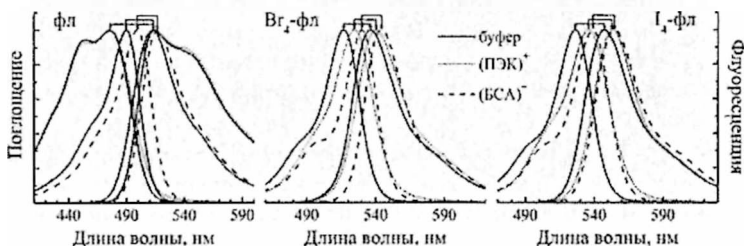


Рис. Изменение спектров поглощения и испускания флуоресцеиновых маркеров при связывании с биополимерами разного поверхностного заряда

Наблюдаемые при связывании сдвиги в спектрах поглощения и флуоресценции (рис.) в ряду анионных красителей были проанализированы в точки зрения перераспределения вкладов ионных и гидрофобных механизмов при переходе от анионного к катионному биополимеру, а также роли галогена в структуре красителя. Произведено сравнение с поведением красителей в протонных и апротонных растворителях.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание FSRZ-2020-0008).*

## ОПТОАКУСТИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР УЛЬТРАЗВУКА НА ОСНОВЕ СТРУКТУР С ТАММОВСКИМ ПЛАЗМОНОМ

Е. И. Гиршова<sup>1</sup>, А. П. Микитчук<sup>2</sup>, А. В. Белоновский<sup>1</sup>,  
К. М. Морозов<sup>1</sup>, М.А. Калитеевский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия  
[ilyishna@gmail.com](mailto:ilyishna@gmail.com)

<sup>2</sup>Белорусский Государственный Университет, Минск, Республика Беларусь

Предложена схема генерации ультразвуковых волн с использованием оптического возбуждения структур с Таммовским плазмоном, обеспечивающих полное поглощение возбуждающего лазерного импульса с произвольной длиной волны, что открывает возможность использования инфракрасных полупроводниковых лазеров. Были проанализированы термодинамические и динамические свойства структуры и найден её оптимальный дизайн. Продемонстрировано, что оптоакустический генератор на основе структуры с Таммовским плазмоном может излучать ультразвуковые волны частотой до 100 МГц с заранее заданным частотным спектром, при этом эффективность энергопреобразования растет с частотой модуляции и мощностью возбуждения.

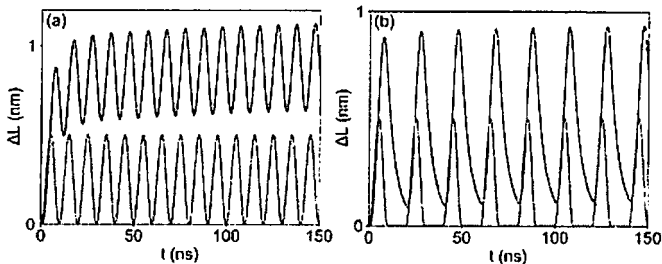


Рис. Колебание поверхности конструкции при нагреве лазером (а) с синусоидальной модуляцией (100 МГц) и плотностью потока  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, (б) с последовательностью синусоидальных импульсов длительностью 10 нс (50 МГц), средняя плотность потока  $5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>

Исследование поддержано РФФИ № 20-32-90188.

### Литература

1. E.I. Girshova, A.P. Mikitchuk, A.V. Belonovski, K.M.G. Pozina, K.V. Kozadaev, A.Yu. Egorov, M.A. Kaliteevski, *Opt. Express*, 28(18), 26161-26169 (2020).

## СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СИЛИКАТОВ ВИСМУТА ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИЕЙ В ВОДЕ

А. Г. Голубовская, Е. Д. Фахрутдинова  
В. А. Светличный, М. В. Грабченко

*Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Томск, Россия, [aleksandra.golubovskaya@mail.ru](mailto:aleksandra.golubovskaya@mail.ru)*

Одним из перспективных направлений современных лазерных технологий является лазерный синтез наноматериалов и структурирования поверхности. Так методом импульсной лазерной абляции (ИЛА) в жидкости получают наноразмерные материалы, в частности полупроводниковые наночастицы, которые широко используются в фотокатализе для разложения органики и получения водорода. По сравнению с химическими методами синтеза, ИЛА в жидкости позволяет получать чистые нанокolloиды без дополнительных прекурсоров. Регулируя параметры лазерного излучения, состав мишени и растворителя можно управлять размером, составом и структурой синтезируемых частицы. Помимо ИЛА объемных мишеней можно воздействовать импульсным лазерным излучением непосредственно и на коллоидные растворы, тем самым меняя характеристики частиц.

В последние годы возрос интерес к полупроводниковым фотокатализаторам на основе сложных многокомпонентных оксидов. К таким материалам относятся силикаты висмута (BSO). В данной работе наночастицы BSO впервые были синтезированы с помощью ИЛА в воде. На мишени Si и Bi воздействовали излучением Nd:YAG лазера (1064 нм, 20 Гц, 7 нс), после чего отдельно синтезированные нанокolloиды смешивались и подвергались дополнительному лазерному облучению (с теми же параметрами), а затем высушивались. При варьировании молярного соотношения Bi/Si (2:1, 4:3 и 12:1 соответственно) при ИЛА и воздействии дополнительного лазерного излучения, а также температуры прокаливания порошков, были синтезированы BSO различного состава, в том числе монофазы соединений  $\text{Bi}_2\text{SiO}_5$ ,  $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$  и  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ . Исследована зависимость между оптическими свойствами, составом и структурой материалов. Проведена оценка фотокаталитической активности образцов в реакции разложения модельного красителя Родамина Б при облучении светодиодным источником с длиной волны излучения 375 нм. Установлено, что из всех синтезированных силикатов висмута, образцы лучшую фотокаталитическую активность демонстрируют материалы, состоящие из фазы  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ .

*Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 19-73-30026).*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЗДАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ГРАВИМЕТРОВ НА БАЗЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ АТОМОВ

А. Н. Гончаров<sup>1,2,3</sup>, Д. В. Бражников<sup>1,2</sup>, О. Н. Прудников<sup>1,2</sup>,  
А. В. Тайченачев<sup>1,2</sup>, А. Э. Бонерт<sup>1</sup>, Д. Н. Капуста<sup>1,2</sup>, С. Н. Багаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*  
[gonchar@laser.nsc.ru](mailto:gonchar@laser.nsc.ru)

<sup>2</sup>*Новосибирский национальный исследовательский государственный  
университет, Новосибирск, Россия*

<sup>3</sup>*Новосибирский государственный технический университет  
Новосибирск, Россия*

В работе представлен анализ возможностей создания высокочувствительных гравиметров на базе интерференции ультрахолодных атомов как для фундаментальных исследований, так и для различных приложений в геофизике, навигации и т.д. Представлены результаты анализа различных схем интерферометра и лазерных систем, необходимых для реализации гравиметра. Обсуждаются планы и перспективы развития этих исследований в ИЛФ СО РАН.

## УСИЛЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК $Ag_2S$ ЗА СЧЕТ ДЕКОРИРОВАНИЯ ИХ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАЗМОННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ Au

И. Г. Гревцева, О. В. Овчинников, М. С. Смирнов,  
А. С. Перепелица, Т. А. Чевычлова, В. Н. Дерелко

*Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия*  
[grevtseva\\_ig@inbox.ru](mailto:grevtseva_ig@inbox.ru)

В данной работе представлены результаты исследования спектрально-люминесцентных свойств гибридных наноструктур на основе коллоидных квантовых точек (КТ)  $Ag_2S/SiO_2$ , обладающих рекомбинационной люминесценцией при 750 нм, и декорированных малыми наночастицами (НЧ) Au. Подобного рода гибридные наноструктуры, настроенные на эффективное поглощение и фотолюминесценцию в диапазоне прозрачности биотканей, являются мультифункциональными системами для одновременной биовизуализации и эффективной неинвазивной терапии путем фототермической абляции различных заболеваний [1].

В рамках водной методики синтеза КТ  $Ag_2S$  были покрыты оболочкой из диоксида кремния (КТ  $Ag_2S/SiO_2$ ), которая была дополнительно функционализирована положительными  $NH_2$ -группами, а затем декорирована НЧ Au (2–3 нм). Осаждение НЧ Au и заполнение ими объема поверхности КТ  $Ag_2S/SiO_2$  приводит к значительному уширению и длинноволновому смещению максимума экстинкции от 482 нм в область 550 нм, что обусловлено укрупнением НЧ Au за счет их агрегации при адсорбции на поверхности КТ  $Ag_2S/SiO_2$  [1].

Декорирование поверхности КТ  $Ag_2S/SiO_2$  НЧ Au приводит к увеличению квантового выхода рекомбинационной люминесценции в 10 раз с одновременным увеличением ее времени жизни от 4 нс до 200 нс. Анализ термостимулированной люминесценции КТ  $Ag_2S/SiO_2$  показал существенное изменение структуры мелких ловушек глубиной 0,15–0,20 эВ. Незначительное увеличение глубины мелких состояний при декорировании КТ наночастицами Au и снижение концентрации исходных локализованных состояний свидетельствует о существенном влиянии поляризационных эффектов от НЧ Au на энергетическую структуру КТ и их люминесцентные свойства. Рост интенсивности ИК люминесценции КТ вероятно, связан с проявлением эффекта Перселла, усложненного влиянием поляризационных эффектов в энергетической структуре КТ.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-12-00266.*

### *Литература*

1. E. Fanizza, C. Urso, R.M. Iacobazzi, N. Depalo, M. Corricelli, A. Pannello, A. Agostiano, N. Denora, V. Laquintana, M. Striccoli, M.L. Curri, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 17(1), 98-108, (2016).

## УПРАВЛЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМИ СВОЙСТВАМИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК $\text{Ag}_2\text{S}$ В УСЛОВИЯХ ЭКСИТОН-ПЛАЗМОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

И. Г. Гревцева, О. В. Овчинников, М. С. Смирнов,  
А. С. Перепелица, Т. А. Чевычелова, В. Н. Дерепко

*Воронежский государственный университет  
Воронеж, Россия, grevtseva\_ig@inbox.ru*

Авторами данной работы разработана техника получения гибридных ассоциатов на основе коллоидных квантовых точек (КТ)  $\text{Ag}_2\text{S}$ , пассивированных молекулами тригликолевой (КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$ ) и 2-меркаптопропионовой кислотами (КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/2\text{-MPA}$ ), и наночастиц (НЧ) Ag пирамидальной формы и наностержней (НСт) Au. Установлены эффекты трансформации контуров спектров люминесценции вследствие эффекта интерференции квантовых состояний компонентов гибридных структур с плазмон-экситонным взаимодействием (эффект Фано), а также тушения люминесценции при непосредственном контакте КТ и НЧ (рис.) [1].

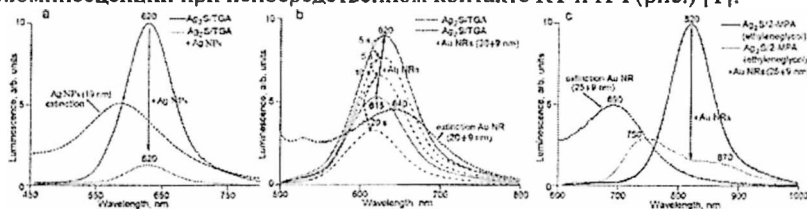


Рис. Спектры экстинкции света НЧ Ag пирамидальной формы (а), и НСтAu размером (20×9) нм (б) и (25×9) нм (с), спектры люминесценции КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{TGA}$  (а и б), КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/2\text{-MPA}$  (в) и их смесей НЧ.

Обнаруженные проявления взаимодействия КТ  $\text{Ag}_2\text{S}$  и плазмонных наночастиц указывают на существование возможности для управления спектром и квантовым выходом ИК люминесценции КТ. Однако полученные данные температурных эффектов в люминесценции свидетельствуют о сложной картине проявления экситон-плазмонного взаимодействия в исследуемых системах, ввиду одновременного проявления нескольких эффектов, таких как эффекты Перселла, Фано, поляризационного действия плазмонных наночастиц на свойства интерфейсных центров люминесценции и энергетические свойства мелких ловушек.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-12-00266.*

### Литература

1. I.G. Grevtseva, T.A. Chevychelova, V.N. Derepko, O.V. Ovchinnikov, M.S. Smirnov, A.S. Perpelitsa, A.S. Parshina, *Condensed Matter and Interphases*, 23(1), 25–31 (2021).

## ПОЛУЧЕНИЕ ФАНТОМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ

Н. Н. Давлетшин<sup>1</sup>, Д. А. Иконников<sup>2</sup>  
В. С. Сутормин<sup>2</sup>, А. М. Выюнышев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Сибирский федеральный университет  
Красноярск, Россия, [k\\_davletshin@mail.ru](mailto:k_davletshin@mail.ru)*

<sup>2</sup>*Институт физики им. Л. В. Куренского ФИЦ КНЦ СО РАН  
Красноярск, Россия*

Под фантомными изображениями часто понимается изображение объекта, полученное методом восстановления функции пространственной корреляции двух световых полей [1]. Идея восстановления изображений с использованием пространственных корреляций световых полей была впервые предложена Д.Н. Клышко [2]. Для восстановления изображения объекта, как правило, используются световые поля со случайным распределением фазы или интенсивности, так называемые спекл-структуры. В качестве генератора спеклов зачастую используют вращающийся матовый диск, пространственный модулятор света (ПМС), либо деформируемый двумерный массив микрозеркал (ДММЗ) [3]. Перечисленные устройства имеют свои недостатки. Вращающийся матовый диск не обеспечивает абсолютно случайные распределения интенсивности, не повторяющиеся с течением времени, в то время как ПМС и ДММЗ имеют высокую стоимость и позволяют получать псевдослучайные спекл-картины. В данной работе продемонстрирована возможность использования жидкокристаллической ячейки в качестве генератора случайных спекл-структур. Получены восстановленные изображения объекта, представляющего собой амплитудную маску. Проанализировано качество полученных изображений с помощью индекса структурного подобия в сравнении с изображением объекта.

### *Литература*

1. M.J. Padgett, R.W. Boyd, *Phil. Trans.*, 375, № 2099, 20160233 (2017).
2. D.V. Strekalov, A.V. Sergienko, D.N. Klyshko, Y.H. Shih, *Phys. Rev. Lett* 74, 3600–3603 (1995).
3. G. M. Gibson, S. D. Johnson, and M. J. Padgett, *Opt. Express*, 28, 28190–28208, (2020).

## ПОЛУЧЕНИЕ И СПЕКТРОСКОПИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СТЁКОЛ НА ОСНОВЕ БОРАТОВ ЛИТИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

А. А. Дергин, С. Г. Мамонтова, А. И. Непомнящих

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН  
Иркутск, Россия, [aleksandrdergin1@gmail.com](mailto:aleksandrdergin1@gmail.com)

Стёкла имеют хорошие перспективы применения в области люминесцентной дозиметрии. Технология изготовления относительно проста, в сравнении с кристаллами, и позволяет получать образцы различных форм и размеров. Легирование редкоземельными элементами также легко производить на разных этапах изготовления стекла.

В нашей работе исследовались стёкла на основе тетрабората лития, легированные празеодимом и тербием. За основу стекла был взят тетраборат лития. Он имеет низкую температуру плавления и его легко синтезировать методом твердофазного синтеза. Наличие изотопов  $^{10}\text{B}$  и  $^6\text{Li}$ , которые имеют большое сечение захвата тепловых нейтронов, позволяет рассматривать данный материал в качестве основы детекторов тепловых нейтронов [1].

Проведены серии экспериментов по получению и легированию стекол на основе тетрабората лития редкоземельными элементами: Sm, Eu, Tb, Pr, Gd. Измерены спектры поглощения, возбуждения и свечения полученных образцов. Определено время затухания фотолюминесценции.

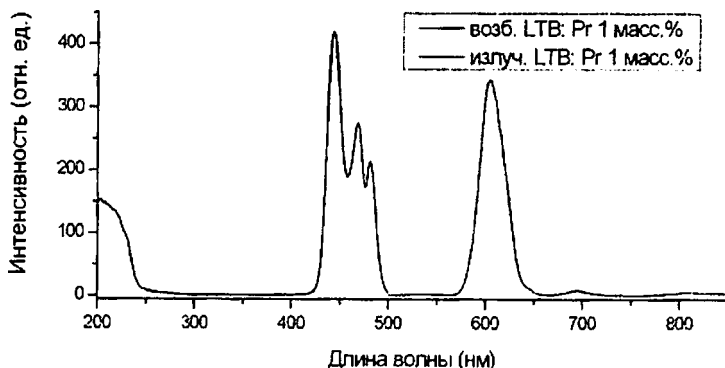


Рис. Спектры возбуждения и свечения стекла, легированного  $\text{Pr}^{3+}$ ,  
 $\lambda_{\text{возб}} = 443 \text{ нм}$ ,  $\lambda_{\text{изл.}} = 604 \text{ нм}$

### Литература

1. J.D. Auxierd II, "The Development of Lithium Tetraborate Compounds for Thermal Neutron Detection." PhD diss., University of Tennessee, 2013.

## ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА СМЕСЕЙ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdS И НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА

О. В. Овчинников, М. С. Смирнов, В. Н. Дерепко

*Воронежский государственный университет  
Воронеж, Россия, [derepko@phys.vsu.ru](mailto:derepko@phys.vsu.ru)*

Интерес к оптике гибридных структур на основе полупроводниковых квантовых точек (КТ) и плазмонных наночастиц (НЧ) обусловлен возможностью управления люминесцентными свойствами первых за счет эффектов плазмон-экситонного взаимодействия, которые могут быть использованы для расширения возможностей применения КТ в биологии, медицине, химии, оптоэлектронике, фотокатализе и т.д.

В данной работе представлены результаты, демонстрирующие изменение люминесцентных свойств КТ CdS в присутствии сферических наночастиц серебра (НЧ Ag) (рис.).

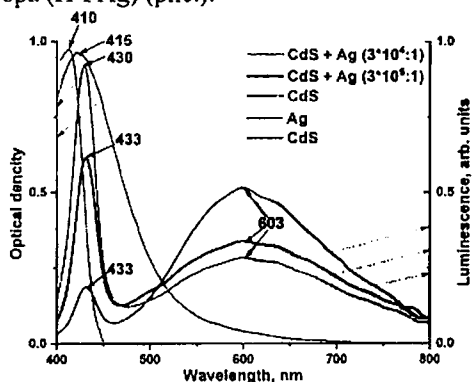


Рис. Экспериментальные спектры: люминесценции КТ CdS и смесей КТ CdS+НЧ Ag; поглощения НЧ Ag и КТ CdS

Исследуемые образцы представляли собой коллоидные растворы. При уменьшении соотношения  $[n_{CdS}]:[n_{Ag}]$  наблюдается тушение экситонной полосы люминесценции (пик при 430 нм) и ускорение кинетики люминесценции, что свидетельствует в пользу переноса энергии вследствие плазмон-экситонного взаимодействия между КТ и НЧ. Увеличение интенсивности люминесценции в области 603 нм, также сопровождающееся ускорением кинетики люминесценции, может быть связано с изменением вероятности безызлучательной рекомбинации вследствие модификации интерфейсов на поверхности КТ и проявлением эффекта Перселла.

*Работа выполнена при поддержке грантом Президента РФ, проект НШ-2613.2020.2.*

## ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

В. П. Дресвянский, Е. Ф. Мартынович

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
Иркутск, Россия, [nadyp@list.ru](mailto:nadyp@list.ru)*

Предметом исследования является образование люминесцирующих точечных дефектов в щелочно-галогенидных кристаллах под действием фемтосекундных лазерных импульсов высокой интенсивности. Цель работы состоит в построении физической модели процессов агрегации и нуклеации дефектов, образующихся при взаимодействии интенсивного фемтосекундного лазерного излучения с кристаллами.

В отличие от однородного распределения дефектов, характерного для кристаллов облученных  $\gamma$ -излучением или рентгеном, при облучении фемтосекундными лазерными импульсами распределение центров окраски и других стабильных дефектов носит пространственно неоднородный характер. Это обусловлено самофокусировкой и множественной филаментацией лазерного излучения и образованием центров лишь в области световых филаментов в виде пространственно обособленных шпуров (следов) из центров окраски, индуцированных этими филаментами.

На основе опытных и литературных данных сформирована физическая модель процессов взаимодействия интенсивного фемтосекундного лазерного излучения с широкозонными кристаллами на примере фторида лития, включающая самофокусировку и множественную филаментацию лазерного излучения на неоднородностях света и вещества, внутреннюю фотоионизацию в области филаментов, фото- и рекомбинационное возбуждение экситонов, их распад на френкелевские пары, частичную перезарядку компонентов пар в поле электронно-дырочной плазмы, миграцию подвижных компонентов нейтральных и ионизованных френкелевских дефектов (междоузельных атомов и ионов фтора и анионных вакансий) с характерными для них термоактивационными параметрами диффузии, ассоциацию анионных вакансий с F-центрами с образованием подвижных  $F_2^+$ -центров, прыжковую миграцию последних, их преобразование в процессе движения в стабильные  $F_2$  и  $F_3^+$  центры и перезарядку с образованием  $F_2$ ,  $F_3^+$  и  $F_3^-$  центров, в случае продолжительного облучения, ассоциацию с ними анионных вакансий и  $F_2^+$  центров и образование вследствие этого более крупных агрегатов вплоть до выпадения наночастиц коллоидного металла, рекомбинацию междоузельных атомов и ионов с электронными центрами окраски с частичным восстановлением узлов решетки и ассоциацию междоузельных атомов и ионов в нестабильные VF, Vt и стабильные V3 центры дырочно-интерстициального типа.

*Работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 года (№ проекта 02-43-2021-0004), а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Министерства образования, культуры, науки и спорта Монголии, проект № 17-52-44015-Mong\_a.*

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ ФТОРИДОВ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ХРОМА

А. В. Егранов, Е. А. Раджабов, В. А. Козловский

*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН  
Иркутск, Россия, [alegra@igc.irk.ru](mailto:alegra@igc.irk.ru)*

В работе исследовались оптические свойства кристаллов  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SrF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$  и  $\text{CdF}_2$ , активированных ионами хрома. Примесь хрома в эти кристаллы входит как в трехвалентном состоянии, так и в двухвалентном. Обычно исследования люминесценции этих ионов ограничиваются инфракрасной областью спектра. Эта область используется для получения лазерного излучения [1]. Выращенные кристаллы, как правило, имеют зеленую окраску, но иногда кристаллы бесцветны или имеют синий цвет. Зеленая окраска однозначно связана с трехвалентным состоянием хрома в этих кристаллах. Положение полос поглощения практически не меняется в исследуемых фторидах. Измерены спектры свечения в инфракрасной области спектра и спектры возбуждения. Спектры свечения и поглощения во многом похожи на известные ранее [2]. В спектрах возбуждения наблюдаются некоторые особенности, не проявляющиеся в спектрах поглощения.

Оптические свойства ионов хрома в двухвалентном состоянии в этих кристаллах практически не исследовались, хотя и имеются многочисленные данные электронно парамагнитного резонанса (например, [3]). Единственные опубликованные данные по этому вопросу – это исследование поглощения  $\text{Cr}^{2+}$  в  $\text{CdF}_2$  [4]. В данной работе мы отчасти хотели восполнить этот пробел. Получены предварительные результаты по спектрам поглощения и свечения в видимой области спектра двухвалентных ионов хрома в этих кристаллах. Сделано соответствие между полосами поглощения и свечения и электронными переходами в двухвалентном ионе хрома.

### *Литература*

1. G. Boulon, *Opt. Mater.*, 34(3), 499-512. (2012).
2. S.A. Payne, L.L. Chase, and W.F. Krupke, *J. Lumin.*, 40, 305-306, (1988).
3. P.B. Olieic, C.A. Bates and J.L. Dunn, *J. Phys.: Condens. Matter*, 11, 2579–2588, (1999).
4. W. Ulrici, *Phys. Status Solidi B*, 84(2), K155-K157, (1977).

## ТЕРМОДИФФУЗИОННОЕ АКТИВИРОВАНИЕ ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ ИОНАМИ МЕДИ

Л. О. Ельцина, Е. Ф. Мартынович

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН*

*Иркутск, Россия [femto@bk.ru](mailto:femto@bk.ru)*

*Иркутский государственный университет*

*Иркутск, Россия*

Недавно Иркутский государственный университет отметил столетие со дня своего образования. Юбилейная дата обострила интерес к истории университета, в том числе, к истории развития физического образования и физических исследований. В частности, нас интересовала история зарождения и развития иркутской школы люминесценции, в которой многие исследования, в том числе и современные, выполнялись на щелочно-галогидных кристаллах. Эти кристаллы рассматриваются как модельные объекты, удобные для изучения новых явлений.

Исследованиями этих кристаллов на кафедре физики ИГУ наши предшественники занимались уже в 20–30-х гг. прошлого века. Эта тематика была основной у первого заведующего кафедрой физики профессора С. А. Арцыбышева. Он исследовал проникновение ионов металлов в кристаллы каменной соли. К этим исследованиям он привлек И. А. Парфиановича, будущего основателя иркутской научной школы люминесценции и радиационной физики. В 1938 г. С. А. Арцыбышев защитил свою докторскую диссертацию по данной тематике [1].

Нас заинтересовала простота термодиффузионных экспериментов С. А. Арцыбышева, И. А. Парфиановича, С. А. Шипицына, К. Н. Погодаева, позволяющих легко вводить ионы металлов в кристаллические образцы, создавая тем самым люминесцирующие среды. Мы решили провести аналогичные эксперименты по введению ионов меди в кристаллы KBr и KCl. Весь процесс сводился к прогреву кристаллов в керамическом тигле, помещенном в электропечь. В тигле рядом с кристаллом помещался кусочек медной проволоки. Прогрев проводился в течение 1 часа при двух температурах: 450 и 700 °С. После такой обработки в кристаллах возникла интенсивная полоса люминесценции ионов меди  $\text{Cu}^+$ , которой не было до обработки. Результаты исследований показаны на рис. 1. Люминесценция возбуждалась четвертой гармоникой неодимового лазера с длиной волны 266 нм. Регистрировалась она при комнатной температуре спектрометром Ocean Optics 65000.

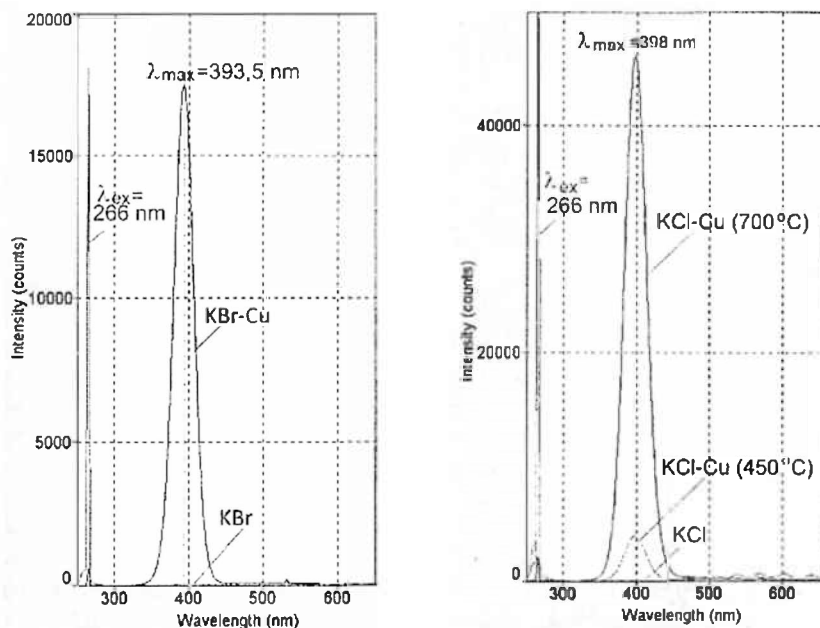


Рис. Спектры люминесценции до и после термообработки кристаллов.

Данная работа выполнялась в ИФ ИЛФ СО РАН как курсовая работа студентки ИГУ Л. О. Ельциной.

### Литература

1. Арцыбышев С. А. Проникновение ионов металлов в прозрачные кристаллы щелочно-галогидных солей: диссертация на степень доктора физических наук // Труды Физического института им. П. П. Лебедева АН СССР. 1938. Т. 1, вып. 3. С. 5–70.

## СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННОЙ ПАСПОРТ А-ПОЛОСЫ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ АЛМАЗОВ

Е. Ф. Мартынович, А. С. Емельянова

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
Иркутск, Россия [femto@bk.ru](mailto:femto@bk.ru)*

В спектрах люминесценции природных и синтетических алмазов часто наблюдается широкая полоса свечения, занимающая область от ~ 350–700 нм, максимум которой находится вблизи ~ 480 нм и смещается в некоторых пределах от образца к образцу. Эта люминесценция возбуждается рентгеновским излучением, ускоренными электронами, а также оптическим излучением. Она полоса является доминирующей в рентгенолюминесценции большинства природных алмазов, поэтому она играет большую роль в технологиях люминесцентной сепарации алмазосодержащих руд. В некоторых типах сепараторов алмазы отделяются от других люминесцирующих минералов с учетом величины времени затухания А-полосы люминесценции [1–3]. Известно, что величина времени затухания основного временного компонента люминесценции тоже изменяется от образца к образцу в пределах ~ (3–9) мс [4]. Разброс спектральных и временных характеристик А-полосы люминесценции обусловлен несколькими причинами. Во-первых, спектры искажаются вследствие реабсорбции люминесценции другими содержащимися в кристаллах центрами и, во-вторых, наличием дополнительных полос люминесценции этих центров, перекрывающихся с А-полосой. Изменчивость величины времени затухания для разных образцов связана с тушением А-полосы посторонними центрами. Учитывая большое значение этой люминесценции для практических приложений, необходимо хорошо знать ее характеристики и уметь уверенно ее идентифицировать.

Очевидно, что в кристаллах с максимальной величиной времени затухания длительного компонента люминесценции (~ 9 мс) тушение будет минимальным. Поэтому в таких кристаллах А-полоса будет иметь наименее искаженные характеристики. Для таких образцов были измерены температурные зависимости постоянных времени затухания. На рисунке представлены спектры фото- и рентгенолюминесценции А-полосы различных образцов алмазов. В образцах с высокой интенсивностью свечения А-полоса является наиболее чистой. Кинетика фото- и рентгенолюминесценции таких образцов представлена в правой части рисунка. Эта кинетика имеет эталонные признаки характерные для А-полосы люминесценции. К ним относятся резкое температурное тушение в области выше ~ 410 К, независимость времени затухания длительного компонента люминесценции от температуры в области ~ (350–170) К и его трансформация в два других компонента при температурах ниже ~ 140 К со своими характерными температурными зависимостями.

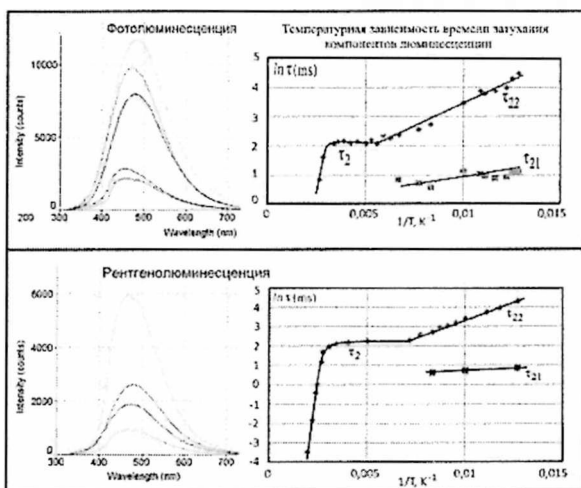


Рис. Спектры (слева) и температурные зависимости длительного компонента затухания (справа) А-полосы фото- и рентгенолюминесценции.

Представленные на рисунке спектры люминесценции и температурные зависимости времени затухания можно рассматривать как спектрально-временной паспорт А-полосы люминесценции алмаза, позволяющий однозначно идентифицировать эту полосу и отличать её от других широких спектральных полос люминесценции в алмазе.

### Литература

1. V. V. Novikov, V. S. Vyunnik, E. F. Martynovich. *Patent SU No.519889*, (1974).
2. V.V. Novikov, V.S. Vyunnik, E.F. Martynovich. *Patent SU No.544195*, (1975).
3. E.F. Martynovich, V.P. Mironov. *Izvestia Vuzov. Fizika*, 52 (12-3), 202, (2010).
4. Е.Ф. Мартынович, Л.В. Морожникова, И.А. Парфянович. ФТТ, 15, № 3, 927, (1973).

## СЕЛЕКТИВНОЕ ПЛАЗМОН-ИНИЦИИРОВАННОЕ ГИДРИРОВАНИЕ НА БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

М. Р. Ерзина, О. А. Гусельникова, Е. В. Милутина, А. Лютаков

*University of Chemistry and Technology, Prague, Czech Republic*

[erzinam@vscht.cz](mailto:erzinam@vscht.cz)

В данной работе авторы представляют одну из наиболее интересных возможностей плазмонного катализа – возможности введения селективности в химические процессы при гидрировании более одной химической связи.

4-нитрофенил и 4-этинилфенил были одновременно привиты на поверхность биметаллической решетки Au/Pt с помощью коллоидной литографии. Биметаллическая решетка представляет собой периодические золотые структуры, поддерживающие возбуждение плазмонов, а дополнительный слой платины обеспечивает участки катализатора для расщепления воды и образования активного водорода. Гидрирование проводилось в воде (источнике водорода) и инициировалось плазмонами.

В результате работы была оценена зависимость преобразования функциональных групп от освещения лазером в разных режимах (непрерывном и импульсном), а так же от частоты света и формы импульса. Было обнаружено, что использование лазерных импульсов прямоугольной или пилообразной формы не приводит к значительному увеличению скорости реакции в диапазоне частот  $0,1-1,0 \cdot 10^5$  Гц. Однако применение более сложных Sinc-образных импульсов увеличивает скорость гидрирования на низких частотах, причем эффект особенно выражен в случае химических фрагментов 4-нитрофенила и лишь незначителен в случае этильных групп. Работа описывает способ тонкой настройки кинетики реакции с помощью плазмонов и демонстрирует возможность кинетического контроля хемоселективности в химическом превращении с помощью подходящего режима запуска лазера.

### *Литература*

1. M. Erzina, O. Guselnikova, E. Miliutina, A. Trelin, P. Postnikov, V. Svorcik, O. Lyutakov, *J. Phys. Chem. C*, 125 (19), 10318-10325 (2021).
2. O. Guselnikova, A. Olshtrem, Y. Kalachyova, I. Panov, P. Postnikov, V. Svorcik, O. Lyutakov, *J. Phys. Chem. C*, 122(46), 26613-26622 (2018).
3. O. Guselnikova, A. Trelin, E. Miliutina, R. Elashnikov, P. Sajdl, P. Postnikov, Z. Kolska, V. Svorcik, O. Lyutakov, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12(25), 28110-28119 (2020).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ В СОЕДИНЕНИЯХ ТИПА YAG

Л. К. Ермаков

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Санкт-Петербург, Россия, [ermakov-lk@mail.ru](mailto:ermakov-lk@mail.ru)*

Соединения с большой величиной запрещенной зоны вызывают большой интерес, так как позволяют манипулировать излучением видимого диапазона и близкого к ним без существенных потерь [4; 5]. В кристаллах иттрий-алюминиевых гранатов (YAG) атом алюминия стоит в как октаэдрическом, так и тетраэдрическом окружении из атомов кислорода. Разные позиции в решетке имеют разную локальную симметрию, что даёт возможность организовывать разные системы уровней в запрещенной зоне при введении примесей. Это позволяет создавать оптические приборы различного назначения. Ввиду этого исследование плотности электронных состояний имеет важное значение.

Расчет плотности состояний можно проводить двумя методами: через построение зоны Бриллюэна [1] и методом разложения функции Грина в непрерывную дробь [2]. Последний вариант более перспективен, так как позволяет избежать построения зоны Бриллюэна, а матричные элементы гамильтониана в обоих вариантах одинаковы в рамках одного приближения. В данной работе применялся гамильтониан в базисе орбиталей Слэйтеровского типа [3]. Аналитический вид атомных орбиталей физически более информативен, чем численный вид, используемый в работе [4]. Однако метод функции Грина в данной работе имеет и свои особенности: быстрое нарастание размера чисел из-за того, что в алгоритме используется многократное умножение матрицы гамильтониана саму на себя. Обойти эту трудность удалось через масштабирование матрицы путем деления её на максимальный диагональный элемент. Размер программы около 1000 операторов языка FORTRAN. Результаты близки к работе [4].

### *Литература*

1. Дж.М. Займан, Принципы теории твердого тела, М. «МИР», 1974 г.
2. Solid State Physics, Volume 35, Acad. Press, N. Y. (1980).
3. E. Clementi, D.L. Raimondi, *J. Chem. Phys.*, 38, 2686-2689 (1963).
4. A.B. Munoz-Garcia, L. Seijo, *Phys. Rev. B*, 82, 184118 (2010).
5. С.В. Меркурьев, В.Е. Привалов, В.Г. Шеманин, *Письма ЖТФ*, 26, № 1, 45-49 (2000).

## ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ПИКОСЕКУНДНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ

В. И. Барышников, А. Д. Ермошенко

*Иркутский государственный университет путей сообщения*

*Иркутск, Россия [vibh@rambler.ru](mailto:vibh@rambler.ru)*

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН*

*Иркутск, Россия [vibh@rambler.ru](mailto:vibh@rambler.ru)*

Разработан, изготовлен и исследованы энергетические и кинетические параметры пикосекундного ускорителя электронов, в котором эмиссия электронов осуществляется на основе фотоэффекта при импульсном лазерном воздействии на неодимовый фотокатод. Анод и фотокатод составляют коаксиальный малоиндуктивный ускоряющий диод в единой конструкции с криостатом для исследуемых образцов. Криостат имеет кварцевые окна для лазерного иницирования работы ускорителя электронов, наблюдения оптического излучения образцов и специальный электрический разъем для измерений импульсных параметров электронного пучка.

Ускоряющее напряжение 5–20 кВ подается на ускоряющий диод с коаксиального кабеля. Коаксиальный кабель заряжается энергией малоиндуктивного конденсатора, который подключен к малогабаритному высоковольтному блоку питания.

