ВКВО-2019

Конференция посвящается памяти академика Евгения Михайловича Дианова, основателя и бессменного председателя Всероссийской конференции по волоконной оптике

г. Пермь 8-11октября 2019 года

Организаторы

Научный центр волоконной оптики РАН
Пермская научно-производственная приборостроительная
Пермский научно-исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)
Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ)
Генеральный спонсор конференции «Ленинградские лазерные системы»
Спонсоры конференции: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Программный комитет

Семенов Сергей Львович, НЦВО РАН, Москва (Председатель)
Шелемба Иван Сергеевич, ООО «Инверсия-Сенсор», Пермь (Заместитель Председателя)

Секция "Волоконные световоды и волоконно-оптические компоненты"

Бубнов Михаил Михайлович, НЦВО РАН, Москва (Председатель)
Безбородкин Павел Владимирович, АО «НИТИОМ ВНС «ГОИ им. С.И. Вавилова»
Бирюков Александр Сергеевич, НЦВО РАН, Москва
Гурьянов Алексей Николаевич, ИХВВ РАН, Нижний Новгород
Дукельский Константин Владимирович, СПбГУТ им. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург
Лобач Иван Александрович, Новосибирский государственный университет, Новосибирск
Крюков Игорь Иванович, ПАО ПНППК, Пермь
Чаморовский Юрий Константинович, ИРЭ РАН, Москва
Шевцов Денис Игоревич, ПАО ПНППК, Пермь

Секция "Волоконные лазеры и усилители"

Буфетов Игорь Алексеевич, НЦВО РАН, Москва (Председатель)
Бабин Сергей Алексеевич, ИАиЭ СО РАН, Новосибирск
Цветков Владимир Борисович,ИОФ РАН, Москва
Евтихиев Николай Николаевич, НТО «ИРЭ-Полюс», НИЯУ МИФИ, Москва
Кель Олег Леонидович, ПНППК, Пермь
Мелькумов Михаил Александрович, НЦВО РАН, Москва

Секция "Волоконно-оптические системы связи и передачи информации"

Наний Олег Евгеньевич, МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва (Председатель)
Бурдин Владимир Александрович, ПГУТИ, Самара
Бурдин Антон Владимирович, ПГУТИ, Самара
Редюк Алексей Александрович, ИВТ СО РАН, Новосибирский государственный университет, Новосибирск
Султанов Альберт Ханович, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа
Турицын Сергей Константинович, Астонский университет, Бирмингем, Великобритания
Федорук Михаил Петрович, ИВТ СО РАН, Новосибирск

Секция "Волоконно-оптические датчики"

Васильев Сергей Александрович, НЦВО РАН, Москва (Председатель)
Беловолов Михаил Иванович, НЦВО РАН, Москва
Бутов Олег Владиславович, ИРЭ РАН, Москва
Витрик Олег Борисович, ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
Горшков Борис Георгиевич, ИОФ РАН, Москва
Пнев Алексей Борисович, МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва
Шелемба Иван Сергеевич, ООО «Инверсия-Сенсор»,

Секция "Агробиофотоника"

Кульчин Юрий Николаевич, ИАПУ ДВО РАН,Владивосток (Председатель)
Ковш Иван Борисович, Лазерная Ассоциация , Москва
Будаговский Андрей Валентинович, Мичуринский ГАУ, Мичуринск
Журавлева Екатерина Васильевна, Министерство науки и высшего образования РФ, Москва
Попов Владимир Олегович, ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва
Соловченко Алексей Евгеньевич, МГУ, Москва
Константинов Юрий Александрович, ПФИЦ УрО РАН. Пермь

Секция "Нанофотоника"

Габитов Ильдар Равильевич, Сколтех и Университет Аризоны (Сопредседатель)
Драчев Владимир Прокопьевич, Сколтех и Университет Северного Техаса (Сопредседатель)
Маймистов Андрей Иванович, МИФИ, Москва
Виноградов Алексей Петрович, МФТИ, Долгопрудный
Сарычев Андрей Карлович, Институт Теоретической и Прикладной Электродинамики РАН, Москва
Лавриненко Андрей Владимирович, Технический Университет Дании
Петров Михаил Игоревич, Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Секция "Радиофотоника"
Шулунов Алексей Николаевич ОАО "НПК "НИИДАР"", Москва (Председатель)
Белкин Михаил Евсеевич, Московский технологический университет (МИРЭА), Москва
Бугров Владислав Евгеньевич Университет ИТМО, Санкт-Петербург
Валуев Виктор Васильевич НИЯУ МИФИ, Москва
Морозов Олег Геннадьевич, КГТУ им. А.Н. Туполева, Казань
Струк Валерий Константинович, ПНППК, Пермь
Секция "Волоконно-оптические кабели"
Мещанов Геннадий Иванович, ВНИИКП, Москва (Председатель)
Овчинникова Ирина Александровна, ВНИИКП, Москва
Тарасов Дмитрий Анатольевич, ВНИИКП, Москва
Воронцов Анатолий Сергеевич, ВНИИКП, Москва
Смильгевич Александр Вадимович, ООО «Инкаб», Пермь
Организационный комитет
Андреев Алексей Гурьевич, ПАО ПНППК, Пермь (Председатель)
Богданова Марина Николаевна, НЦВО РАН, Москва
Былинкина Валентина Геннадьевна, ПАО ПНППК, Пермь
Зак Михаил Иосифович, ПАО ПНППК, Пермь
Константинов Михаил Александрович, ПАО ПНППК, Пермь
Крюков Игорь Иванович, ПАО ПНППК, Пермь
Левченко Андрей Евгеньевич, НЦВО РАН, Москва
Первадчук Владимир Павлович, Институт фотоники и оптоэлектронного приборостроения ПГТУ, Пермь
Шакирова Галина Касимовна, ПАО ПНППК, Пермь (Технический секретарь)