Фотокатод из неодима имеет красную границу фотоэффекта 388 нм. В экспериментах использовалось излучение  $2\omega$ Ti:Sp лазера (375 нм, 50 фс, 80 МГц) при ускоряющем напряжении 20 кВ. Импульс тока электронного пучка, зарегистрированный на малоиндуктивном резисторе 50 Ом цилиндра Фарадея, достиг 0,02 А. Измеренная длительность импульсов электронного пучка по методу [1] не превышает 10 пс. В указанном режиме при плотности тока пучка 0,001 А/см<sup>2</sup> облучены кристаллы LiF с экспозицией 10 с и в слое толщиной ~5 мкм наведена сверхвысокая концентрация F<sub>2</sub> и F<sub>3</sub><sup>+</sup> центров (коэф. погл. при 450 нм 1500 см<sup>-1</sup>).

### *Литература*

1. В.И. Барышников, Т.А. Колесникова. *Оптика и спектроскопия*, 95 (4), 638–642 (2003).

## ИЗМЕРЕНИЕ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛА БАРИЕВОГО ХАЛЬКОГЕНИДА

Е. Ю. Ерушин<sup>1,2,3</sup>, Н. Ю. Костюкова<sup>1,2,3</sup>, А. А. Бойко<sup>2,3,4</sup>,  
Д. Б. Колкер<sup>1,2,3</sup>, Д. В. Бадиков<sup>4</sup>, В. В. Бадиков<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Институт лазерной физики СО РАН  
Новосибирск, Россия, [info@laser.nsc.ru](mailto:info@laser.nsc.ru)

<sup>2</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия, [rector@nsu.ru](mailto:rector@nsu.ru)

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет  
Новосибирск, Россия, [info@ctu.nstu.ru](mailto:info@ctu.nstu.ru)

<sup>4</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Томск, Россия, [rector@tsu.ru](mailto:rector@tsu.ru)

<sup>5</sup>Кубанский государственный университет  
Краснодар, Россия, [rector@kubsu.ru](mailto:rector@kubsu.ru)

Ранее в [1] при исследовании лучевой стойкости новых перспективных кристаллов бариевых халькогенидов ( $\text{BaGa}_4\text{Se}_7$  (BGSe) и  $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$  (BGGSe)) к излучению Nd:YLF лазера с длиной волны 1053 нм было обнаружено двухфотонное поглощение в кристалле BGGSe излучения с указанной длиной волны. В данной работе представлены экспериментально измеренные данные коэффициента двухфотонного поглощения и нелинейного показателя преломления кристалла BGGSe для обыкновенной (o) и необыкновенной (e) волны. Для измерения использовалась методика Z-скана с открытой и закрытой диафрагмой, описанная в работе [2]. В качестве источника излучения использовался Nd:YLF лазер с длиной волны 1,053 мкм, генерирующий импульсы наносекундной длительности (5–6 нс) с частотой следования  $f = 1000$  Гц. В результате для e-волны при  $f = 1000$  Гц коэффициент двухфотонного поглощения составил  $\beta = 4,6 \pm 0,1$  см<sup>2</sup>/Вт, нелинейный показатель преломления  $n_2 = 5,1 \pm 0,3 \times 10^{-13}$  см<sup>2</sup>/Вт, а нелинейность третьего порядка  $\chi^{(3)} = 8,9 \pm 0,5 \times 10^{-13}$  см<sup>2</sup>/статВ<sup>2</sup>.

*Экспериментальный стенд для Z-скана разработан при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 20-42-543004. Тестовая пластинка  $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$  изготовлена и подготовлена к эксперименту при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-60055.*

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Госзадания FSUS-2020-0036.*

### Литература

1. N.Y. Kostyukova, A.A. Boyko, E.Y. Erushin, A.I. Kostyukov, V.V. Badikov, D.V. Badikov, D.B. Kolker, *J. Opt. Soc. Am. B.*, 36, № 8, 2260-2265 (2019).
2. P.B. Chapple, J. Staromlynska, J.A. Hermann, T.J. McKay, R.G. Mcduff, *J. Nonlinear Opt. Phys. Mater.*, 06, № 3, 251-293 (1997).

## ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ УЗКОПОЛОСНЫЙ ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЮЩИЙ ИЗЛУЧЕНИЕ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ПОРЯДКА 2,1 МКМ В РЕЖИМЕ, БЛИЗКОМ К ВЫРОЖДЕННОМУ

Н. Ю. Костоюкова, Е. Ю. Ерушин, А. А. Бойко, Д. Б. Колкер

*Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия, [rector@nsu.ru](mailto:rector@nsu.ru)*

В настоящее время, существует ряд перспективных неоксидных нелинейных кристаллов, таких как  $ZnGeP_2$ ,  $AgGaSe_2$ ,  $BaGa_2GeSe_6$  и  $OPGaAs$ , обладающих высокой нелинейностью. К сожалению, для накачки параметрических генераторов света (ПГС) на основе указанных кристаллов не могут быть применены широко распространенные Nd:YAG / Nd:YLF из-за двухфотонного поглощения на длине волны 1 мкм. Поэтому для накачки ПГС требуются более длинноволновые источники излучения. Одним из способов создания таких источников является создание ПГС на основе оксидного кристалла, например PPLN [1].

Данная работа посвящена разработке перестраиваемого узкополосного ПГС, генерирующего излучение с длиной волны порядка 2,1 мкм в режиме, близком к вырожденному. В качестве источника накачки использовался Nd:YAG лазер (Canlas), генерирующий импульсы длительностью 8 нс с частотой следования 5 кГц и с длиной волны 1064 нм. Нелинейным элементом ПГС служил MgO:PPLN кристалл российского производства размером  $2 \times 10 \times 20$  мм с рабочей апертурой  $2 \times 2$  мм и периодом доменной структуры 32,3 мкм. Для обужения спектральной линии выходного излучения использовалась объемная Брэгговская решетка (ОБР) размером  $5 \times 5 \times 5$  мм в резонаторе ПГС. Максимально достигнутое значение средней мощности выходного излучения ПГС составило 617 мВт (123 мкДж). Максимальная эффективность преобразования составила 10%, что соответствует квантовой эффективности 20%. Размещение ОБР на поворотной подвижке позволило перестраивать длину волны выходного излучения в диапазоне: от 2050 нм до 2209 нм для сигнальной и холостой волны. Косвенные измерения показывают, что спектральная ширина линии не превышает 1 нм. Стоит отметить, что при замене ОБР на отражающее зеркало резонатора ширина спектральной линии в вырожденном режиме заметно увеличивается (более 100 нм).

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 20-72-00032 (разработка экспериментальной установки, проведение эксперимента, исследование выходных характеристик излучения).*

*Кристалл MgO:PPLN изготовлен при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-20077.*

### *Литература*

1. B. Nandy, S.C. Kumar, J.C. Casals, H. Ye, M. Ebrahim-Zadeh, *J. Opt. Soc. Am. B*, 35, C57-C67 (2018).

## СПЕКТРАЛЬНАЯ И ТОКОВАЯ ДИАГНОСТИКА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ЛАБОРАТОРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ МАГНИТОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В АТМОСФЕРАХ ПЛАНЕТ ПОДОБНЫХ ГОРЯЧИМ ЮПИТЕРАМ

М. А. Ефимов, М. С. Руменских, А. А. Чибранов,  
И. Ф. Шайхисламов, А. Г. Березуцкий, В. Г. Посух,  
П. А. Трушин, Ю. П. Захаров, И.Б. Мирошниченко

*Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*  
[efim.sci@gmail.com](mailto:efim.sci@gmail.com)

В работе приведен анализ взаимодействия плазменных потоков в экспериментах по моделированию натекания звездного ветра на атмосферу горячего Юпитера [1]. Возмущения плазменных потоков регистрировались зондами Ленгмюра и магнитными зондами [2]. Существенная роль также уделялась спектральным измерениям, можно заметить, с течением времени линии более высоких зарядностей становятся менее интенсивными, что объясняется процессами рекомбинации электронов и ионов. Магнитное поле не оказывает влияния на данный эффект.

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 позволят 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 была выполнена в рамках проекта РНФ № 18-12-00080, при поддержке грантов РФФИ № 18-2921018, гранта Минобрнауки 075-15-2020-780, а также Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема No АААА-А17-117021750017-0).*

### *Литература*

1. I. F. Shaikhislamov, V.G. Posukh, A.V. Melekhov, P.A. Prokopov, E.L. Boyarintsev, Yu.P. Zakharov, A.G. Ponomarenko, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 58(11), 115002 (2016).
2. М.А. Ефимов, А.А. Чибранов, А.Г. Березуцкий и др., *Квант. электрон.*, 51, № 3, 222-227, (2021).

## НОВЫЕ СКАНДОБОРАТНЫЕ КРИСТАЛЛЫ: СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА И ГВГ

А. Я. Жамус<sup>1</sup>, Д. М. Ежов<sup>1</sup>, А. Б. Кузнецов<sup>2</sup>,  
В. А. Светличный<sup>1</sup>, А. Е. Кох<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Томск, Россия, [amtarjamous2@gmail.com](mailto:amtarjamous2@gmail.com)

<sup>2</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН  
Новосибирск, Россия, [ku.artemv@gmail.com](mailto:ku.artemv@gmail.com)

Одной из актуальных задач кристаллооптики на сегодняшний день является разработка новых материалов для различных применений в нелинейной оптике и лазерной технологии. Кристаллы на основе боратов всегда были перспективными нелинейно-оптическими материалами, благодаря таким свойствам как высокой эффективности преобразования и лучевой стойкости. Однако, эти кристаллы могут быть полезными и для других оптических применений, например, в качестве активных сред твердотельных лазеров или флуоресцирующих материалов при добавлении элементов из f-группы (Nd, Pr и др.). В последние годы значительно возрос интерес к поиску и созданию новых многофункциональных оптических материалов, которые позволяют одновременно и генерировать лазерное излучение, и осуществлять нелинейное преобразование частоты, например, среды с самоудвоением частоты генерации.

Данная работа посвящена исследованию трёхкатионных скандоборатных кристаллов, выращенных методом TSSG. Кристаллы с общей формулой  $RE_xM_ySc_{2+z}(BO_3)_4$  ( $RE$  – лантанонды от Sm до Yb,  $M = Nd, Pr$ ,  $x+y+z=2$ ). Изучены их кристаллическая структура, спектры поглощения и люминесценции, а также проведено сравнительное исследование эффективности генерации второй гармоники (ГВГ) излучения Nd:YAG-лазера ( $\lambda = 1064$  нм,  $\tau = 6$  нс) выбранных кристаллов порошковым методом Куртца-Перри.

Установлено, что кристаллы, содержащие Nd, преобразуют вторую гармонику с эффективностью до 50% по отношению к KDP, что связано с собственным поглощением ионами  $Nd^{3+}$  на длине волны второй гармоники при преобразовании излучения Nd:YAG-лазера. Эффективность преобразования этого же излучения для кристаллов, содержащих Pr, гораздо выше. В работе также определены величины эффективной нелинейной восприимчивости изученных кристаллов  $d_{eff}$  и обсуждено влияние их химического состава и линейных оптических свойств на эффективность ГВГ.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-05-00198).*

## ТОНКАЯ СТРУКТУРА ЭКСИТОНОВ В КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ CdS, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ

А. А. Зарубанов, К. А. Свит, К. С. Журавлев

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирск, Россия, alexsundr@mail.ru*

Квантовые точки (КТ) уже нашли свое применение в дисплеях, где они используются для излучения монохроматических красных и зеленых цветов. Кроме того, недавно была показана возможность создания на основе КТ светодиодов с высокой яркостью и внешним квантовым выходом более 20 %.

Для достижения высокого квантового выхода необходимо иметь высокую вероятность излучательной рекомбинации. Вероятность излучательной рекомбинации определяется энергетической структурой экситонов.

В данной работе исследовалась кинетика фотолюминесценции (ФЛ) CdS КТ, сформированных в матрице пленки Ленгмюра-Блоджетт. С целью изучения тонкой структуры экситонов в данной работе была исследована нестационарная ФЛ КТ CdS в диапазоне температур 5–300 К.

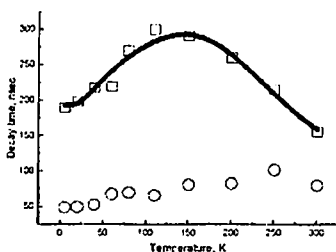


Рис. Температурная зависимость времен задержания ФЛ CdS КТ. Квадраты – медленное время жизни, круги – быстрое время жизни, сплошная линия – аппроксимация ур. Больцмана

Кинетика ФЛ описывается суммой двух экспонент во всем диапазоне температур с временами жизни 40 и 150 нс при 5 К. Маленькое время жизни мы связываем

с рекомбинацией трионов [1]. Большое время жизни определяется рекомбинацией темного экситона [2]. С учетом тонкой структуры экситона температурную зависимость его времени жизни можно описать простой 3-уровневой моделью с разными временами жизни. При этом распределения экситонов по состояниям описывается уравнением Больцмана [2]. В результате аппроксимации экспериментальной зависимости времени жизни темного экситона от температуры получаются следующие энергетические зазоры между уровнями экситонов: 7 мэВ и 86 мэВ.

### Литература

1. А. А. Зарубанов, К. С. Журавлев, *ФТП*, 49 (3), 392 (2015).
2. S. A. Crooker, T. Barrick, J. A. Hollingsworth, and V. I. Klimov, *Appl. Phys. Lett.*, 82, 2793 (2003).

## ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В УПРАВЛЕНИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ К ЛАЗЕРНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

А. С. Зверев<sup>1</sup>, А. Ю. Митрофанов<sup>2</sup>, Н. Н. Ильякова<sup>2</sup>  
Д. Р. Нурмухаметов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт углеродной и химического материаловедения  
ФИЦ УУХ СО РАН*

*Кемерово, Россия, [anthon.zverev@yandex.ru](mailto:anthon.zverev@yandex.ru)*

<sup>2</sup>*Кемеровский государственный университет  
Кемерово, Россия, [lira@kemsu.ru](mailto:lira@kemsu.ru)*

В работе рассмотрено применение оксидов магния и цинка как фотокаталитической добавки, способной заметно уменьшить порог инициирования взрывной реакции энергетического материала лазерным излучением на примере тетранитрата пентаэритрита (ТЭН). Базируясь на механизме, предложенном в [1], рассмотрены схемы процессов фотоиницирования для композитов, содержащих каждый из оксидов. Ключевой стадией в обоих случаях является перенос электрона на низшую вакантную молекулярную орбиталь (НВМО) ТЭНа, с образованием метастабильного продукта, способного к экзотермическому разложению. Различными являются способы переноса заряда. В случае MgO – это непосредственный фотоиндуцированный перенос валентного электрона оксида на НВМО ТЭНа, происходящий при воздействии третьей гармоники YAG:Nd-лазера (3,5 эВ). В случае ZnO происходит генерация электрон-дырочной пары и самопроизвольный переход электрона на находящуюся ниже дна зоны проводимости НВМО ТЭНа. При этом данный процесс может эффективно осуществляться и при воздействии видимого излучения с длиной волны 532 нм по двухфотонному механизму. В качестве подтверждения предложенных моделей в работе проведен совместный анализ спектров поглощения интерфейсов оксид-ТЭН, люминесценции материалов, результатов оптоакустических исследований, порогов лазерного инициирования гармониками YAG:Nd-лазера с длинами волн 1064, 532 и 355 нм. Для композитов ТЭН-ZnO изучена зависимость порога лазерного инициирования от концентрации оксида. Показано, что в зависимости от концентрации оксида и длины волны инициирующего излучения порог может быть понижен в 2–5 раз.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-33-60013).*

### *Литература*

1. R. V. Tsyshkevsky, S. N. Rashkeev, M. M. Kuklja, *Surf. Sci.*, 637, 19-28, (2015).

## ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРАСИТЕЛЯ РОЗЫ БЕНГАЛЬСКОЙ

Т. С. Кондратенко, А. И. Звягин  
Т. А. Чевычелова, О. В. Овчинников

Воронежский государственный университет  
Воронеж, Россия, [optichka@vandex.ru](mailto:optichka@vandex.ru)

Присутствие наночастиц благородных металлов вблизи флуоресцирующих красителей может существенно влиять на свойства последних. В работе рассмотрены спектрально-люминесцентные и нелинейно-оптические свойства ксантенового красителя Роза Бенгальская (RB) в присутствии треугольных наночастиц серебра (AgNPs) с плазмонным пиком 570 нм, приходящимся на максимум свечения красителя. Наночастицы получены методом коллоидного синтеза и переведены в этанольный раствор. Смеси получали для AgNPs и этанольного раствора RB ( $10^{-5}$  моль/л). На рисунке приведены спектральные и нелинейно-оптические свойства смесей RB и AgNPs в соотношении 1:1000, а также их отдельных компонент.

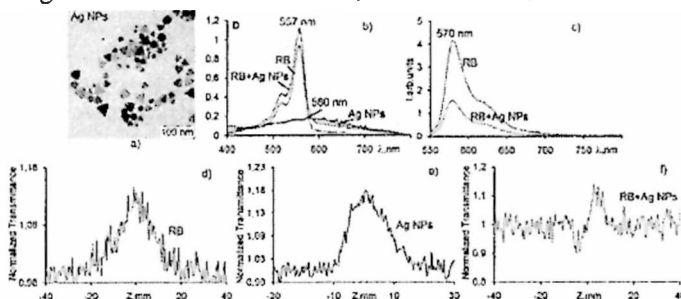


Рис. ПЭМ-изображение НЧ Ag (a); спектры поглощения (b) и люминесценции (c) и Z-сканы с закрытой апертурой (d-f) исследуемых образцов

Показано, что присутствие AgNPs вблизи молекул красителя приводит к тушению люминесценции RB и существенному изменению нелинейно-оптических свойств (появление самофокусировки при сопряжении). Наблюдаемые явления могут быть объяснены как формированием комплексов между молекулами RB и AgNPs, характерных для ксантеновых красителей [1], так и влиянием поля металлических наночастиц на свойства RB.

*Работа поддержана грантом Президента РФ № МК-3411.2021.1.2.*

### Литература

1. D. Burget, J.P. Fouassier, *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, 94(13), 1849–1854 (1998).

## ФЛУКТУИРУЮЩАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ ОДИНОЧНЫХ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В КУБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

В. П. Дресвянский, С. А. Зилов, Е. Ф. Мартынович

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
Иркутск, Россия, [nadvp@list.ru](mailto:nadvp@list.ru)*

Центры окраски в различных кристаллах широко используются в качестве рабочих центров детекторов гамма-излучения, трековых детекторов заряженных частиц и смешанных полей ядерных излучений, оптических носителей визуальной и цифровой информации, лазерных сред и пассивных лазерных затворов, тонкопленочных запоминающих люминесцентных экранов для визуализации и оцифровки рентгеновских микроразрешенных изображений. Развитие новых принципов спектроскопического различения радиационных дефектов, дополняющих традиционные спектрально-кинетические методы, использование новых спектроскопических характеристик, является актуальным. Это особенно подчеркивается практическим значением радиационных дефектов, включая центры окраски, как модельных квантовых систем в различных фундаментальных исследованиях, которые можно искусственно создавать в конденсированных средах действием жесткой радиации или лазерного излучения.

Целью представленных исследований является изучение возможностей спектроскопического различения отдельных типов люминесцирующих дефектов, создаваемых радиацией в конденсированных средах, на основе сопоставления обобщенных численных характеристик квантовых траекторий интенсивности фотолюминесценции, которые измеряются методами конфокальной сканирующей люминесцентной микроскопии на единичных дефектах в режиме пространственно-селективного время-коррелированного счета одиночных фотонов.

В работе экспериментально подтверждена возможность реализации и эффективность метода лазерной конфокальной сканирующей люминесцентной спектроскопии одиночных радиационных дефектов по характеристикам их фотолюминесцентных траекторий. Построены динамические модели  $F_2$  и  $F_3^+$  центров в кристаллах фторида лития. На основе математического аппарата для флуоресценции одиночных молекул, в частности уравнений для *on*- и *off*- интервалов для молекулы с триплетным уровнем, авторами было введено дополнительное уравнение, описывающее переориентацию центра окраски. Полученные в результате расчета квантовые траектории одиночных  $F_2$  и  $F_3^+$  центров окраски хорошо согласуются с экспериментальными.

На примере исследования одиночных центров окраски, индуцированных в объеме кубического кристалла, показано, что регистрируемые поляризованные квантовые траектории несут в себе информацию о структуре, природе, динамике квантовой системы и ее локальном окружении. Предложен новый метод лазерной сканирующей конфокальной люминесцентной микроскопии одиночных квантовых систем, находящихся в кристаллической матрице, основанный на анализе соотношения интенсивностей поляризованных квантовых траекторий (зависимостей от времени числа зарегистрированных фотонов с вертикальной и горизонтальной поляризациями за фиксированное время регистрации). Разработаны математический аппарат и алгоритмы для анализа поляризованных квантовых траекторий, сформированы таблицы характеристик квантовых траекторий для всех возможных типов одиночных центров окраски (квантовых систем) в кубическом кристалле.

*Работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 года (№ проекта 0243-2021-0004), а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Министерства образования, культуры, науки и спорта Монголии, проект № 17-52-44015-Mong\_a.*

## ОПТИЧЕСКИЕ ВИХРЕВЫЕ 3D РЕШЕТКИ

Д. А. Иконников, С. А. Мысливец, В. Г. Архипкин  
А. М. Вьюнышев

*Институт физики им. Л. В. Кузенского ФИЦ КИЦ СО РАН  
Красноярск, Россия, [ikonnikov@iph.krasn.ru](mailto:ikonnikov@iph.krasn.ru)*

Оптические лазерные вихревые пучки активно исследуются на протяжении последних лет [1]. Оптические вихри представляют собой свет, поле которого имеет вид  $(x + iy)^l \equiv A e^{i\varphi}$ , где  $l$  – топологический заряд,  $\varphi$  – азимутальный угол. Такие пучки нашли применение во многих областях, таких как квантовые коммуникации, сверхъёмкая передача информации, микроскопия сверхвысокого разрешения и оптические манипуляции [2]. Для ряда прикладных задач, таких как захват и удержание объектов различной природы, высококачественная фотолитография и структурирование вещества, требуется создание упорядоченных массивов пучков, в том числе, оптических вихревых 3D решеток. Одним из способов получения трехмерных оптических решеток является дифракция света на периодической решетке. Известно, что при прохождении через периодическую решетку плоской волны в ближнем поле наблюдается эффект Тальбота, который заключается в периодическом самовоспроизведении изображения на расстояниях кратных длине Тальбота. Для пучков с плоским волновым фронтом эффект Тальбота к настоящему времени хорошо изучен [3]. Для оптических вихрей терагерцового диапазона данный эффект наблюдался экспериментально [4,5]. В данной работе была теоретически и экспериментально исследована ближнепольная дифракция оптических вихрей видимого диапазона на двумерной амплитудной решетке. Трехмерные световые решетки из оптических вихрей могут обеспечить новые функциональные возможности для взаимодействия света с веществом, которые невозможны в оптических решетках без топологического заряда.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 19-12-00203).*

### *Литература*

1. A.M. Yao and M. J.Padgett, *Adv. Opt. Photon.*, 2, 161-204, (2011).
2. Y. Shen, X. Wang, Z. Xie et al., *Light Sci. Appl.*, 8, 90, (2019).
3. J. Wen, Y. Zhang, M. Xiao, *Adv. Opt. Photon.*, 5, 83-130, (2013).
4. I.A. Kotelnikov, O.E. Kameshkov, B.A. Knyazev, *J. Optics*, 22, 065603, (2020).
5. B. Knyazev, O. Kameshkov, N. Vinokurov et al., *Opt. Express*, 26, 14174-14185, (2018).

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АТОМОВ Li-6 В ПОЛЯХ РАЗЛИЧНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Р. Я. Ильенков<sup>1</sup>, О. Н. Прудников, А. В. Тайченачев<sup>1,2</sup>, В. И. Юдин<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт лазерной физики СО РАН

Новосибирск, Россия, [ilenkov.roman@gmail.com](mailto:ilenkov.roman@gmail.com)

<sup>2</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет  
Новосибирск, Россия

Теоретическое описание кинетики нейтральных атомов в поляризованных полях с учетом эффектов отдачи и пространственной локализации сложная задача. Для ее решения был развит квазиклассический подход [1; 2]. Однако учет реальной атомной структуры D2 линии атома лития-6, приводит к изменению зависимостей температуры лазерного охлаждения от параметров охлаждающего поля.

Оптимальная в случае двухуровневого атома схема охлаждения в поле встречных циркулярно-поляризованных полей показывает в несколько раз худшие результаты, что показано на рисунке. Требуется поиск альтернативных схем.

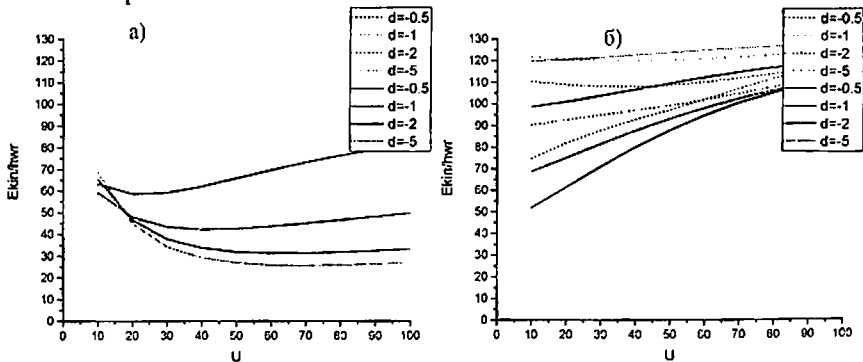


Рис. Кинетическая энергия атомов Li-6 в зависимости от оптического потенциала охлаждающего поля  $\sigma^+ \rightarrow \sigma^-$  конфигурации при различных отстройках: а) простая двухуровневая схема; б) схема с тремя возбужденными уровнями и одним основным состоянием. Параметры задачи выражены в единицах спонтанной релаксации. Непрерывные линии (Климонтович) и точки (Иго) отражают различные способы определения диффузии

Работа поддержана грантом Президента (№ 075-15-2021-128).

### Литература

1. V.G. Minogin, V.S. Letokhov, Laser Light Pressure on Atoms, Gordon and Breach, New York, 1987.
2. A. P. Kazantsev, G. I. Surdutovich, and V. P. Yakovlev, Mechanical Action of Light on Atoms, World Scientific, Singapore, 1990.

## ЭФФЕКТ ПАРСЕЛЛА В МЕТАЛЛО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ С ОРГАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ

Е. И. Гиршова<sup>1,2</sup>, К. М. Морозов<sup>1,2</sup>, А.В. Белоновский<sup>1,2</sup>, М.А. Калитеевский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, [m.kaliteevski@mail.ru](mailto:m.kaliteevski@mail.ru)

Проведено исследование спектральных характеристик и динамики люминесценции в резонаторных и периодических слоистых структурах структурах с органическими светоизлучающими слоями. Методом термического напыления изготовлены различные светоизлучающие структуры с металлическими, диэлектрическими и органическими слоями, излучающими в видимой и ультрафиолетовой области спектра.

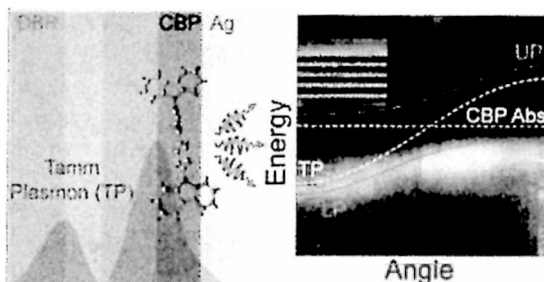


Рис. Схема структуры с и картина люминесценции

Проанализировано влияние эффекта Парселла и процессов безызлучательной рекомбинации на интенсивность и динамику люминесценции. Продемонстрирована эффективная люминесценции в видимом и ультрафиолетовом диапазоне.

### Литература

1. К.М. Морозов, К.А. Иванов, D. de Sa Pereira, C. Menelaou, A.P. Monkman, G. Pozina, M.A. Kaliteevski, *Sci. Rep.*, 9, 9604 (2019).
2. К.М. Морозов, К.А. Иванов, А.В. Белоновский, Е.И. Гиршова, D. de Sa Pereira, C. Menelaou, P. Pander, L.G. Franca, A.P. Monkman, G. Pozina, D.A. Livshits, N.V. Selenin, M.A. Kaliteevski, *J. Phys. Chem. C*, 124, 21656–21663 (2020).
3. К.М. Морозов, P. Pander, L.G. Franca, А.В. Белоновский, Е.И. Гиршова, К.А. Иванов, D.A. Livshits, N.V. Selenin, G. Pozina, A.P. Monkman, M.A. Kaliteevski, *J. Phys. Chem. C*, 125, 8376–8381 (2021).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МАТРИЦЫ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

К. Р. Каримуллин, А. И. Аржанов, А. В. Наумов

<sup>1</sup>*Институт спектроскопии РАН*

*Москва, Троицк, Россия, [kamil@isan.troitsk.ru](mailto:kamil@isan.troitsk.ru)*

<sup>2</sup>*Московский педагогический государственный университет,  
Москва, Россия*

Полупроводниковые квантовые точки (КТ) и композитные материалы на их основе привлекают внимание исследователей благодаря своим уникальным спектральным и фотофизическим свойствам. Все большее распространение получают фотонные технологии, основанные на использовании различных материалов с КТ: светонзлучающие устройства, преобразователи солнечной энергии и источники лазерного излучения, в т.ч. источники одиночных фотонов.

Внедрение КТ внутрь прозрачной твердой матрицы способствует решению таких материаловедческих задач как стабилизация КТ в пространстве и их однородное распределение с заданной концентрацией, а также защита от деградации и окисления. Однако вопрос о влиянии матрицы на свойства результирующего материала изучен недостаточно. Как показывают исследования, свойства нанокompозита представляют собой сложную комбинацию свойств КТ и твердотельной матрицы. За счет подбора матрицы можно модифицировать характеристики композита, например, управлять спектром люминесценции, что в перспективе открывает возможность получать материалы с совершенно новыми свойствами. Все это определяет важность и актуальность изучения нанокompозитов с квантовыми точками для современной физики и материаловедения.

В данной работе выполнены комплексные структурные и спектральные исследования твердотельных нанокompозитов, изготовленных с использованием двухоболочечных коллоидных КТ CdSe/CdS/ZnS. В качестве твердотельных матриц для внедрения КТ были использованы замороженные толуол и гексадекан, а также полимерные пленки: полиметилметакрилат, полиизобутилен, полипропилен и полиэтилентерефталат. Для всех образцов в широком диапазоне криогенных температур были измерены спектры люминесценции и построены температурные зависимости положения их максимума и ширины. На основе анализа этих зависимостей в рамках модели электрон-фононного взаимодействия определены следующие параметры: ширина запрещенной зоны при нулевой температуре, фактор Хуанга-Риса и средняя энергия фононов. Полученные величины средней энергии фононов совпали с результатами независимых измерений, выполненных методом комбинационного рассеяния света. Дополнительно была исследована кинетика люминесценции и измерено время жизни возбужденного состояния для разных матриц. Исследования профиля поверхности на атомно-силовом микроскопе, а также измерения методом люминесцентной микроспектроскопии, позволили получить новую информацию о связи люминесцентных свойств образцов с их внутренней структурой.

*Работа выполнена в рамках темы Государственного задания МПГУ «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» (номер государственной регистрации ААА-А20-120061890084-9).*

## УПРАВЛЕНИЕ ФОРМОЙ ФРОНТА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В МЕТОДЕ ЧОХРАЛЬСКОГО

С. А. Кислицын, В. С. Бердников, К. А. Митин

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН  
Новосибирск, Россия, [berdnikov@itp.nsc.ru](mailto:berdnikov@itp.nsc.ru)  
Новосибирский государственный технический университет  
Новосибирск, Россия, [berdnikov@itp.nsc.ru](mailto:berdnikov@itp.nsc.ru)*

Метод Чохральского один из основных методов получения высококачественных монокристаллов различных материалов. Метод поддается сравнительно простой модификации при выращивании кристаллов с различными теплофизическими свойствами. Суть метода заключается в вытягивании монокристалла со свободной поверхности большого объема расплава. Структурное совершенство получаемых монокристаллов зависит от формы фронта кристаллизации и тепловой истории растущего кристалла. Из-за перепада температуры между фронтом кристаллизации и стенками тигля в расплаве неизбежно развивается свободная конвекция, имеющая тепловую гравитационно-капиллярную природу. От теплофизических свойств расплавов существенно зависит относительная роль сил плавучести и термокапиллярного эффекта. Сопряженный конвективный теплообмен в расплаве влияет на форму фронта кристаллизации и на итоговое качество получаемых монокристаллов. В реальной технологии с целью управления гидродинамикой и сопряженным теплообменом в системах «кристалл – расплав – стенки тигля» применяется вращение кристалла. Таким образом, в формировании конвективных течений в расплаве начинают принимать участие центробежные силы и сила Кориолиса, а теплообмен между кристаллом, расплавом и стенками тигля происходит в режиме смешанной конвекции. Численно, методом конечных элементов, исследован сопряженный конвективный теплообмен в системе «кристалл – расплав – стенки тигля» на начальных стадиях роста кристаллов кремния и модельных веществ – воды и гептадекана. Изученная относительная роль и влияние сил плавучести и термокапиллярной конвекции при различных характерных перепадах температуры, скорости вращения кристалла на локальные особенности конвективного теплообмена в расплаве и на формы фронтов кристаллизации. Вода в данном случае пример вещества с инверсной зависимостью плотности от температуры, вносящей особенности в зависимости пространственных форм течения и локальный конвективный теплообмен от управляющих параметров и влияющей на формы фронта кристаллизации.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН 0257-2021-0003. Номер гос. регистрации 121031800213-0.*

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РОСТА КРИСТАЛЛОВ ИЗ РАСПЛАВОВ С НОРМАЛЬНОЙ И ИНВЕРСНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ ПЛОТНОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТОДОМ БРИДЖМЕНА**

**С. А. Кислицын, В. С. Бердников, К. А. Митин**

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН*

*Новосибирск, Россия, [berdnikov@itp.nsc.ru](mailto:berdnikov@itp.nsc.ru)*

*Новосибирский государственный технический университет*

*Новосибирск, Россия, [berdnikov.itp@gmail.com](mailto:berdnikov.itp@gmail.com)*

Методом Бриджмена получают монокристаллы различных веществ из расплавов. Существенные отличия теплофизических свойств веществ вынуждают подбирать способы управления гидродинамикой и конвективным теплообменом для создания и поддержки оптимальных форм фронтов кристаллизации. В методе Бриджмена управляющие параметры при заданных материале и размерах тигля и свойствах конкретного расплава – скорость опускания тигля в холодную зону печи, градиент температуры на внешней стороне тигля и режим вращения тигля. Наиболее широко метод Бриджмена используется для получения монокристаллов из расплавов, обладающих нормальной зависимостью плотности от температуры, т. е. с плотностью, уменьшающейся с ростом температуры. Это, например, многие оксиды, щелочногалоидные вещества, кремний, германий. Методом Бриджмена выращивают так же кристаллы из расплавов, обладающих инверсной зависимостью плотности от температуры. К таким веществам относятся некоторые теллуриды кадмия-ртути, монокристаллы которых используются в оптических приборах, работающих в ИК-диапазоне длин волн. В лабораторных экспериментах при исследовании гидродинамики и форм фронтов кристаллизации при выращивании кристаллов из расплавов, обладающих инверсной зависимостью плотности от температуры, используется вода как жидкость-имитатор. Численно исследованы процессы кристаллизации кремния и воды в цилиндрических тиглях. Проведено исследование влияния скорости опускания тигля в «холодную» зону, градиента температуры, начального перегрева расплава и скорости вращения тигля на гидродинамику, поля температуры и формы фронтов кристаллизации.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН 0257-2021-0003. Номер гос. регистрации 121031800213-0.*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ С АГЛОМЕРАТАМИ КОАГУЛИРОВАННЫХ НАНОПРОВОЛОК ДЛЯ SERS-СПЕКТРОСКОПИИ

Е. П. Кожина<sup>1</sup>, С. А. Бедин<sup>1,2</sup>, С. Н. Андреев<sup>1</sup>,  
И. М. Долуденко<sup>2</sup>, А. В. Наумов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский педагогический государственный университет  
Москва, Россия, [Liza.kozhina.99@mail.ru](mailto:Liza.kozhina.99@mail.ru)

<sup>2</sup>Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и  
фотоника» РАН, Москва, Россия

Гигантское комбинационное рассеяние света (SERS (англ.) – усиленное поверхностью комбинационное рассеяние) представляет собой мощный аналитический инструмент для спектральной идентификации различных материалов и структур, вплоть до отдельных наночастиц, квантовых объектов, одиночных молекул. Как показывают многочисленные исследования, по аналогии с усилением спонтанного излучения квантовой системы [1], интенсивность регистрируемого SERS-сигнала может быть повышена либо за счет увеличения амплитуды локального электрического поля, либо за счет изменения плотности состояний. В свою очередь, высокоинтенсивные локальные поля, так называемые «горячие точки», могут возникать вблизи поверхности большой кривизны (на остриях, шероховатостях), а также в малых зазорах между соседними плазмонными наноструктурами, где максимальной фактор усиления SERS-сигнала может достигать порядка  $10^{11}$ .

В нашей работе [2] мы показали возможность метода шаблонного синтеза для изготовления SERS-активных подложек с ансамблем вертикально-стоящих нанопроволок (НП) на основе треховых мембран (ТМ). Этот метод позволяет не только варьировать плотность НП и их диаметр, но также и их длину. Было обнаружено, что за счет действия капиллярных сил близлежащие НП слипаются вершинами, образуя пучки. Количество НП в пучке зависит от их длины, а также влияет на особенность формирования «горячих точек» в точке контакта НП, что подтверждает наличие определённой длины НП для получения наибольшего усиления сигнала комбинационного рассеяния света.

С помощью компьютерного моделирования было продемонстрировано многократное усиление локального электрического поля в зазоре между вершинами НП. Таким образом, SERS-сигнал для молекул, адсорбированных в точке контакта НП, наиболее интенсивный, что было экспериментально подтверждено на примере 4-тПВА. Вклад «горячих точек» в интенсивность регистрируемого SERS-сигнала заметно увеличивается, если нанести исследуемое вещество на влажную подложку, где НП еще не слиплись вершинами. Мы предлагаем этот новый тип наноструктурированных SERS-подложек в качестве основы для эффективного анализа веществ сверхнизких концентраций.

*Работа выполнена в рамках темы Государственного задания МПГУ «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» (АААА-А20-120061890084-9).*

### Литература

1. E.M. Purcell, *Phys. Rev.*, 69, 681 (1946).
2. E.P. Kozhina, S.A. Bedin, N.L. Nechaeva, S.N. Podoyntsyn, V.P. Tarakanov, S.N. Andreev, Y.V. Grigoriev, and A.V. Naumov, *Appl. Sci.*, 11, 4 (2021).

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ КРАЕВОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА

Е. А. Колесник<sup>1,2</sup>, В. С. Рипенко<sup>1,2</sup>, Д. В. Григорьев<sup>2</sup>,  
С. М. Дзядух<sup>2</sup>, Е.И. Липатов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Томск, Россия, [kolesnikkaterina2607@gmail.com](mailto:kolesnikkaterina2607@gmail.com)*

С помощью спектроскопии оптического поглощения в спектральной области от 200 до 300 нм исследовано краевое поглощение 7 образцов синтетического алмаза IIa типа в температурном диапазоне от 12 до 470 К. С помощью численных методов получены температурные зависимости оптического поглощения в расщеплённое состояние свободных экситонов для отрицательной и положительной фононных ветвей [1; 2]. В докладе обсуждаются аномальные температурные зависимости вероятности оптических переходов. Показано, что температурная зависимость оптической ширины запрещенной зоны, известная по литературным источникам [3; 4], вызвана не изменением ширины запрещенной зоны, но поглощением в экситонное состояние.

### *Литература*

1. E.I. Lipatov, K.R. Burumbayeva, D.E. Genin, V.S. Ripenko, M.A. Shulepov, V.F. Tarasenko, *Proc. SPIE*, 10614, 106141H (2018).
2. V.F. Tarasenko, E.I. Lipatov, D.V. Grigor'ev, D.E. Genin, *J. Phys. Conf. Ser.*, 1115, 052026 (2018).
3. P.J. Dean, I.H. Jones, *Phys. Rev.*, 133, № 6A, A1698-A1705, (1964).
4. C.D. Clark, P.J. Dean, P.V. Harris, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 277, 312-329, (1964).

## ПОЛУПОЛЯРНЫЕ III-N СЛОИ НА НАНО-СТРУКТУРИРОВАННОЙ КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ: ТЕХНОЛОГИЯ, ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

Е. В. Коненкова, С. Д. Коненков  
В. Н. Бессолов, В. Н. Пантелеев

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН  
Санкт-Петербург, Россия, [stevan1999@yandex.ru](mailto:stevan1999@yandex.ru)*

**Мотивация:** Полуполярные слои GaN привлекают внимание исследователей из-за возможностей получить светодиоды с зеленым светом излучения и применить их для оптической коммуникации.

**Цель работы:** Разработка метода эпитаксиального роста слоев AlN и GaN(10-11) на подложке Si(100), на поверхности которой сформирована V-образная нано-структура с размером элементов < 100 нм (подложка NP-Si(100)) и изучение люминесцентных свойств полуполярных слоев.

**Результаты:** в процессе роста слоя GaN осуществляется переход из симметричного состояния с двумя полуполярными плоскостями AlN в асимметричное состояние с единой ориентацией оси *c* слоя полуполярного GaN(10-11), причем направление оси *c* в растущем полуполярном слое совпадает с направлением потока ионов  $N_2^+$  на поверхность кремния при образовании наномаски.

Спектры фотолюминесценции GaN(10-11) и GaN(0001), синтезированных на NP-Si(100), Si(111) и Si(100), показали, что энергии максимумов спектров структур GaN(0001)/Si(111) составляют  $h\nu = 3,46$  эВ; GaN(0001)/Si(100) –  $h\nu_1 = 3,45$  эВ и  $h\nu_2 = 3,42$  эВ, а GaN(10-11)/NP-Si(100) –  $h\nu_1 = 3,40$  эВ,  $h\nu_2 = 3,32$  эВ,  $h\nu_3 = 3,29$  эВ.

Сравнивая наши спектры фотолюминесценции с литературными можно заключить, что пик  $h\nu = 3,39$ – $3,40$  эВ в слоях GaN(10-11) и пик  $h\nu = 3,41$  эВ в GaN обусловлен  $BSF_S I_1$  дефектами. Пик  $h\nu = 3,30$ – $3,32$  эВ возможно связан с донорно-акцепторной рекомбинацией, связанной с атомами кремния в GaN. Пик  $h\nu = 3,46$  эВ обычно интерпретируется, как люминесценция экситона, связанного на доноре.

**Выводы.** Таким образом, максимум излучения в полуполярных слоях обусловлен дефектами упаковки –  $BSF_S I_1$ , а в полярных, в основном, рекомбинацией экситона. Предложенный подход по разработке технологии полуполярных III-N слоев на поверхности NP-Si(100) перспективен для создания полуполярных «квазиподложек» на кремнии.

*Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00096.*

## ДЕФОРМАЦИЯ ПОЛУПОЛЯРНОГО И ПОЛЯРНОГО НИТРИДА ГАЛЛИЯ, СИНТЕЗИРОВАННОГО НА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОДЛОЖКЕ КРЕМНИЯ

В. Н. Бессолов, М. Е. Компан, Е. В. Коненкова, С. Д. Коненков

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН  
Санкт-Петербург, Россия, [lenua@trial.ioffe.ru](mailto:lenua@trial.ioffe.ru)*

Повышение эффективности люминесценции квантово-размерных структур путем выращивания III-нитридных излучателей вдоль полуполярных ориентаций является перспективным направлением технологии светодиодов.

Данная работа посвящена изучению деформации структур при эпитаксии GaN(11-22) на подложке Si(113), на поверхности которой сформирована наноструктура с размером элементов < 100 нм.

В ходе технологического эксперимента в одинаковых температурно-временных режимах выращивались слои GaN(10-11) на NP-Si(100) и GaN(001) на подложке Si(111). Рентгенодифракционный анализ слоев показал, что слои имеют полуширину кривой рентгеновской дифракции  $\omega_b \sim 30$  аркмин для GaN(11-22) и  $\omega_b \sim 22$  аркмин для GaN(0002).

Исследование полученных гетероструктур GaN(11-22)/NP-Si(113) и GaN(0001)/Si(111) с помощью КРС позволило выявить различие в деформации структур при эпитаксии на плоской подложке Si(111) и на грани Si(111) темплейта NP-Si(113). Спектры КРС, измеренные в области фононной моды  $E_2(\text{high})$ , для слоев GaN, выращенных на NP-Si(113) и Si(111), в целом соответствовали тому, что можно было ожидать и содержали линии, принадлежащие кремниевой подложке, а также линии  $E_2(\text{high})$ , обусловленные нитридом галлия. Положение линии  $E_2(\text{high})$  зависело от структуры и составляло  $563,3 \text{ см}^{-1}$  для GaN(0001)/Si(111) и  $565,2 \text{ см}^{-1}$  для GaN(11-22)/NP-Si(113). Для слоев GaN(0001) и GaN(11-22) оценивалась величина продольных упругих напряжений –  $\sigma$ . Оказалось, что величины  $\sigma$  существенно различаются  $\sigma_{(0001)} - 1,12 \text{ ГПа}$  и  $\sigma_{(11-22)} - 0,67 \text{ ГПа}$  соответственно для GaN(0001)/Si(111) и GaN(11-22)/NP-Si(113) структур.

Упругие напряжения, которые могут возникать при охлаждении GaN(0001)/Si(111) составляют величину  $\sigma_{\text{эф}(0001)} = 0,79 \text{ ГПа}$  для GaN(0001)/Si(111),  $\sigma_{\text{эф}(11-22)} = 0,34 \text{ ГПа}$  для GaN(11-22)/NP-Si(113).

Итак, применение структурированной подложки NP-Si(113) для синтеза GaN(11-22) предпочтительнее, чем подложки Si(111) для синтеза полярного GaN(0001) из-за меньшей деформации в процессе охлаждения структуры от температуры роста до комнатной.

*Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00096.*

## СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ САМОУПОРЯДОЧЕННЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdZnSeS/ZnS С РЕЗОНАНСНО-ВОЗБУЖДЕННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ ОСТРОВКОВОЙ СЕРЕБРЯНОЙ ПЛЕНКИ

Е. И. Константинова, В. А. Слежкин, В. В. Брюханов

*Калининградский государственный технический университет  
Калининград, Россия? [konstantinovaeliz@gmail.com](mailto:konstantinovaeliz@gmail.com); [vslezhkin@mail.ru](mailto:vslezhkin@mail.ru)  
Балтийский федеральный университет имени И. Канта  
Калининград, Россия, [brvukhanov.v.v@mail.ru](mailto:brvukhanov.v.v@mail.ru)*

В работе спектрально-кинетическими методами исследовалось взаимодействие резонансно-возбужденных наночастиц (НЧ) серебряной островковой пленки с квантовыми точками CdZnSeS/ZnS (КТ), высаженными на поверхность методом физической адсорбции.

Изучение взаимодействия экситонов КТ с поверхностными плазмонами наноструктурированных пленок перспективно для нелинейной оптики, оптоэлектроники и медицины. Островковые серебряные пленки были получены методом электрохимического осаждения с последующим растворением поверхностного слоя ( $\delta$ ) различной толщины ( $\delta = 0,125\text{--}0,5$  мкм).

Эксперимент также проводился с образцами пленок, поверхность которых модифицировалась наночастицами серебра радиуса 30 нм. Образцы измерялись на оптической системе Fluorolog (Horiba, Франция) при возбуждении  $\lambda = 350$  нм и  $\lambda = 405$  нм (частотой повторения импульса 1 МГц) с использованием отсекающего фильтра длиной волны  $\lambda = 420$  нм.

Было обнаружено, что при резонансном возбуждении НЧ лазерным наносекундным импульсом длиной волны 405 нм кинетика затухания люминесценции КТ с хорошей точностью ( $\chi^2 = 1,05$ ) описывается двухкомпонентной моделью Ферстера. Анализ кинетических кривых показал, что увеличение размеров НЧ ведет к образованию донорно-акцепторного комплекса, который приводит к ускорению безызлучательного переноса по сравнению с результатом, предсказанным моделью случайного распределения доноров и акцепторов.

## АНИЗОТРОПИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК ГЕКСАГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА

Л. В. Котова, Л. А. Алтынбаев, М. О. Жукова, В. Т. Ноган  
А. Балдычева, В. П. Кочерешко

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН  
Санкт-Петербург, Россия, [kotova@mail.ioffe.ru](mailto:kotova@mail.ioffe.ru)*

Путем расщепления объемных образцов в ультразвуковой ванне были изготовлены тонкие пленки гексагонального нитрида бора толщиной несколько моноатомных слоев. Исследовались спектры пропускания, отражения и фотолюминесценции таких пленок в области ниже края фундаментального поглощения. Измерены спектральные зависимости линейной и круговой поляризации прошедшего через образец света. Исследование с помощью сканирующей электронной микроскопии показало отсутствие заметных выделенных направлений в образце. Однако при исследовании параметров Стокса прошедшего через образец света обнаружилось явление двулучепреломления. Установлено, что оптические оси имеют одно и то же направление по всей площади образца. При этом рассеянный образцом свет был не поляризован. Это указывает на то, что причина анизотропии не заключается в свойствах отдельных микрокристаллов, а является общей для всего образца и связана с анизотропией фактора заполнения.

При расщеплении объемных кристаллов BN в ультразвуковой ванне полученные микрокристаллики электризуются в результате разрыва химических связей и затем, при осаждении, они слипаются упорядоченным образом в соответствии с направлением дипольного момента. В результате таких анизотропных корреляций в распределении микрокристаллов их плотность в разных направлениях может оказаться разной. На глаз это может быть и не заметно, но в поляризации может проявиться. Действительно, при электризации диэлектрических кристаллов электростатические поля могут оказаться достаточными для их упорядочения.

Из полученных данных однозначно следует вывод, что во всем измеренном спектральном интервале наблюдается явление двулучепреломления света. Это явление проявляется в конверсии линейной поляризации в эллиптическую. На длине волны 550 нм степень круговой поляризации меняла знак. Это изотропная точка в спектре, в которой меняется знак двулучепреломления. В то же время этот эффект достигает максимума на длине волны  $\lambda \sim 650$  нм. Спектральные зависимости степени линейной поляризации подтверждают вывод о наличии двулучепреломления и позволяют определить направление оптических осей. Были проведены измерения явления двулучепреломления в зависимости от точки на образце. Оказалось, что по всей площади образца ( $\sim 1 \text{ см}^2$ ) направление оптической оси не меняется.

Очевидно, что двулучепреломление вызвано наличием выделенной оптической оси в исследуемом образце. Появление оптической оси в порошке может быть обусловлено как анизотропией самих частиц порошка, так и анизотропией их расположения. Таким образом, можно заключить, что исследование с помощью сканирующей электронной микроскопии показало однородность полученных образцов. Однако исследование параметров Стокса прошедшего через образец света позволило установить наличие скрытой анизотропии оптических свойств этих пленок.

## ВЫХОД ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ИЗ МНОГОСЛОЙНОГО АСИММЕТРИЧНОГО РЕЗОНАТОРА

П. С. Панкин<sup>1,2</sup>, А. В. Шабанов<sup>1</sup>, Д. С. Бузин<sup>1,2</sup>, А. И. Краснов<sup>1,2</sup>,  
С. В. Наболь<sup>1,2</sup>, В. С. Суторин<sup>1,2</sup>, В. А. Гуняков<sup>1</sup>, В. П. Вяткин<sup>1</sup>,  
Ф. В. Зеленев<sup>3</sup>, А. Н. Масюгин<sup>3</sup>, И. В. Немцев<sup>4,1</sup>, М. Н. Волочаев<sup>1</sup>,  
С. Я. Ветров<sup>2,1</sup>, И. В. Тимофеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН  
Красноярск, Россия, [dir@iph.krasn.ru](mailto:dir@iph.krasn.ru)

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет,  
Красноярск, Россия, [office@sfu-kras.ru](mailto:office@sfu-kras.ru)

<sup>3</sup>АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»,  
Красноярск, Россия, [albert.masvugin@mail.ru](mailto:albert.masvugin@mail.ru)

<sup>4</sup>Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, Россия, [fic@ksc.krasn.ru](mailto:fic@ksc.krasn.ru)

Анализ микрофотографий хлоропластов и иридопластов [1] растений показывает наличие в них структур, которые можно рассматривать как фотонный кристалл с дефектом [2], причем пространственное положение дефектного слоя в структуре может быть несимметричным. Расчеты показывают (рис.), что максимум величины поглощения света, плотности электромагнитного поля и выхода люминесценции на длине волны дефектной моды соответствует асимметричному случаю со сдвинутым на один период в сторону падающего луча относительно центра дефектного слоя.

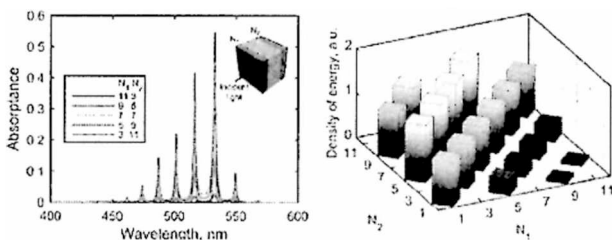


Рис. Спектр поглощения оптической ячейки с раствором родамина 6G в метаноле, при различном положении дефектного слоя в структуре (слева). Плотность энергии электромагнитного поля на длине волны дефектной моды  $\lambda = 533$  нм (справа)

### Литература

1. M. Jacobs, M. Lopez-Garcia, O.-P. Phrathep, T. Lawson, R. Oulton, H.M. Whitney, *Nat. Plants*, 2, 16162, (2016).
2. А.В. Шабанов, М.А. Коршунов, Е.Р. Буханов, *Комп. оптика*, 43(2), 231-237, (2019).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОДИНОЧНЫХ ЦЕНТРОВ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ В КУБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

Н. Д. Кривошеев, С. А. Зилов

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
Иркутск, Россия*

Ранее в работах [1; 2] сообщалось, что с помощью метода конфокальной люминесцентной микроскопии, экспериментально наблюдалась люминесценция одиночных  $F_2$  и  $F_3^+$  центров окраски. Было обнаружено, что интенсивность люминесценции центра может изменяться. Авторы [1; 2], показали, что это явление можно объяснить переориентациями центров окраски. Так же ими теоретически, были определены характерные для каждого центра отношения интенсивностей и времена жизни для различных конфигураций эксперимента.

Оба эксперимента проводились на лазерном люминесцентном микроскопе PicoQuant MicroTime 200. Для возбуждения люминесценции использовался полупроводниковый лазер с длиной волны 405 нм, работающий в импульсном режиме с частотой повторения импульсов 5 и 10 МГц. Лазерный луч был линейно поляризован и ориентирован по нормали к поверхности кристалла пл.(100); при повороте кристалла вокруг оси перпендикулярной плоскости кристалла пл.(110) отношения интенсивностей меняются. Так для  $F_2$  центра (отношение интенсивностей для ориентации «0°»:  $I_{1,2}:I_{3,6}:I_{4,5} = 1:2:0$ ; отношение интенсивностей для ориентации «45°»:  $I_6:I_{1,2,4,5}:I_3 = 8:1:0$ ) для  $F_3^+$  центра (отношение интенсивностей для ориентации «0°»:  $I_{1,2,3,4} = 1$ , отношение интенсивностей для ориентации «45°»:  $I_{1,2}:I_{3,4} = 1:3$ , где  $I_k$  – интенсивность люминесценции центра окраски в ориентации  $k$ ).

На рис. 1 приведены характерные зависимости для ориентации «0» пл.(100) и «45» пл.(110) образца.

Данная работа позволяет убедиться в правильности ранее сделанных выводов при помощи моделирования и сравнения с экспериментально полученными квантовыми траекториями  $F_3^+$  центра окраски. Моделирование центра окраски проводится на языке Python с учётом переориентации центра. В настоящее время нет исчерпывающей модели, описывающей  $F_2$  центр, поэтому пока что нет возможности моделировать этот центр (без грубого приближения), а также  $F_2$  достаточно легко может наблюдаться экспериментально в отличии от  $F_3^+$ , поэтому для некоторых задач легче провести эксперимент. На рис. 2 изображён результат моделирования квантовой траектории  $F_3^+$  центра окраски.

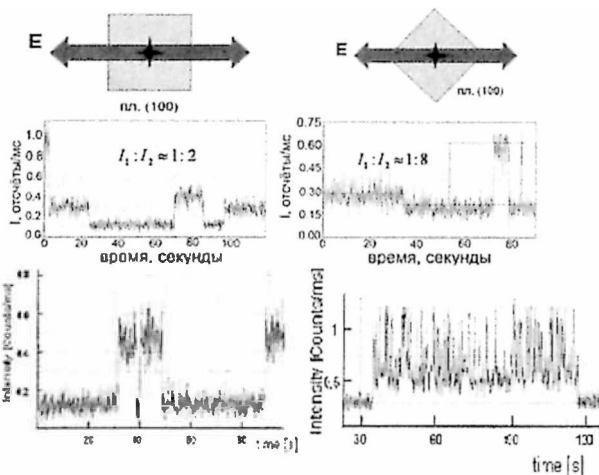


Рис. 1. Первая пара рисунков изображает ориентацию образца относительно вектора  $E$  поляризованного лазерного излучения. Вторая пара рисунков – квантовая траектория  $F_2$  центра окраски. Третья пара рисунков – квантовая траектория  $F_3^+$  центра окраски

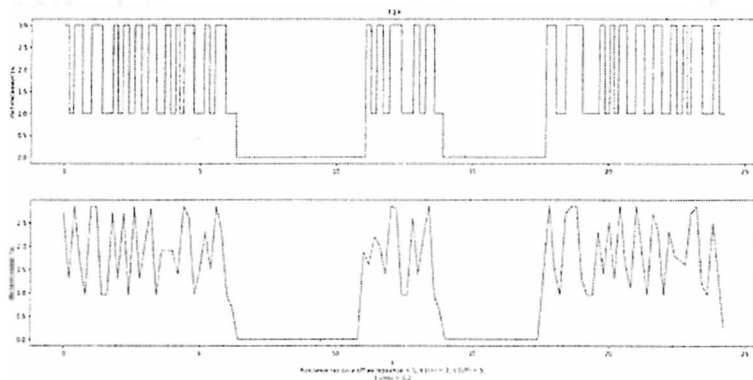


Рис. 2. Смоделированная квантовая траектория  $F_3^+$  центра окраски.  
Время накопления  $t = 0,2$  с

Расчитанные квантовые рис. 2 траектории показывают хорошее согласие с экспериментом. Уравнения, положенные в основу данной работы, исчерпывающе описывают динамику  $F_3^+$  центра.

### Литература

1. И.С. Осадько, УФН, 176 (1), 23–57 (2006); I.S. Osad'ko, *Phys. Usp.*, 49 (1), 19–51 (2006).
2. С.А. Зильов, А.П. Войтович, С.В. Бойченко, А.В. Кузнецов, В.П. Дресвянский, А.Л. Ракевич, А.В. Бартуль, К. Кениг, Е.Ф. Мартынович, *Изв. РАН Сер. физ.*, 80, № 1, 89–92 (2016); *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 80, № 1, 81–84 (2016).

## ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛНОВОДА В LiF ПРИ ФИЛАМЕНТАЦИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

А. В. Кузнецов<sup>1</sup>, А. Е. Дормидонов<sup>2</sup>, В. О. Компанец<sup>2</sup>,  
С. В. Чекалин<sup>2</sup>, В. П. Кандидов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
Иркутск, Россия, [a.v.kuznetsov@bk.ru](mailto:a.v.kuznetsov@bk.ru)

<sup>2</sup>Институт спектроскопии РАН, Москва, Троицк, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
Москва, Россия

Исследовано формирование микромодификаций в LiF при многоимпульсной филаментации фемтосекундных импульсов среднего ИК-диапазона в условиях аномальной дисперсии групповой скорости, вызывающих образование световых пуль [1]. В LiF филаментация сопровождается образованием стабильных люминесцентных центров окраски (ЦО), таких как  $F_2$  и  $F_3^+$  ЦО [2].

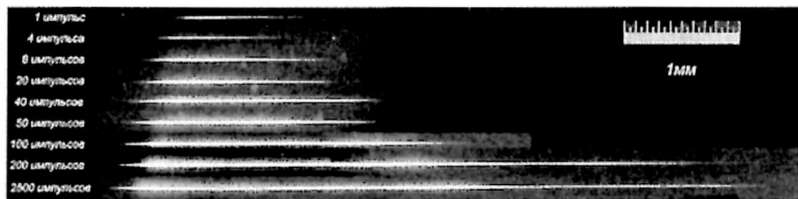


Рис. Фотографии люминесцирующих волноводов, наведенных в LiF разным числом фемтосекундных импульсов с длиной волны 3,2 мкм. Люминесценция принадлежит  $F_2$  и  $F_3^+$  ЦО, возбуждаемым непрерывным лазером с длиной волны излучения 450 нм

Установлено, что длина наводимого волновода возрастает с увеличением числа импульсов как в направлении распространении излучения, так и во встречном направлении. Предложена модель формирования волновода, которая описывает аккумулялирование плотности ЦО в LiF и связанную с этим модификацию показателя преломления при многоимпульсной фемтосекундной филаментации.

Работа поддержана грантом РНФ (проект № 18-12-00422), а также проектом 0243-2021-0004 в рамках плана фундаментальных исследований РАН на период до 2025 г.

### Литература

1. С.В. Чекалин, В.О. Компанец, А.Е. Дормидонов, В.П. Кандидов, УФН, 189, 299-305 (2019).
2. А.В. Кузнецов, В.О. Компанец, А.Е. Дормидонов, С.В. Чекалин, С.А. Шленов, В.П. Кандидов, Квант. электрон., 46, 379-386 (2016).

## СПУТНИКОВЫЕ КВАНТОВЫЕ СЕТИ

В. Л. Курочкин<sup>1,2</sup>, А. В. Хмелев<sup>3,4</sup>, А. В. Дуплинский<sup>3,5</sup>,  
В. Ф. Майборода<sup>3</sup>, Ю. В. Курочкин<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>*Центр компетенций ИТН «Квантовые коммуникации»,  
Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС», Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Российский квантовый центр, Москва, Россия, [v.kurochkin@rqc.ru](mailto:v.kurochkin@rqc.ru)*

<sup>3</sup>*ООО «КуРэйт», Одинцово, Россия*

<sup>4</sup>*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия*

<sup>5</sup>*Московский государственный технический университет  
им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия*

Оптические потери в вакууме для организации лазерной связи на дальние расстояния между произвольными точками на земной поверхности меньше, чем при применении оптоволоконных линий. Поэтому такие линии являются наиболее многообещающими для создания крупномасштабных сетей передачи данных. Дальность связи ограничена кривизной поверхности Земли. Поэтому однофотонные системы распределения квантового ключа рассматриваются как перспективные для создания глобальных квантовых спутниковых сетей. Первый спутник с системой распределения квантового ключа [1; 2] успешно продемонстрировал эти преимущества. В докладе представлены материалы по развитию инфраструктуры приемных квантовых станций по территории России для организации спутниковых квантовых сетей [3] на базе двух астрономических обсерваторий и даны первые экспериментальные результаты.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-71-20146).*

### *Литература*

1. S.-K. Liao, W.-Q. Cai, W.-Y. Liu et al., *Nature*, 549, 43-47, (2017).
2. S.-K. Liao, W.-Q. Cai, J. Handstainer et al., *Phys. Rev. Lett.*, 120, 030501 (2018).
3. V.L. Kurochkin, A.V. Khmelev, I.V. Petrov et al., *J. Phys. Conf. Ser.*, 1680, 012031 (2020).

## НОВЫЙ ПЛАЗМОН-АКТИВНЫЙ КАТАЛИЗАТОР RGO-FeN<sub>4</sub>-AgNPs ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КИСЛОРОДА

А. Кушнаренко, В. Шворчик, О. Лютаков

*University of Chemistry and Technology, Prague, Czech Republic*

*[kushnarn@vscht.cz](mailto:kushnarn@vscht.cz)*

Плазмон – это квазичастица, которая возникает в наноструктурах благородных металлов за счёт колебаний электронов проводимости. Возбуждение плазмона обеспечивает субдифракционную фокусировку света и соответствующую концентрацию фотонной энергии в наноразмерной области. Плазмон нашел свое применение в сенсорике, а в последнее время и в химической технологии. В частности, с помощью плазмонной стимуляции на данный момент решается целый ряд актуальных химических трансформаций.

Одной из наиболее перспективных областей является комбинирование плазмоники и 2Д катализаторов. В этом случае плазмон обеспечивает эффективное поглощение света с последующей стимуляцией каталитических центров 2Д материала через инъецицию носителей заряда или возбужденных состояний. Новые железо-азотные (FeN<sub>4</sub>) катализаторы в последние годы стали наиболее многообещающей альтернативой дорогостоящим аналогам на основе Pt в топливных элементах.

В этой работе было предложено получение и применение высокоэффективного 2Д катализатора на основе восстановленного оксида графена (RGO) с FeN<sub>4</sub> в качестве активных каталитических центров и последующей гибридизацией материала с плазмон-активными наночастицами серебра (AgNPs). Целевой областью применения материала является фотоэлектрохимическая реакция восстановления кислорода, которая может использоваться для улучшения эффективности топливных элементов на основе Fe-катализаторов, работающих при комнатных температурах.

## КИНЕТИКА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЦЕНТРА ОКРАСКИ С БЕСФОНОННЫМИ ЛИНИЯМИ 368 И 756 НМ В КРИСТАЛЛЕ НЕЙТРОННО-ОБЛУЧЁННОГО ЛЕЙКОСАПФИРА

Н. Л. Лазарева, Е. Ф. Мартынович

*Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*

*[albert94@mail.ru](mailto:albert94@mail.ru)*

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,*

*Иркутск, Россия*

В данной работе исследовались вероятности излучательных и безызлучательных переходов в названном центре окраски. Предварительно изучалась правомерность отнесения к одному и тому же центру полос оптического поглощения 357 нм (3,47 эВ) и 680 нм (1,82 эВ), а также полос люминесценции 380 нм (3,26 эВ) и 830 нм (1,49 эВ) и связанных с ними бесфононных линий с длинами волн 368 нм (3,37 эВ) и 755 нм (1,64 эВ). На основе имеющихся экспериментальных данных о спектральных и кинетических характеристиках построена модель центра (рис.), выполнено теоретическое исследование и определение вероятностей переходов и других характеристик для данного центра.

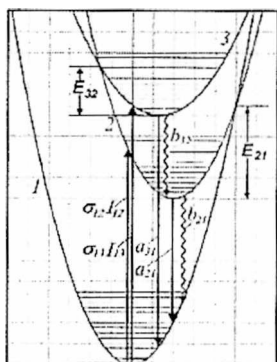


Рис. Модель центра в конфигурационных координатах

При моделировании использованы возбуждающие импульсы с крутым фронтом и экспоненциальным затуханием. Расчёты произведены в рамках приближения слабого поля.

На основе сопоставления характеристик экспериментальных и теоретических кинетических зависимостей определены вероятности всех рассматриваемых переходов. Подтверждена трехуровневая модель центра окраски в кристаллах лейкосапфира, обладающего бесфононными линиями 368 и 756 нм, предложенная ранее независимо Е.Ф. Мартыновичем с сотрудниками и М.Е. Спрингисом.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90275.*

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК СУЛЬФИДА СВИНЦА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПИРОЛИЗА АЭРОЗОЛЯ ИЗ РАСТВОРОВ ТИОКАРБАМИДА И ХЛОРИДОВ СВИНЦА

А. А. Левина, А. Н. Лукин, В. Н. Семенов

Воронежский государственный университет  
Воронеж, Россия, [levina.ange1999@yandex.ru](mailto:levina.ange1999@yandex.ru)

В данной работе авторы исследовали оптические свойства и кристаллическую структуру пленок PbS, полученных методом распыления-водных растворов прекурсоров  $[Pb(N_2H_4CS)_2Cl_2]$  на нагретую до  $450^\circ C$  кварцевую подложку при варьировании соотношений лигандов  $C(PbCl_2):C(N_2H_4CS)$  от 1:8 до 1:15. Спектры оптического поглощения представлены на рис. 1. Они имеют сложную структуру, характерную для двухфазных систем. Графический анализ спектра (рис., а) позволил определить ширину запрещенной зоны отдельных фаз, входящих в состав образца. Ширина запрещенной зоны широкозонной фазы (0,80–0,82 эВ) (рис., б), а узкозонная фаза имеет величину  $E_g = 0,5$  эВ (рис., в). Известно, что PbS кристаллизуется в кубическую структуру (пр. гр.  $Fm\bar{3}m$ ) и имеет ширину запрещенной зоны 0,41 эВ. Однако в работе [1] получены пленки PbS с кристаллической решеткой типа  $D0_3$  и шириной запрещенной зоны 0,83–0,85 эВ. Таким образом, полученные нами образцы состоят из двух фаз  $D0_3$  (широкозонная) и  $B1$  (узкозонная), которая может быть твердым раствором между фазами со структурой  $B1$  и  $D0_3$ . Рентгеноструктурные исследования также подтверждают фазовый состав полученных образцов.

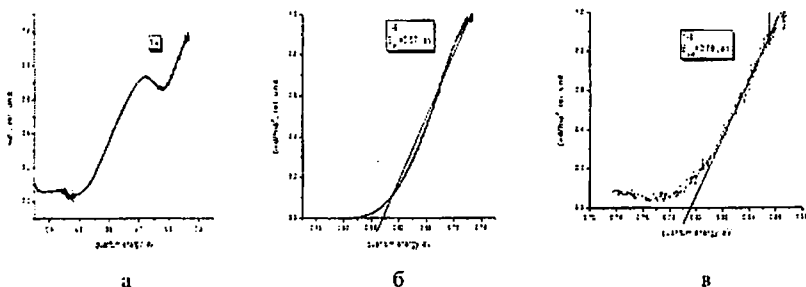


Рис. Спектр поглощения PbS и степенная зависимость первого и второго участка края собственного поглощения образца  $E_{g1} = 0,59$  эВ и  $E_{g2} = 0,79$  эВ при соотношении компонентов  $C(PbCl_2):C(N_2H_4CS)$  1:8

### Литература

1. С.И. Садовников, Н.С. Кожевникова, А.И. Гусев, *ФТП*, 45 (12), 1621-1632, (2011).

## АЛМАЗ В КВАНТОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Е. И. Липатов<sup>1,2</sup>, А. Г. Бураченко<sup>1,2</sup>, Д. Е. Генин<sup>1,2</sup>, Е. А. Колесник<sup>1,2</sup>,  
В. С. Рипенко<sup>1,2</sup>, А. Д. Саввин<sup>1</sup>, М. А. Шулепов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН  
Томск, Россия, [lipatov@loi.hcei.tsc.ru](mailto:lipatov@loi.hcei.tsc.ru)

Оптически активные центры в алмазе, содержащие вакансию и примесные атомы (N, N<sub>2</sub>, Si, Ge и др.), характеризуются высокой фотостабильностью, спектрами поглощения и люминесценции в видимом диапазоне, характеристическими временами люминесценции в масштабе десятков наносекунд [1–3]. Большинство из упомянутых центров сравнительно несложно создать в алмазном образце в процессе синтеза алмаза и его послеростовой радиационно-термической обработки.

Указанные фотоактивные центры характеризуются различным электрон-фононным взаимодействием, поэтому для квантовых информационных технологий возникает широкий выбор возможностей. NV-центры характеризуются интенсивным фононным крылом, тремя зарядовыми состояниями и спиновым расщеплением энергетических уровней в случае захвата дополнительного электрона. N<sub>2</sub>V-центры характеризуются высокой эффективностью возбуждения электронами из зоны проводимости, свечением в зеленой области видимого спектра и высоким коэффициентом усиления вынужденного излучения. Центры, содержащие вакансию и элемент четвертой группы (Si, Ge, Sn), характеризуются высокой интенсивностью бесфононной линии и слабым фононным крылом.

В докладе приводятся результаты исследований оптического поглощения, люминесценции, возбуждения спиновых состояний и обсуждаются существующие и возможные применения примесно-дефектных центров в алмазе, фотоактивных в зеленой и красной областях видимого диапазона, для задач интегральной оптики, квантовых коммуникаций и квантовых вычислений.

*Исследование было выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0048.*

### Литература

1. I.A. Dobrinets, V.G. Vins, A.M. Zaitsev, HPHT-Treated Diamonds, *Springer Series in Materials Science*, 181, 1-270, (2013).
2. M.A. Lobachev, D.B. Radishev, S.A. Bogdanov, A.L. Vikharev, A.M. Gorbachev, V.A. Isaev, S.A. Kravtsov, A.I. Okhapkin, E.A. Arhipova, M.N. Drozdov, V.I. Shashkin, *Phys. Status Solidi*, 14, № 11, 2000347, p. 1-5, (2020).
3. S. Pezzagna, J. Meijer, *Appl. Phys. Rev.*, 8, 011308, (2021).

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ОКСИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ В КАЧЕСТВЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ В ТГц ДИАПАЗОН

Д. М. Лубенко<sup>1</sup>, В. Ф. Лосев<sup>1</sup>, Ю. М. Андреев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН  
Томск, Россия, [lubenkodm@gmail.com](mailto:lubenkodm@gmail.com)*

<sup>2</sup>*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
Томск, Россия, [yuandreev@yandex.ru](mailto:yuandreev@yandex.ru)*

Портативные перестраиваемые по частоте узкополосные источники излучения ТГц диапазона, работающие в длинноволновых окнах прозрачности атмосферы, являются привлекательными для создания сверхчувствительных лидарных систем для мониторинга газовых компонентов и температуры атмосферы в силу слабого влияния аэрозолей и осадков. Для получения такого излучения обычно используются генераторы разностных частот лазеров ближнего ИК диапазона на основе нелинейных полупроводниковых и органических кристаллов, таких как ZGP (0,2–5 ТГц) [1], GaSe (0,4–3,7 ТГц) [2], DSTMS (0,15–5,5 ТГц) [3], ОН1 [4] и др. Эти кристаллы характеризуются невысокой лучевой стойкостью и низкими эксплуатационными характеристиками. В данной работе в качестве ТГц генераторов мы рассматриваем использование оксидных нелинейных кристаллов LB4, LBO и  $\beta$ -BBO, основные окна прозрачности которых совпадают с рабочими диапазонами мощных твердотельных лазеров и их гармоник. Установлено, что перечисленные кристаллы, имеющие чрезвычайно низкие коэффициенты нелинейной восприимчивости, характеризуются не только предельно низкими коэффициентами поглощения  $\leq 10^{-4}$  см<sup>-1</sup>, но и крайне высокой лучевой стойкостью. Она по крайней мере на два порядка превышает известные данные, что позволяет компенсировать невысокую эффективность преобразования частоты. Также отмечается резкое уменьшение анизотропии поглощения в субтерагерцовой области, а затем спад ее до нуля. Эти обстоятельства позволяют создать трассовые измерители фонового содержания малых газовых компонент атмосферы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научно-го фонда в рамках гранта № 19-19-00241.*

### Литература

1. K.S. Rao, D. Ganesh, A.K. Chaudhary, *Opt. Laser Technol.*, 103, 126–134 (2018).
2. J. Mei, K. Zhong, M. Wang, Y. Liu, D. Xu, W. Shi, Y. Wang, J. Yao, R.A. Norwood, N. Peyghambarian, *Opt. Express*, 24, 23368–23375 (2016).
3. C. Ruchert, C. Vicario, C.P. Hauri, *Phys. Rev. Lett.*, 110, 123902 (2013).
4. C. Ruchert, C. Vicario, C.P. Hauri, *Opt. Lett.*, 37, 899–901 (2012).

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЕНСОРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

А. О. Макаров, Д. В. Бражников, А.Н. Гончаров

Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия  
[werklore@mail.ru](mailto:werklore@mail.ru)

В данной работе была собрана экспериментальная установка на основе оптического магнитометра, работающего на атомах  $^{87}\text{Rb}$  на основе эффекта электромагнитно индуцированной абсорбции (ЭИА) [1; 2]. Были получены резонансы насыщенного поглощения с шириной около 2 МГц и контрастом около 40 %.