Редакция

Главный редактор
Свинцов А. Г.
Редакционный совет

Беловолов Михаил Иванович	к.ф.-м.н.	НЦВО РАН
Бурдин Антон Владимирович	д.т.н.	ПГУТИ
Бурдин Владимир Александрович	д.т.н.	ПГУТИ
Буфетов Игорь Алексеевич	чл.-корр.РАН	НЦВО РАН
Витрик Олег Борисович	д.ф.-м.н.	ИАПУ ДВО РАН
Дмитриев Сергей Александрович	д.т.н.	Оптические системы безопасности
Капранов Дмитрий Валерьевич		Минпромторг
Карасик Валерий Ефимович	д.т.н.	МГТУ им Баумана Н.Э.
Кульчин Юрий Николаевич	академик РАН	ИАПУ ДВО РАН
Лукин Игорь Александрович	к.т.н.	Супертел
Маковей Сергей	к.т.н.	Corning
Морозов Олег Геннадьевич	д.т.н.	КГТУ-КАИ им А.Н. Туполева
Потапов Владимир Тимофеевич	д.т.н.	ИРЭ РАН
Свинцов Анатолий Геннадьевич	к.т.н.	Фотон-Экспресс
Семенов Андрей Борисович	д.т.н.	МТУСИ
Семенов Сергей Львович	д.ф.-м.н.	НЦВО РАН
Синев Сергей Геннадьевич	д.т.н.	АИН
Слепцов Михаил Алексеевич	к.т.н.	Т8
Смильгевич Александр Вадимович	к.э.н.	ИНКАБ
Тихомиров Сергей Владимирович	д.т.н.	ВНИИОФИ
Филимонов Сергей Николаевич	д.т.н.	ПАО «Вымпелком»
Хромой Борис Петрович	д.т.н.	МТУСИ
Шаталин Сергей Владимирович	к.ф.-м.н.	Silixa Ltd
Ющенко Николай Иванович		СвязьСтройДеталь

Издание зарегистрировано министерством РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 10.10.2000 г., ПИ №77-5559, Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 08.12.2009, ПИ №ФС77-38431
Индекс издания по каталогам:Роспечати — 37261, Пресса России — 39813 Издается с апреля 1995 г.
115446, Москва, Коломенский проезд д. 21
тел. 8(965) 181-02-25 e-mail: fotonexpress@mail.ru www.fotonexpres.ru
Тезисы докладов публикуются в том виде, в котором они были предоставлены авторами. Мнение авторов не всегда отражает точку зрения редакции. Редакция не несёт ответственности за содержание рекламных материалов. Любое использование материалов журнала допускается только с письменного разрешения редакции.

Издание включено в Российский индекс научного цитирования www.elibrary.ru, ВИНИТИ РАН, в «список ВАК»

ПАМЯТИ ЕВГЕНИЯ МИХАЙЛОВИЧА ДИАНОВА
Семенов С.Л., Чурбанов М.Ф., Андреев А.Г., Мещанов Г.И.……..16

КАЛИБРОВОЧНЫЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В ОБЛАСТИ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ
Батурин А.С., Кравцов В.Е., Крутиков В.Н., Митюрев А.К., Савкин К.Б., Тихомиров С.В.……..18

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ DWDM-СИСТЕМ СВЯЗИ РОССИЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВА
Трещиков В.Н.……20

РЫНОК ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА И КАБЕЛЯ В МИРЕ И В РОССИИ
Мещанов Г.И., Николаев А.В.……..21

ФОТОНИКА: ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ В СНГ И В МИРЕ
Ковш И.Б.……..21

Волоконно-оптические датчики……22

ВОЛОКОННЫЕ ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК С НАКЛОННЫМИ ШТРИХАМИ
Бутов О.В., Томышев К.А.……..22

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА ДЛЯ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК С НАКЛОННЫМИ ШТРИХАМИ
Томышев К.А., Мануйлович Е.С., Бутов О.В.……24

ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННЫЙ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДАТЧИК ИЗГИБА ДЛЯ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
Бутов О.В., Базакуца А.П., Чаморовский Ю.К., Федоров А.Н., Шевцов И.А.……..26

РАСПРЕДЕЛЁННЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ РЕГИСТРАЦИИ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ СЛАБООТРАЖАЮЩИХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Пнев А.Б., Степанов К.В., Жирнов А.А., Чернуцкий А.О., Нестеров Е.Т., Карасик В.Е.……..28

БОРТОВАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗНОСА ТОКОПРИЁМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА МЕТРОПОЛИТЕНА
Морозов О.Г., Артемьев В.И.……..30

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ДРЕЙФА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С ТЕРМОЗАВИСИМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МАТЕРИАЛОВ КОНТУРА
Есипенко И.А., Лыков Д.А.……..32

МНОГОМОДОВЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ГИРОСКОП
Сахаров В.К., Машинский С.С.……..34

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ
Григорьев В.В., Митюрев А.К., Погонышев А.О., Савкин К.Б., Тихомиров С.В.……..36