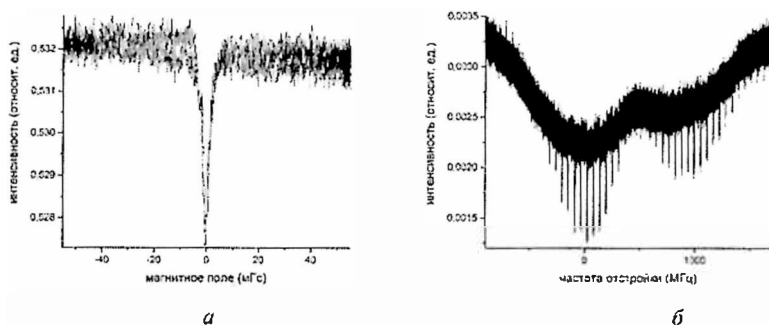


Рис. Пример резонанса ЭИА (а), пример наблюдаемых резонансов ЭИА на линиях поглощения атомов рубидия (б)

Данный магнитометр считается перспективным с возможностью применения в следующих областях: биомагнетизм, геофизические исследования, медицинские приложения, разработка точных атомных часов, исследование магнитного поля в космосе, использование массивов магнитометров для визуализации магнитных полей и мн. др.

### Литература

1. Brazhnikov D. V. et al. *Laser Phys. Lett.*, 2014, vol. 11, no. 12, 125702.
2. Brazhnikov D. V. et al. *Laser Phys. Lett.*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 1–7.

## КИНЕТИКА ИМПУЛЬСНОЙ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ИОНОВ ЦЕРИЯ В ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОМ ГРАНАТЕ

В. И. Соломонов<sup>1,2</sup>, А. В. Спирина<sup>1</sup>, А. С. Макарова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт электрофизики УрО РАН

Екатеринбург, Россия, [anniebubnova@mail.ru](mailto:anniebubnova@mail.ru)

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Исследовалась кинетика импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) керамических образцов иттрий-алюминиевого граната, допированного ионами  $\text{Ce}^{3+}$  ( $\text{Ce:YAG}$ ). Образцы  $\text{Ce:YAG}$  с содержанием оксида церия 0,1; 0,5; 1; 2; 3; 4 и 5 мол. % были изготовлены в Институте электрофизики УрО РАН. В видимой области спектра наблюдается полоса излучения  $\text{Ce}^{3+}$  с максимумом при 560 нм, характерный вид которой приведен на рис. 1. Во всех образцах люминесценция на этой полосе возникает после прекращения воздействия электронного пучка длительностью 2 нс, а ее кинетика характеризуется разгоранием и затуханием (рис. 2) с максимумом при  $t = 85\text{--}143$  мкс.

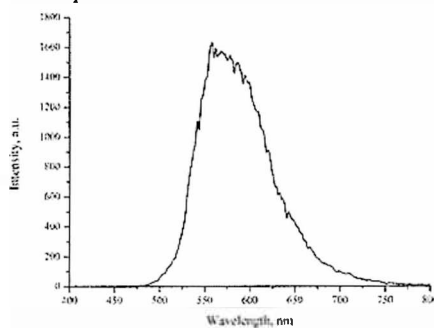


Рис. 1. Характерный спектр ИКЛ ионов  $\text{Ce}^{3+}$  в кристаллической решетке YAG.

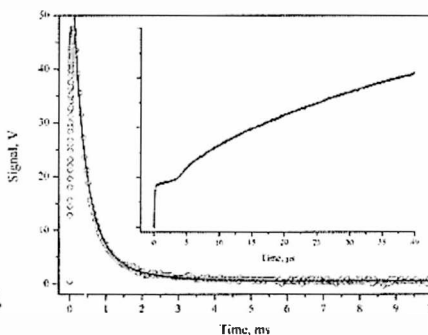


Рис. 2. Характерная кинетическая кривая полосы ИКЛ  $\text{Ce}^{3+}$  при 560 нм. На вставке приведен участок разгорания.

Линией регрессии, описывающей процесс затухания люминесценции коэффициентом корреляции 0,99, является сумма двух экспоненциальных функций с различающимися на порядок характерными временами  $\tau_{d1} = 320\text{--}600$  мкс и  $\tau_{d2} = 1,75\text{--}2,78$  мс, зависящими от содержания церия. Кривые разгорания (рис. 2, вставка) характеризуются особенностью: в них отчетливо выделяются два участка, разделенных точкой перегиба при  $t_1 \approx 3,5$  мкс.

Обсуждаются механизмы разгорания и затухания полосы ИКЛ иона  $\text{Ce}^{3+}$  в YAG в зависимости от содержания церия.

## ФОРМИРОВАНИЕ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ, ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ В ДИАПАЗОНЕ 460–500 нм, В КРИСТАЛЛАХ LiF

Н. Т. Максимова, В. М. Костюков, В. В. Толстиков

*Иркутский государственный университет  
Иркутск, Россия, [Natmax\\_2001@mail.ru](mailto:Natmax_2001@mail.ru)*

Диапазон люминесценции центров окраски во фториде лития простирается от 400 до 1400 нм. Люминесценция в зеленом и красном диапазонах широко изучена в связи с многочисленными работами по лазерной генерации на  $F_2$  и  $F_3^+$  центрах. Вместе с тем сообщения о люминесценции в LiF в голубом диапазоне (420–490 нм) весьма немногочисленны.

В кристаллах LiF, облученных при температурах выше комнатной, а также в результате радиационно-термического преобразования дефектов формируются агрегатные центры с широкой полосой поглощения в области 360–380 нм [1]. При возбуждении в этой полосе наблюдается свечение в голубом диапазоне спектра 460–490 нм. Отличительной особенностью является присутствие в R – области спектра одной полосы, которая по положению совпадает с известной  $R_2$  – полосой, но не проявляет фоновой структуры, характерной для  $R_2$  полосы. Образованию «голубых» центров сопутствует образование  $F_3^+$  центров зеленого свечения. Исследуемые «голубые» центры остаются стабильными в термическом диапазоне разрушения  $F_3^+$  центров. Усиление полосы поглощения «голубых» центров при одновременном снижении  $F_3^+$  полосы вероятно связано с процессом захвата электрона, в результате которого происходит образование устойчивой конфигурации  $F_3$  центра.

Известно, что  $F_3$  центр обладает несколькими электронными состояниями. В абсорбционном спектре такой структуры возможно проявление нескольких полос поглощения. В работе [2] приведены доказательства существования различных конфигураций (изомеров)  $F_3$ -центров в LiF. Такие агрегатные дефекты отличаются пространственной формой и окружением в кристаллической решетке. В нашем случае последний факт, вероятно, определяет особенности их спектральных характеристик и их высокую термическую стабильность.

### *Литература*

1. N.T. Maksimova, V.M. Kostyukov, *AIP Conf. Proc.*, 2069, 020006 (2019).
2. A.P. Voitovich, V.S. Kalinov, E.F. Martynovich, *Cryst. Res. Technol.*, 48 (6), 381–386 (2013).

## СВЯЗЫВАНИЕ ИОДЗАМЕЩЕННОГО ФЛУОРЕСЦЕИНА С КАТИОННЫМ ПОЛИМЕРОМ

М. А. Малаховский, Н. В. Слюсаренко

М. А. Герасимова, Е. А. Слюсарева

*Сибирский федеральный университет  
Красноярск, Россия, [polomiks@yandex.ru](mailto:polomiks@yandex.ru)*

Связывание люминесцентной метки с биологической структурой позволяет визуализировать бесцветные системы (белки, функциональные компоненты клетки, мембраны, биополимеры и т. д.). Определение механизма связывания является важной задачей, поскольку определяет прочность такой связи и ее специфичность по отношению к биомолекуле. Ранее было показано, что бромзамещенный флуоресцеин (эозин Y) связывается с полимерной частицей, содержащей аминогруппы, преимущественно по электростатическому механизму [1]. Для выявления роли гидрофобных взаимодействий в такой системе мы исследовали связывание йодзамещенного флуоресцеина (эритрозина B) с аналогичными полимерными частицами. Наличие тяжелых атомов в структуре молекулы увеличивает ее гидрофобность, не меняя существенно ее зарядовые свойства.

Мы синтезировали частицы полиэлектролитных комплексов (с размером ~0,5 мкм и дзета-потенциалом +35 мВ) из двух противоположно заряженных полисахаридов, избыточным компонентом в которых был катионный хитозан. В результате контакта эритрозина B с коллоидным раствором частиц достигалось равновесие связанного и свободного красителя. Параметры связывания были рассчитаны на основе уравнения Хилла [2], устанавливающего соотношение между концентрацией связанного, свободного красителя с концентрацией частиц. Концентрация свободного красителя оценивалась спектрофотометрическим методом после физического осаждения частиц.

Найденные константы связывания полимерных частиц с обоими красителями имеют близкие значения (~10<sup>4</sup> М<sup>-1</sup>). Тем не менее, количество мест связывания молекул эритрозина B с поверхностью полимерных частиц оказалось примерно в 1,5 раз больше, чем аналогичная величина для эозина Y. Таким образом, наличие тяжелых атомов в структуре красителя может менять баланс возможных межмолекулярных взаимодействий в сторону увеличения роли гидрофобных взаимодействий.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-02-0045А.*

### *Литература*

1. N. Slyusarenko, M. Gerasimova, M. Atamanova, A. Plotnikov, E. Slyusareva, *Colloids and Surf., A: Physicochem. and Eng. Asp.*, 610, 12573 (2021).
2. K.Y. Foo, B.H. Hamced, *Chem. Eng. J.*, 156, 2-10 (2010).

## НОВЫЕ УРОВНИ В ОПИСАНИИ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ ВЕЩЕСТВА: ТОПОЛОГИЯ И ОНТОГЕНИЯ

С. Г. Мамонтова

*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН  
Иркутск, Россия [svelta@igc.irk.ru](mailto:svelta@igc.irk.ru)*

Применение термина «фазовые портреты» (ФП) для описания кристаллообразующей среды было предложено М.А. Михайловым [1] при изучении кристаллизации бериллиевого индидалита (БИ) в сухих системах. Под частным ФП понимается последовательная совокупность мгновенных ФП (т.е. состояний вещества в заданных Р-Т условиях) для конкретного варианта кристаллизации. Совокупность частных ФП создаёт полный фазовый портрет температурного интервала синтеза.

В настоящей работе предложено выделять несколько новых видов частных ФП: термодинамический, генетический и топологический.

Первостепенная роль *термодинамического* уровня описания ФП продемонстрирована расчётом величины  $\Delta G$  для взаимодействия сухих видообразующих оксидов БИ [2]. Данная реакция невозможна при любых температурах, следовательно, частные ФП преобразования  $\text{BeO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{БИ}$  включают набор промежуточных реакций, что подтверждается экспериментом. Фазовый и генетический ФП этих реакций в значительной степени определяются химической предысторией исходной смеси. *Генетический* ФП описывает элементы структурного наследования, объединяющие фазы, участвующие в кристаллизации конечного продукта синтеза. Для БИ, полученного из золь-гель прекурсора, такими элементами являются шестичленное кольцо кремнекислородных тетраэдров и рёберное объединенный кристаллографических полиэдров в кристаллической решётке петалитового и бериллового типа. Топологический ФП является количественной характеристикой наборов промежуточных и конечных фаз, существенно отличающейся для различных методов синтеза БИ.

*Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по Проекту IX.25.3.2. “Кристаллические и аморфные функциональные материалы с прогнозируемыми свойствами” (0350-2019-0002).*

### *Литература*

1. М.А. Михайлов, *Тез. докл. Всерос. Совец. “Совр. пробл. геохимии”*, 288–291, (2012).
2. S.G. Mamontova, S.Z. Zelentsov, *AIP Conf. Proc.*, 2069, 040002 (2019).

## ОБЪЕМНЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ С ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Е. Ф. Мартынович

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН*

*Иркутск, Россия [fento@bk.ru](mailto:fento@bk.ru)*

*Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*

Названные материалы находят применение в научных исследованиях [1–3] для фотографирования пространственной картины высоконелинейного взаимодействия интенсивного лазерного излучения с прозрачными средами, визуализируемой после фотографирования в фотолюминесцентном излучении. Такое применение является актуальным в связи с тем, что при высоконелинейном взаимодействии оптического излучения и вещества происходят сложные процессы самовоздействия, такие как самофокусировка, множественная филаментация излучения и другие, радикально изменяющие исходную пространственную конфигурацию поля излучения в веществе. Экспериментальное исследование реализующихся при таких взаимодействиях пространственных конфигураций представляет значительный интерес для лазерной физики и нелинейной оптики.

Объемное фотографирование, хранение изображений, последующая многократная их фотолюминесцентная визуализация и подробное исследование различными методами пространственных распределений люминесцентных характеристик облученных оптических носителей дают богатую информацию о механизмах взаимодействия света и вещества.

Подобные среды применяются также для изготовления оптических носителей для прямой лазерной записи информации в цифровых форматах или в виде изображений, в том числе цветных [4].

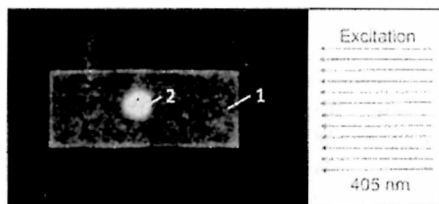


Рис. 1. Люминесцентная визуализация изображения в кристаллической пластинке 1 пятна 2, предварительно экспонированного фемтосекундным лазерным излучением

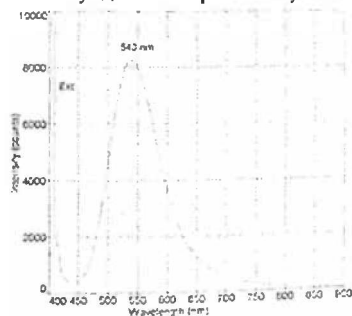


Рис. 2. Спектр люминесценции, визуализирующей скрытое фотографическое изображение в одном из специальных оптических носителей

### Литература

1. E.F. Martynovich, V.P. Dresvyansky, A.L. Rakevich, N.L. Lazareva, M.A. Arsentieva, A.A. Tyutrin, O. Bukhtsoozh, S. Enkhbat, P.V. Kostryukov, B.E. Perminov, A.V. Konyashchenko, *Appl. Phys. Lett.*, 114, № 12, 121901 (2019).
2. E.F. Martynovich, N.L. Lazareva, S.A. Zilov, *J. Lumin.*, 234, 117989 (2021).
3. S. Chekalin, V. Kompanets, A. Dormidonov, V. Kandidov, *Laser Phys. Lett.*, 17, 085401 (2020).
4. E.F. Martynovich, E.O. Chernova, V.P. Dresvyansky, A.E. Bugrov, P.V. Kostryukov, A.V. Konyashchenko, *Opt. Laser Technol.*, 131, 106430 (2020).

## ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ СЕПАРАЦИЯ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ РУД

Е. Ф. Мартынович<sup>1</sup>, В. П. Миронов<sup>1</sup>, А. С. Емельянова<sup>1</sup>,  
Д. С. Глазунов<sup>1</sup>, А. А. Тютрин<sup>1</sup>, С. А. Шабалин<sup>2</sup>, Е. В. Бубырь<sup>2</sup>,  
Л. В. Казаков<sup>2</sup>, И. В. Бычков<sup>3</sup>, С. Н. Багаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
Иркутск, Россия, [femto@bk.ru](mailto:femto@bk.ru)

<sup>2</sup>Акционерное общество «Инновационный центр «Буревестник»»,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Иркутский научный центр СО РАН, Иркутск, Россия

Широкое применение получил способ возбуждения люминесценции сепарируемых алмазосодержащих материалов, включающий их облучение рентгеновским излучением. Рентгеновское излучение хорошо возбуждает люминесценцию природных алмазов. В спектре рентгенолюминесценции большинства алмазов возникает так называемая А-полоса люминесценции, которая визуальнo воспринимается как свечение голубого цвета. Центры люминесценции, ответственные за эту полосу, считаются приоритетными центрами рентгенолюминесценции алмазов. Они обладают характерной кинетикой в миллисекундном временном диапазоне. Использование временных характеристик люминесценции при сепарации существенно повышает селективность извлечения алмазов. Вместе с тем, в некоторых образцах, в основном, типа IIa, возбуждается также люминесценция других типов центров свечения с кинетикой отличающейся от кинетики А-полосы. Люминесцентные сепараторы с рентгеновским возбуждением люминесценции сепарируемых материалов получили наибольшее распространение в практике обогащения, что свидетельствует о преимуществах такого способа возбуждения. При всех известных достоинствах данного способа он имеет очевидный недостаток – его применение сопряжено с необходимостью обеспечения радиационной безопасности персонала. Поэтому развиваются альтернативные люминесцентные и нелюминесцентные методы сепарации. В докладе будут рассмотрены и исследованы различные варианты люминесцентных методов сепарации алмазосодержащих материалов.

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ С ПЕРЕНОСОМ ЗАРЯДА В НЕОБЛУЧЕННЫХ КРИСТАЛЛАХ LiF-UO<sub>2</sub>

Л. И. Щепина<sup>1</sup>, Р. Ю. Шендрик<sup>2</sup>, Е. В. Мсжова<sup>1</sup>,  
Н. А. Иванов<sup>3</sup>, Л. И. Ружников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Иркутский государственный университет  
Иркутск, Россия, [schepina@api.isu.ru](mailto:schepina@api.isu.ru)*

<sup>2</sup>*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН  
Иркутск, Россия, [roshen@yandex.ru](mailto:roshen@yandex.ru)*

<sup>3</sup>*Иркутский национальный исследовательский технический университет  
Иркутск, Россия, [ivnik@istu.edu](mailto:ivnik@istu.edu)*

В настоящее время три основных иона активатора  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{4+}$  используются наиболее часто в типичных светодиодных люминофорах. Квантовая эффективность этих люминофоров часто превышает 90 % по всему спектру видимого диапазона при возбуждении синими светодиодами [1]. Однако пиковые длины волн и ширины линий их излучения, а также их стабильность могут быть улучшены. На сегодняшний день ведется поиск люминофора с узкой линией излучения в зеленой области спектра. В данной работе мы исследуем люминесценцию с переносом заряда в необлученных  $\gamma$  или  $X$ -излучением кристаллах  $\text{LiF-UO}_2$  с максимумом на длине волны 523 нм и шириной спектра излучения 0,094 эВ (для сравнения ширина спектра излучения керамики на основе ИАГ-Се в пять раз превосходит указанную величину [2]). Следует отметить, что в работе [3] рассматривается бесструктурное свечение в данной области спектра с временем затухания 50–90 мкс. В отличие от авторов данной работы нами зарегистрировано свечение в данной области с ярко выраженной структурой полос и временем затухания 40 нс и 0,21 мкс. Задача настоящей работы провести исследование люминесцентных свойств кристалла  $\text{LiF-UO}_2$ , с целью практического использования в качестве преобразователя излучения синих светодиодов. Полоса поглощения с максимумом  $\approx 312,5$  нм имеет ряд резонансных линий: 325,7; 335,3; 345,3; 354,5; 393,4 с одинаковой колебательной модой  $\approx 800 \text{ см}^{-1}$ , характерной для  $(\text{U}^{5+}\text{O}_5\text{F})^{5-}$ . При этом наблюдается изменение частоты из-за межуровневого взаимодействия близких  $5f^1-6d^1$  конфигураций иона урана. При возбуждении  $\lambda = 350$  нм наблюдается люминесценция в зеленой области спектра с БФЛ 518,5 и 527,8 нм, характерными для  $\text{U}^{5+}$ -центров в облученных ионизирующим излучением кристаллах  $\text{LiF-U}_2\text{O}$  [4]. Определена сила связи электронов с фононами решетки ( $S = 7-8$ ). Проведена оценка КПД преобразователя в зеленую область спектра на основе этого кристалла ( $\eta = 0,9$ ) при возбуждении синим светодиодом. В этих кристаллах переход электрона с  $2p$  орбитали ближайшего лиганда кислорода на ион  $\text{U}^{6+}$  сопровождается временным восстановлением иона U до пятивалентного состояния и появлением дырки связанной с анионом кислорода:

$U^{6+} + e \rightarrow (U^{5+})^* \rightarrow h\nu + U^{5+}$ . Электрон 6d орбитали иона  $U^{5+}$  релаксирует на 5f орбиталь с излучением фотона в видимой области спектра ( $\lambda_m = 518,5$  и  $527,8$  нм). Последующая локализация дырки на  $U^{5+}$  приводит к восстановлению иона  $U^{6+}$ .

### Литература

1. K. Alberi, J. Murphy, A. Setlur, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 52 (10), 31–32 (2019).
2. В.И. Соломонов, В.В. Осипов и др., *Опт. и спектр.*, 128 (1), 5–10 (2020).
3. Л.А. Лисицына, С.Н. Путинцева и др., *Изв. ТИУ.*, 312 (2), 66–70 (2008).
4. A. Lupci, V. Lupci, I. Ursu, *J. Phys. C: Sol. Stat. Phys.*, 18, 6099–6107 (1985).

## ПРЕВРАЩЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМОНОВ И ИХ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Е. Милютина, В. Шворчик, А. Лютаков

*University of Chemistry and Technology  
Prague, Czech Republic, [miliutie@vscht.cz](mailto:miliutie@vscht.cz)*

Плазмоника представляет собой уникальный способ сосредоточить световую энергию в чрезвычайно маленьком пространстве и открывает несколько новых возможностей для химического синтеза. В настоящее время химические превращения, индуцированные плазмонами, стали одной из самых привлекательных и горячих тем в химии материалов. В этой работе предложен альтернативный подход превращения органических соединений с помощью плазмонов и его теоретическое обоснование. Было проведено комплексное исследование механизма реакции с помощью плазмонов с использованием симметричных и несимметричных солей иодония в качестве органического зонда. Экспериментальный и теоретический анализ позволил исключить возможный тепловой эффект или перенос горячих электронов. Было обнаружено, что взаимодействие плазмонов с несимметричными иодонивыми солями приводит к внутримолекулярному возбуждению электрона с последующим региоселективным разрывом связи C – I с образованием богатых электронами радикалов, что не может быть объяснено возбуждением горячими электронами или тепловыми эффектами. Эксперимент был поставлен таким образом, чтобы исключить возможность фотохимической реакции. Для этого был изготовлен волоконно-оптический зонд, через который светили лазером с длиной волныпадающей в максимум поглощения плазмона.

## NV и SiV ЦЕНТРЫ В АЛМАЗЕ С ПОЗИЦИИ ИЗОМОРФНЫХ ЗАМЕЩЕНИЙ

В.П. Миронов

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
Иркутск, Россия. [mironov2011@gmail.com](mailto:mironov2011@gmail.com)*

Известно несколько сотен линий и ЭКС в поглощении и люминесценции алмазов, обусловленных дефектами кристаллической решетки примесной или собственной природы. Дефекты примесной природы чаще объясняются изоморфными замещениями атомов матрицы примесями и не всегда достаточно обоснованы. Здесь обсуждаются модели некоторых простейших дефектов в алмазе в соответствии с правилами изоморфизма.

Обсуждается возможная молекулярная структура дефектов и точечная группа их симметрии. Предлагаются варианты моделей некоторых простейших дефектов в алмазе: вакансии, пары полувакансий и собственного межузельного атома, атомов примеси V (азот) и IV (кремний) группы в изоморфном замещении, в сочетании с вакансией и парой полувакансий.

Вероятной моделью 3N центра является собственный межузельный атом в гексагональном окружении и «расщепленной» вакансии (пары полувакансий).

Кроме модели C-дефекта, как нейтрального атома и азотного донора, допускается модель структуры со встройкой атома водорода по донорно-акцепторному механизму. Во всех случаях группа симметрии будет центра  $C_{3v}$ .

Центр 575 нм при захвате дополнительного электрона превращается в центр 640. Вероятным донором этого электрона является нейтральный C-дефект – одиночный азотный атом. Происходит следующее:  $(N \Rightarrow N^+) \Rightarrow e^- \Rightarrow (NV^0 + e^- \Rightarrow NV^+)$  с образованием донорно-акцепторной пары  $(N^+ + NV^0)$ . О существовании таких пар недавно сообщалось. Кроме этого, в структуру  $NV^0$  центра легко встраивается атом водорода с образованием водородной связи.

Атом кремния имеет существенно больший ионный радиус, что не позволяет ему быть изоструктурным замещением. Структура дефекта пока не определена, природа оптических возбуждений и другие связанные с этим свойства недостаточно понятны, в литературе ведется дискуссия. Вероятной моделью Si-дефекта 737 нм является атом кремния, заместивший пару соседних атомов углерода. В данном случае образуется структура  $V/2-Si-V/2$  с точечной группой симметрии  $C_{2v}$  с осью  $C_2$  по направлению  $\langle 110 \rangle$ .

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕПЛОТДАЧИ НА ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В КРИСТАЛЛАХ В МЕТОДЕ ЧОХРАЛЬСКОГО

В. С. Бердников, К. А. Митин

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН  
Новосибирск, Россия, [berdnikov@itp.nsc.ru](mailto:berdnikov@itp.nsc.ru)*

Метод Чохральского является наиболее распространенным методом получения монокристаллов широкой номенклатуры материалов. Пространственное распределение дефектов в монокристаллах, получаемых вытягиванием из расплавов методом Чохральского, зависит как от формы фронта кристаллизации на разных стадиях процесса роста, так и от нестационарных полей температуры и градиентов температуры в кристаллах. В высокотемпературном технологическом процессе поля температуры зависят от интенсивности радиационно-конвективной теплоотдачи от кристалла в окружающую среду. Управление тепловыми условиями роста кристалла является сложной задачей, так как нелинейность задач сопряженного радиационно-конвективного теплообмена между кристаллом, расплавом и окружающей средой приводит к необходимости их решения при большом количестве промежуточных геометрий расчетных областей по мере роста кристалла и изменении его длины. Особенности сопряженного конвективного и радиационно-конвективного теплообмена кристаллов с окружающей средой в зависимости их длины практически не исследованы. Для понимания закономерностей зависимости полей температуры в кристаллах от интенсивности теплоотдачи с их образующих и соответствующих термических напряжений решаются задачи в рамках частичного моделирования. Частичное моделирование позволяет определить основные тенденции в поведении рассматриваемых систем при изменении отдельных управляющих параметров или их группы.

Численно, методом конечных элементов, исследован сопряженный радиационно-конвективный теплообмен кристалла с окружающей средой при геометрии подобной верхней части теплового узла в методе Чохральского. Решались системы уравнений термогравитационной и смешанной конвекции в переменных вихрь, функция тока и температура. Проведено исследование влияния на поля температуры и термических напряжений в кристаллах без вращения и с учетом вращения кристаллов различной длины, т.е. на различных стадиях технологического процесса вытягивания кристаллов из расплава. Исследована относительная роль естественной и вынужденной конвекции, радиационно-кондуктивной и радиационно-конвективной теплоотдачи.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН 0257-2021-0003. Номер гос. регистрации 121031800213-0. При частичной поддержке грантом РФФИ 19-08-00707.*

## **ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА НА РЕЖИМЫ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ ОТ КРЕМНИЕВОГО СТЕРЖНЯ**

**А. В. Митина, В. С. Бердников, К. А. Митин**

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН  
Новосибирск, Россия, [berdnikov@itp.nsc.ru](mailto:berdnikov@itp.nsc.ru)*

В качестве исходного сырья для производства монокристаллов кремния высокого качества используется поликремний, получаемый с помощью Сименс-процессов. Суть Сименс-процесса состоит в водородном восстановлении трихлорсилана либо моносилана в реакторе на разогреваемых электрическим током затравочных кремниевых стержнях. При инициации процесса стержни предварительно разогреваются до температуры, при которой кремний становится проводящим, затем с помощью подбора напряжения стержни разогреваются и придерживаются при заданной температуре. Из сложной сборки U-образных стержней, характерной для современных вариантов реакторов водородного восстановления трихлорсилана, вычленен отдельный наиболее важный элемент. Этим элементом является отдельный одиночный U-образный или цилиндрический кремниевый стержень, разогреваемый постоянным электрическим током. Для исследований основных свойств конвективного течения у стержня и влияния локальных особенностей конвекции на теплоотдачу и на поля температуры в стержнях можно рассмотреть простейшие геометрии.

Численно, методом конечных элементов, исследован нестационарный сопряженный свободноконвективный теплообмен, разогреваемого за счет пропуска электрического тока, одиночного кремниевого стержня. Решалась нестационарная система термогравитационной конвекции в переменных вихрь, функция тока и температура. В режимах с учетом радиационной теплоотдачи расчеты радиационных потоков проведены на основе зонального метода. В трехмерной постановке задачи исследована теплоотдача от одиночного U-образного стержня квадратного сечения, расположенного в прямоугольной камере с холодными стенками, на начальных стадиях процесса. Наиболее простым вариантом является конвекция в кольцевом зазоре с внешней холодной изотермической оболочкой и внутренним цилиндрическим нагретым телом. Расчеты проведены при различных перепадах температуры и для стержней различной длины и диаметров. Рассчитаны поля температуры и градиентов температуры, поля термических напряжений.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН 0257-2021-0003. Номер гос. регистрации 121031800213-0. При частичной поддержке грантом РФФИ 19-08-00707.*

## СПЕКТРЫ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МЕТАБОРАТА МЕДИ, ЛЕГИРОВАННОГО НИКЕЛЕМ (Cu,Ni)B<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

А. Д. Молчанова<sup>1</sup>, Е. В. Тропина<sup>1,2</sup>, К. Н. Болдырев<sup>1,2</sup>,  
Е. М. Мошкина<sup>3</sup>, М. Н. Попова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт спектроскопии РАН

Москва, Троицк, Россия, [nastvamolchanova@list.ru](mailto:nastvamolchanova@list.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН  
Красноярск, Россия

Метаборат меди CuB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> обладает интересными и в некотором роде уникальными физическими свойствами, представляющими интерес как в рамках исследования этого кристалла, так и для физики магнитных соединений в целом. Так, это единственное на данный момент соединение меди, в котором удалось наблюдать все бесфононные линии (БФЛ) Cu<sup>2+</sup> [1]. Также был обнаружен значительный дихроизм по отношению к направлению распространения света [2] и антиферромагнитный линейный дихроизм CuB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> [3]. Интересны также исследования метаборатов меди, легированных различными 3d ионами. Так, в чистом метаборате не удалось наблюдать магнитоэлектрический эффект, однако (Cu,Ni)B<sub>2</sub>O<sub>4</sub> является мультиферроиком (Ni<sup>2+</sup> ~ 3%) [3, 4].

Метаборат меди CuB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> обладает интересными люминесцентными свойствами [6]. Исследования во внешних магнитных полях выявили значительный рост (~ 70%) сигнала при переключении знака внешнего магнитного поля. Это позволило также отобразить скошенную антиферромагнитную доменную структуру (Cu,Ni)B<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (Ni ~ 5%). В настоящей работе проведено исследование температурной зависимости спектров люминесценции (Cu,Ni)B<sub>2</sub>O<sub>4</sub> для различных концентраций Ni<sup>2+</sup>.

*Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 19-12-00413.*

### Литература

1. R.V. Pisarev, A.M. Kalashnikova, O. Schöps, and L. N.Bezmaternykh, *Phys. Rev. B*, 84, 075160 (2011).
2. S. Toyoda, M. Fiebig, T. Arima, Y. Tokura, N.Ogawa, *Sci. Adv.*, 7, eabe2793 (2021).
3. K.N. Boldyrev, R.V. Pisarev, L.N. Bezmaternykh, M.N. Popova, *Phys. Rev. Lett.* 114, 247210 (2015).
4. N.D. Khanh, N. Abe, K. Kubo, M. Akaki, M. Tokunaga, T. Sasaki, T. Arima, *Phys. Rev. B* 87, 184416 (2013).
5. M. Saito, K. Ishikawa, S. Konno, K. Taniguchi, T. Arima, *Nat. Mater.*, 8, 634-638 (2009).
6. S. Toyoda, N. Abe, T. Arima, *Phys. Rev. B* 93, 201109(R) (2016).

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСЕННОЙ СВОТСУММЫ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ LiF:Mg,Ti

В. П. Дресвянский<sup>1</sup>, Н. С. Бобина<sup>2</sup>, С. Энхбат<sup>3</sup>,  
С. В. Мурзин<sup>1</sup>, Е. Ф. Мартинович<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, e-mail: vadyp@list.ru*

<sup>2</sup>*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия*

<sup>3</sup>*Institute of Physics and Technology Mongolian Academy of Science  
Ulaanbaatar, Mongolia*

Объектом наших исследований являлись дозиметрические монокристаллы LiF:Mg (100 ppm), Ti (10 ppm) широко применяемые в  $\gamma$ -дозиметрии. Целью данной работы являлось исследование механизма запасаения светосуммы кристаллами LiF:Mg,Ti под действием интенсивного фемтосекундного излучения титан-сапфирового лазера в ближней ИК-области  $\sim 800$  нм, а также исследование фотолюминесценции облученных образцов и сопоставление полученных результатов с результатами исследований ТСЛ этих же кристаллов, облученных бета-излучением и другими видами радиации.

Экспериментальная установка по облучению кристаллов LiF:Mg,Ti фемтосекундными лазерными импульсами включала титан-сапфировый лазер, генерирующий импульсы длительностью 50 fs с энергией около 6 мДж и частотой следования 10 Гц. Исследования ТСЛ проводились на специализированной установке в температурном диапазоне от 295 К до 673 К с постоянной скоростью нагрева 1 Кс<sup>-1</sup>. После измерения кривых термо-высвечивания кристалла, облученного фемтосекундным излучением дополнительно были проведены исследования ТСЛ этого же образца, облученного  $\beta$ -излучением изотопного источника <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y с мощностью дозы 0,6 Gy/min. Время облучения образца бета частицами составляло 30 сек.

В результате проведенных исследований определены типы дефектов, которые аккумулируют энергию в виде запасенной светосуммы при взаимодействии фемтосекундных лазерных импульсов с широкозонными кристаллами. Установлено, что дефекты, аккумулирующие энергию при действии единичных фемтосекундных лазерных импульсов, это F<sub>2</sub> и F<sub>3</sub><sup>+</sup> центры и дополнительные к ним центры интерстициального типа. При облучении сериями импульсов дополнительно возникают F<sub>3</sub>, F<sub>3</sub><sup>-</sup> и F<sub>4</sub> центры. По сравнению с рентгеновским и  $\beta$ -облучением более эффективно записываются высокотемпературные пики. Мы связываем более эффективное наведение высокотемпературных пиков под действием лазерного излучения с более высокой плотностью возбуждения вещества. Плотность возбуждения кристалла при действии лазерного излучения примерно в

$10^7$  раз выше, чем при действии рентгеновского излучения. Также, она примерно в  $10^4$  раза выше плотности возбуждения, обеспечиваемой использованным нами источником бета-излучения. Из литературы известно, что высокотемпературные пики в ТЛ детекторах на основе LiF:Mg,Ti более эффективно наводятся в треках тяжелых частиц, где плотность возбуждения значительно выше, чем при рентгеновском или бета облучении.

Аксиальная зависимость аккумулярованной кристаллом энергии под действием единичных фемтосекундных импульсов лазерного излучения или их малых серий имеет «рваный», немонотонный характер, что, как показали микроскопические исследования, определяется тем, что запасание происходит в областях самофокусирующихся филаментов лазерного излучения, которые на начальном этапе облучения имеют малые размеры и их количество невелико. С увеличением числа лазерных импульсов длина шпуров, наводимых филаментами в кристалле, а также их диаметры увеличиваются, а аксиальная зависимость запасенной энергии сглаживается. Величина светосуммы термостимулированной люминесценции, высвеченной облученными кристаллами, с ростом числа импульсов лазерного облучения вначале растет сверхлинейно, затем достигает максимума и далее снижается. Эффект насыщения запасенной светосуммы обусловлен тем, что в центральной приосевой части шпуров концентрация, степень агрегации и номенклатура центров окраски больше, чем в периферийной части.

*Работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 года (№ проекта 0243-2021-0004), а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Министерства образования, культуры, науки и спорта Монголии, проект № 17-52-44015-Mong\_a.*

## СТРУКТУРНЫЕ РАЗЛИЧИЯ КВАРЦЕВЫХ СТЕКОЛ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИЗ $\beta$ -КВАРЦА И $\beta$ -КРИСТОБАЛИТА

А. С. Мысовский, А. И. Богданов, А. С. Паклин

Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН  
Иркутск, Россия, [mysovsky@gmail.com](mailto:mysovsky@gmail.com)

В данной работе методом молекулярной динамики был исследован процесс синтеза кварцевых стекол, образующихся из двух различных кристаллических модификаций  $\text{SiO}_2$ , а именно  $\beta$ -кварца и  $\beta$ -кristобалита. Подобные стекла были ранее синтезированы в Институте геохимии СО РАН [1]. Несмотря на то, что для их синтеза было использовано одинаковое исходное сырье, стекла, синтезированные из  $\beta$ -кristобалита, демонстрируют большую термическую устойчивость, а также ряд других отличий от стекол, синтезированных из  $\beta$ -кварца.

В этой связи встает вопрос, в чем могут состоять структурные отличия данных стекол. Кроме практического значения, этот вопрос также интересен и в фундаментальном отношении: «помнит» ли стекло что-либо о кристаллической структуре того материала, из которого было синтезировано? Какие структурные особенности и какие собственные дефекты стекла могут быть обусловлены этой исходной кристаллической фазой?

Для ответа на эти вопросы в данной работе была предпринята попытка смоделировать процесс синтеза стекла. Для моделирования процессов плавления кристалла и образования стекла был выбран метод классической молекулярной динамики. Межатомное взаимодействие описывалось при помощи потенциалов ReaxFF [2]. Моделируемый фрагмент содержал около 3000 атомов. Расчеты выполнялись программным комплексом LAMMPS [3].

Полученные структуры содержат разнообразные дефекты, такие, как немостиковый атом кислорода (NBOHC), супероксидный радикал и другие. Несмотря на в целом весьма похожие функции парного и углового распределения атомов, в них наблюдаются и определенные различия (рис.). Роль разнообразных дефектов в формировании структурных отличий между двумя типами стекол обсуждается в работе.