ОДНОРОДНОЕ УШИРЕНИЕ В СПЕКТРЕ СУПЕРЛЮМИИНЕСЦЕНТНОГО ЭРБИЕВОГО ИСТОЧНИКА
Моршнев С.К., Губин В.П., Старостин Н.И., Пржиялковский Я.В., Сазонов А.И.……..38

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК С ПОДАВЛЕНИЕМ ИЗБЫТОЧНОГО ШУМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ
Пржиялковский Я.В., Старостин Н.И., Губин В.П., Моршнев С.К., Сазонов А.И.……..40

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОГРАНИЧЕННОЙ ЧАСТОТНОЙ ПОЛОСЫ В ВОЛОКОННОМ ДАТЧИКЕ ТОКА НА ЭФФЕКТЕ ФАРАДЕЯ
Старостин Н.И., Губин В.П., Пржиялковский Я.В., Моршнев С.К., Сазонов А.И.……..42

ОПТИЧЕСКИЙ ЧАСТОТНЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР НА ОСНОВЕ САМОСКАНИРУЮЩЕГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА
Ткаченко А.Ю., Лобач И.А., Каблуков С.И.……..44

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИРПИРОВАННОГО ИМПУЛЬСА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФАЗЫ В КОГЕРЕНТНОМ РЕФЛЕКТОМЕТРЕ
Яцеев В.А., Зотов А.М., Бутов О.В.……..46

ХАРАКТЕРИСТИКА УЗКОПОЛОСНЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ РЕФЛЕКТОМЕТРОВ
Фомиряков Э.А., Харасов Д.Р., Никитин С.П., Наний О.Е., Трещиков В.Н.……..48

ТЕОРЕМА ВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКОВ И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
Беловолов М.И.……..50

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ВИБРАЦИИ
Бурдышева О.В., Шолгин Е.С.……..52

ВИБРАЦИОННАЯ ДИНАМИКА ТОНКИХ ПЛЕНОК МОДЕЛЕЙ БАРАБАННЫХ ПЕРЕПОНОК И МЕТОДИКА ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ЗОНДОМ
Беловолов М.И., Парамонов В.М., Беловолов М.М., Тимашев С.Ф., Свистушкин М.В., Мокоян Ж.Т. Тимофеева В.А.……..54

МЕХАНИЗМ И СВОЙСТВА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКОВ НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ ЗВУКА
Беловолов М.И., Парамонов В.М., Беловолов М.М.……..56

ИНТЕРФЕРОМЕТР НА ОСНОВЕ ДВУХ ВОЛОКОННЫХ ВСТАВОК С ТОНКОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ
Иванов О.В.……..58

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ ФОТОАКТИВНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ТЕРМОМЕТРИИ И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ
Матросова А.С., Евстропьев С.К., Миронов Л.Ю., Демидов В.В., Комаров А.В., Никоноров Н.В.……..60

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ МИКРООПТОМЕХАНИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСНЫХ СТРУКТУР
Потапов В.Т., Егоров Ф.А., Пестерев Е.Н.……..62

Агробиофотоника……..*64*

АГРОБИОФОТОНИКА - ВЛИЯНИЕ СВЕТА НА РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ
Кульчин Ю.Н.……..64

СВЕТОДИОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ АГРОБИОФОТОНИКИ
Долин Е.В.……..65

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ВЛИЯНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ
Чуб В.В., Миронова О.Ю., Морозов Я.А., Волков А.В.……..66

ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ СРЕДСТВ КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ РАСТЕНИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР
Макаренков Д.А., Глушко А.Н., Убаськина Ю.А., Поплевин Д.С.……..68

СТАНОВЛЕНИЕ АГРОБИОФОТОНИКИ КАК ЗАКОНОМЕРНОЕ РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ
Соснин Э.А., Кульчин Ю.Н., Астафурова Т.П.……..70

МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ КАЧЕСТВА СРЕЗАННЫХ ЛИСТЬЕВ САЛАТА ПО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ
Соловченко А.Е., Шурыгин Б.М., Николенко А.А., Чивкунова О.Б., Соловченко О.В., Ахаев Д.Н.……..72

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ КАРТОФЕЛЯ IN VITRO
Чухланцев Н.В., Фомин Д.С.……..74

Радиофотоника……..*76*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОПЛАНАРНОЙ ЛИНИИ СВЧ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ БУФЕРНОГО СЛОЯ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ
Журавлев А.А., Мушинский С.С., Вобликов Е.Д., Малкин А.И., Князев Н.С.……..76

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОТОНИКЕ *Пшеничнюк И.А., Назариков Г.И., Малышева Е.Д., Казаков И.А., Косолобов С.С., Маймистов А.И., Драчев В.П.*……..78

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ ВЕКТОРНЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ СПЕКТРА: ВОЗМОЖНОСТИ, ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
Морозов О.Г., Папазян С.Г., Сахабутдинов А.Ж.……..79

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЛАДКОГО ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ДЛЯ ОДНОМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА
Попов А.В., Прокопович Д.В., Баскаков В.А.……81

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЙ СИСТЕМ СРАВНЕНИЯ И СИНХРОНИЗАЦИИ ШКАЛ ВРЕМЕНИ ПРОСТРАНСТВЕННО УДАЛЕННЫХ ЭТАЛОНОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ
Колмогоров О.В., Прохоров Д.В., Донченко С.С.……83

РАДИФОТОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МГНОВЕННЫХ ЧАСТОТ МНОЖЕСТВА РАДИОСИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНОГО ЧАСТОТНОГО СМЕЩЕНИЯ С РАСШИРЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ ИЗМЕРЯЕМЫХ ЧАСТОТ
Иванов А.А., Морозов О.Г., Сахабутдинов А.Ж., Сарварова Л.М., Колесников В.Ю.……85

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ КОЛЕСНОГО ПОДШИПНИКА НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ АДРЕСНЫХ СТРУКТУР
Аглиуллин Т.А., Губайдуллин Р.Р., Сахабутдинов А.Ж., Морозов О.Г.……87

ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК КОНТРОЛЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ЩЕТОЧНО-КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ВБР
Липатников К.А., Кузнецов А.А., Фасхутдинов Л.М., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж.……89

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ С ФАЗОВЫМ П-СДВИГОМ КАК ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ
Липатников К.А., Кузнецов А.А., Фасхутдинов Л.М., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж.……90

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ИЗНОСА ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ШИНЫ
Губайдуллин Р.Р., Аглиуллин Т.А, Сахабутдинов А.Ж.……92

ИЗМЕРЕНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ В ШИРОКОПОЛОСНЫХ АНАЛОГОВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ РАДИОСИГНАЛОВ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ
Иванов С.И., Лавров А.П., Саенко И.И., Звегинцев В.Н., Подстригаев А.С.……94

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОИСКА С ВОСХОЖДЕНИЕМ К ВЕРШИНЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ЮСТИРОВКИ КАНАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА И ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА
Карнаушкин П.В., Пономарев Р.С.……96

Волоконно-оптические системы связи и передачи информации……98

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОТКРЫТЫХ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ ПЛАТФОРМ
Коган С.С.……98

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ
Конышев В.А., Наний О.Е., Трещиков В.Н., Новиков А.Г., Убайдуллаев Р.Р.……100

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ МУЛЬТИГИГАБИТНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО КВАРЦЕВЫМ ВОЛОКОННЫМ СВЕТОВОДАМ С ЭКСТРЕМАЛЬНО УВЕЛИЧЕННЫМ ДИАМЕТРОМ СЕРДЦЕВИНЫ
Бурдин А.В., Бурдин В.А., Жуков А.Е.……101

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКНА НА МАКСИМАЛЬНУЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ
Старых Д.Д., Самоделкин Л.А., Наний О.Е., Шихалиев И.И., Трещиков В.Н.……103

МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ
Сидельников О.С., Редюк А.А., Стилианос С., Федорук М.П.……104

КОМПЕНСАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА С ПОНИЖЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ
Аверьянов Е.А., Редюк А.А., Сидельников О.С., Федорук М.П.……106

МАЛОМОДОВАЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ СВЯЗИ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ИСКАЖЕНИЙ НА ЛИНЕЙНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ
Бурдин В.А., Бурдин А.В., Волков К.А., Еремчук Е.Ю.……108

СОДЕРЖАНИЕ СОЛИТОНОВ В СТАНДАРТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ OFDM СИГНАЛАХ
Седов Е.В., Редюк А.А., Федорук М.П., Турицын С.К.……110

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ DWDM СИСТЕМ СВЯЗИ С КАНАЛЬНОЙ СКОРОСТЬЮ И ФОРМАТОМ МОДУЛЯЦИИ
Конышев В.А., Наний О.Е., Новиков А.Г., Убайдуллаев Р.Р., Трещиков В.Н.……..…..111

АППАРАТУРА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ШКАЛ ВРЕМЕНИ ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ СВЯЗИ
Григорьев В.В., Митюрев А.К., Савкин К.Б., Тихомиров С.В.……..…..112

ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ
Дорожкин А.Н., Старых Д.Д., Наний О.Е., Трещиков В.Н.……..…..114

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕШАЮЩИХ ДЕРЕВЬЕВ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ
Ракитский А.А., Редюк А.А.……..…..116

Волоконно-оптические кабели……..*118*

ПОТЕНЦИАЛЬНО-ВОЗМОЖНЫЕ ТОЧКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАБЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ С ОПЕРАТОРАМИ СВЯЗИ
Павлов Д.В.……..…..118

ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИЧЕСКИМ КАБЕЛЯМ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ
Овчинникова И.А, Воронцов А.С., Тарасов Д.А.……..…..120

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ С ПОВЫШЕННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ И МЕТОДЫ ИХ КОНТРОЛЯ
Степанов К.В., Кошелев К.И., Жирнов А.А., Пнев А.Б., Шелестов Д.А., Сазонкин С.Г., Овчинникова И.А., Игнатиков И.С., Тарасов Д.А.……..…..122

ПРОГНОЗ СРОКА СЛУЖБЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ С УЧЕТОМ НАГРУЗОК НА ВОЛОКНО В ПРОЦЕССЕ ЕГО ПРОИЗВОДСТВА
Бурдин В.А., Нижгородов А.О.……..…..124

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОВМЕСТИМОСТИ КОМПОНЕНТОВ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ С ГИДРОФОБНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ
Тарасов Д.А., Овчинникова И.А.……..…..126

Волоконные световоды и волоконно-оптические компоненты……*128*

ВЫСОКОЧИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА С МАЛЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ПОТЕРЯМИ
Гурьянов А.Н.……..…..128

АКТИВНЫЕ СВЕТОВОДЫ НА ОСНОВЕ ФТОРФОСФОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА
Лобанов А.С., Липатов Д.С., Яшков М.В., Абрамов А.Н., Гурьянов А.Н., Кочергина Т.А., Бобков К.К., Худяков М.М., Лихачев М.Е.……..…..130