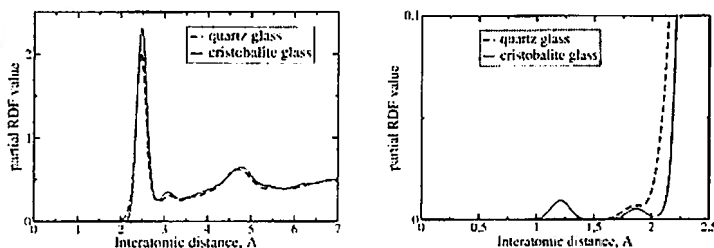


Рис. Частичная функция парного распределения атомов для пар О-О в стеклах, синтезированных из  $\beta$ -кварца и  $\beta$ -кristобалита

### Литература

1. A.I. Nepomnyashchikh, A.A. Shalacv, T.Yu. Sizova, A.S. Paklin, A.N. Sapozhnikov, L.A. Pavlova, *Crystallogr. Rep.*, 63, № 2, 290-294 (2018).
2. A.C.T. van Duin, A. Strachan, S. Stewman, Q. Zhang, X. Xu, W.A. Goddard, *J. Phys. Chem. A*, 107(19), 3803-3811 (2003).
3. <https://lammps.sandia.gov>

## СПЕКТРОСКОПИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ КВАНТОВОЙ СВЯЗИ

Б. А. Наседкин<sup>1</sup>, А. О. Исмагилов<sup>1</sup>, А. А. Калинин<sup>2</sup>,  
А. Н. Цыпкин<sup>1</sup>, В. И. Егоров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет ИТМО  
Санкт-Петербург, Россия, [b.nasedkin@bk.ru](mailto:b.nasedkin@bk.ru)

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет  
Санкт-Петербург, Россия, [a.kalinichev@sphu.ru](mailto:a.kalinichev@sphu.ru)

Одним из направлений в современной квантовой криптографии является противодействие возможным атакам, в том числе на элементную базу систем передачи данных. Примером подобных атак может являться атака типа «троянский конь» [1–3]. Данная атака основывается на использовании уязвимостей, связанных с отражением и пропусканием используемых элементов. Для получения информации нарушитель использует длины волн, отличные от длины волны, на которой идёт передача данных. Вследствие чего возникает необходимость проверки спектральных характеристик элементов, входящих в состав волоконно-оптических линий квантовой связи.

В данной работе рассмотрен перестраиваемый источник излучения, на основе эффектов спонтанного параметрического рассеяния и параметрического усиления в кристалле йодата лития в условиях фемтосекундной лазерной накачки. Были измерены спектры генерируемого излучения в зависимости от поворота кристалла для диапазона от 600 до 1600 нм. Спектральные характеристики измерялись после прохождения генерируемого излучения через одномодовое оптическое волокно. На основе полученного источника разработана схема спектроскопии элементов волоконно-оптических линий квантовой связи.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (паспорт № 2019-0903).*

### Литература

1. N. Gisin, S. Fasel, B. Kraus, H. Zbinden, G. Ribordy, *Phys. Rev. A*, 73(2), 022320, (2006).
2. N. Jain, E. Anisimova, I. Khan, V. Makarov, C. Marquardt, G. Leuchs, *New J. Phys.*, 16(12), 123030, (2014).
3. S. Sajceed, C. Minshull, N. Jain, V. Makarov, *Sci. Rep.*, 7(1), 1-7, (2017).

## МОДИФИКАЦИЯ МАКСЕНА ПРИ ПОМОЩИ ПЛАЗМОНА: НАСТРОЙКА ПОВЕРХНОСТНОЙ ХИМИИ И СОЗДАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ

А. А. Ольштрем, С. Чертопалов, В. Шворчик, О. Лютаков

*University of Chemistry and Technology, Prague, Czech Republic*

*[olshtren@vscht.cz](mailto:olshtren@vscht.cz)*

*Institute of Physics of the Czech Academy of Sciences*

*Prague, Czech Republic, [chertopalov@fzu.cz](mailto:chertopalov@fzu.cz)*

В случае материалов с высокой плотностью свободных электронов взаимодействие легкой массы может быть значительно улучшено за счет коллективных электронных колебаний, широко известных как поверхностные плазмоны [1]. Это явление и связанная с ним способность манипулировать светом в наноразмерном масштабе находят применение в различных областях, от сенсоров до фотоэлектрических устройств [2].

Недавно было обнаружено, что новый класс 2D материалов – максены – обладают плазмон-активными свойствами [3]. Плазмоны на поверхности максена могут возбуждаться при освещении видимым светом, что позволяет ввести новую интересную концепцию в химии материалов – использование плазмонной помощи для активации химического превращения [4]. Суть этой концепции заключается в активации плазмонных молекул диэлектриков вблизи плазмонно-активных наноструктур и их переводе в термодинамически нестабильное (т.е. химически реактивное) состояние [5].

В этой статье мы предлагаем новый подход к модификации нового и интересного класса 2D материалов – максенов с формулой  $Ti_3C_2T_x$ . Наш подход основан на обработке поверхности, атакуемой высокореактивными радикалами – солями йодония (которые обычно стабильны в условиях окружающей среды, но могут участвовать в реакции с помощью плазмона), генерируя высокореактивные радикалы и немедленно прививаться к поверхности плазмон-активного твердого материала.

### Литература

1. J.A. Schuller, E.S. Barnard, W. Cai, Y.C. Jun, J.S. White, M. L. Brongersma, *Nat. mater.*, 9, 193-204, (2010).
2. C. Clavero, *Nat. Photonics*, 8, 95-103, (2014).
3. L. Wu, Q. You, Y. Shan, S. Gan, Y. Zhao, X. Dai, *Sens. Actuators, B*, 277, 210-215 (2018).
4. O. Guselnikova, A. Olshtrem, Y. Kalachyova, I. Panov, P. Postnikov, V. Svorcik, O. Lyutakov, *J. Phys. Chem. C*, 122 (46), 26613-26622 (2018).
5. M.J. Kale, T. Avanesian, P. Christopher, *JCS Catal.*, 4, 116-128 (2014).

## СВЯЗАННОЕ СОСТОЯНИЕ В КONTИНУУМЕ ТИПА ФРИДРИХА – ВИНТГЕНА В АНИЗОТРОПНОМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ

П. С. Панкин, Д. Н. Максимов, Д. С. Бузин, А. И. Краснов,  
С. В. Наболь, И. В. Тимофеев

*Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН  
Красноярск, Россия, [dir@iph.krasn.ru](mailto:dir@iph.krasn.ru)  
Сибирский федеральный университет  
Красноярск, Россия, [office@sfu-kras.ru](mailto:office@sfu-kras.ru)*

Связанное состояние в континууме (ССК) – это локализованное безызлучательное решение уравнений Максвелла, сосуществующее с непрерывным континуумом распространяющихся мод [1]. Концепция ССК позволяет реализовать резонансные оптические моды с настраиваемой добротностью, посредством управления скоростью утечки энергии из локализованного состояния в континуум. ССК типа Фридриха-Винтгена объясняется полной деструктивной интерференцией мод резонатора, при их выходе в волноводы [2]. На рисунке можно видеть коллапс резонансной линии, свидетельствующий о реализации в системе ССК типа Фридриха – Винтгена. В работе сообщается об аналитическом решении задачи рассеяния вблизи ССК, с использованием метода resonant tate expansion [3].

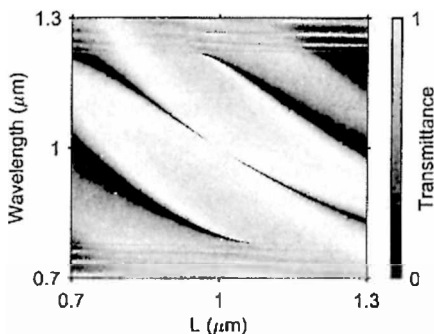


Рис. Численный спектр пропускания фотонного кристалла при изменении толщины анизотропного дефектного слоя

### Литература

1. C.W. Hsu, B. Zhen, A.D. Stone, J.D. Joannopoulos, M. Soljačić, *Nat. Rev. Mater.*, 1(9), 16048 (2016).
2. A.F. Sadreev, *Rep. Prog. Phys.*, 84, 055901 (2021).
3. S. Neale, E.A. Muljarov, *Phys. Rev. B.* 103(15), 155112 (2021).

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ CORE/SHELL $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

А. С. Перепелца, О. И. Овчинников, М. С. Смирнов,  
Т. С. Кондратенко, И. Г. Гревцева, С. В. Асланов

*Воронежский государственный университет  
Воронеж, Россия, [a-perpelitsa@vandex.ru](mailto:a-perpelitsa@vandex.ru)*

Разработка методик повышения квантового выхода и контроля структуры коллоидных квантовых точек (КТ) различного состава является важной технологической и научной задачей, интерес к которым обусловлен широким спектром применения коллоидных КТ начиная от люминесцентных излучателей, в том числе источников одиночных фотонов, и заканчивая пассивными системами управления параметрами оптического излучения [1; 2]. Наряду с ними важную роль играет подбор высокочувствительных методик детектирования и контроля структуры локализованных состояний, не участвующих в излучательной рекомбинации при формировании различных оболочек и пассивирующих слоев на интерфейсе КТ.

В работе исследовалась трансформация структуры локализованных состояний в коллоидных КТ  $\text{Ag}_2\text{S}$ , синтезированных в этиленгликоле и пассивированных 2-меркаптопропионовой кислотой, средним размером 3,0 нм с характерной особенностью в спектре оптического поглощения при 1,70 эВ и рекомбинационной люминесценцией с максимумом 1,43 эВ с квантовым выходом 1,6 %. Формирование оболочки  $\text{SiO}_2$  с толщиной оболочки, по данным ПЭМ, до 2,0 нм при водит к смещению особенности в оптическом поглощении к 1,60 эВ и максимума люминесценции к 1,33 эВ с увеличением квантового выхода до 8,0 %.

Методом термостимулированной люминесценции для КТ  $\text{Ag}_2\text{S}$  обнаружено две полосы термовысвечивания при 190 К и 250 К, связанные с наличием мелких дырочных состояний с глубинами  $\sim 0,117$  эВ и  $\sim 0,135$  эВ. Формирование core/shell КТ  $\text{Ag}_2\text{S}/\text{SiO}_2$  приводит к исчезновению полосы термовысвечивания с максимумом 250 К, связанной с уровнями с глубиной  $\sim 0,135$  эВ, что интерпретировано как «залечивание» одного типа ловушек преимущественно локализованных на поверхности КТ.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-12-00266.*

### Литература

1. I. Tretyakov, S. Svyatodukh, A. Perepelitsa, S. Ryabchun, N. Kaurova, A. Shurakov, M. Smirnov, O. Ovchinnikov, G. Goltsman, *Nanomaterials*, 10, 861 (2020).
2. A.I. Zvyagin, T.A. Chevychelova, I.G. Grevtseva, M.S. Smirnov, A.S. Selyukov, O.V. Ovchinnikov, R.A. Ganeev, *J. Russ. Laser Res.* 41, 670–680 (2020).

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТУННЕЛЬНОГО ТИПА

В. К. Платонов, Е. В. Шиндякин, А. С. Уваров,  
А. Ю. Сенькина, А. В. Егранов, Н. А. Москвина

*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН  
Иркутск, Россия, [platonvitalis@gmail.com](mailto:platonvitalis@gmail.com)  
Областной онкологический диспансер  
Иркутск, Россия, [ood@iood.ru](mailto:ood@iood.ru)*

Актуальной задачей в современной лучевой терапии является определение дозы, полученной пациентом во время проведения сеанса облучения. Вклад в суммарную дозу вносит первичный пучок излучения, направленный в мишень облучения и вторичное излучение, рассеянное в теле пациента, деталях аппарата и строительных конструкциях [1]. При проведении облучения на линейном ускорителе, оборудованном устройством поглощения первичного пучка, вклад рассеянного излучения в интегральную дозу, получаемую пациентом, существенно увеличивается [2; 3].

В рамках работы разработана методика измерения распределения рассеянного излучения в процедурном помещении линейного ускорителя, оснащенного устройством поглощения первичного пучка. В качестве дозиметров использованы кристаллы LiF. Разработаны капсулы для детекторов. Изготовление капсул проводилось методом 3D печати из PET-G и PLA пластика. Определение распределения рассеянного излучения проводилось под разными углами наклона гентри, степенью раскрытия коллиматора и на разных расстояниях от изоцентра, а также при вращении гентри со скоростью 4 об/мин. В изоцентр аппарата был помещен тканеэквивалентный гетерогенный фантом грудной клетки CIRS Thorax Phantom для имитации рассеяния излучения в пациенте [3,4].

Полученные данные позволят сформировать полную картину распределения рассеянного излучения в процедурном помещении линейного ускорителя.

### *Литература*

1. Varian Medical Systems. Introducing Halcyon [Internet]. Centreline August 2017;:4–7, <https://www.varian.com/oncology/centerline/2017-08> [accessed 17 June 2018].
2. J. Balog, D. Lucas, C. DeSouza, R. Crilly, *Med. Phys.*, 32, 710–9 (2005).
3. S. Baechler, F.O. Bochud, D. Verellen, R. Moeckli, *Phys. Med. Biol.*, 52, 5057–67 (2007).
4. National Council on Radiation Protection and Measurements, 2005. NCRP 151: Structural shielding design and evaluation for megavoltage x- and gamma-ray radiotherapy facilities (Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection and Measurements).

## ЛАЗЕРНЫЕ МЕТОДЫ ПРОИЗВОДСТВА И ДИАГНОСТИКИ ВОДОРОДА

В. Е. Привалов, В. Г. Шеманин

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Санкт-Петербург, Россия, [vaevpriv@yandex.ru](mailto:vaevpriv@yandex.ru)  
Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского  
государственного технологического университета  
Новороссийск, Россия, [vshevanin@yandex.ru](mailto:vshevanin@yandex.ru)*

Интерес к водородной энергетике появился давно. Для её реализации необходимо сделать реакцию термоядерного синтеза водорода управляемой. Пока это получается на очень короткий промежуток времени. Была попытка использовать микротермоядерные взрывы для энергетике, которая пока успеха не имела. Однако теплота сгорания водорода наиболее высока среди элементов таблицы Д.И. Менделеева, поэтому водородная энергетика имеет перспективы и при прямом сжигании водорода. Здесь препятствием является дороговизна производства водорода. При электролизе воды затрата энергии превосходит энергию горения водорода. Сегодня более 90 % водорода производится паровой конверсией природного газа или метана. Другой способ – газификация угля. Оба способа примерно вдвое дешевле электролиза воды. Однако рентабельность не обеспечивают. Совершенно другой подход – топливную ячейку – предложил автор [1]. Его патент датирован 1990 г. (приоритет (1987 г.)). Его предложение совершенствуется (например, [2]). Нашлось место и лазеру в тесной топливной ячейке [3]. Развитие водородной энергетике потребует совершенной диагностики водорода. Ведутся работы и в этом направлении [4].

### *Литература*

1. S.A. Meyer, The Birthday of new technology, Water fuel cell, Technical brief, Hydrogen fracturing process, Grove City, Ohio, 1995, Режим доступа: свободный (13.11.2018), [https://vk.com/doc72110428\\_365553645?hash=cf3a3a09bfb78824b9&dl=23e8b23c85441b4472](https://vk.com/doc72110428_365553645?hash=cf3a3a09bfb78824b9&dl=23e8b23c85441b4472)
2. В.Е. Привалов Патент РФ № 165752, БИ № 31, 2016.
3. В.Е. Привалов Патент РФ № 180441, БИ № 17, 2018.
4. Э.И. Воронина, В.Е. Привалов, В.Г. Шеманин, *Письма в ЖТФ*, 30 (5), 14-17 (2004).

## СПЕКТРЫ ФОТОБИОЛОГИЧЕСКОЙ ИНАКТИВАЦИИ КОРОНАВИРУСА SARS-COV-2 СОЛНЕЧНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ УФБ-ДИАПАЗОНА (280–320 НМ)

В. Е. Прокопьев

*Институт сильноточной электроники СО РАН  
Томск, Россия, [prokop@ogl.hcei.tsc.ru](mailto:prokop@ogl.hcei.tsc.ru)*

Вспышка вирусного заболевания COVID-19 тяжелого острого респираторного синдрома – (ТОРС – англ. Severe acute respiratory syndrome coronavirus) вызванная коронавирусом (КВ – англ. COV) SARS-COV-2 поставила перед врачами и научным сообществом много сложных вопросов, связанных с объяснением причин возникновения, путей и условиях распространения эпидемии и необходимостью разработки и создания новых методов диагностики, лечения и прогноза. При этом водно-капельные частицы слюны являются основным резервуаром и средой переноса вирусов [1].

На основании многих натурных и лабораторных исследований доказано, что в основе бактерицидного, цитотоксического и мутагенного эффектов УФ излучения лежит поглощение УФ квантов молекулами ДНК и РНК бактерий и вирусов.

По фотобиологическому действию ультрафиолетового (УФ) солнечного излучения (СИ) его условно разделяют по длинам волн на три диапазона: УФС (200–280 нм), УФБ (280–315(320) нм) и УФА (315(320)–400 нм).

Ранее во многих работах показано, что инаktivация вирусов и, в частности, SARS-CoV-2 с помощью УФС излучения представляет собой традиционный метод дезинфекции.

Однако в реальных естественных условиях длины волн меньше, чем 280 (290) нм (УФ-С) полностью поглощается молекулами озона, кислорода и окислами атмосферных газов уже в верхних слоях атмосферы. Поэтому до поверхности Земли полностью доходит только УФА (320–400 нм) и частично излучение УФБ (280–320 нм), которое значительно ослаблено и трансформировано в области длин волн 290–300 нм.

Поэтому определение характеристик СИ в УФБ области спектра на поверхности Земли и исследование фотобиологических спектров действия, влияющих на выживаемость вирусов в этой области, представляет значительный интерес.

В настоящей работе проведены экспериментальные наземные наблюдения интенсивности и спектра СИ в УФБ диапазоне в г. Томске (56°29' с.ш. (N), 84°56.89' в.д. (E)) с 26.03.2020 по 18.05.2021.

На основе этих измерений и экспериментальных исследований спектральных характеристик биологических тканей (слюны и цельная кровь человека), а также анализа научных работ по строению и химическому молекулярному составу SARS-COV-2 определены первичные фотоакцепторы (хромофоры), молекулярные структуры и спектры фотобиологического действия инаktivации КВ: *гуанин* – азотистое основание цепи РНК коронавируса SARS-CoV-2; *молекулы гидроксила* – ОН глюкозы в положении углерода 2' в молекуле РНК; *тирозин* и *триптофан* – в активном центре S-белка (spikeglycoprotein – S') коронавируса.

### *Литература*

1. R. Xu, B. Cui, X. Duan, P. Zhang, X. Zhou, Q. Yuan, *Int. J. Oral. Sci.*, 12, Art. 11 (2020).

## СВЕЧЕНИЕ $Tm^{2+}$ В КРИСТАЛЛАХ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ ФТОРИДОВ

Е. А. Раджабов

*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН  
Иркутск, Россия, [eradz@igc.irk.ru](mailto:eradz@igc.irk.ru)*

Спектроскопия  $Tm^{2+}$  в кристаллах  $CaF_2$  впервые исследована в работе Kiss [1] в связи с возможным применением его в качестве лазерного материала. Подобно  $Yb^{3+}$  двухвалентный ион тулия имеет основное состояние  $4f^{13}$  с спин-орбитально расщепленными на  $\sim 1$  эВ атомными уровнями  ${}^2F_{7/2}$ ,  ${}^2F_{5/2}$ . Разрешенные  $4f$ - $5d$  переходы  $Tm^{2+}$  в галоидных кристаллах располагаются в области 700–200 нм. Наблюдается свечение при  $5d$ - $4f$  переходах 500–800 нм так и при  $4f$ - $4f$  переходах 1,0–1,3 мкм в ионах тулия  $Tm^{2+}$ . Относительно недавние исследования показали перспективность использования кристаллов с  $Tm^{2+}$  как эффективных концентраторов солнечного излучения (luminescent solar concentrators) [2], что стимулировало новые исследования  $Tm^{2+}$  в галоидных кристаллах [3].

Нами исследованы оптические спектры кристаллов щелочноземельных фторидов  $CaF_2$ ,  $SrF_2$ ,  $BaF_2$  с примесью 0,01, 0,1, 0,3 моль. %  $TmF_3$ . При выращивании тулий входил в трехвалентной форме. Перевод в двухвалентное состояние осуществлялся аддитивным окрашиванием, прогревом кристалла в вакууме в парах кальция при 750–850 °С.

Спектры  $f$ - $f$  свечения при низких температурах состоят из двух резких линий обусловленных переходами из двух  ${}^2F_{5/2}$  состояний, расщепленных кристаллическим полем, на основное  ${}^2F_{7/2}$  состояние. При нагревании  $f$ - $f$  свечение уменьшается в два этапа и окончательно исчезает при 250, 300, 350 К в  $BaF_2$ ,  $SrF_2$ ,  $CaF_2$  соответственно. Расстояние между линиями свечения уменьшается в ряду  $CaF_2$ ,  $SrF_2$ ,  $BaF_2$  на  $240 \text{ см}^{-1}$ , что связано с уменьшением силы кристаллического поля. В интервале температур 20–100 К наблюдалось разгорание антистоксовых спутников у коротковолновой линии свечения  $Tm^{2+}$ .

В области 650–750 нм при низких температурах во всех кристаллах обнаружены полосы свечения, которые могут быть обусловлены переходами  $5d$ - $4f$  в  $Tm^{2+}$ . Длительность свечения  $5d$ - $4f$  находится в микросекундном диапазоне в  $CaF_2$ - $Tm$ ,  $BaF_2$ - $Tm$  и миллисекундном диапазоне в  $SrF_2$ - $Tm$ .

### Литература

1. Z. J. Kiss, *Phys. Rev.* 127, 718-724 (1962).
2. O. M. ten Kate, K.W. Kramer, E. Van der Kolk, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 140, 115–120 (2015).
3. M.P. Plokker, W. Hoogsteen, R.D. Abellon, K.W. Krämer, E. van der Kolk, *J. Lumin.*, 225, 117327 (2020).

## ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОПОРОШКОВ ОКСИДА ЦИНКА, ПОЛУЧЕННЫХ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИЕЙ В ВОЗДУХЕ

*О. А. Реутова, В. А. Светличный*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Томск, Россия, [reutovaolesya@mail.ru](mailto:reutovaolesya@mail.ru)*

Полупроводниковые гетерогенные фотокатализаторы активно используются для решения задачи по очистке окружающей среды. Они способны под действием УФ и видимого излучения образовывать электронно-дырочную пару, участвующую в окислительно-восстановительных процессах. Одним из наиболее перспективных фотокатализаторов является оксид цинка.

Известно, что на каталитические свойства наноматериалов большое влияние оказывают метод и условия их синтеза. В данной работе исследуемые образцы оксида цинка были получены импульсной лазерной абляцией (ИЛА) в воздухе мишени металлического цинка излучением Nd:YAG лазера (1064 нм) наносекундной (7 нс) и пикосекундной (100 пс) длительности. Плотность мощности ( $W$ ) излучения на поверхности мишени варьировалась от 0,18 до 26,5 ГВт/см<sup>2</sup>. В результате изменялся фазовый состав частиц, их размеры и морфология. При нс импульсах частицы состояли из многогранников ZnO со структурой вюрцита с примесью металлической фазы. При повышении  $W$  до 0,4–0,6 МВт/см<sup>2</sup> в образцах появлялась фаза гидроксинитрата цинка  $Zn_5(OH)_8(NO_3)_2 \times 2H_2O$ . Она образуется в абляционной плазме в результате взаимодействия ионизованного цинка ZnII с возбужденными атомарными азотом и кислородом в присутствии паров воды. Повышение  $W$  излучения при переходе к пс импульсам увеличивает долю ZnII в плазме и стимулирует образование различных соединений цинка с азотом:  $Zn_5(OH)_8(NO_3)_2 \times 2H_2O$ ,  $Zn_3(OH)_4(NO_3)_2$ ,  $Zn(OH)(NO_3) \times H_2O$ . При  $W = 26,5$  ГВт/см<sup>2</sup> доля ZnO в образцах составляет всего 6%, а наночастицы имеют форму палочек.

Исследование фотокаталитической активности полученных нанопорошков в реакции фоторазложения модельного органического красителя родамина Б при облучении светодиодами с длиной волны 375 нм показало, что гидроксинитраты цинка не проявляют фотокаталитической активности. Лучшие результаты получаются для нанопорошков, преимущественно состоящих из фазы ZnO. Фотокаталитическая активность коррелирует с размером частиц, а термообработка при температурах 200–400°C увеличивает активность за счет очистки поверхности катализатора.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (Грант № 19-73-30026).*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ КСАНТЕНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ В КОМПЛЕКСЕ С ХИТОЗАНОМ

А. В. Рогова, Ф. Н. Томилин, М. А. Герасимова, Е. А. Слюсарева

*Сибирский федеральный университет  
Красноярск, Россия, [arogova1927@gmail.com](mailto:arogova1927@gmail.com)  
Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН  
Красноярск, Россия, [felixnt@gmail.com](mailto:felixnt@gmail.com)*

Многоступенчатая диссоциация ксантеновых красителей, приводит к их разнообразию ионных форм в широком интервале pH. В связи с этим флуоресцентные красители (эозин, эритрозин) широко используются для создания биосенсоров, в том числе для создания нового материала в флуоресцентной визуализации [2]. В настоящее время большой интерес науки и промышленности приводит к использованию полимеров природного происхождения, таких как хитозан. Данный полимер обладает рядом свойств, это и высокая биологическая активность, и совместимость с тканями человека. При связывании хитозана и флуоресцентных красителей можно визуализировать биологически активные вещества и системы доставки лекарственных средств.

В данной работе исследование спектральных характеристик эозина и эритрозина с хитозаном смогут дать новые представления о свойствах данных красителей. Теоретические расчёты проводились при помощи метода функционала плотности в B3LYP функционале и в базисе aug-cc-pVDZ. Были смоделированы эозин и эритрозин в комплексе с хитозаном. Была проведена оптимизация геометрии различных ионных форм эозина и эритрозина, рассчитаны спектры поглощения с учётом растворителя (модель Solvation Model Density) при взаимодействии с хитозаном, с использованием программы GAMESS [1]. Полученные электронные спектры ионных форм красителей, связанных с взаимодействием аминогруппы хитозана, сравнили с экспериментально измеренными спектрами. Выявлены спектральные изменения красителей, обусловленные переносом протона в основном состоянии.

*Работа поддержана грантом 19-02-00450-а.*

### *Литература*

1. H. Zheng, X.-Q. Zhan, Q.-N. Bian, and X.-J. Zhang, *Chem. Commun.*, 49, 429-447 (2013).
2. F.N. Tomilin, A.V. Rogova, E.V. Kaufman, A.S. Drevolsky, M.A. Gerasimova, E.A. Slyusareva, *Proc. SPIE*, 11322, 29, (2019).

## РЕАЛИЗАЦИЯ ОДНОКУБИТОВЫХ КВАНТОВЫХ ОПЕРАЦИЙ С ОДИНОЧНЫМИ АТОМАМИ РУБИДИЯ В ДВУХ ОПТИЧЕСКИХ ДИПОЛЬНЫХ ЛОВУШКАХ

И. И. Рябцев, И. И. Бетеров, Е. А. Якшина, Д. Б. Третьяков,  
В. М. Энтин, Н. В. Альянова, К. Ю. Митянин, И. Н. Ашкарин,  
И. Г. Неизвестный, А. В. Латышев, А. Л. Асеев

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирск, Россия, [ryabsev@isp.nsc.ru](mailto:ryabsev@isp.nsc.ru)  
Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет, Новосибирск, Россия*

В докладе дан краткий обзор современного состояния дел в области экспериментальной квантовой информатики с одиночными нейтральными атомами в массивах оптических дипольных ловушек, а также представлены экспериментальные результаты по реализации однокубитовых квантовых операций с одиночными атомами Rb в двух оптических дипольных ловушках Rb, полученные в последние годы в Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова (ИФП) СО РАН.

Одним из перспективных вариантов построения квантового компьютера является использование одиночных нейтральных атомов в качестве квантовых битов (кубитов) [1,2]. Такие атомы, захваченные с помощью лазерного излучения в оптические решетки или ловушки с периодом в несколько микрон, образуют квантовый регистр. В случае атомов щелочных металлов рабочими уровнями кубитов являются два сверхтонких подуровня основного состояния. Инициализация кубитов осуществляется с помощью метода оптической накачки. Однокубитовые операции выполняются на основе СВЧ или рамановских переходов между уровнями кубита. Выполнение более сложных двухкубитовых операций достигается путем кратковременного лазерного возбуждения атомов в высоковозбужденные (ридберговские) состояния, для которых характерно сильное диполь-дипольное взаимодействие между атомами. Квантовые алгоритмы должны выполняться в виде последовательности одно- и двухкубитовых квантовых операций.

В ИФП СО РАН создается демонстратор квантовых операций на основе одиночных атомов Rb в массивах оптических дипольных ловушек. Для захвата атомов применяется сфокусированное излучение с длиной волны 850 нм. Ловушки сформированы длиннофокусным объективом, расположенным снаружи вакуумной камеры магнитооптической ловушки. Регистрация одиночных атомов осуществляется по сигналу резонансной флуоресценции с помощью sCMOS видеокамеры.

В экспериментах с одной ловушкой [3] были реализованы захват и удержание одиночного атома на временах до 50 с, оптическая накачка по-

ляризованным лазерным излучением, СВЧ-переходы между двумя сверхтонкими подуровнями основного состояния и измерение квантового состояния атома методом выталкивания из ловушки. Получены осцилляции Раби на "часовом" СВЧ-переходе  $5S_{1/2}(F=2, M_F=0) \rightarrow 5S_{1/2}(F=1, M_F=0)$  между двумя рабочими уровнями кубита с частотой до 4,2 кГц, контрастом до 95% и временем когерентности до 3 мс. Данные осцилляции соответствуют реализации двух базовых однокубитовых квантовых операций (вентилля Адамара и вентилля NOT) из различных начальных состояний кубита со средней точностью  $95,2 \pm 3$  %.

В следующем эксперименте [4] для формирования двух ловушек излучение с длиной волны 850 нм отражалось от пространственного модулятора света (spatial light modulator, SLM), который создавал фазовую маску и преобразовывал волновой фронт луча таким образом, чтобы в фокусе объектива формировался набор максимумов интенсивности, соответствующий двум или нескольким дипольным ловушкам [2]. Индивидуальная адресация осуществлялась с помощью дополнительного сфокусированного лазерного излучения, вызывающего дифференциальный световой сдвиг частоты СВЧ-перехода. При включении лазера адресации вероятность СВЧ-перехода в адресуемом атоме подавлялась до среднего уровня ниже 5%. Осцилляции Раби, оставшиеся в другом атоме, имели прежний контраст и соответствовали реализации индивидуально адресуемых базовых однокубитовых квантовых операций. После нормировки на погрешность приготовления и измерения квантовых состояний кубитов получена оценка для точности отдельных вращений кубитов  $97 \pm 3$  %.

*Работа была поддержана грантом РФФИ 19-52-15010 и Новосибирским государственным университетом.*

### *Литература*

1. И.И. Рябцев, И.И. Бетеров, Д.Б. Третьяков, В.М. Эптин, Е.А. Якшина, *УФН*, 182 (2), 206-219 (2016).
2. И.И. Рябцев, К.Ю. Митянин, И.И. Бетеров, Д.Б. Третьяков, В.М. Эптин, Е.А. Якшина, Н.В. Альянова, И.Г. Незвесгий, *Льотметрия*, 56 (5), 72-80 (2020).
3. И.И. Бетеров, Е.А. Якшина, Д.Б. Третьяков, В.М. Эптин, Н.В. Альянова, К.Ю. Митянин, И.И. Рябцев, *ЖЭТФ*, 159 (3), 409-423 (2021).
4. И.И. Бетеров, Е.А. Якшина, Д.Б. Третьяков, В.М. Эптин, Н.В. Альянова, К.Ю. Митянин, А.М. Фарук, И.И. Рябцев, *Квантовая электроника*, 51 (6), 464-472 (2021).

## УШИРЕНИЕ БЕСФОНОННЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ОРГАНИЧЕСКИХ МОЛЕКУЛ В СТЕКЛООБРАЗНЫХ МАТРИЦАХ: ВЛИЯНИЕ КВАДРАТИЧНОГО ЭЛЕКТРОН-ФОНОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

А. О. Савостьянов<sup>1-3</sup>, И. Ю. Еремчев<sup>2,3</sup>, Lothar Kador<sup>4</sup>, А. В. Наумов<sup>1-3</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт спектроскопии РАН

Москва, Троицк, Россия, [savostianov.a@isan.troitsk.ru](mailto:savostianov.a@isan.troitsk.ru)

<sup>4</sup>University of Bayreuth, Institute of Physics, Bayreuth, Germany

Данная работа посвящена обсуждению процессов уширения бесфононных спектральных линий (БФЛ) одиночных примесных молекул, внедренных в неупорядоченные твердотельные матрицы (органические стекла, стеклообразные полимеры и т. д.). Хорошо известно, что БФЛ примесных молекул-хромофоров в таких средах подвержены процессам спектрального уширения уже при  $T > 1-2$  К вследствие взаимодействия электронной подсистемы хромофора с элементарными возбуждениями среды (как правило, выделяют вклады туннельных систем и фононов) [1]. Такие процессы оказывают серьезное влияние, например, на эффективность применения органических молекул в качестве источников однофотонного излучения [2], а потому требуют детального изучения.

Хотя влияние электрон-фононного (ЭФ) взаимодействия на форму БФЛ исследуется уже более полувека, до сих пор остается невыясненным, почему лишь отдельные колебания вносят существенный вклад в процессы уширения БФЛ, в то время как вклад других пренебрежимо мал. Особый интерес здесь представляют неупорядоченные материалы – стекла, колебательная динамика которых при низких температурах значительно усложнена существованием бозонного пика, микроскопическая природа которого по-прежнему является предметом дискуссий. На сегодняшний день общепризнанной является точка зрения, что именно колебания с частотами порядка частоты бозонного пика ( $\sim 5-50$  см<sup>-1</sup> для органических стекол и замороженных полимеров), локализованные в нанометровых областях материала, вносят основной вклад в уширение БФЛ примесных хромофоров [3]. Для проверки этого утверждения в работе проанализированы БФЛ одиночных молекул (ОМ) риленового ряда (тетра-третбутилтеррилен – ТБТ), внедренных в пленки замороженного полиизобутилена (ПИБ) в температурном диапазоне 15–60 К. Основной упор сделан на применение теории ЭФ-взаимодействия, разработанной И. С. Осадько в рамках адиабатического и гармонического приближений [4]. Данный подход обладает значительным потенциалом для описания принципиально различных картин уширения БФЛ, так как в явном виде

задействует функции плотности колебательных состояний (ПКС), что позволяет выходить за рамки рассмотрения ЭФ-взаимодействия только с одной колебательной модой. В перспективе такой подход может быть использован для исследования структурных изменений в ближайшем окружении молекул-хромофоров, вызывающих значительное отклонение значений локальной ПКС от функции, усредненной по всему объему исследуемого материала.

*Исследование было выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научной темы «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике», а также в рамках проекта РФФИ № 20-03-00923.*

### *Литература*

1. C. Gooijer, F. Ariese, and J. W. Hofstraat, Shpol'skii spectroscopy and other site selection methods: applications in environmental analysis, bioanalytical chemistry, and chemical physics (Wiley-Interscience, New York, 2000), Chemical analysis, 156.
2. C. Polisseni, K. D. Major, S. Boissier, S. Grandi, A. S. Clark, and E. A. Hinds, *Opt. Express*, 24, 5615 (2016).
3. Y. G. Vainer, A. V. Naumov, M. A. Kol'chenko, and R. I. Personov, *Phys. Status Solidi B*, 241, 3480 (2004).
4. I. S. Osad'ko, *Phys. Rep.*, 206, 43 (1991).

## СПЕКТРЫ ТЕРМОДЕПОЛЯРИЗАЦИИ ФТОРИДОВ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ЛЕГИРОВАННЫХ ДУМЯ ПРИМЕСЯМИ ЛАНТАНОИДОВ

А. В. Самборский<sup>1</sup>, Е. А. Раджабов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет  
Иркутск, Россия, [arss-inc@hotmail.com](mailto:arss-inc@hotmail.com)

<sup>2</sup>Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН  
Иркутск, Россия

Изучены спектры термодеполяризации у гетерогенных лантаноидов в кристаллах фторидов щелочноземельных металлов, с двойной активацией лантаноидов одной группы (Eu, Yb) и лантаноидов другой группы (Nd, Ho, Er, Yb). Обе примеси лантаноидов вводили в равных концентрациях 0,01, 0,03, 0,1 моль. %. При выращивании  $M\text{eF}_2$ , дважды допированных различными лантаноидами в восстановительных условиях, только один из лантаноидов становился двухвалентным, а другой оставался трехвалентным [1,2].

Измерения проводились в криостате в вакууме при линейной скорости нагрева от 12 до 15 град/мин. Сначала образец поляризовали при комнатной температуре 2 кВ в течение 3 минут, а затем охлаждали до 85 К. Затем образец нагревали, снимая показания возникающего в образце тока.

У всех исследованных образцов наблюдалось рост пиков, уширение или расщепление пика в спектрах термодеполяризации. Для образцов  $\text{BaF}_2$  активированных  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Ho}^{3+}$  наблюдалось два пика при температурах 177 К и 191 К, обусловленные переориентацией диполей  $\text{Yb}^{3+} - \text{F}_i^-$  с энергией активации 0,46 эВ и  $\text{Ho}^{3+} - \text{F}_i^-$  с  $E_a = 0,5$  эВ соответственно. Для образцов  $\text{BaF}_2\text{-}0,1\%\text{EuF}_3\text{-}0,1\%\text{YbF}_3$  наблюдалось уширение пика при температурах 176 К со слабо выраженным пиком при температуре 185 К, обусловленные переориентацией диполей  $\text{Yb}^{3+} - \text{F}_i^-$  с  $E_a = 0,46$  эВ и  $\text{Eu}^{3+} - \text{F}_i^-$  с  $E_a = 0,48$  эВ соответственно. Переориентация диполей трехвалентного лантаноида – межузельного фтора происходит в интервале 170–200 К для диполей, в которых межузельный фтор находится в положении (NNN, симметрия  $\text{C}_{3v}$ ) в  $\text{BaF}_2$  [3]. Наблюдается различие температурных пиков для пар примесей, для диполей, имеющих в составе лантаноид с меньшим ионным радиусом, наблюдается более низкая температура пика и меньшая энергия активации.