MCVD МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕТОВОДОВ С ОДНОРОДНОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ YB_2O_3-AL_2O_3-P_2O_5-SIO_2
Липатов Д.С., Гурьянов А.Н., Бобков К.К., Лихачев М.Е.……..…..132

ПОДАВЛЕНИЕ НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫХ МОД ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА С ДВОЙНОЙ ОБОЛОЧКОЙ ПОСРЕДСТВОМ ВНЕСЕНИЯ ПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПЕРВУЮ ОТРАЖАЮЩУЮ ОБОЛОЧКУ
Кочергина Т.А., Алешкина С.С., Липатов Д.С., Салганский М.Ю., Вельмискин В.В., Бубнов М.М., Гурьянов А.Н., Лихачев М.Е.……..…..134

КВАРЦЕВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ, АКТИВИРОВАННЫЕ НАНОКРИСТАЛЛАМИ YAG:ND3+
Евстропьев С.К., Асеев В.А., Демидов В.В., Кузьменко Н.К., Матросова А.С., Комаров А.В., Дукельский К.В., Никоноров Н.В., Орешкина К.В.……..…..136

ИЗГОТОВЛЕНИЕ АКТИВНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ НА ОСНОВЕ ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ МЕЗОПОРИСТЫХ СТЕКОЛ *Дианов Е.М., Исхакова Л.Д., Вельмискин В.В., Пластинин Е.А., Милович Ф.О., Машинский В.М., Фирстов С.В.……..…..138*

СТРУКТУРА И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ МЕЗОПОРИСТЫХ СТЕКОЛ И ПРЕФОРМ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ НА ИХ ОСНОВЕ *Пластинин Е.А., Дианов Е.М., Исхакова Л.Д., Вельмискин В.В., Машинский В.М., Фирстов С.В., Милович Ф.О.……..…..140*

СОВМЕСТНЫЕ РАЗРАБОТКИ ИХВВ РАН И НЦВО РАН ПО ХАЛЬКОГЕНИДНЫМ ВОЛОКОННЫМ СВЕТОВОДАМ ДЛЯ СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА
Чурбанов М.Ф., Плотниченко В.Г.……..…..142

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ И ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ И ДИФРАКЦИИ
Исхакова Л.Д., Лаврищев С.В., Милович Ф.О., Черноок С.Г.……143

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СТЁКЛА СИСТЕМ GA-GE-AS-SE И GA-GE-SB-SE ДЛЯ АКТИВНОЙ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА
Ширяев В.С., Караксина Е.В., Котерева Т.В., Филатов А.И., Плехович А.Д.……145

КРИСТАЛЛЫ СИСТЕМЫ AgBr – $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНФРАКРАСНЫХ СВЕТОВОДОВ
Салимгареев Д.Д., Львов А.Е., Лашова А.А., Жукова Л.В.……147

ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ СВЕТОВОД С УВЕЛИЧЕННЫМ ДИАМЕТРОМ ПОЛЯ МОДЫ ДЛЯ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА
Лашова А.А., Львов А.Е., Салимгареев Д.Д., Корсаков А.С., Жукова Л.В.……149

ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ НА ОСНОВЕ СТЕКОЛ СИСТЕМЫ GE-SE ДЛЯ НПВО АНАЛИЗА
Зернова Н.С., Вельмужов А.П., Суханов М.В., Котерева Т.В.……151

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА ИНФРАКРАСНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА РЕГИСТИРИРУЕМЫЙ СИГНАЛ В ДИАПАЗОНЕ 7-9 МКМ
Львов А.Е., Салимгареев Д.Д., Лашова А.А., Корсаков А.С., Жукова Л.В.……152

СТЕРИЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МЕДИЦИНЕ
Столов А.А., Микилев А.И.……154

АО «ОПТИКОВОЛОКОННЫЕ СИСТЕМЫ»: ЭТАПЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА
Буралкин М.В., Долгов Ю.В., Танякин Д.А…, Чернов А., Гусев В.О.……156

ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЗАПИСЬ МАССИВОВ ВБР В 7-СЕРДЦЕВИННЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ ДЛЯ СЕНСОРНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ
Вольф А.А., Бронников К.А., Якушин С.С., Достовалов А.В., Журавлев С.Г., Салганский М.Ю., Егорова О.Н., Семёнов С.Л., Бабин С.А.……158

ВОЛОКОННЫЕ РЕШЕТКИ В АКТИВНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ФОСФОСИЛИКАТНЫХ СВЕТОВОДАХ
Рыбалтовский А.А., Егорова О.Н., Васильев С.А., Журавлев С.Г., Бутов О.В., Семенов С.Л., Галаган Б.И., Сверчков С.Е., Денкер Б.И.……160

ТЕЙПЕРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА С МАССИВОМ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК
Попов С.М., Бутов О.В., Колосовский А.О., Волошин В.В., Воробьёв И.Л., Исаев В.А., Вяткин М.Ю., Фотиади А.А., Чаморовский Ю.К.……162

ПОНИЖЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ВРМБ В ПАССИВНЫХ ОДНОМОДОВЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ С МНОГОМОДОВЫМ АКУСТИЧЕСКИМ ПРОФИЛЕМ
Цветков С.В., Лихачев М.Е., Худяков М.М., Бубнов М.М.……164