### Литература

1. П.П. Феофилов, *Опт. и спектр.*, 12, № 4, 531–533, (1962).
2. E. Radzhabov, V. Kozlovsky, *Radiat. Meas.*, 122, 63–66, (2019).
3. E. Radzhabov, *Phys. Status Solidi B*, 257, 1–6, (2020).

## ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ПИРОЛИТИЧЕСКИХ ПЛЕНОК СУЛЬФИДА КАДМИЯ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ МЕДИ

Т. В. Самофалова, В. Н. Семенов, А. Н. Лукин,  
Д. А. Миннаков, Е. В. Попова

*Воронежский государственный университет  
Воронеж, Россия, [TSamofalova@bk.ru](mailto:TSamofalova@bk.ru)*

В работе проведены исследования люминесцентных свойств пленок сульфида кадмия, осажденных методом пиролиза аэрозоля растворов координационных соединений  $[\text{Cd}(\text{N}_2\text{H}_4\text{CS})_2\text{Br}_2]$  при температуре  $450^\circ\text{C}$  и легированных ионами меди с концентрацией  $10^{-7}$ – $10^{-3}$  ат. %. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) регистрировали при комнатной температуре с помощью экспериментальной установки, созданной на базе волоконно-оптического спектрометра USB4000-VIS-NIR фирмы Ocean Optics [1].

Проведенные исследования показали, что при введении легирующей примеси с концентрацией от  $10^{-7}$  до  $10^{-1}$  ат. % происходит увеличение интенсивности свечения по сравнению с нелегированными образцами (рис.). Максимальная интенсивность ФЛ наблюдается при концентрации активатора  $10^{-6}$  ат. %. Предложена структура центров люминесценции, образующихся в пленках CdS на основе собственных и примесных дефектов разного типа [2].

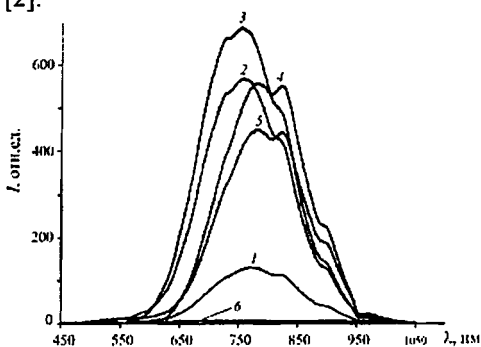


Рис. Спектры фотолюминесценции пленок CdS, легированных ионами меди с концентрацией: 1 – 0; 2 –  $10^{-7}$ ; 3 –  $10^{-6}$ ; 4 –  $10^{-5}$ ; 5 –  $10^{-4}$ ; 6 –  $10^{-3}$  ат. %.

### Литература

1. И.Н. Сарычева, О.О. Янушевнич, В.А. Шульгин, Д.А. Миннаков, В.М. Кашкаров, Патент России № RU 2464549 C1, 2012. Бюл. № 29 от 12.05.2011.
2. Т.В. Самофалова, В.Н. Семенов, Е.Ю. Проскурнина, Д.А. Миннаков, Е.В. Попова, Вестник Башкирск. ун-та, 25 (1), 87–92 (2020).

## ГЕНЕРАЦИЯ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА

Е. А. Сандабкин, Д. М. Лубенко, В. Ф. Лосев

*Институт сильноточной электроники СО РАН  
Томск, Россия, [kinesis52@mail.ru](mailto:kinesis52@mail.ru)*

Работа посвящена экспериментальному исследованию условий генерации ТГц излучения в лазерной плазме филамента, создаваемого сфокусированным ультракоротким импульсом Ti:Sapphire комплекса, работающего на длине волны 950 нм. Созданы различные варианты генераторов ТГц диапазона, в которых проведены исследования зависимости интенсивности, поляризации и расходимости излучения в схемах с одно- и двухцветной накачкой от величины энергии и поляризации излучения накачки, а также от направления приложенного внешнего электрического поля к плазме филамента. С помощью обрезных фильтров низких частот ТГц диапазона проведены оценки спектров генерируемого излучения. Обсуждаются оптимальные условия генерации ТГц излучения и возможные области его применения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-48-703027.*

## ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НА NV ЦЕНТРАХ В АЛМАЗЕ

А. Д. Саввин<sup>1</sup>, А. Е. Дормидонов<sup>1</sup>, Е. О. Сметанина<sup>1</sup>,  
В. П. Митрохин<sup>1</sup>, Е. И. Липатов<sup>2,3</sup>, Д. Е. Генин<sup>2,3</sup>, С. А. Потанин<sup>4,5</sup>,  
А. П. Елисеєв<sup>6</sup>, В. Г. Винс<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Томск, Россия

<sup>3</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

<sup>4</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
Москва, Россия

<sup>5</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
Москва, Россия

<sup>6</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН  
Новосибирск, Россия

<sup>7</sup>ООО «Велман», Новосибирск, Россия

Долгое время кристаллы алмаза с NV центрами (азот-вакансия) рассматривались как потенциальная лазерная среда. Данные центры существуют в двух состояниях: отрицательно заряженной  $NV^-$  и нейтральном  $NV^0$ . В данной работе подробно исследованы свойства образца ВДВТ алмаза с двумя областями роста с различным соотношением концентраций  $NV^0/NV^-$ . Область с преобладанием  $NV^0$  центров проявляет только наведенное поглощение, а зона роста с преобладанием  $NV^-$  центров обеспечивает усиление зондирующего излучения с коэффициентом усиления существенно превышающем потери на поглощение в невозбужденном образце, что является необходимым условием генерации. Лазерная генерация получена в линейном резонаторе, образованном плоскими зеркалами и фокусирующей линзой, обеспечивающей устойчивость генерируемой моды. Образец и линза располагались под углом Брюстера. Накачка осуществлялась наносекундным цугом пикосекундных лазерных импульсов длительностью 150 пс с длиной волны 532 нм и суммарной энергией до 400 мкДж. Длительность генерируемых импульсов около 1 нс, энергия 10 нДж, центральная длина волны 720 нм при ширине спектра 20 нм. Алмаз обладает непревзойденной теплопроводностью и почти нулевым коэффициентом теплового расширения, что в совокупности с большой шириной контура люминесценции  $NV^-$  центра позволяет надеяться на создание на его основе мощных перестраиваемых непрерывных и фемтосекундных лазеров, а также фемтосекундных усилителей с высокой средней мощностью. Продемонстрированная в работе лазерная генерация показывает реальность таких перспектив.

## СИНТЕЗ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ, СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ И КОМПОЗИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КАТАЛИЗЕ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИЕЙ В ЖИДКОСТИ

В. А. Светличный

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Томск, Россия, [svel@spti.tsu.ru](mailto:svel@spti.tsu.ru)*

В последние десятилетия в мире интенсивно развиваются высокоэнергетические методы синтеза наноматериалов с уникальными функциональными свойствами, которые востребованы в оптоэлектронике, биомедицине и катализе. Один из таких методов – импульсная лазерная абляция (ИЛА) в жидкости. К ее преимуществам относится возможность сразу получать наночастицы в виде коллоидных растворов, минимизация или отсутствие прекурсоров, возможность управления составом и структурой получаемых частиц. Экстремальные условия при ИЛА также позволяют получать высокодефектные структуры, промежуточные нестабильные фазы, сложные и композитные материалы, что не всегда доступно химическим методам синтеза.

В данной работе рассмотрены и реализованы различные подходы к синтезу сложных наноструктур на основе импульсного лазерного воздействия: абляция мишени в среде с прекурсором второго компонента; последовательное получение ИЛА частиц одного сорта, с последующей абляцией второй мишени в получившемся коллоидном растворе; облучение смеси предварительно полученных коллоидных растворов частиц разного сорта сфокусированным лазерным излучением; непосредственно абляция сложных мишеней (сплавов или композитов); пропитка или соосаждение предварительно полученных ИЛА коллоидов и т.д.

Продемонстрировано, что полученные в работе наноматериалы эффективно используются в гетерогенном катализе: низкотемпературном окислении CO и NO (Ox-Me, где Ox = CeO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Me = Ag, Au, Pt, Pd, Cu), гидрировании нитрофенола (Pt-Ag), селективном окислении глицерина и пропиленгликоля (Au-Ag, Pd-Ag, Pt-Ag, Pd-Au), а также при фотокаталитическом разложении органических загрязнителей и получении водорода (TiO<sub>2</sub>-Me, где Me = Pt, Ag, Bi<sub>x</sub>Si<sub>y</sub>O<sub>z</sub>, Bi<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub>), других каталитических процессах.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (Грант № 19-73-30026).*

## НА ПУТИ К КОМПАКТНОМУ ИТТЕРБИЕВОМУ ОПТИЧЕСКОМУ СТАНДАРТУ ЧАСТОТЫ

А. В. Семенко, Д. В. Сутырин, Г. С. Белотелов, С. Н. Слюсарев

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических  
и радиотехнических измерений, Московская обл., рп Менделеево, Россия  
[av\\_semenko@mail.ru](mailto:av_semenko@mail.ru)*

На данный момент лучшие оптические стандарты частоты (ОСЧ) достигли неопределенной систематической погрешности (НСП) ниже  $10^{-18}$ , что открывает новые возможности для применения подобных систем в прикладной и фундаментальной физике. В России и за рубежом разрабатываются мобильные ОСЧ, а следующим шагом будет разработка портативного ОСЧ.

Для измерения разницы высот двух расположенных в разных точках земной поверхности ОСЧнами разрабатывается мобильный ОСЧ на основе ультрахолодных атомов иттербия. Для измерения разницы высот с точностью 10 см необходимо достигнуть НСП воспроизведения единицы частоты  $1 \cdot 10^{-17}$ . Один из основных вкладов в НСП-штарковский сдвиг частоты лазера, формирующего оптическую решетку. В результате проведенных исследований было обнаружено, что нефилтрованное усиленное спонтанное излучение в ОСЧ на атомах иттербия вызывает световой сдвиг на уровне  $2 \cdot 10^{-14}$  [1].

Длины волн, необходимые для захвата и охлаждения атомов иттербия, позволяют использовать коммерческие диодные лазеры. Для данного проекта была разработана компактная схема распределения частотпервичного и вторичного охлаждения, детектирования и зеэмановского замедления. Модифицированная версия системы стабилизации частот (FSS) [2] позволяет одновременно стабилизировать частоты нескольких лазеров за счет их привязки к высокодобротному оптическому ULE резонатору.

В настоящий момент нами получена первичная магнито-оптическая ловушка при общей мощности охлаждающего излучения 14 мВт и при градиенте магнитного поля 50 Гс/см. Дальнейшее направление исследований – снижение градиента магнитного поля за счет использования двухцветной оптической ловушки [3].

### *Литература*

1. А.В. Семенко, Г.С. Белотелов, Д.В. Сутырин и др. *Квант электрон.* (в печати) (2021).
2. A. Nevsky, S. Alighanbari, Q.-F. Chen, I. Ernsting, S. Vasilyev, S. Schiller, G. Barwood, P. Gill, N.Poli, G.M. Tino, *Opt. Lett.*, 38, 4903-4906 (2013).
3. A. Kawasaki, B. Braverman, Q. Yu, V. Vuletic, *J. Phys. B*, 48, 15, 155302 (2015).

## СПЕКТРЫ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТОВ

О. И. Семенова<sup>1</sup>, В. А. Гайслер<sup>1</sup>, В. Е. Аникеева<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирск, Россия, [oisem@isp.nsc.ru](mailto:oisem@isp.nsc.ru)

<sup>2</sup>Институт спектроскопии РАН, Москва, Троицк

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Москва, Россия

Металлоорганические перовскиты  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$  ( $\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ) являются перспективными материалами для разработки оптоэлектронных устройств (тонкопленочных солнечных элементов, светонзлучающих диодов, датчиков гамма- и рентгеновского излучения). Целью данной работы являлось исследование оптоэлектронных свойств монокристаллов  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ , в которых анионом  $\text{X}$  являлись атомы брома и йода. Рост объемных кристаллов проводился из насыщенных растворов синтезированных порошков нужного стехиометрического состава при контролируемом медленном понижении температуры. Химический состав подтвержден с помощью методов РФЭС и ЭДС. Структура кристаллов была исследована с помощью рентгеновской дифракции. На рисунке представлены спектры фотолюминесценции (ФЛ) кристаллов  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ .

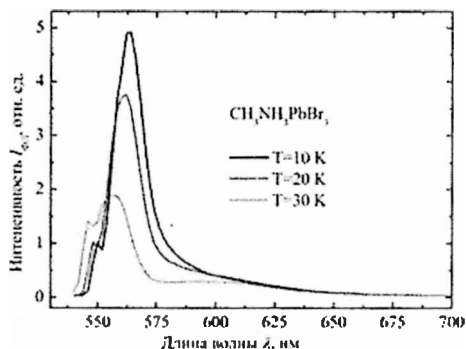


Рис. Спектры фотолюминесценции кристаллов  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ .

В спектрах проявляются особенности, относящиеся к рекомбинации экситонов, что позволяет оценить энергию связи экситона в  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ . Полученное значение энергии связи составляет 41 мэВ, что хорошо соответствует литературным данным 40,6 мэВ.

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НИХ

А. В. Сивак

*ООО «Научно-исследовательский центр «ТОПАЗ»,  
Москва, Россия, [topaz@inenergy.ru](mailto:topaz@inenergy.ru)*

В настоящее время созданы различные типы топливных элементов, отличающихся по диапазону рабочих температур, виду используемого топлива, типа электролита и т. д. Среди этого разнообразия наиболее коммерчески успешными технологиями являются топливные элементы на основе протонно-обменных мембран (английская аббревиатура – PEMFC) и твердооксидные топливные элементы (SOFC). На их долю приходится примерно 98% всего рынка топливных элементов, который распределен в отношении приблизительно 80 на 20 для PEMFC и SOFC, соответственно.

Несмотря на большой успех в коммерциализации PEMFC и SOFC, многие факторы, влияющие на производительность топливных элементов и ресурсное время их работы, требуют дальнейших исследований и разработок как материалов, используемых в PEMFC и SOFC, так и технологий создания данных типов энергетических систем. Спектроскопические методы представляют тут несомненный интерес, так как в большинстве своем являются не инвазивными и позволяют проводить комплексные исследования свойств функциональных материалов и «in-situ» измерения сложных электрохимических процессов.

В данном докладе будут представлены результаты наших работ и работ наших коллег по изучению транспортных характеристик электролитов для PEMFC и SOFC и по изучению электрохимических реакций, происходящих при работе данных типов топливных элементов. Для проведения этих исследований были задействованы различные спектроскопические методы, широко используемые в физике конденсированного состояния.

Использование полученных экспериментальных данных совместно с компьютерными расчетами позволили в hi-tech компании «Инэнерджи» разработать уникальную технологию по созданию ЭХГ на основе микротрубчатых SOFC. Данные портативные генераторы имеют выходную мощность 100 Вт и работают на бытовых баллончиках с пропан-бутановой смесью.

Для технологии PEMFC совокупность проведенных исследований, позволила нам создать широкую линейку батарей (стеков) топливных элементов: от малогабаритных с невысокой мощностью 5–10 Вт (типа батареи «крона»), до мощных стеков с производительностью до 50 кВт, используемых в транспорте и в беспилотных летательных аппаратах. Такая широкая линейка продукции PEMFC по габаритам и мощности является уникальной и в настоящее время создана только в «Инэнерджи».

## СИНТЕЗ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ $Y P_x V_{1-x} O_4$

Б. В. Сладкопевцев<sup>1</sup>, Е. В. Томина<sup>2,1</sup>, А. Н. Лукин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Воронежский государственный университет  
Воронеж, Россия, [dp-kmins@vandex.ru](mailto:dp-kmins@vandex.ru)*

<sup>2</sup>*Воронежский государственный лесотехнический университет  
им. Г. Ф. Морозова, Воронеж, Россия, [tomina-e-v@vandex.ru](mailto:tomina-e-v@vandex.ru)*

Создание смешанных кристаллофосфоров на основе  $YVO_4$  является одним из способов улучшения, изменения и контроля люминесцентных и сцинтилляционных свойств. В работе синтезировали наночастицы смешанных ванадат-фосфатов различного состава  $Y P_x V_{1-x} O_4$  методом соосаждения под воздействием микроволнового излучения с последующей ультразвуковой обработкой [1]. По данным РФА химически гомогенные образцы нанопорошка ванадат-фосфата формируются при  $pH = 9$ . На дифрактограммах наблюдается сдвиг рефлексов ванадат-фосфатов относительно нелегированного образца  $YVO_4$  в сторону увеличения угла  $2\theta$ , что характерно в случае замещения ионов  $V^{5+}$  ( $0,54 \text{ \AA}$ ) ионами с меньшим ионным радиусом  $P^{5+}$  ( $0,38 \text{ \AA}$ ) и подтверждает встраивание фосфора с кристаллическую решетку ванадата иттрия, приводящее к некоторому ее искажению. По данным ПЭМ размер частиц ванадат-фосфата иттрия не превышает 50 нм.

Согласно литературным данным [2] люминесценция беспримесного ванадата иттрия представлена широкой полосой в области 350–600 нм, природа которой связана с электронными переходами с переносом заряда в комплексах  $(VO_4)^{3-}$ .

Результаты анализа люминесценции образца ванадат-фосфата состава  $Y P_{0,1} V_{0,9} O_4$  показывают, что при возбуждении с  $\lambda = 313 \text{ нм}$  для него характерна широкая полоса излучения 400–600 нм с достаточно интенсивными полосами при  $\lambda = 484 \text{ нм}$  (голубой цвет) и 575 нм (желто-зеленый цвет). Это может быть обусловлено как допированием матрицы ванадата иттрия фосфором, так и центрами, сформированными дефектами структуры в  $YVO_4$ , образующимися при допировании.

### Литература

1. Е.В. Томина, И.Я. Минтгова, Н.А. Бурцева, Б.В. Сладкопевцев. Способ синтеза люминофора на основе ортованадата иттрия: патент на изобретение № 2548089.
2. Y. Fujimoto, T. Yanagida, Y. Yokota, V. Chani, V. V. Kochurikhin, A. Yoshikawa, *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A.*, 635, 53-56 (2011).

## МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИЕ КАРКАСЫ: ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ

Е. А. Слюсарева

*Сибирский федеральный университет  
Красноярск, Россия, [E.Slyusareva@sfu-kras.ru](mailto:E.Slyusareva@sfu-kras.ru)*

Металлоорганические каркасы (МОК) – класс кристаллических пористых материалов, синтезированных посредством самосборки органических лигандов и неорганических металлических узлов – ионов или кластеров (рис.). Последние несколько лет МОК были в центре внимания из-за их структурной универсальности и настраиваемой пористости, которые обеспечивают многообещающие перспективы сразу в нескольких направлениях, таких как хранение и разделение газов, сенсорика, доставка и пролонгированное действие лекарств, катализ.

В лекции будут рассмотрены вопросы синтеза, химического состава МОК, их уникальные физические свойства: высокая (до 90 %) пористость, большая (до 6000 м<sup>2</sup>/г) удельная поверхность, регулируемая форма пор, упругость каркаса с возможностью изменения размеров пор и т.д.

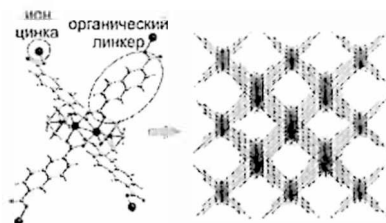


Рис. МОК и его структурная единица

Особое внимание будет уделено оптическим свойствам в ИК и видимой области спектра. Показана возможность анализа фазовых переходов МОК при различных внешних воздействиях на основе обнаруженных низкочастотных мод колебаний [1]. Фотолюминесцентные свойства МОК, обусловленные люминесценцией ионов металлов или органических лигандов, могут быть использованы в сенсорных приложениях. Аналитическим сигналом в этом случае выступает тушение/усиление интенсивности или ратнометрического сигнала люминесценции в присутствии аналита.

*Выполнено при поддержке РФФИ и Немецкого научно-исследовательского общества, проект № 21-52-12018.*

### Литература

1. A. Krylov, I. Senkovska, S. Ehrling, M. Maliuta, S. Krylova, E. Slyusareva, A. Vtyurin, S. Kaskel, *Chem. Comm.*, 59, 8269-8272 (2020).

## БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ В МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСАХ

Н. В. Слюсаренко<sup>1</sup>, А. С. Крылов<sup>2</sup>, Е. А. Слюсарева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Сибирский федеральный университет  
Красноярск, Россия, [sci\\_box@mail.ru](mailto:sci_box@mail.ru)*

<sup>2</sup>*Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН  
Красноярск, Россия*

Металл-органические каркасы (МОК) – новый класс гибридных материалов с упорядоченной структурой, которые состоят из ионов/кластеров металлов и органических линкеров. Ряд МОК обладают уникальной особенностью изменять размеры пор под влиянием внешних факторов среды, что приводит к существованию их «открытой» и «закрытой» фазы. Изменение фазы может происходить под действием давления [1] или растворителя, в котором диспергированы МОК. Благодаря пористой структуре данный класс композитов применяется для адсорбции газов, катализа, а также в системах доставки лекарств [2].

Люминесцирующие МОК могут быть использованы в сенсорных приложениях. Использование различных стратегий может приводить к формированию донорно-акцепторных пар с эффективным безызлучательным переносом энергии электронного возбуждения (БПЭЭВ). В качестве донора и акцептора могут выступать структуры МОК и внешние добавки-молекулы, попавшие в поры каркаса. Помимо расстояния между люминофорами эффективность переноса энергии будет зависеть от резонансных энергетических характеристик донорно-акцепторной пары, взаимной ориентации их диполей, соотношения доноров и акцепторов.

В работе выполнен расчет эффективности БПЭЭВ для случая передачи энергии в системе со сложной геометрией, содержащей множество доноров и акцепторов, с применением теории Фёрстера и численного метода Монте-Карло [3]. В качестве прототипа системы для наблюдения переноса энергии были выбраны люминесцирующие металл-органические каркасные структуры, содержащие ионы цинка и нафталин-2,6-дикарбоновую кислоту в качестве органического линкера, способные изменять геометрию пор и органический краситель с подходящими размерами и спектральными характеристиками. Предполагается, что краситель будет адсорбироваться в порах МОК, находящегося в «открытой» фазе, что в свою очередь приведет к достижению необходимого для наблюдения БПЭЭВ расстояния между донором и акцептором.

Расчеты выявили критерии достижения эффективного БПЭЭВ в изучаемой системе. Результаты работы будут использованы при экспериментальной реализации механизма переноса энергии в системе МОК-краситель для обнаружения аналитов или детектирования фазы, в который находится МОК.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Немецкого научно-исследовательского общества, проект № 21-52-12018.*

### *Литература*

1. A. Krylov, A. Vtyurin, P. Petkov, I. Senkovska, M. Maliuta, V. Bon, T. Heine, S. Kaskel, E. Slyusareva, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 19, 32099-32104 (2017).
2. A. Kirchon, L. Feng, H.F. Drake, E.A. Joseph, H.-C. Zhou, *Chem. Soc. Rev.*, 47, 8611-8638 (2018).
3. E. Deplazes, D. Jayatilaka, B. Corry, *J. Biomed. Optics*, 17, 011005 (2012).

## ФОТОПРИЕМНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ ДВОЙНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С Се:YAG МИКРОСЛОЕМ

В. И. Барышников, Ю. А. Суханова

*Иркутский государственный университет путей сообщения*

*Иркутск, Россия, [vibh@rambler.ru](mailto:vibh@rambler.ru)*

*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН*

*Иркутск, Россия, [vibh@rambler.ru](mailto:vibh@rambler.ru)*

Исследованы режимы работы, быстродействие и энергетические характеристики синих, желтых и белых светодиодов. Анализ данных спектроскопических и кинетических исследований показал, что при импульсном синем лазерном облучении светодиоды, излучающие желтый или белый свет, генерируют наносекундные электрические импульсы длительностью до 50 нс. По данным измерений минимальная длительность импульса излучения синего светодиода составила 40 нс, а белого около 50 нс. Более продолжительное затухание излучения у белого светодиода обусловлено тем, что желтая составляющая в спектре излучения связана с люминесценцией Се:YAG микрокристаллического слоя с известным временем затухания 50 нс.

Установлено, что энергии фотонов излучения синего лазера, частично проникающего в белом и желтом светодиодах сквозь Се:YAG микрокристаллический слой, достаточно для генерации электронно-дырочных пар на высокоэнергетическом межзонном переходе двойной InGaN гетероструктуры и, следовательно, генерации электрических импульсов в фотодиодном режиме с сопутствующим интенсивным излучением Се:YAG слоя. Вместе с тем, при подаче зеленых импульсов  $2\omega$ :YAG:Nd лазера (532 нм; 1,0 Вт/см<sup>2</sup>; 10 нс) на выходе белого, желтого и синего светодиодов электрические импульсы не наблюдаются.

Используя синее лазерное излучение с частотой импульсов до 10 МГц, появляется возможность с большого расстояния фиксировать факт попадания лазерного луча на светодиоды по яркому свечению их Се:YAG микрокристаллических структур и тем самым поддерживать в них стабильную генерацию электрических импульсов при передаче информации и программировании светодиодных матриц информационных табло, светофоров и экранов.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ОДИНОЧНЫХ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В КРИСТАЛЛАХ LiF, СОДЕРЖАЩИХ ПРИМЕСЬ МАГНИЯ

Е. Ф. Мартынович<sup>1,2</sup>, Р. А. Тазиев<sup>1,2</sup>  
В. П. Дресвянский<sup>1</sup>, А. Л. Ракевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
Иркутск, Россия, [femto@bk.ru](mailto:femto@bk.ru)*

<sup>2</sup>*Иркутский государственный университет  
Иркутск, Россия*

Ранее нами в кристаллах фторида лития, выращенных в восстановительной атмосфере, облученных малой дозой рентгеновского излучения, зарегистрированы центры окраски, обладающие спектральной полосой люминесценции с максимумом  $\lambda_{\text{max}} = 800$  нм и с постоянной времени затухания  $26,5 \pm 1$  нс при комнатной температуре [1]. При увеличении дозы облучения концентрация этих центров быстро насыщается, в то время как концентрации известных собственных центров окраски продолжают возрастать.

Это указывает на примесную природу данных центров окраски. Была исследована люминесценция единичных центров этого типа, которая имела мерцающий характер. Основную часть времени при непрерывном возбуждении этот центр находится в излучающем состоянии, которое прерывается редкими (один раз в несколько минут) мерцаниями секундной продолжительности.

В этой работе исследуется кристалл фторида лития с примесью 0,05 вес. % магния, выращенный на воздухе, т. е. в окислительной атмосфере. Как следует из данных, представленных на рисунке, спектральная полоса люминесценции исследуемых центров с максимумом при 800 нм, имеющая длительность около 27 нс, содержится и в этом кристалле. Контрольные эксперименты показали, что данный кристалл содержал в своем составе кислород, который обнаруживался по наличию люминесценции, возбуждаемой пятой гармоникой неодимового лазера (213 нм) в полосе с максимумом 419 нм, принадлежащей  $O^{2-}-V_a^+$  центрам [2]. Такой полосы люминесценции в кристалле, выращенном в восстановительных условиях, не было, что подтверждало отсутствие кислорода. Поскольку центры окраски с полосой 800 нм и длительностью 27 нс создаются в бескислородных кристаллах, можно заключить, что в их состав кислород не входит.

Продолжено исследование параметров траекторий интенсивности люминесценции одиночных центров окраски с указанными спектрально-временными характеристиками.

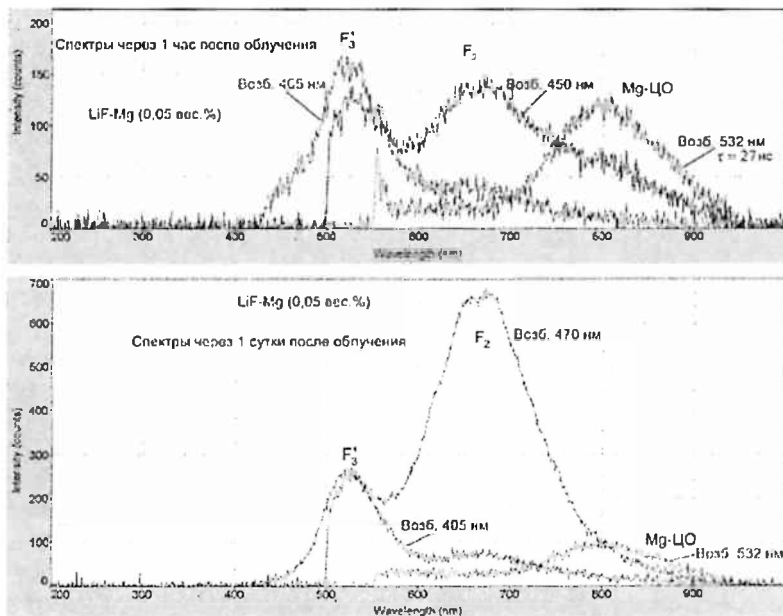


Рис. Спектры люминесценции в кристалле LiF-Mg (0,05 вес. %) через час после облучения рентгеновским излучением (сверху) и спустя сутки (снизу)

### Литература

1. E.F. Martynovich, R.A. Taziev, V.P. Dresvyanskiy, A.L. Rakevich. Luminescence of Single Color Centers Created in LiF Crystals at Low Dose of Irradiation. The article has been accepted by AIP Conference Proceedings. After it is published, it will be found at <https://aip.scitation.org/journal/anc>.
2. А.И. Непомнящих, Е.А. Раджабов, А.В. Егранов. Центры окраски и люминесценция кристаллов LiF. Новосибирск: «Наука», 1984. 113 с.

## ИЗЛУЧЕНИЕ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА И ИМПУЛЬСНАЯ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ

В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт

*Институт сильноточной электроники СО РАН  
Томск, Россия, [VFT@loi.hcei.tsc.ru](mailto:VFT@loi.hcei.tsc.ru)*

В докладе будут представлены результаты исследований спектральных, амплитудно-временных и пространственных характеристик излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ), полученные за последние годы в ИСЭ СО РАН при возбуждении прозрачных веществ потоком электронов с энергиями десятки-сотни кэВ, см. также работы [1–4]. Интерес к изучению характеристик излучения Вавилова – Черенкова (ИВЧ) возрос в связи с работами по созданию детекторов убегающих электронов (УЭ) для установок типа ТОКАМАК. Будут приведены спектры ИВЧ в алмазе (природном и синтетическом), кварцевом стекле, сапфире, лейкосапфире, сообщается о регистрации ИВЧ в  $MgF_2$ ,  $Ga_2O_3$  и других прозрачных образцах. Проведено сравнение спектров и амплитудно-временных характеристик ИВЧ и импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) при различных энергиях электронов. Для ряда образцов представлены результаты расчётов спектров ИВЧ с учетом дисперсии показателя преломления, а также распределения электронов пучка по энергиям и уменьшения энергии электронов в процессе их торможения в веществе образцов. Исследован спектр излучения полиметилметакрилата (ПММА), который используется в качестве материала для радиаторов в черенковских детекторах и световодов, передающих излучение в сцинтилляционных дозиметрах, а также в качестве пластиковой основы в органических сцинтилляторах.

### *Литература*

1. V.F. Tarasenko, V.I. Oleshko, M.V. Erofeev, E.I. Lipatov, D.V. Beloplotov, M.I. Lomaev, A.G. Burachenko, E.Kh. Baksht, *J. Appl. Phys.*, 125, 244501 (2019).
2. V.F. Tarasenko, E.Kh. Baksht, D.V. Beloplotov, A.G. Burachenko, M.I. Lomaev, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 59, SHND01 (2020).
3. В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт, М.В. Ерофеев, *Письма в ЖТФ*, 47 (6), 7-10, (2021).
4. В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт, М.В. Ерофеев, А.Г. Бураченко, *Опт. и спектр.*, 129 (6), 569-598, (2021).

## ФОРМИРОВАНИЕ $F_3^+$ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В ГАММА-ОБЛУЧЕННОМ ФТОРИДЕ ЛИТИЯ, ПОДВЕРГНУТОМ МЕХАНИЧЕСКОМУ ДИСПЕРГИРОВАНИЮ

Н. Т. Максимова, С. Ю. Теренин

*Иркутский государственный университет  
Иркутск, Россия, Natmax\_2001@mail.ru*

Создание новых систем аккумуляции и хранения энергии, в том числе не наносящих вред окружающей среде, является одной из важнейших проблем, стоящих перед исследователями. В качестве таких систем в настоящее время заметный интерес представляют электрохимические конденсаторы с двойным электрическим слоем [1]. Размеры двойного электрического слоя (ДЭС) крайне малы, в то время как площадь развитой поверхности дисперсной среды огромна. Такое соотношение предполагает возможность колоссального накопления энергии, заключенной в небольших объемах. О возможности запасаения и долговременного хранения электретной энергии в системе диспергированный кристалл фторида лития – водная пленка сообщалось нами в [2].

Целью настоящего исследования являлся поиск путей повышения энергии накапливаемой данной системой. Монокристаллы LiF выращивались по методу Киропулоса. Образцы кристаллов подвергались облучению гамма-квантами. Электрическая активность материала достигалась путем механической активации – механического дробления монокристалла с последующей селекцией микрочастиц. Исследования проводились методами абсорбционной, люминесцентной спектроскопии, а также методом термостимулированных токов. В гамма-облученных кристаллах LiF исследованы процессы взаимодействия радиационных дефектов со структурными дефектами, формирующимися в результате механической активации. Обнаружен аномальный рост положительно заряженных агрегатов –  $F_3^+$  центров. Установлено, что возрастание эффективности положительно заряженных центров на поверхности твердой фазы (кристаллитов) влечет за собой формирование отрицательного заряда в жидкой фазе, что, в целом, повышает величину заряда ДЭС среды. Полученный результат является одним из возможных путей влияния на величину электрического поля, генерируемого системой.

### *Литература*

1. M. Jayalakshmi, K. Balasubramanian, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 3, 1196–1217 (2008).
2. N.T. Maksimova, S.Yu. Terenin, A.V. Mitova, I.L. Urakov, L.I. Ruzhnikov, *AIP Conf. Proc.*, 2069, 040005 (2019).

## ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВЫХ ЯМ $\alpha$ -Sn/Ge МЕТОДАМИ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

В. Н. Трухин<sup>1</sup>, И. А. Мустафин<sup>1</sup>, F. V. Kusmartsev<sup>2,3</sup>,  
A. Kusmartseva<sup>2</sup>, Y. Liu<sup>3</sup>, B. Zhang<sup>3</sup>, Y. Luo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе  
Санкт-Петербург, Россия, [valembr@mail.ru](mailto:valembr@mail.ru)

<sup>2</sup>Loughborough University, Epinal Way, Loughborough, United Kingdom

<sup>3</sup>Micro/Nano Fabrication Laboratory, Microsystem & Terahertz Research Center,  
China Academy of Engineering Physics, Chengdu, Sichuan, China

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования фототоков в наноструктурах на основе квантовых ям  $\alpha$ -Sn/Ge при возбуждении фемтосекундными оптическими импульсами, и индуцированного этими фототоками терагерцового излучения. Данная структура представляет интерес с точки зрения получения нового топологического материала [1]. Исследуемые образцы представляли собой нанометровые слои Ge и  $\alpha$ -Sn, выращенные на поверхности SiO<sub>2</sub>. Терагерцовое излучение регистрировалось с помощью метода электрооптического сэмплирования, регистрация фототоков осуществлялась путем измерения фотоэдс на контактах, нанесенных на верхнюю поверхность образца. Исследование свойств генерируемого ТГц излучения от образцов на основе пленок Ge или  $\alpha$ -Sn показало картину, схожую с генерацией от объемного InAs, как для ТЕ, так и для ТМ поляризаций возбуждающего импульса. При исследовании образцов, содержащих одну или несколько квантовых ям  $\alpha$ -Sn/Ge было показано, что при изменении поляризации возбуждающего света от ТМ к ТЕ – амплитуда ТГц импульса изменяет свой знак и зависимость амплитуды ТГц импульса от угла поворота вектора поляризации имеет синусоидальный характер. При смене направления распространения света наблюдалась инверсия знака фототока. Зависимость максимальной амплитуды ТГц импульса от интенсивности возбуждающего света имела линейный характер. Наблюдаемые зависимости фототока от поляризации света, направления волнового вектора и интенсивности возбуждаемого света присущи току увлечения. Расчет тока увлечения на основе феноменологического подхода подтвердил соответствие рассчитанных зависимостей с экспериментальными данными. Природа процесса ТГц генерации в  $\alpha$ -Sn/Ge, по-видимому, обусловлена проявлением асимметрии в импульсном пространстве неравновесных электронов при межзонных переходах в наноструктуре, являющую собой новый класс топологических материалов.

### Литература

1. N.P. Armitage, E.J. Melc, A. Vishvanath, *Rev. Mod. Phys.* 90, 015001 (2018).

## НОВЫЕ ОПТИЧЕСКИ ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРЫ

А. Е. Тулупова, В. Шворчик, О. Лютаков

*University of Chemistry and Technology  
Prague, Czech Republic, [tulupova@vscht.cz](mailto:tulupova@vscht.cz)*

Нами был предложен новый подход в создании суперконденсаторов, которые позволяют переключать процессы зарядки-разрядки под внешним оптическим воздействием. С постоянным увеличением потребления энергии в повседневной жизни исследователи ищут новые альтернативные системы для ее эффективного хранения. В последние годы, для достижения этой цели, разрабатываются такие устройства как суперконденсаторы, которые обладают высокой степенью заряда-разряда, высокой удельной мощностью, длительным сроком службы и выдающейся циклической стабильностью. Нами был изготовлен материал на основе высокопористых углеродных наноструктур скомбинированных со светочувствительными веществами на базе фотон-переключаемых органических молекул. Предложенный подход позволяет оптически переключать свойства материала, в том числе по требованию менять поверхностный заряд, диэлектрическую проницаемость и сопротивление на границе электролит-твердая фаза. Таким образом, созданная фоточувствительная электрода дает возможность осуществлять внешнее управление зарядом/разрядом суперконденсатора. В числе потенциальных применений находятся как оптически-управляемое продолжение времени разрядки суперконденсатора (выравнивание электрических токов во внешней цепи), так и получение электрических высокоомощностных импульсов.

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ УГЛЕРОДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

А. А. Тютрин<sup>1</sup>, Р. Вэнг<sup>2</sup>, Е. Ф. Мартынович<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
Иркутск, Россия, [tyutrin\\_aleks@gmail.com](mailto:tyutrin_aleks@gmail.com)*

<sup>2</sup>*College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical  
Technology, Beijing, People's Republic of China*

<sup>3</sup>*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

Бурное развитие нанотехнологий во многих областях науки и техники зависит от постоянного поиска и синтеза новых передовых наноразмерных объектов и материалов. В настоящий момент внимание многих исследователей сфокусировано на углеродных квантовых точках (УКТ) благодаря их уникальным свойствам, которые нашли свое применение в светоизлучающих устройствах, в системах биологической визуализации, в устройствах накопления энергии и во многих других сферах.

Цель работы – исследование люминесцентных свойств углеродных квантовых точек, сформированных плазменным методом.

Углеродные квантовые точки были синтезированы путем плазменной обработки раствора глюкозы при атмосферном давлении и комнатной температуре. Концентрация квантовых точек контролировалась изменением времени обработки раствора глюкозы плазменным методом.

Спектральные и кинетические характеристики синтезированных квантовых точек изучались с помощью конфокального сканирующего люминесцентного микроскопа с временным разрешением и коррелированного по времени счета одиночных фотонов MicroTime 200 (PicoQuant GmbH), оснащенного спектрометром Ocean Optics QE65000.

Результаты измерений показали, что спектры излучения представляют собой широкие неэлементарные полосы. Максимумы этих полос располагались при 476, 500, 547 и 580 нм, когда возбуждающее излучение имело длины волн 375, 405, 470 и 532 нм, соответственно. В кинетике люминесценции обнаружены три экспоненциальных компонента с постоянными времени затухания 0,65, 2,2 и 6,2 нс. Образование этих компонентов не связано с размерным эффектом, который обычно определяет основные свойства квантовых точек. Наличие этих компонентов связано с образованием трех различных типов центров люминесценции с различной вероятностью квантовых переходов.

*Работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 года (№ проекта 02-43-2021-0004).*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТНОГО $\text{TiO}_2$ , ПОЛУЧЕННОГО ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИЕЙ В ВОДЕ

Ж. П. Федорович, Е. Д. Фахрутдинова, В. А. Светличный

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Томск, Россия, [zhanna.fedorovich.99@gmail.com](mailto:zhanna.fedorovich.99@gmail.com)*

Импульсная лазерная абляция (ИЛА) – интенсивно развивающийся высокоэнергетический метод синтеза наноструктур с уникальными свойствами. Так ИЛА перспективен для синтеза полупроводниковых материалов, применяющихся в фотокаталитических процессах. Одним из наиболее популярных фотокатализаторов является диоксид титана, так как он обладает высокой фотоактивностью, фотоустойчивостью, экологической безопасностью и доступностью. К недостаткам  $\text{TiO}_2$  относится его активность только в УФ области, поэтому перспективной задачей является сенсибилизация диоксида титана к видимой области спектра. Этого можно достигнуть путем создания собственных дефектов, которые приводят к изменению оптических, а, следовательно, и фотокаталитических свойств  $\text{TiO}_2$ . Одним из способов получения дефектного диоксида титана является ИЛА. В данной работе диоксид титана получали абляцией металлической  $\text{Ti}$  мишени излучением Nd:YAG лазера (1064 нм, 7 нс, 20 Гц, 160 мДж/импульс). В результате ИЛА образовывался темно-синий коллоидный раствор, который дополнительно облучался сфокусированным лазерным излучением с целью влияния на структурные и оптические свойства частиц  $\text{TiO}_2$ . Затем коллоидные растворы высушивались и подвергались термической обработке при температурах 250–800 °С для дальнейших исследований.

По данным рентгенофазового анализа полученные образцы являются рентгеноаморфными, при отжиге приобретая преимущественно кристаллическую структуру анатаза, с небольшой примесью рутила. Дополнительное облучение приводит к увеличению фазы анатаза в составе образцов. Исследование оптических свойств порошков методами спектроскопии диффузного отражения и фотолюминесценции показало, что все образцы имеют поглощение в видимой области спектра, связанное с наличием дефектов различной природы (вакансий по кислороду разного типа,  $\text{Ti}^{3+}$  в решетке и междоузлиях, автолокализованных экситонных состояний и др.), присутствие которых зависит от проведения лазерной постобработки и температуры прокаливания. Установлено, что полученные ИЛА катализаторы проявляют высокую фотокаталитическую активность, которая наблюдается даже после высокотемпературной обработки при 800 °С, что связано с присутствием в образцах ионов  $\text{Ti}^{3+}$ .

*Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 19-73-30026).*

## ФЛУОРЕСЦЕНТНО МЕЧЕННЫЙ РОДАМИНАМИ АРАБИНОГАЛАКТАН И ЕГО СВОЙСТВА

Е. В. Хименко, Н. Ю. Васильева  
Н. В. Слюсаренко, Е. А. Слюсарева

*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*  
[katrinflv@bk.ru](mailto:katrinflv@bk.ru)

Создание флуоресцентно меченых биополимеров является актуальным благодаря возможности их применения для визуализации процессов в клетках и для биосенсорных приложений. Такие биоконъюгаты должны обладать высокими значениями квантового выхода флуоресценции, коэффициента экстинкции, а также быть биосовместимыми.

В настоящей работе для создания биоконъюгатов использовались родаминовые красители и растительный полисахарид – сульфатированный арабиногалактан (САГ). Соединения получены методом ионного обмена катиона аммония в аммониевой соли САГ на катион родамина.

Сравнение свойств биоконъюгатов с водными растворами родамина В (рис., а) и родамина 6G (рис., б) проведено спектральными методами. Образование биоконъюгата привело к снижению квантового выхода флуоресценции до 10% для родамина В и 17% для родамина 6G. Значение коэффициента экстинкции составило  $2,7 \cdot 10^4$  и  $1,8 \cdot 10^4 \text{ M}^{-1} \text{ см}^{-1}$  для родамина В и родамина 6G соответственно. Изменение характеристик может являться результатом изменения конформации хромофора и его окружения. Тем не менее, получившиеся значения говорят о возможности применения новых биоконъюгатов в методах флуоресцентной диагностики.

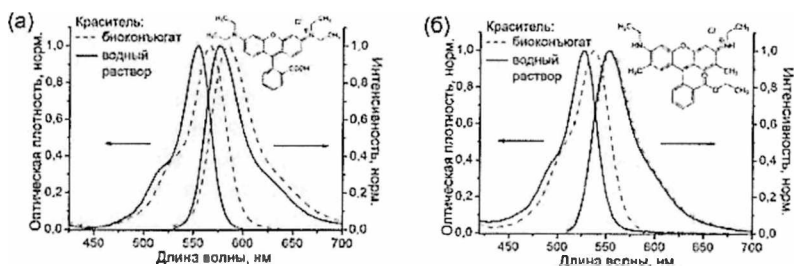


Рис. Спектры поглощения и флуоресценции родамина В (а) и родамина 6G (б). Вставки – структурная формула родамина В (а) и родамина 6G (б)

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание FSRZ-2020-0008).*

## НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРАСИТЕЛЯ МЕТИЛЕНОВОГО ГОЛУБОГО В ПРИСУТСТВИИ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА

Т. А. Чевычелова, А. И. Звягин, О. В. Овчинников

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия  
[t.chevychelova@rambler.ru](mailto:t.chevychelova@rambler.ru)

В последние годы активно исследуется проблема люминесценции молекул красителей и квантовых точек в условиях плазмон-экситонного взаимодействия, достигаемого в присутствии наночастиц металлов. Вероятные проявления этого взаимодействия в нелинейном поглощении лазерных импульсов пока остаются невыясненными.

В данной работе представлены результаты исследования влияния наночастиц золота на нелинейно-оптические свойства тиазинового красителя Метиленового Голубого (МВ). В смесях с молекулами МВ использовали сферические наночастицы Au размером 16 нм в оболочке из диоксида кремния (Au@SiO<sub>2</sub> NPs) с толщиной оболочки до 10 нм и плазмонным пиком 526 нм. Смеси получали при соотношении концентраций Au@SiO<sub>2</sub>NPs ( $6,0 \cdot 10^{-9}$  моль/л) и водного раствора МВ ( $2,5 \cdot 10^{-5}$  моль/л). На рисунке приведены спектральные и нелинейно-оптические свойства Au@SiO<sub>2</sub>NPs и МВ<sup>+</sup> и их смесей при соотношении  $3,2 \cdot 10^3$  и  $7,1 \cdot 10^4$  молекул красителя, приходящихся на одну наночастицу.

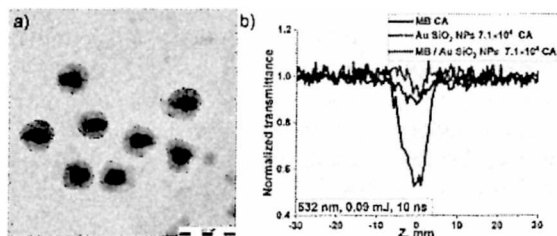


Рис. ПЭМ-изображение Au@SiO<sub>2</sub>NPs(a); Z-сканы, записанные в геометрии закрытой апертуры для исследуемых образцов(b)

Обнаружено тушение люминесценции полосы мономеров МВ. Одновременно методом Z-сканирования для 10 нс лазерных импульсов излучения второй гармоники YAG:Nd<sup>3+</sup> лазера (532 нм) показано, что в присутствии Au@SiO<sub>2</sub>NPs происходит и усиление обратного насыщенного поглощения, характерного для красителя МВ. Сделано предположение о том, что в присутствии плазмонных наночастиц увеличивается скорость интерспиновой конверсии в МВ, что проявляется в тушении флуоресценции МВ.

Работа поддержана грантом Президента РФ, проект НШ-2613.2020.2.

## КОГЕРЕНТНЫЕ РЕЗОНАНСЫ НАСЫЩЕННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ НА ПЕРЕХОДЕ С МОМЕНТАМИ УРОВНЕЙ $J=1/2$ В СПЕКТРОСКОПИИ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ВОЛН

Э. Г. Сапрыкин, А. А. Черненко

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия  
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирск, Россия, [chernen@isp.nsc.ru](mailto:chernen@isp.nsc.ru)*

На основе аналитических и численных решений уравнений для матрицы плотности исследуются физические процессы, формирующие спектры резонансов насыщенного поглощения на атомном переходе с моментом уровней  $J = 1/2$  в поле двух однонаправленных линейно поляризованных лазерных волн произвольной интенсивности.

Показано, что особенности спектров резонансов насыщенного поглощения и формирующие их процессы определяются направлением взаимной ориентации поляризаций световых волн, степенью открытости атомного перехода и интенсивностью насыщающей волны. Выявлены условия, при которых нелинейный резонанс носит исключительно когерентный характер, обусловленный либо релаксацией когерентных биений населенностей уровней [1; 2], либо индуцированной оптическими полями магнитной когерентностью уровней перехода. В этом случае основной вклад вносят уровни нижнего состояния, вклад переноса магнитной когерентности с уровней верхнего состояния на нижние в амплитуду резонанса мал и проявляется в виде добавки.

### *Литература*

1. Э.Г. Сапрыкин, А.А. Черненко, А.М. Шалагин, *ЖЭТФ*, 150, 238 (2016).
2. Э.Г. Сапрыкин, А.А. Черненко, *КЭ*, 49, 479 (2019).

## ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОДОЛЬНЫХ ТОКОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ПОТОКОМ ВНУТРИ-МАГНИТОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

А. А. Чибранов, А. Г. Березуцкий, М. А. Ефимов  
Ю. П. Захаров, В. Г. Посух, М. А. Руменских  
П. А. Трушин, И. Ф. Шайхисламов

*Институт лазерной физики СО РАН  
Новосибирск, Россия, [chibranov\\_25@mail.ru](mailto:chibranov_25@mail.ru)*

Несмотря на огромный интерес, проявляемый сегодня к изучению космических явлений, многие его процессы до сих пор остаются не изученными. Одним из таких процессов является формирование глобальной системы продольных токов в магнитосферах планет, в которых присутствуют плотные внутри-магнитосферные потоки плазмы. В данной работе представлены эксперименты, моделирующие генерацию сильных продольных токов, замыкающихся на полюсах планеты, проведенные в Лаборатории энергетики мощных лазеров ИЛФ СО РАН на установке КИ-1 [1; 2].

Результаты эксперимента демонстрируют, что на первом этапе формируется плазма, захваченная в дипольном магнитном поле. Второй внешний плазменный поток формирует магнитосферу и взаимодействует с внутренней плазмой. При этом внутри магнитосферы образуются сильные продольные токи, которые напрямую зависят от величины магнитного поля диполя.

Таким образом, впервые в лабораторных условиях был поставлен эксперимент по моделированию системы продольных токов, протекающих во внутри-магнитосферной плазме. Дальнейшее развитие подобных экспериментов позволит усовершенствовать численные модели и исследовать процессы, протекающие в магнитосферах Юпитера и горячих экзопланет.

*Настоящая работа была выполнена в рамках проекта РНФ № 18-12-00080, при поддержке грантов РФФИ № 18-2921018, гранта Минобрнауки 075-15-2020-780, а также Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № АААА-А17-117021750017-0).*

### *Литература*

1. М.А. Ефимов, А.А. Чибранов, А.Г. Березуцкий и др., *Квант. электрон.*, 51, № 3, 222-227, (2021).
2. I.F. Shaikhislamov, V.G. Posukh, A.V. Melckhov et al., *Plasma Phys. Control. Fusion*, 57, № 7, 075007, (2015).

## ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОЛОКАЛИЗОВАННОЙ ДЫРКИ В КРИСТАЛЛЕ $\text{LaF}_3$ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ

Н. Г. Чуклина, А. С. Мысовский

*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН  
Иркутск, Россия, [dir@igc.irk.ru](mailto:dir@igc.irk.ru)*

В данной работе были рассмотрены различные возможные конфигурации автолокализованной дырки (АЛД) в кристалле  $\text{LaF}_3$ . Кристалл фторида лантана является представителем трифторидов редкоземельных элементов с типичной для этого класса кристаллов структурой тиссонита. Для правильного описания локализованного состояния в кристалле при моделировании использовалась теория функционала плотности в приближении DFT+U с обменно-корреляционным функционалом PBESol. А для исследования возможных каналов диффузии АЛД по кристаллу использовался метод молекулярной динамики (МД) из первых принципов при постоянном нагреве.

По результатам молекулярной динамики было установлено четыре возможные конфигурации АЛД в кристалле  $\text{LaF}_3$ : 1) между ионами фтора в одном слое анионной подрешетки F1; 2) между ионами фтора ближайших параллельных слоев подрешетки F1 разделённых слоем ионов лантана; 3) между ионами подрешеток F1 и F2; 4) между ионами подрешеток F1 и F3 (рис.).

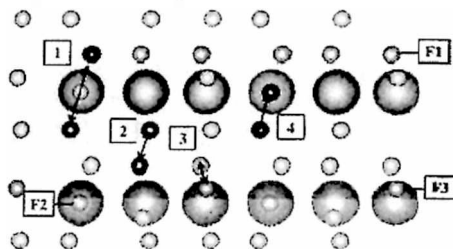


Рис. Возможные конфигурации АЛД в кристалле  $\text{LaF}_3$ .

Методом молекулярной динамики были определены возможные пути диффузии АЛД по кристаллу  $\text{LaF}_3$ . Миграция реализуется между 1-й конфигурацией и ближайшей конфигурацией того же типа, а также между 2-й конфигурацией и всеми остальными возможными конфигурациями автолокализованной дырки. Наименьшим значением энергии барьера обладает переход 1–2 (0,15 эВ), поэтому данный канал диффузии является главным и наиболее часто реализуемым в кристалле  $\text{LaF}_3$ .

## РОСТ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ КРИСТАЛЛОВ КОЛЬКВИРИТА МЕТОДОМ БРИДЖМЕНА И ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НА $\text{LiSr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{AlF}_6:\text{Ce}^{3+}\text{Yb}$

А. А. Шакиров, А. А. Шавельев, А. С. Низамутдинов  
Н. Ф. Рахимов, О. А. Морозов, М. А. Марисов  
В. В. Семашко

*Казанский (Приволжский) федеральный университет  
Казань, Россия, [shakirov.1995@mail.ru](mailto:shakirov.1995@mail.ru)*

Фторидные кристаллы со структурой кольквириита  $\text{LiCaAlF}_6$ , используются в качестве матриц активных сред, усиливающих УФ и ближнее ИК излучение, и, будучи активированными ионами  $\text{Ce}^{3+}$ , применяются в различных отраслях: при борьбе с кожными заболеваниями витилиго и псориаз, экологии – в системах зондирования LIDAR, высокотемпературные сцинтилляторы [1]. Преимуществами данных соединений, являются значительно меньшая температура плавления, более широкая запрещенная зона, а также возможность генерации импульсов ультракороткой длительности [2]. Проблемой данных соединений является низкая изоморфная емкость, что при попытке повысить концентрацию ионов  $\text{Ce}^{3+}$  в кристаллах  $\text{LiCaAlF}_6$  появляются различные дефекты, что приводит к уменьшению выхода и КПД за счет центров окраски. Но известно, что, варьируя набор катионов кристаллической решетки, можно значительно повысить изоморфную емкость [3].

В настоящей работе обсуждается выращивание методом Бриджмена фторидных кристаллов высокого качества  $\text{LiCaAlF}_6$  и  $\text{LiSr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{AlF}_6$ , активированных различными ионами. Так, описанная методика для кристаллов  $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}^{3+}$  позволила достичь концентрации примеси 1,2 ат. % с однородностью показателя преломления  $2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$  и диф. КПД лазерной генерации 47 % (289 нм). Для кристаллов смешанной структуры  $\text{LiSr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{AlF}_6:\text{Ce}^{3+}$  за счет дополнительной активации  $\text{Yb}^{3+}$  удалось подавить образование центров окраски и получить лазерную генерацию, максимальный диф. КПД составил 14,3 % для  $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}^{3+}\text{Yb}$ .

### *Литература*

1. A. Gektin, N. Shiran, S. Neicheva, V. Gavriluyuk, A. Bensalah, T. Fukuda, K. Shimamura, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 486 (1-2), 274-277 (2002).
2. M.H. Pham, M. Cadatal-Raduban, M.V. Luong, H.H. Le, K. Yamanoi, T. Nakazato, T. Shimizu, N. Sarukura, H.D. Nguyen, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 53, 062701 (2014).
3. A.S. Nizamutdinov, V.V. Semashko, A.K. Naumov, L.A. Nurtdinova, R. Yu. Abdulsabirov, S.L. Korableva, V.N. Efimov, *Phys. Solid State*, 50, 1648-1651 (2008).

## НОВЫЙ МЕХАНИЗМ СПИНОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ КВАЗИЧАСТИЦ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ: ДИНАМИЧЕСКАЯ СПИНОВАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Т. С. Шамирзаев

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН  
Новосибирск, Россия*

Развитие эпитаксиальных технологий роста привело к созданию низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур: квантовых ям (КЯ), сверхрешеток (СР), квантовых точек (КТ) – объектов с новыми, не существующими в природе, электронными и оптическими свойствами, использование которых не только открыло широкие возможности для создания многочисленных полупроводниковых приборов, но и позволило проводить исследования физических явлений фундаментального характера.

В лекции будет представлен обзор современного состояния дел в области изучения спиновой ориентации электронной подсистемы в наногетероструктурах. Особое внимание уделено обсуждению недавно открытого, нового механизма спиновой ориентации локализованных электронов: динамической спиновой поляризации электронов при взаимодействии с флуктуациями ядерного спина [1]. Будет показано, что флуктуации ядерного спина могут быть использованы для поляризации углового момента электронов через сверхтонкое взаимодействие в слабом магнитном поле при освещении образца неполяризованным светом, который напрямую не поляризует ни ядра, ни электроны. Теория, построенная для описания этого нового эффекта, предсказывает при определенных условиях 100%-ную спиновую поляризацию в продольных магнитных полях в несколько миллитесла для электронов, связанных в локализованных экситонах.

*Работа поддержана РФФИ (проекты № 19-02-00098 и 19-52-12001).*

### *Литература*

1. D.S. Smirnov, T.S. Shamirzaev, D.R. Yakovlev, M. Bayer, *Phys. Rev. Lett.*, 125, 156801 (2020).

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУР ДИОКСИДА ГАФНИЯ

А. О. Шилов<sup>1</sup>, С. С. Савченко<sup>1</sup>, Р. В. Камалов<sup>1</sup>,  
А. С. Вохминцев<sup>1</sup>, И. А. Вайнштейн<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Научно-образовательный центр «Наноматериалы и нанотехнологии»,  
Уральский федеральный университет имени первого Президента  
России Б. Н. Ельцина

Екатеринбург, Россия, [ao.shilov@urfu.ru](mailto:ao.shilov@urfu.ru)

<sup>2</sup>Институт металлургии УрО РАН

Екатеринбург, Россия

Наноструктуры диоксида гафния различной размерности и с различной морфологией (нанотрубки, наночастицы, пленки и т.д.) обладают уникальным сочетанием механических, электрических и оптических свойств. Перспективы применения  $\text{HfO}_2$  в ячейках памяти нового поколения и в устройствах современной оптоэлектроники требуют глубокого понимания закономерностей формирования его электронных и оптических характеристик. Данная работа посвящена изучению спектров фотолюминесценции (ФЛ) в нанотрубках и наночастицах диоксида гафния в диапазоне температур 40–300 К.

Методом диффузного отражения проанализированы оптические свойства нанотрубок и порошка  $\text{HfO}_2$  в области края собственного поглощения. В предположении различных типов межзонных оптических переходов проведена оценка ширины энергетической щели 5,3–5,6 эВ в исследуемых образцах. Исследование ФЛ проводилось с помощью спектрометра Perkin Elmer LS 55, оснащенного криостатом Janis CCS 100/204N с датчиком температуры DT-670B-CU, в диапазоне 230–700 нм при возбуждении 200–290 нм. Показано, что при комнатной температуре в спектрах ФЛ доминирует свечение 2,6 эВ, обусловленное оптически активными центрами на основе кислородных вакансий. В диапазоне  $T < 200$  К при межзонном возбуждении с энергией  $> 5,6$  эВ обнаружена излучательная рекомбинация 4,2 эВ автолокализованных экситонов.

С использованием экспериментальных данных проанализированы процессы температурного тушения и разгорания ФЛ различной природы, рассчитаны энергии эффективных колебаний, ответственных за фонон-индуцированные смещение и уширение электронных уровней в зонной структуре  $\text{HfO}_2$ . На основе полученных результатов выполнена оценка фактора Хуанга-Риса ( $S = 12-40$ ), значения которого указывают на существенный вклад эффектов электрон-фононного взаимодействия в наблюдаемое температурное поведение ФЛ спектров в  $\text{HfO}_2$ .

*Работа выполнена при поддержке научного проекта Минобрнауки FEUZ-2020-0059.*

## УСИЛЕННОЕ СПОНТАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ $\lambda = 718$ НМ В АЛМАЗЕ ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКЕ

М. А. Шулепов<sup>1,2</sup>, А. Г. Бураченко<sup>1,2</sup>, Д. Е. Генин<sup>1,2</sup>,  
Е. И. Липатов<sup>1,2</sup>, В. С. Рипенко<sup>1,2</sup>, Е. Н. Тельминов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН  
Томск, Россия, [MixShlp@vandex.ru](mailto:MixShlp@vandex.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Томск, Россия

Созданию оптических вычислительных устройств, в наибольшей степени, на сегодняшний день, удовлетворяет алмаз. Данный материал, по аналогии с электронными компонентами на кремнии, потенциально позволяет в одном кристалле реализовывать сенсоры, интерферометры, поляризаторы, источники излучения, световоды, разветвители и пр. Часть перечисленных компонентов сегодня реализуются посредством создания в алмазе NV-центров. С помощью NV-центров в алмазе возможно создание однофотонных источников, применяемых для задач квантовой криптографии, физически реализовать q-биты (квантово-логические элементы), создать магнитометрические сенсоры и т. д. [1–3]. Однако до недавнего времени на алмазе получали только люминесцентные источники света. Лазерный же источник света на алмазе был под вопросом, что делало проблематичным создание оптических интегральных схем на базе алмаза. Реализация лазерных источников затруднялась наличием двух зарядовых состояний алмаза ( $NV^0$  и  $NV^-$ ). Наши исследования [4] показали, что нейтральное зарядовое состояние ( $NV^0$ -центр) является негативным фактором для генерации лазерного излучения.

Здесь представлены результаты исследований спектральных характеристик усиленного спонтанного излучения в фононном крыле люминесценции NV-центров при импульсной оптической накачке излучением с  $\lambda = 532$  нм. Приведены результаты, полученные на образцах с различными концентрациями примесно-дефектного состава.

### Литература

1. А. Федоров, Квантовые технологии № 7: криптография и связь. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=j87RzCRG8L8&list=PLKz7OPui9exTJsoV9xy38qoVqAR8UFy\\_&index=7](https://www.youtube.com/watch?v=j87RzCRG8L8&list=PLKz7OPui9exTJsoV9xy38qoVqAR8UFy_&index=7) (дата обращения: 30.04.2021)
2. А. Федоров, Квантовые технологии № 5: квантовый компьютер. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=j87RzCRG8L8&list=PLKz7OPui9exTJsoV9xy38qoVqAR8UFy\\_&index=7](https://www.youtube.com/watch?v=j87RzCRG8L8&list=PLKz7OPui9exTJsoV9xy38qoVqAR8UFy_&index=7) (дата обращения: 30.04.2021)
3. А. Федоров, Квантовые технологии № 6: квантовые сенсоры. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=F3GXfRt5pUk&list=PLKz7OPui9exTJsoV9xy38qoVqAR8UFy\\_&index=6](https://www.youtube.com/watch?v=F3GXfRt5pUk&list=PLKz7OPui9exTJsoV9xy38qoVqAR8UFy_&index=6) (дата обращения: 30.04.2021)
4. A. Savvin, A. Dormidov, E. Smetanina, V. Mitrokhin, E. Lipatov, D. Genin, S. Potanin, A. Yelissev, V. Vins, NV– Diamond Laser. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=F3GXfRt5pUk&list=PLKz7OPui9exTJsoV9xy38qoVqAR8UFy\\_&index=6](https://www.youtube.com/watch?v=F3GXfRt5pUk&list=PLKz7OPui9exTJsoV9xy38qoVqAR8UFy_&index=6)

## 3D НАНОЛИТОГРАФИЯ И ФОТОННЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

А. Г. Витухновский<sup>1,2</sup>, Д. А. Чубич<sup>1</sup>, Д. А. Колымагин<sup>1</sup>  
Риолонд Паттиа<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)  
Долгопрудный, Россия, [mir.3D@gmail.com](mailto:mir.3D@gmail.com)*

<sup>2</sup>*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН  
Москва, Россия, [vitukhnovsky@mail.ru](mailto:vitukhnovsky@mail.ru)*

Фотонная интегральная схема (PIC – Photonic Integrated Circuit) представляет собой устройство, которое объединяет несколько (по крайней мере две) фотонных функций и подобно электронной интегральной схеме. Основное различие между ними заключается в том, что фотонная интегральная схема оперирует сигналами на оптических длинах волн, обычно в видимой части спектра или ближнем инфракрасном диапазоне от 850 до 1650 нм. Наиболее коммерчески используемой материальной платформой для PIC является нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), который позволяет интегрировать различные оптически активные и пассивные функции на одной платформе.

Основное применение фотонных интегральных схем – это волоконно-оптическая связь, хотя также возможны приложения в других областях, таких как биомедицинские приложения и фотонные вычисления. Поскольку на PIC возможна организация разделения оптических мод, что важно для квантовых вычислений, то концепция PIC может быть полезна для миниатюризации квантовых симуляторов и компьютеров (линейные оптические квантовые вычисления). Другим примером PIC, широко используемой сегодня в волоконно-оптических системах связи и спектроскопии на чипе, является лазер с внешней модуляцией (EML), который сочетает в себе лазерный диод с распределенной обратной связью и модулятор поглощения на одном чипе на основе нитрида кремния. Также интерес для практических применений представляет эффект затягивания и генерация оптических гребёнок в интегральном микрорезонаторе из нитрида кремния [1].

Низкая стоимость, простота изготовления и возможности интеграции полимеров с низкими оптическими потерями делают их привлекательными для приложений PIC. Полимерные волноводные материалы могут быть прозрачными в широком спектральном диапазоне, а потери на поглощение могут быть ниже 0,1 дБ / см на всех основных длинах волн связи. С другой стороны, фундаментальная проблема заключается в том, что соединение фотонных чипов (как компонентов PIC) намного сложнее, чем соединение электронных чипов: фотонные соединения требуют тщательного согласования мод излучения и высокоточного выравнивания оптических чипов, так что свет, выходящий из выходной грани одного чипа, напрямую попадает во входную грань другого чипа. Это особенно сложно, когда речь идет о фотонных чипах на основе полупроводников, несущих

щих высококонтрастные волноводы с диаметром модового поля порядка 1 мкм или меньше. Сборка таких систем до сих пор требует так называемых активных методов юстировки, при которых эффективность оптической связи постоянно контролируется и оптимизируется в процессе юстировки. Методы высокоточного трехмерного нанопроизводства приводят к концепции соединения фотонных проводов (PWB – Photonic Wire Bonding), которую можно рассматривать как оптический аналог соединения металлических проводов в электронике. PWB – одномодовые полимерные волноводы произвольной формы, которые эффективно соединяют интегрированные оптические чипы друг с другом или с оптическими волокнами.

Фотонные чипы и волокна крепятся на общей подложке с высокой точностью. Области межсоединений изготовлены в светочувствительном фоторезисте, и фактическое положение полимерного волновода относительно созданных электронной литографией волноводы  $\text{Si}_3\text{N}_4$  достигается с помощью методов трехмерной литографии с точностью порядка 100 нм. Форма волновода на основе PWB разработана в соответствии с заданными положениями ввода-вывода и создается с помощью двухфотонной 3D-нанолиитографии.

Процесс изготовления PWB описан в [2], и осуществляется на основе нелинейно-оптического процесса двухфотонного поглощения фемтосекундного лазерного излучения в специальном веществе – фоторезисте. Луч лазера фокусируется высокоапертурным объективом в объеме прозрачного материала, заставляя его локально полимеризоваться.

Используя идею STED микроскопии (использование дополнительного тушащего лазера) можно существенно увеличить пространственное разрешение 3D-нанолиитографии при постоянной длине волны возбуждения. В работе использовалось лазерное излучение с длиной волны 780 нм и несколько коммерческих фоторезистов, например, IP-L, IP-Dip и Opticosmр, а также специально приготовленные фотокомпозиции. Изготовленные фотонные межсоединения структурно и функционально охарактеризованы и демонстрируют высокую эффективность передачи фотонов в 3D-структурах в фотонных интегральных схемах сложной архитектуры. Кроме того, полимерные структуры, изготовленные методом 3D-нанолиитографии, позволяют эффективно решать проблему завода излучения относительно широкого спектрального диапазона в фотонную интегральную схему за счет трансформации моды электромагнитного излучения в свободном пространстве в волновод из нитрида кремния.

3D-нанолиитография с использованием оригинальных фоторезистов открывает возможности изготовления нанофотонных устройств для видимого, ближнего инфракрасного и рентгеновского диапазонов электромагнитного излучения [3].

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-20129.*

### *Литература*

1. Arslan S. Raja et al. Nature Communications, 10, 680 (2019)
2. R. Zvagsky, D.Chubich, D.Kolymagin et al. J. Phys D: Appl. Phys., 53, 355102 (2020)
3. M. I. Sharipova et al. Opt. Mat. Express 11, 2, 371 (2021)

## СВЕРХЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ РАМАНОВСКАЯ И ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ СПЕКТРОМИКРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ МОЛЕКУЛ

А. В. Наумов

*Московский педагогический государственный университет  
Москва, Россия*

*Троицкий филиал Физического института РАН им. П. Н. Лебедева  
Москва, Троицк, Россия*

*Институт спектроскопии РАН  
Москва, Троицк, Россия, [a.v.naumov@mail.ru](mailto:a.v.naumov@mail.ru)*

Бурное развитие инструментальной базы современной фотоники привело к разработке методов детектирования одиночных молекул в конденсированных средах. Так, детектирование флуоресценции одиночных маркерных молекул (ОМ) легло в основу методов оптической наноскопии – дальнеполевой микроскопии сверхвысокого пространственного разрешения (направление, отмеченное Нобелевской премией 2014 г.), получившей широкое распространение в различных приложениях: физике конденсированного состояния вещества, материаловедении, квантовых технологиях, биофизике, медицине.

Возможности методов детектирования одиночных квантовых излучателей (ОКИ) могут быть существенно расширены за счет «многоцветового» (многопараметрического) подхода, когда одновременно с детектированием изображений ОКИ на различных длинах волн регистрируются их спектры, в том числе в зависимости от различных внешних параметров. Особенно продуктивной с точки зрения аналитических возможностей представляется техника спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС, в англоязычной литературе – рамановское рассеяние). Наличие уникального набора колебательных уровней у каждого молекулярного соединения приводит к возможности однозначной его идентификации по спектру КРС (своего рода «отпечаткам пальцев»). В отличие от флуоресцентных методик переход к КРС ОМ был затруднен вследствие малого квантового выхода. Ситуация кардинально поменялась с появлением методов, использующих эффект гигантского усиления КРС, в частности, в присутствии металлических плазмонных наночастиц на случайно или специально структурированной поверхности (surface enhanced Raman scattering, SERS). Последняя (SERS) технология, обладая высоким потенциалом практического применения в области ультрачувствительной биосенсорики и цитометрии, привлекает сейчас значительное внимание. Необходимы фундаментальные исследования теоретической задачи об усилении КРС молекул в ближнем поле плазмонных наноструктур для инжиниринга таких метаповерхностей с заданными свойствами (тонкой настройкой под определенные аналиты), а также сравнительный анализ с поведе-

нием спектров флуоресценции аналита. Требуется разработка эффективных методов синтеза метаповерхностей с заданными характеристиками.

Все эти вопросы обсуждаются в данной лекции. Продемонстрированы возможности многопараметрической флуоресцентной наноскопии для нанодиагностики тонких диэлектрических пленок [1], обсуждается вопрос о влиянии различных параметров на спектры одиночных примесных органических (макро)молекул в широком диапазоне низких температур [2; 3]. Особое внимание уделяется возможности детектирования спектров КРС от ультрамалых объемов аналита (вплоть до единичных молекул) при использовании специально разработанных SERS-метаповерхностей [4,5].

*Обсуждаемые результаты относятся к теме Государственного задания Московского педагогического государственного университета (МПГУ) «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» при поддержке Министерства просвещения Российской Федерации (AAAA-A20-120061890084-9).*

#### *Литература*

1. A.V. Naumov, A.A. Gorshel'ev, M.G. Gladush, T.A. Anikushina, A.V. Golovanova, J. Köhler, L. Kador, *Nano Lett.*, 18 (10), 6129-6134 (2018).
2. А.В. Наумов, *УФН*, 183 (6), 633-652 (2013).
3. А.О. Савостьянов, И.Ю. Еремчев, А.А. Горшелев, А.В. Наумов, А.С. Старухин, *Письма в ЖЭТФ*, 107 (7), 426-433 (2018).
4. E.P. Kozhina, S.A. Bedin, N.L. Nechaeva, S.N. Podoynitsyn, V.P. Tarakanov, S.N. Andreev, Y.V. Grigoriev, A.V. Naumov, *Appl. Sci.*, 11 (4), 1375 (2021).
5. E.P. Kozhina, S.N. Andreev, V.P. Tarakanov, S.A. Bedin, I.M. Doludenko, A.V. Naumov, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 84 (12) 1465-1468 (2020).