ИЗГИБНЫЕ ПОТЕРИ В ПОЛЫХ АНТИРЕЗОНАНСНЫХ СВЕТОВОДАХ С БОЛЬШОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДЬЮ МОДОВОГО ПОЛЯ
Леонов С.О., Елистратова Е.А., Демидов В.В., Ананьев В.А., Алагашев Г.К., Прямиков А.Д., Карасик В.Е.……166

СЕЛЕКТИВНОЕ УСИЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ МОДЫ ГИБРИДНОГО СВЕТОВОДА С АНОМАЛЬНОЙ В ОБЛАСТИ 1 МКМ ДИСПЕРСИЕЙ
Алешкина С.С., Липатов Д.С., Салганский М.Ю., Таусенев А.В., Шепелев Д.В., Бубнов М.М., Гурьянов А.Н., Лихачев М.Е.……168

ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СЕРДЦЕВИНЫ ЗАГОТОВКИ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ АКТИВНЫХ ИОНОВ
Латкин К.П., Бурдин В.В., Константинов Ю.А., Первадчук В.П.……170

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ПОЛЫХ РЕВОЛЬВЕРНЫХ СВЕТОВОДАХ
Колядин А.Н., Косолапов А.Ф., Буфетов И.А.……172

СИНТЕЗ ФОСФОРОСИЛИКАТНЫХ СТЁКОЛ И СВЕТОВОДОВ НА ИХ ОСНОВЕ, ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ, МЕТОДОМ MCVD
Афанасьев Ф.В., Гурьянов А.Н., Лобанов А.С., Хопин В.Ф., Мелькумов М.А., Фирстов С.В.……174

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГАУССОВСКИХ ИМПУЛЬСОВ ПО ОДНОМОДОВЫМ ОПТИЧЕСКИМ ВОЛОКНАМ В ЛИНЕЙНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ
Былина М.С., Глаголев С.Ф.……176

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ РАЗВЕТВИТЕЛЕЙ
Базакуца П.В., Боев М.А., Никитин А.И.……178

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СПЛАВНЫХ WDM-МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ В ЖЕСТКИХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ
Елизаров С.Г., Ключник Н.Т., Ленин М.М., Иванов Д.А., Яковлев М.Я.……..180

ПОВЫШЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ АКТИВНОГО КВАРЦЕВОГО ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА
Цибиногина М.К., Шарипов Я.М., Осипчук М.К., Джанджгава Н.Т., Пищальников К.Д., Гагарина К.И., Перетрухина И.А.……182

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СВЕТОВОДОВ ТИПА «ПАНДА» С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ ЧИСТОГО И ЛЕГИРОВАННОГО АЗОТОМ КВАРЦЕВЫХ СТЕКОЛ
Томашук А.Л., Кашайкин П.Ф., Семенов С.Л., Филиппов А.В., Бычкова Е.А., Галанова С.В., Азанова И.С., Вохмянина О.Л. , Поспелова Е.А., Шаронова Ю.О., Димакова Т.В., Волошин В.В., Воробьев И.Л., Колосовский А.А., Чаморовский Ю.К., Голант К.М.……184

ПРОИЗВОДСТВО И ИСПЫТАНИЕ СВЕТОВОДОВ ТИПА КВАРЦ/КВАРЦ, УСТОЙЧИВЫХ К УФ И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ
Грищенко А.Б., Сахаров Д.А.……186

РАДИАЦИОННО СТОЙКИЕ НЕЛЕГИРОВАННЫЕ СВЕТОВОДЫ ТИПА «ПАНДА» В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕПРЕРЫВНОГО И ИМПУЛЬСНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ
Азанова И.С., Шаронова Ю.О., Поспелова Е.А., Вохмянина О.Л., Мальцев И.А., Димакова Т.В. Кашайкин П.Ф., Филиппов А.В., Таценко О.М., Томашук А.Л.……188

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ В МЕДНОМ ПОКРЫТИИ
Косолапов А.Ф., Семенов С.Л.……190

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ПОЛИИМИДНЫМ ЗАЩИТНО-УПРОЧНЯЮЩИМ ПОКРЫТИЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
Булатов М.И., Саранова И.Д., Смирнова А.Н.……192

Волоконные лазеры и усилители……..*194*

ИЗМЕРЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ, ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
Чернышева М.А.……194

НЕЛИНЕЙНАЯ КОМПРЕССИЯ СПЕКТРА ОТРИЦАТЕЛЬНО ЧИРПИРОВАННЫХ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОМ СВЕТОВОДЕ СО СМЕЩЕННОЙ ДИСПЕРСИЕЙ
Крылов А.А., Сенаторов А.К., Яценко Ю.П.……196

ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ КОНУСНОГО ЭРБИЕВОГО СВЕТОВОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ САМОФОКУСИРОВКИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В СРЕДАХ С АНОМАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ
Андрианов А.В., Коптев М.Ю., Лихачев М.Е., Бубнов М.М., Липатов Д.С., Анашкина Е.А., Ким А.В., Литвак А.Г.……198

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВКР-ГЕНЕРАЦИИ ДИССИПАТИВНЫХ СОЛИТОНОВ ВО ВНЕШНЕМ РЕЗОНАТОРЕ ИЗ ФОСФОРОСИЛИКАТНОГО ВОЛОКНА
Харенко Д.С., Беднякова А.Е., Жданов И.С., Федорук М.П., Бабин С.А.……200