## СОДЕРЖАНИЕ

Similarity of nature of molecular complexes with hydrogen bond in fluoride crystalline matrices $\text{LiF}$ , $\text{NaF}$ and optical ceramics $\text{MgF}_2$ <i>L. I. Bryukvina, D. S. Glazunov</i>	3
Up-conversion phosphors based on alkaline earth fluorides <i>S. V. Kuznetsov, E. I. Madirov, V. A. Konyushkin, A. N. Nakladov, P. P. Fedorov, T. Bergfeldt, D. Busko, I. A. Howard, B. S. Richards, A. Turshatov</i>	4
Diamond X-ray luminescence composite with embedded YAG:Sc:Ce nanoparticles <i>S. Kuznetsov, V. Sedov, I. Kamenskikh, A. Martyanov, D. Vakalov, S. Savin, E. Rubtsova, V. Tarala, S. Omelkov, A. Koitov, V. Raichenko, V. Konov</i>	5
Characterization of defect luminescence in aluminoborosilicate glasses <i>E. Malchukova, B. Boizot, E. Terukov</i>	6
Time-Resolved luminescence and VUV excitation spectroscopy of cerium doped garnet scintillator materials <i>V. Pankratov</i>	7
Optical characteristics of $\text{LiF}$ crystal layers containing magnesium and lithium nanoparticles <i>V. L. Paperny</i>	8
Striking lattice parameter-dependent features in the delocalization of self-trapped hole centers $V_L$ in binary and complex halides <i>A. I. Popov, E. A. Kotomin</i>	9
Metal halide perovskites: oxygen sensitivity <i>Yangyang Lu, Haizheng Zhong</i>	10
Combination of plasmon-active structure and $\text{WO}_3$ -CdS photocatalyst for enhanced water splitting process <i>D. Zabelina, A. Zabelina, A. Tulupova, O. Lyutakov</i>	11
Photocatalytic selective hydrogenation of phenylacetylene to styrene <i>A. Zabelina, D. Zabelin, O. Lyutakov</i>	12
Новые $\text{InGaSb/AlP}$ квантовые точки: перспективы для универсальной памяти <i>Д. С. Абрамкин, А. А. Блохин, М. О. Петрушков, Е. А. Емельянов, М. А. Путько, Е. С. Коптsev, М. Ю. Есин, А. К. Гутаковский, В. В. Преображенский</i>	13
Дальние корреляции в граничных слоях жидкостей <i>Ю. В. Аграфонов, И. С. Петрушин, Д. В. Халаилов</i>	14
Изменение спектрального состава в г-рой гармонике в процессе преобразования и усиления chirпированного импульса <i>С. В. Алексеев, В. Ф. Лосев, Д. М. Лубенко, А. Г. Ястремский</i>	15
Детекторы излучения на основе нитрида алюминия и оксидов алюминия и кремния <i>И. Л. Азучер, А. С. Артамонов</i>	16

Терагерцовая и инфракрасная спектроскопия высокого разрешения монокристаллов гибридного перовскита $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ <i>К. Н. Болдырев, В. Е. Анисеева, О. Н. Семенова, М. Н. Попова</i>	18
Дифракция вихревых гауссовых пучков на двумерной рамановской решетке <i>В. Г. Архипкин, С. А. Мысливец</i>	19
Плазмон индуцированный рост ковалентно органических каркасных структур на поверхности оптического волокна и его дальнейшее применение <i>П. Баинова, В. Шворчик, А. Лютаков</i>	20
Автобалансный метод детектирования резонанса когерентного пленения населенностей в оптически плотной среде <i>К. А. Баранцев, А. Н. Литвинов</i>	21
Особенности лазерного и рентгеновского возбуждения кристаллов $\text{Ce,Pr:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ <i>В. И. Барышицков, Ю. А. Суханова, Т. А. Колесникова, О. Л. Никонович</i>	22
Спектры люминесценции мезорезонаторов <i>А. В. Бельюновский, К. М. Морозов, Е. Н. Гиринова, М. А. Каличевский</i>	23
Формы фронтов кристаллизации и тепловая история кристаллов при их получении из расплавов <i>В. С. Бердников, В. А. Винокуров, В. В. Винокуров, В. А. Гришков, С. А. Кислицын, К. А. Митин</i>	24
Конвективный теплообмен в методе Чохральского в режимах вращения кристаллов и тиглей <i>В. С. Бердников, В. А. Винокуров, В. В. Винокуров</i>	25
Квантовохимическое моделирование колебательных спектров природных минералов <i>А. И. Богданов, Р. Ю. Шендрик, Е. В. Канева</i>	26
Лазерная сканирующая флуоресцентная микроскопия одиночных молекул: условия инвариантности формы изображений при азимутальном вращении эмиттеров <i>С. В. Бойченко</i>	27
Фотохромные эффекты в легированных полупроводниковых алмазах <i>К. Н. Болдырев</i>	28
Особенности фундаментального поглощения гибридного перовскита $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ в области структурных фазовых переходов <i>В. Е. Анисеева, К. Н. Болдырев, М. Н. Попова, О. Н. Семенова</i>	30
Детектирование высокоэнергетичных электронов в алмазе <i>А. Г. Бураченко, К. П. Артемов, Е. И. Липатов, В. С. Рипенко, М. А. Шуленин</i>	31
Плазменная химия в микрофлюидном режиме: гидрирование фенилацетилена до стриола <i>В. Бурцев, В. Шворчик, А. Лютаков</i>	32
Люминесцентные свойства пористого анодированного оксида алюминия, активированного нонами РЗЭ <i>А. А. Васин, Ю. В. Юферов, И. Д. Попов, И. А. Попов, М. Г. Зуев</i>	33

- Наночастицы, полученные методом импульсной лазерной абляции, для использования в SERS  
*А. В. Волокишина, И. Н. Лапин, В. А. Светличный* 34
- Влияние температуры на форму и сдвиги резонансов когерентного племени населенности, детектируемых методом Рэмси, в оптически плотной среде  
*Г. В. Волошин, А. Н. Литвинов, К. А. Баранцев* 35
- Влияние лазерного излучения на частные петли гистерезиса быстроохлажденных ферромагнетиков  
*Н. А. Лю-ю, А. С. Пришелев, Н. В. Морозова, С. Н. Малов, А. В. Гаврилюк, А. А. Гаврилюк* 36
- Люминесценция кислородно-дефицитных центров в кварцевых стеклах  
*Т. Ю. Гармышева, Р. Ю. Шендрик, А. С. Паклин, А. А. Шалиев, А. И. Непомнящих* 37
- Электронно-дырочная жидкость в алмазах при возбуждении лазерными импульсами наносекундной длительности  
*Д. Е. Гещи, Е. И. Литатов, Д. В. Григорьев, А. Г. Бураченко* 38
- Роль полярности окружения при связывании флуоресцентного маркера с биополимерами разного поверхностного заряда  
*М. А. Герасимова, И. В. Слюсаренко, Е. А. Слюсарева* 39
- Оптоакустический генератор ультразвука на основе структур с таммовским плазмоном  
*Е. И. Гиршова, А. И. Микитчук, А. В. Белоновский, К. М. Морозов, М. А. Калитеевский* 40
- Синтез наночастиц силикатов висмута импульсной лазерной абляцией в воде  
*А. Г. Голубовская, Е. Д. Фахрутдинова, В. А. Светличный, М. В. Грабченко* 41
- Исследование возможностей создания нового поколения высокоточных гравиметров на базе интерференции ультрахолодных атомов  
*А. Н. Гончаров, Д. В. Бражников, О. И. Прудников, А. В. Тайначев, А. Э. Бонсрт, Д. И. Капустя, С. И. Багаев* 42
- Усиление люминесценции коллоидных квантовых точек Ag<sub>2</sub>S за счет декорирования их поверхности плазмонными наночастицами Au  
*И. Г. Гревцева, О. В. Овчинников, М. С. Смирнов, А. С. Перепелица, Т. А. Чевычелова, В. И. Дерепко* 43
- Управление люминесцентными свойствами квантовых точек Ag<sub>2</sub>S в условиях экситон-плазмонного взаимодействия  
*И. Г. Гревцева, О. В. Овчинников, М. С. Смирнов, А. С. Перепелица, Т. А. Чевычелова, В. И. Дерепко* 44
- Получение фантомных изображений с использованием жидкокристаллической ячейки  
*И. И. Лактецкий, Д. А. Иконников, В. С. Суторкин, А. М. Вьюнышев* 45
- Получение и спектроскопия люминесцентных стёкол на основе боратов лития, легированных редкоземельными элементами  
*А. А. Дерещи, С. Г. Мамонтова, А. И. Непомнящих* 46

- Люминесцентные свойства смесей квантовых точек CdS и наночастиц серебра  
*О. В. Овчинников, М. С. Смирнов, В. Н. Дерепко* 47
- Лазерно-индуцированное дефектообразование в диэлектрических кристаллах  
*В. П. Дресвянский, Е. Ф. Мартынович* 48
- Оптические свойства кристаллов щелочноземельных фторидов, активированных ионами хрома  
*А. В. Егранов, Е. А. Раджабов, В. А. Козловский* 49
- Термодиффузионное активирование щелочно-галогидных кристаллов ионами меди  
*Л. О. Ельцина, Е. Ф. Мартынович* 50
- Спектрально-временной паспорт А-полосы люминесценции алмазов  
*Е. Ф. Мартынович, А. С. Емельянова* 52
- Селективное плазмон-иницированное гидрирование на биметаллической поверхности  
*М. Р. Ерзина, О. А. Гусельникова, Е. В. Милютина, А. Лютиков* 54
- Исследование численными методами плотности электронных состояний в соединениях типа YаС  
*Л. К. Ермаков* 55
- Оптоэлектронный пикосекундный ускоритель электронов  
*В. П. Барышников, А. Д. Ермошенко* 56
- Измерение нелинейно-оптических свойств кристалла бариевого халькогенида  
*Е. Ю. Ерушин, Н. Ю. Костюкова, А. А. Бойко, Д. Б. Колкер, Д. В. Бадиков, В. В. Бадиков* 57
- Перестраиваемый узкополосный источник излучения, генерирующий излучение с длиной волны порядка мкм в режиме, близком к вырожденному  
*Н. Ю. Костюкова, Е. Ю. Ерушин, А. А. Бойко, Д. Б. Колкер* 58
- Спектральная и токовая диагностика в экспериментах по лабораторному моделированию Магнитосферных процессов, происходящих в атмосферах планет подобных горячим юпитерам  
*М. А. Ефимов, М. С. Руменских, А. А. Чибранов, П. Ф. Шайхисламов, А. Г. Березуцкий, В. Г. Посух, П. А. Трушин, Ю. П. Захаров, Н. Б. Мирошниченко* 59
- Новые скандоборатные кристаллы: спектрально-люминесцентные свойства и ГВГ  
*А. Я. Жамус, Д. М. Ежов, А. Б. Кузнецов, В. А. Светличный, А. Е. Кох* 60
- Тонкая структура экситонов в квантовых точках CdS, сформированных методом Ленгмюра-Блоджетт  
*А. А. Зарубанов, К. А. Свит, К. С. Журавлев* 61
- Фотокаталитические процессы в управлении чувствительностью энергонасыщенных материалов к лазерному излучению  
*А. С. Зверев, А. Ю. Митрофанов, Н. Н. Пьякова, Д. Р. Нурмухаметов* 62
- Влияние наночастиц серебра на люминесцентные и нелинейно-оптические свойства красителя розы бенгальской  
*Т. С. Кондратенко, А. Н. Зявлин, Т. А. Чебычелова, О. В. Овчинников* 63

Флуоресцирующая флуоресценция одиночных центров окраски в кубических кристаллах <i>В. П. Дресвянский, С. А. Зячов, Е. Ф. Мартынович</i>	64
Оптические вихревые 3D решетки <i>Д. А. Иконников, С. А. Мысливец, В. Г. Архипкин, А. М. Вьюннишев</i>	66
Оптимизация лазерного охлаждения атомов Li-6 в полях различной поляризации <i>Р. Я. Ивченко, О. И. Прудников, А. В. Тайченачев, В. И. Юдин</i>	67
Эффект парселла в металло-диэлектрических структурах с органической активной областью <i>Е. И. Гиринова, К. М. Морозов, А. В. Белоповский, М. А. Качишевский</i>	68
Исследование влияния твердотельной матрицы на люминесцентные свойства наноконпозитов с квантовыми точками <i>К. Р. Каримовичи, А. И. Аржанов, А. В. Наумов</i>	69
Управление формой фронта кристаллизации в методе Чохральского <i>С. А. Кислицыи, В. С. Бердников, К. А. Митин</i>	70
Численное моделирование процессов роста кристаллов из расплавов с нормальной и инверсной зависимостью плотности от температуры методом бриджмена <i>С. А. Кислицыи, В. С. Бердников, К. А. Митин</i>	71
Использование метаповерхностей с агломератами коагулированных нанопроволок для SERS-спектроскопии <i>Е. П. Кожина, С. А. Бедин, С. Н. Андреев, И. М. Долуденко, А. В. Наумов</i>	72
Температурные зависимости краевого поглощения синтетического алмаза <i>Е. А. Колесник, В. С. Ртченко, Д. В. Григорьев, С. М. Дзяюх, Е. И. Литатов</i>	73
Полуполярные III-N слои на нано-структурированной кремниевой подложке: Технология, люминесценция <i>Е. В. Коненкова, С. Д. Коненков, В. Н. Бессолов, В. Н. Пантелеев</i>	74
Деформация полуполярного и полярного нитрида галлия, синтезированного на наноструктурированной подложке кремния <i>В. Н. Бессолов, М. Е. Кампан, Е. В. Коненкова, С. Д. Коненков</i>	75
Спектрально-кинетическое исследование взаимодействиясамоупорядоченных квантовых точек CdZnSeS/ZnS с резонансно-возбужденнымиианочастицами островковой серебряной пленки <i>Е. И. Константинова, В. А. Слежкин, В. В. Брюханов</i>	76
Анизотропия оптических свойств пленок гексагонального нитрида бора <i>Д. В. Котова, Л. А. Алтымбаев, М. О. Жукова, В. Т. Ноган, А. Балдычева, В. П. Кочерешко</i>	77
Выход люминесценции из многослойного асимметричного резонатора <i>И. С. Панкин, А. В. Шабанов, Д. С. Бузин, А. И. Крысина, С. В. Наболь, В. С. Сутормин, В. А. Гуляков, В. П. Вяткин, Ф. В. Зеленев, А. Н. Масюгин, И. В. Нелцев, М. Н. Волочаев, С. Я. Ветров, И. В. Тимофеев</i>	78
Моделирование динамики одиночных центров флуоресценции в кубических кристаллах <i>И. Д. Кривошеев, С. А. Зячов</i>	79

- Формирование волновода в LiF при филаментации последовательности фемтосекундных лазерных импульсов среднего ик-диапазона 81  
*А. В. Кузнецов, А. Е. Дормидонов, В. О. Компанец, С. В. Чекалин, В. П. Кандидов*
- Спутниковые квантовые сети 82  
*В. Л. Курочкин, А. В. Хмелев, А. В. Дузлинский, В. Ф. Майборода, Ю. В. Курочкин*
- Новый плазмон-активный катализатор  $RgO\text{-}FeN_x\text{-}AgNPs$  для восстановления кислорода 83  
*А. Кучинаренко, В. Шворчик, О. Лютаков*
- Кинетика люминесценции центра окраски с бесфононными линиями 368 и 756 нм в кристалле нейтронно-облученного лейкосапфира 84  
*И. Л. Лазарева, Е. Ф. Мартынович*
- Оптические свойства пленок сульфида свинца, полученных методом пиролиза аэрозоля из растворов тиокарбамида и хлоридов свинца 85  
*А. А. Леваша, А. Н. Лукин, В. Н. Семсенов*
- Алмаз в квантовых информационных технологиях 86  
*Е. И. Липатов, А. Г. Бураченко, Д. Е. Гензи, Е. А. Колесник, В. С. Рипенко, А. Д. Саввин, М. А. Шуленов*
- Применение нелинейных оксидных кристаллов в качестве преобразователей частоты в ТГц диапазоне 87  
*Д. М. Лубенко, В. Ф. Лосев, Ю. М. Андреев*
- Исследование магнитооптических резонансов для создания высокочувствительных сенсоров магнитного поля 88  
*А. О. Макаров, Д. В. Бражников, А. Н. Гончаров*
- Кинетика импульсной катодолюминесценции ионов церия в иттрий-алюминиевом гранате 89  
*В. Н. Соломонов, А. В. Спирина, А. С. Макарова*
- Формирование центров окраски, люминесцирующих в диапазоне 460–500 нм, в кристаллах LiF 90  
*Н. Т. Максимова, В. М. Костюков, В. В. Толстиков*
- Связывание подзамененного флуоресценции с катионным полимером 91  
*М. А. Матаховский, Н. В. Слюсаренко, М. А. Герасимова, Е. А. Слюсарева*
- Новые уронны в описании фазовых портретов вещества: топология и онтогенез 92  
*С. Г. Мамонтова*
- Объемные нелинейные фотографические материалы с люминесцентной визуализацией изображений 93  
*Е. Ф. Мартынович*
- Люминесцентная сепарация алмазосодержащих руд 94  
*Е. Ф. Мартынович, В. П. Миронов, А. С. Емельянов, Д. С. Глазунов, А. А. Тютрин, С. А. Шабалин, Е. В. Бубырь, Л. В. Казаков, П. В. Бычков, С. Н. Багаев*
- Фотолюминесценция с переносом заряда в необлученных кристаллах  $LiF\text{-}UO_2$  95  
*Л. И. Щетина, Р. Ю. Шендрик, Е. В. Межова, И. А. Иванов, Л. И. Ружников*

Превращения органических соединений с помощью плазмонов и их теоретическое обоснование <i>Е. Митютина, В. Шворчик, А. Лютаков</i>	96
NV и SiV центры в алмазе с позиции изоморфных замещений <i>В. П. Миронов</i>	97
Влияние режимов теплоотдачи на поля температуры в кристаллах в методе Чохральского <i>В. С. Бердников, К. А. Митиш</i>	98
Влияние внутренних источников тепла на режимы радиационно-конвективной теплоотдачи от кремниевого стержня <i>А. В. Митина, В. С. Бердников, К. А. Митиш</i>	99
Спектры люминесценции метабората меди, легированного никелем (Cu,Ni)B <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <i>А. Д. Матчанова, Е. В. Тропина, К. Н. Ботдыров, Е. М. Мошкина, М. И. Попова</i>	100
Пространственное распределение запасенной светосуммы фемтосекундного лазерного излучения в кристаллах LiF:Mg,Ti <i>В. П. Дресвянский, Н. С. Бобина, С. Энхбат, С. В. Мурзун, Е. Ф. Мартынович</i>	101
Структурные различия кварцевых стекол, синтезированных из β-кварца и β-кristобалита <i>А. С. Мысовский, А. И. Богданов, А. С. Паклин</i>	103
Спектроскопия элементов волоконно-оптической квантовой связи <i>Б. А. Наседкин, А. О. Исмагилов, А. А. Килинчев, А. И. Цыпкин, В. И. Егоров</i>	104
Модификация максена при помощи плазмона: настройка поверхностной химии и создание функционального покрытия <i>А. А. Олыштрем, С. Чертопазов, В. Шворчик, О. Лютаков</i>	105
Связанное состояние в континууме типа фридриха-винтгена в анизотропном фотонном кристалле <i>П. С. Паклин, Д. Н. Максимов, Д. С. Бузин, А. И. Краснов, С. В. Наболь, И. В. Тимофеев</i>	106
Преобразование локализованных состояний при формировании люминесцирующих core/shell Ag <sub>2</sub> S/SiO <sub>2</sub> квантовых точек <i>А. С. Церсулина, О. И. Овчинников, М. С. Смирнов, Т. С. Кондратенко, И. Г. Гревцева, С. В. Асланов</i>	107
Исследование распределения рассеянного излучения от линейного ускорителя туннельного типа <i>В. К. Платонов, Е. В. Шиндякин, А. С. Уваров, А. Ю. Сенькина, А. В. Егранов, И. А. Москвина</i>	108
Лазерные методы производства и диагностики водорода <i>В. Е. Привалов, В. Г. Шеманин</i>	109
Спектры фотобиологической инактивации коронавируса SARS-COV-2 сощечным излучением УФБ-диапазона (280–320 нм) <i>В. Е. Прокопьев</i>	110
Свечение Tm <sup>3+</sup> в кристаллах щелочноземельных фторидов <i>Е. А. Раджабов</i>	111

- Фотокаталитические свойства нанопорошков оксида цинка, полученных импульсной лазерной абляцией в воздухе 112  
*О. А. Реутова, В. А. Светличный*
- Исследование люминесцентных свойств ксантеновых красителей в комплексе с хитозаном 113  
*А. В. Рогова, Ф. И. Толмачин, М. А. Герасимова, Е. А. Слюсарева*
- Реализация однокубитовых квантовых операций с одиночными атомами рубидия в двух оптических дипольных ловушках 114  
*И. И. Рябцев, П. И. Бетров, Е. А. Якишина, Д. Б. Третьяков, В. М. Энтин, Н. В. Алянова, К. Ю. Митянин, И. Н. Анкариш, П. Г. Незвестный, А. В. Латышев, А. Л. Асеев*
- Лазерная генерация на NV центрах в алмазе 116  
*А. Д. Савкин, А. Е. Дормидонов, Е. О. Сметанна, В. П. Митрохин, Е. И. Липатов, Д. Е. Генин, С. А. Потанин, А. П. Елисеев, В. Г. Вит*
- Уширение бесфононных спектральных линий органических молекул в стеклообразных матрицах: влияние квадратичного электрон-фононного взаимодействия 117  
*А. О. Савостьянов, И. Ю. Еремчев, Lothar Kador, А. В. Наумов*
- Спектры тремдеполяризации фторидов щёлочноземельных металлов легированных двумя примесями лантановидов 119  
*А. В. Самборский, Е. А. Раджабов*
- Люминесцентные свойства пиролитических пленок сульфида кадмия, активированных ионами меди 120  
*Т. В. Самфалова, В. Н. Семенова, А. Н. Лукин, Д. А. Минаков, Е. В. Попова*
- Генерация ТГц излучения в лазерной плазме фемтосекундного импульса 121  
*Е. А. Сандакши, Д. М. Лубенко, В. Ф. Лосев*
- Синтез биметаллических, сложных оксидных и композитных наночастиц для применения в катализе импульсной лазерной абляцией в жидкости 122  
*В. А. Светличный*
- На пути к компактному иттербиевому оптическому стандарту частоты 123  
*А. В. Семенко, Д. В. Сутырин, Г. С. Белотелов, С. Н. Слюсарев*
- Спектры фотолюминесценции монокристаллов металлоорганических перовскитов 124  
*О. И. Семенова, В. А. Гайслер, В. Е. Анисьева*
- Перспективные энергетические системы и спектроскопические методы исследования электрохимических процессов в них 125  
*А. В. Сивак*
- Синтез и люминесцентные свойства нанокристаллов  $YF_3V_{1-x}O_4$  126  
*Б. В. Сладкопевцев, Е. В. Томина, А. Н. Лукин*
- Металл-органические каркасы: оптические свойства и применение 127  
*Е. А. Слюсарева*

- Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения в металл-органических каркасах  
*И. В. Слюсаренко, А. С. Крылов, Е. А. Слюсарева* 128
- Фотоприемный режим работы светодиодов на основе двойной гетероструктуры с Се:YAG микрослоем  
*В. И. Барышников, Ю. А. Суханова* 129
- Исследование люминесценции одиночных центров окраски в кристаллах LiF, содержащих примесь магния  
*Е. Ф. Мартынович, Р. А. Тазиев, В. П. Дресвянский, А. Л. Ракевич* 130
- Излучение Вавилова-Черенкова и импульсная катодолуминесценция при возбуждении пучком электронов  
*В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакин* 132
- Формирование  $F_2^+$  центров окраски в гамма-облученном фториде лития, подвергнутом механическому диспергированию  
*Н. Т. Максимова, С. Ю. Терещин* 133
- Исследование квантовых ям  $\alpha$ -SN/GE методами терагерцовой спектроскопии  
*В. Н. Трушин, Н. А. Мустафин, F. V. Kusmartsev, A. Kusmartseva, Y. Liu, B. Zhang, Y. Luo* 134
- Новые оптически переключаемые суперконденсаторы  
*А. Е. Тузупова, В. Шварчик, О. Лютаков* 135
- Люминесценция углеродных квантовых точек, синтезированных плазменным методом  
*А. А. Тютрин, Р. Вэнг, Е. Ф. Мартынович* 136
- Исследование дефектного  $TiO_2$ , полученного импульсной лазерной абляцией в воде  
*Ж. П. Федорович, Е. Д. Фахрутдинова, В. А. Светличный* 137
- Флуоресцентно меченый родамином арабиногалактан и его свойства  
*Е. В. Хименко, Н. Ю. Васильева, Н. В. Слюсаренко, Е. А. Слюсарева* 138
- Нелинейно-оптические свойства красителя метиленового голубого в присутствии наночастиц золота  
*Т. А. Чевычелова, А. И. Звягин, О. В. Овчинников* 139
- Когерентные резонансы насыщенного поглощения на переходе с моментами уровней  $J=1/2$  в спектроскопии однонаправленных волн  
*Э. Г. Сапрыкин, А. А. Черненко* 140
- Лабораторное моделирование системы продольных токов, генерируемых потоком внутри-магнитосферной плазмы  
*А. А. Чибриков, А. Г. Березуцкий, М. А. Ефимов, Ю. П. Захаров, В. Г. Посух, М. А. Руменских, П. А. Трушин, И. Ф. Шайхисламов* 141
- Исследование автолокализованной дырки в кристалле  $LaF_3$  методом молекулярной динамики из первых принципов  
*И. Г. Чухлипа, А. С. Мысовский* 142
- Рост высококачественных кристаллов кальквинита методом Бриджмена и лазерная генерация на  $LiSr_2Ca_{1-x}AlF_6:Ce^{3+}Yb$   
*А. А. Шакиров, А. А. Шавельев, А. С. Низамутдинов, Н. Ф. Рахимов, О. А. Морозов, М. А. Марисов, В. В. Семашко* 143

---

Новый механизм спиновой поляризации квазичастиц в твердых телах: динамическая спиновая поляризация электронов <i>Т. С. Шамирзаев</i>	144
Влияние температуры на люминесцентные свойства наноструктур диоксида гафния <i>А. О. Шилов, С. С. Савченко, Р. В. Камалов, А. С. Вохминцев, И. А. Вайнштейн</i>	145
Усиленное спонтанное излучение $\lambda = 718$ нм в алмазе при оптической накачке <i>М. А. Шулепов, А. Г. Бураченко, Д. Е. Гелин, Е. И. Липатов, В. С. Ритенко, Е. Н. Тельминов</i>	146
3d нанолитография и фотонные интегральные схемы <i>А. Г. Витухновский, Д. А. Чубич, Д. А. Кольмагин, Риконд Паттиса</i>	147
Сверхчувствительная рамановская и флуоресцентная спектроскопия одиночных молекул <i>А. В. Наумов</i>	149

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

## В

Bergfeldt T. 4  
Boizot B. 6  
Bryukvina L. I. 3  
Busko D. 4

## F

Fedorov P. P. 4

## G

Glazunov D. S. 3

## H

Hogan B. T. 77  
Howard I. A. 4

## K

Kador Lothar 117  
Kamenskikh I. 5  
Konov V. 5  
Konyushkin V. A. 4  
Kotlov A. 5  
Kotomin E. A. 9  
Kusmartsev F. V. 134  
Kusmartseva A. 134  
Kuznetsov S. 5  
Kuznetsov S. V. 4

## L

Liu Y. 134  
Luo Y. 134  
Lyutakov O. 11, 12

## M

Madirov E. I. 4  
Malchukova E. 6  
Martyanov A. 5  
Nakladov A. N. 4

## O

Omelkov S. 5

## P

Pankratov V. 7  
Paperny V. L. 8  
Popov A. I. 9

## R

Ralchenko V. 5  
Richards B. S. 4  
Rubtsova E. 5

## S

Savin S. 5  
Sedov V. 5  
Tarala V. 5  
Tcrukov E. 6  
Tulupova A. 11  
Turshatov A. 4  
Vakalov D. 5  
Yangyang Ju 10  
Zabelin D. 11, 12  
Zabelina A. 11, 12  
Zhang B. 134  
Zhong Haizheng 10

## A

Абрамкин Д. С. 13  
Аграфонов Ю. В. 14  
Алексеев С. В. 15  
Алтынбаев Л. А. 77  
Алукер Н. Л. 16  
Альянова Н. В. 114  
Андреев С. Н. 72  
Андреев Ю. М. 87  
Ашкеева В. Е. 18, 30, 124  
Аржанов А. И. 69  
Артамонов А. С. 16  
Артемов К. П. 31  
Архипкин В. Г. 19, 66  
Асеев А. Л. 114  
Асланов С. В. 107  
Ашкарин И. Н. 114

## Б

Багаев С. Н. 42, 94  
Бадиков В. В. 57  
Бадиков Д. В. 57  
Баннова П. 20  
Бакиг Е. Х. 132  
Балдычева А. 77  
Баранцев К. А. 21  
Баранцев К. А. 35  
Барышников В. И. 22, 56, 129  
Бедин С. А. 72  
Белоновский А. В. 23, 40, 68  
Белотелов Г. С. 123  
Бердинов В. С. 24, 25, 70, 71, 98, 99  
Березуцкий А. Г. 59, 141  
Бессолов В. Н. 74, 75

Бетеров И. И. 114  
Блошкин А. А. 13  
Бобина Н. С. 101  
Богданов А. И. 26, 103  
Бойко А. А. 57, 58  
Бойченко С. В. 27  
Болдырев К. Н. 18  
Болдырев К. Н. 28, 30, 100  
Бонерт А. Э. 42  
Бражников Д. В. 42, 88  
Брюханов В. В. 76  
Бубырь Е. В. 94  
Бузин Д. С. 78, 106  
Бураченко А. Г. 31, 38, 86, 146  
Бурцев В. 32  
Бычков И. В. 94

## В

Вайнштейн И. А. 145  
Васильева Н. Ю. 138  
Васин А. А. 33  
Ветров С. Я. 78  
Вишюкуров В. А. 24, 25  
Вишюкуров В. В. 24, 25  
Винс В. Г. 116  
Витухновский А. Г. 147  
Волокитина А. В. 34  
Волочаев М. Н. 78  
Волошин Г. В. 35  
Вохминцев А. С. 145  
Вьюнышев А. М. 45, 66  
Вэнг Р. 136  
Вяткин В. П. 78

## Г

Гаврилюк А. А. 36  
Гаврилюк А. В. 36  
Гайслер В. А. 124  
Гармышева Т. Ю. 37  
Генн Д. Е. 38, 86, 116, 146  
Герасимова М. А. 39, 91, 113  
Гиршова Е. И. 23, 40, 68  
Глазунов Д. С. 94  
Голубовская А. Г. 41  
Гончаров А. Н. 42, 88  
Грабченко М. В. 41  
Грещева И. Г. 43, 44, 107  
Григорьев Д. В. 38, 73

Гришков В. А. 24  
 Гуняков В. А. 78  
 Гусельникова О. А. 54  
 Гутаковский А. К. 13

## Д

Давлетшин Н. Н. 45  
 Дергин А. А. 46  
 Дерепко В. Н. 43, 44, 47  
 Дзядух С. М. 73  
 Долуденко И. М. 72  
 Дормидонов А. Е. 81, 116  
 Дресвянский В. П. 48, 64, 101, 130  
 Душинский А. В. 82

## Е

Егоров В. И. 104  
 Егранов А. В. 49, 108  
 Ежов Д. М. 60  
 Елиссев А. П. 116  
 Ельцина Л. О. 50  
 Емельянов А. С. 94  
 Емельянов Е. А. 13  
 Емельянова А. С. 52  
 Еремчев И. Ю. 117  
 Ерзина М. Р. 54  
 Ермаков Л. К. 55  
 Ермошенко А. Д. 56  
 Ерушин Е. Ю. 57, 58  
 Есин М. Ю. 13  
 Ефимов М. А. 59, 141

## Ж

Жамус А. Я. 60  
 Жукова М. О. 77  
 Журавлев К. С. 61

## З

Зарубанов А. А. 61  
 Захаров Ю. П. 59, 141  
 Зверев А. С. 62  
 Звягин А. И. 63, 139  
 Зеленов Ф. В. 78  
 Зилов С. А. 64, 79  
 Зуев М. Г. 33

## И

Иванов Н. А. 95  
 Иконников Д. А. 45, 66  
 Ильенков Р. Я. 66

Ильякова П. Н. 62  
 Исмагилов А. О. 104

## К

Казаков Л. В. 94  
 Калининчев А. А. 104  
 Калитесевский М. А. 23, 40, 68  
 Камалов Р. В. 145  
 Кандидов В. П. 81  
 Канева Е. В. 26  
 Капуста Д. Н. 42  
 Каримуллин К. Р. 69  
 Кислицын С. А. 24, 70, 71  
 Кожина Е. П. 72  
 Козловский В. А. 49  
 Колесник Е. А. 73, 86  
 Колесникова Т. А. 22  
 Колкер Д. Б. 57, 58  
 Колымагин Д. А. 147  
 Компан М. Е. 75  
 Компанец В. О. 81  
 Кондратенко Т. С. 63, 107  
 Коненков С. Д. 74, 75  
 Коненкова Е. В. 74, 75  
 Констаггинова Е. И. 76  
 Коптев Е. С. 13  
 Костоков В. М. 90  
 Костокова Н. Ю. 57, 58  
 Котова Л. В. 77  
 Кох А. Е. 60  
 Кочерешко В. П. 77  
 Краснов А. И. 78, 106  
 Кривошеев Н. Д. 79  
 Крылов А. С. 128  
 Кузнецов А. Б. 60  
 Кузнецов А. В. 81  
 Курочкин В. Л. 82  
 Курочкин Ю. В. 82  
 Кушнарченко А. 83

## Л

Лазарева Н. Л. 84  
 Лапин И. Н. 34  
 Латышев А. В. 114  
 Левина А. А. 84  
 Липатов Е. И. 38, 86  
 Липатов Е. И. 31, 73, 116, 146  
 Литвинов А. Н. 21, 35  
 Лосев В. Ф. 15, 87, 121

Лубенко Д. М. 15, 87, 121  
 Лукин А. Н. 85  
 Лукин А. Н. 120, 126  
 Лютаков А. 20, 96  
 Лютаков А. 32, 54  
 Лютаков О. 83, 105, 135  
 Лю-ю Н. А. 36

## М

Майборода В. Ф. 82  
 Макаров А. О. 88  
 Макарова А. С. 89  
 Максимов Д. Н. 106  
 Максимова Н. Т. 90, 133  
 Малаховский М. А. 91  
 Малов С. Н. 36  
 Мамонтова С. Г. 46, 92  
 Марисов М. А. 143  
 Мартынович Е. Ф. 48, 50, 52, 64, 84, 93, 94, 101, 130, 136  
 Масюгин А. Н. 78  
 Межова Е. В. 95  
 Микитчук А. П. 40  
 Милотина Е. В. 54, 96  
 Миннаков Д. А. 120  
 Миронов В. П. 94, 97  
 Мирошниченко И. Б. 59  
 Митин К. А. 24, 70, 71, 98, 99  
 Митина А. В. 99  
 Митрофанов А. Ю. 62  
 Митрохин В. П. 116  
 Митяшин К. Ю. 114  
 Молчанова А. Д. 100  
 Морозов К. М. 23, 40, 68  
 Морозов О. А. 143  
 Морозова Н. В. 36  
 Москвина Н. А. 108  
 Мошкина Е. М. 100  
 Мурзил С. В. 101  
 Мустафин И. А. 134  
 Мысливец С. А. 19, 66  
 Мысовский А. С. 103, 142

## Н

Наболь С. В. 78, 106  
 Наседкин Б. А. 104  
 Наумов А. В. 69, 72, 117, 149  
 Незвестный И. Г. 114

Немцев И. В. 78  
 Непомнящих А. И. 37, 46  
 Низамутдинов А. С. 143  
 Никонович О. Л. 22  
 Нурмухаметов Д. Р. 62

## О

Овчинников О. В. 43, 44,  
 47, 63, 139  
 Овчинников О. И. 107  
 Олимпстрем А. А. 105

## П

Пакин А. С. 37, 103  
 Панкин П. С. 78, 106  
 Пантелеев В. Н. 74  
 Перепелица А. С. 43, 44,  
 107  
 Петрушин И. С. 14  
 Петрушков М. О. 13  
 Платонов В. К. 108  
 Попов И. Д. 33  
 Попов Н. А. 33  
 Попова Е. В. 120  
 Попова М. Н. 18, 30, 100  
 Посух В. Г. 59, 141  
 Потанин С. А. 116  
 Преображенский В. В. 13  
 Привалов В. Е. 109  
 Приятелев А. С. 36  
 Прокопьев В. Е. 110  
 Прудников О. Н. 42, 67  
 Путяго М. А. 13

## Р

Раджабов Е. А. 49, 111,  
 119  
 Ракевич А. Л. 130  
 Рахимов Н. Ф. 143  
 Реутова О. А. 112  
 Риглонд Паттна 147  
 Рипенко В. С. 31, 73, 86,  
 146  
 Рогова А. В. 113  
 Ружников Л. И. 95  
 Руменских М. А. 59, 141  
 Рябцев И. И. 114

## С

Саввин А. Д. 86, 116  
 Савостьянов А. О. 117

Савченко С. С. 145  
 Самборский А. В. 119  
 Самофалова Т. В. 1120  
 Сандабкин Е. А. 121  
 Сапрыкин Э. Г. 140  
 Светличный В. А. 34, 41,  
 60, 112, 137, 122  
 Свит К. А. 61  
 Семашко В. В. 143  
 Семенов А. В. 123  
 Семенов В. Н. 85  
 Семенов В. Н. 120  
 Семенова О. И. 18, 30, 124  
 Сенькина А. Ю. 108  
 Сивак А. В. 125  
 Сладкопевцев Б. В. 126  
 Слежкин В. А. 76  
 Слюсарев С. Н. 123  
 Слюсарева Е. А. 39, 91,  
 113, 127, 128, 138  
 Слюсаренко Н. В. 39, 91,  
 128, 138  
 Сметанина Е. О. 116  
 Смирнов М. С. 43, 44, 47,  
 107  
 Соломонов В. И. 89  
 Спирица А. В. 89  
 Сутормин В. С. 45, 78  
 Сутырин Д. В. 123  
 Суханова Ю. А. 22, 129

## Т

Тазнев Р. А. 130  
 Тайченачев А. В. 42, 67  
 Тарасенко В. Ф. 132  
 Тельминнов Е. Н. 146  
 Теренин С. Ю. 133  
 Тимофеев И. В. 78, 106  
 Толстиков В. В. 90  
 Томилин Ф. Н. 113  
 Томина Е. В. 126  
 Третьяков Д. Б. 114  
 Тропина Е. В. 100  
 Трухин В. Н. 134  
 Трушин П. А. 59, 141  
 Тулупова А. Е. 134  
 Тютрин А. А. 94, 136

## У

Уваров А. С. 108

## Ф

Фахрутдинова Е. Д. 41,  
 137  
 Федорович Ж. П. 134

## Х

Халаинов Д. В. 14  
 Хименко Е. В. 139  
 Хмелев А. В. 82

## Ц

Цыпкин А. Н. 104  
 Чевычелова Т. А. 43, 44,  
 63, 139  
 Чекалин С. В. 81  
 Черненко А. А. 140  
 Чертопалов С. 105  
 Чибранов А. А. 59, 141  
 Чубич Д. А. 147  
 Чулкина Н. Г. 142

## Ш

Шабалин С. А. 94  
 Шабанов А. В. 78  
 Шавельев А. А. 143  
 Шайхисламов И. Ф. 59,  
 141  
 Шакиров А. А. 143  
 Шалаев А. А. 37  
 Шамирзаев Т. С. 144  
 Шворчок В. 20, 32, 83, 96,  
 105, 135  
 Шеманин В. Г. 109  
 Шендрик Р. Ю. 26, 37, 95  
 Шылов А. О. 145  
 Шляндякин Е. В. 108  
 Шулепов М. А. 31, 86, 146  
 Щенникова Л. И. 95

## Э

Энтин В. М. 114  
 Энхбат С. 101

## Ю

Юдин В. И. 67  
 Юферов Ю. В. 33

## Я

Якшина Е. А. 114  
 Ястремский А. Г. 15

*Научное издание*

**МАТЕРИАЛЫ  
XVIII МОЛОДЕЖНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ  
ПО ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ  
И ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКЕ**

Иркутск, Россия, 5–10 июля 2021 г.

ISBN 978-5-9624-1943-5

*Материалы публикуются в авторской редакции*  
Компьютерный набор и верстка *С. В. Бойченко*

Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130а

Иркутский государственный университет  
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1

---

Подписано в печать 30.06.2021. Формат 60×90 1/16  
Усл. печ. л. 10,3. Тираж 150 экз. Заказ 64

---

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии Издательства ИГУ  
664084, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 124