МНОГОИМПУЛЬСНЫЕ РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ В ТУЛИЕВОМ ВОЛОКОННОМ КОЛЬЦЕВОМ ЛАЗЕРЕ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД
Воропаев В.С., Донодин А.И., Воронец А.И., Батов Д.Т., Власов Д.С., Лазарев В.А., Тарабрин М.К., Крылов А.А., Карасик В.Е.……202

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ С ВЫСОКОЙ ПИКОВОЙ МОЩНОСТЬЮ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1.9 МКМ В СТАНДАРТНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СВЕТОВОДАХ
Донодин А.И., Воропаев В.С., Воронец А.И., Батов Д.Т., Власов Д.С., Лазарев В.А., Тарабрин М.К., Карасик В.Е.……204

ВРЕМЕННЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОЛЬМИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ ГИБРИДНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД
Филатова С.А., Камынин В.А., Арутюнян Н.Р., Рыбин М.Г., Образцова Е.Д., Цветков В.Б.……206

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА Bi:SnO-SiO_2-GeO_2 СТЕКОЛ
Галаган Б.И., Денкер Б.И., Машинский В.М., Сверчков С.Е., Дианов Е.М.……208

ОБЕСЦВЕЧИВАНИЕ ИК-АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА 1550 НМ ПРИ НАГРЕВЕ ВИСМУТОВЫХ СВЕТОВОДОВ
Алышев С.В., Харахордин А.В., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Фирстова Е.Г., Мелькумов М.А., Гурьянов А.Н…..210

ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫМ ВОДОРОДОМ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КВАРЦЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ER^{3+} В СЕРДЦЕВИНЕ
Базакуца А.П., Бутов О.В.……212

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ЭРБИЕВЫХ КОМПОЗИТНЫХ СВЕТОВОДОВ
Галаган Б.И., Денкер Б.И., Камынин В.А., Поносова А.А., Сверчков С.Е., Семенов С.Л., Цветков В.Б.……..…..214

ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 2,718 НМ АКТИВНОМ ТЕЛЛУРИТНОМ СВЕТОВОДЕ
Муравьев С.В., Дорофеев В.В., Колташев В.В., Ким А.В.……..216

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭРБИЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ С КОРОТКИМ РЕЗОНАТОРОМ
Смирнов А.М., Базакуца А.П., Бутов О.В.……...…..218

ГЕНЕРАЦИЯ СУПЕРКОНТИНУУМА В ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ВОЛОКНАХ ПРИ НАКАЧКЕ CR2+:ZNSE ЛАЗЕРОМ
Леонов С.О., Ванг Ю., Ширяев В.С., Снопатин Г.Е., Степанов Б.С., Плотниченко В.Г., Карасик В.Е., Гальцерано Д.……..220

КВАНТОВЫЕ ФЛУКТУАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СОЛИТОНОВ
Мельников Л.А., Мажирина Ю.А.……...…..222

ВОЛОКОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ СЛАБОГО СИГНАЛА НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 0.98 МКМ
Алешкина С.С., Липатов Д.С., Котов Л.В., Темянко В.Л., Кочергина Т.А., Вельмискин В.В., Бардина Т.Л., Бубнов М.М., Гурьянов А.Н., Лихачев М.Е.……..224

ТУЛИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С УПРАВЛЯЕМЫМ САМОСКАНИРОВАНИЕМ ДЛИНЫ ВОЛНЫ
Бударных А.Е., Лобач И.А., Каблуков С.И.……..226

НЕОДИМОВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С САМОСКАНИРОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ
Каширина Е.К., Лобач И.А., Каблуков С.И.……..228

НОВЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ
Иваненко А.В., Нюшков Б.Н., Смирнов С.В., Кохановский А.Ю., Кобцев С.М., Серебренников К.В., Луценко Д.Б., Гладуш Ю.Г., Мкртчян А.А.……..230

МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕШЕТОК В ВОЛОКОННОМ САМОСКАНИРУЮЩЕМ ЛАЗЕРЕ
Лобач И.А., Дробышев Р.В., Подивилов Е.В., Каблуков С.И.……..232

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СУБНАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ИТТЕРБИЕВОМ ВОЛОКОННОМ УСИЛИТЕЛЕ
Жлуктова И.В., Камынин В.А., Филатова С.А., Трикшев А.И., Цветков В.Б.……..234

ЛАЗЕРЫ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 2.5 - 5 МКМ НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВЫХ СВЕТОВОДОВ С ПОЛОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ
Гладышев А.В.……..236

ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ТУЛИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР
Колегов А.А., Софиенко Г.С.……..238

ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННЫЙ ГАЗОВЫЙ РАМАНОВСКИЙ ЛАЗЕР С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ГЕНЕРАЦИИ 4.4 МКМ
Астапович М.С., Гладышев А.В., Худяков М.М., Косолапов А.Ф., Лихачев М.Е., Буфетов И.А.……..239

2,07-МИКРОННЫЙ ГОЛЬМИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ
Вольф А.А., Скворцов М.И., Камынин В.А., Жлуктова И.В., Абдуллина С.Р., Достовалов А.В., Цветков В.Б., Бабин С.А.……..241

СПЕКТРАЛЬНАЯ И ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В ГОЛЬМИЕВОМ ВОЛОКОННОМ УСИЛИТЕЛЕ
Камынин В.А., Филатова С.А., Жлуктова И.В., Цветков В.Б.……..243

РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ CARS
Антропов А.А., Евменова Е.А., Харенко Д.С., Кузнецов А.Г., Каблуков С.И., Бабин С.А.……..245

ВКР-ЛАЗЕР С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ НА ОСНОВЕ МАССИВА ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК
Абдуллина С.Р., Скворцов М.И., Власов А.А., Подивилов Е.В., Бабин С.А.……..247

УСИЛЕНИЕ, КОГЕРЕНТНОЕ СУММИРОВАНИЕ, СЖАТИЕ И УЛУЧШЕНИЕ КОНТРАСТА МОЩНЫХ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В МНОГОСЕРДЦЕВИННЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ
Андрианов А.В., Калинин Н.А., Егорова О.Н., Липатов Д.С., Анашкина Е.А., Балакин А.А., Скобелев С.А., Ким А.В., Литвак А.Г.……..249

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ МОЩНЫХ ОПТОВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ
Колегов А.А., Кулаков Д.В., Галеев А.В., Исаев А.В.……*251*

ОСОБЕННОСТИ ОБЪЕДИНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ С ПОМОЩЬЮ ОПТОВОЛОКОННЫХ СИГНАЛЬНЫХ ОБЪЕДИНИТЕЛЕЙ
Колегов А.А., Черникова А.В., Сарасеко Д.В., Денисенко К.А.……*252*

ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ER/ER-YB УСИЛИТЕЛЬ ОДНОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ПИКОВОЙ МОЩНОСТЬЮ 2 КВТ И ВЫСОКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ
Худяков М.М., Бубнов М.М., Липатов Д.С.,Гурьянов А.Н.,Лихачёв М.Е.……*254*

УСИЛИТЕЛЬ ИМПУЛЬСОВ С ВЫСОКОЙ СРЕДНЕЙ (100ВТ) И ПИКОВОЙ (1МВТ) МОЩНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ИТТЕРБИЕВОГО СВЕТОВОДА-КОНУСА
Бобков К.К., Левченко А.Е., Вельмискин В.В., Кочергина Т.А., Алешкина С.С., Бубнов М.М., Липатов Д.С., Лаптев А.Ю., Гурьянов А.Н., Лихачев М.Е.……*256*

ГЕНЕРАЦИЯ СВЯЗАННЫХ СОЛИТОНОВ В ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ С СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ВЫСОКОНЕЛИНЕЙНОМ РЕЗОНАТОРЕ
Дворецкий Д.А., Орехов И.О., Куделин И.С., Сазонкин С.Г., Пнев А.Б., Карасик В.Е., Денисов Л.К.……*258*

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИВАЕМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭФФЕКТ ПОСТЕПЕННОЙ ДЕГРАДАЦИИ МОДЫ В ИТТЕРБИЕВОМ УСИЛИТЕЛЕ
Бобков К.К., Бубнов М.М., Алешкина С.С., Лихачев М.Е.……*260*

Нанофотоника……*262*

ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОГО НАСЫЩАЮЩЕГОСЯ ПОГЛОТИТЕЛЯ ИЗ ОДНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК
Мкртчян А.А., Гладуш Ю.Г., Копылова Д.С., Иваненко А.В., Нюшков Б.Н., Кохановский А.Ю., Кобцев С.М., Насибулин А.Г.……*262*

ВЫСОКОАПЕРТУРНЫЕ МЕТАЛИНЗЫ, ТОРОИДАЛЬНЫЙ И ОБРАТНЫЙ ПОТОК В ФОКУСЕ
Котляр В.В.……*263*

КЛАССИЧЕСКИЕ И КВАНТОВЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА С НАНОМЕТРОВОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ВРЕМЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ
Мелентьев П.Н., Балыкин В.И.……*265*

КОГЕРЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ БЕЗРЕЗОНАТОРНЫХ ЛАЗЕРОВ
Зябловский А.А., Доронин И.В., Андрианов Е.С., Пухов А.А., Лозовик Ю.Е., Виноградов А.П. Лисянский А.А. .. 266

ТЕОРИЯ РАМАНОВСКОГО ЭФФЕКТА В ЛАЗЕРНУЮ ЭПОХУ
Виноградов А.П., Шишков В.Ю., Андрианов Е.С., Пухов А.А., Лисянский А.А.……*268*

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МИКРОСФЕРЫ ТИПА ЯДРО-ОБОЛОЧКА ДЛЯ УСИЛЕНИЯ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ И ФОТОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА
Ноздрюхин Д.В., Беседина Н., Ефимова О., Чернышев В.С., Гиппиус Н., Дьяков С., Ященок А.М., Горин Д.А.….*270*

ГИГАНТСКОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ НА РЕЗОНАНСНОЙ КРЕМНИЙ-СЕРЕБРЯНОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ
Сарычев А.К., Иванов А.В., Быков И.В., Богинская И.А., Лагарьков А.Н., Рыжиков И.А., Нечаева Н.Л., Курочкин И.Н., Бондаренко А.В., Гирель К.В.……*271*

УСИЛЕНИЕ ЭФФЕКТА РАМАНА С ПОМОЩЬЮ ИНФРАКРАСНОГО ИСТОЧНИКА СВЕТА
Шишков В.Ю., Андрианов Е.С., Пухов А.А., Виноградов А.П., Лисянский А.А.……*273*

УЛЬТРАТОНКИЕ ПЛЕНКИ ЗОЛОТА ДЛЯ ФОТОННЫХ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ
Волков В., Якубовский Д., Стебунов Ю., Киртаев Р., Ермолаев Г., Миронов М., Новиков С., Воронин К., Арсенин А.……*274*

МУЛЬТИПОЛЬНЫЕ РЕЗОНАНСЫ КРЕМНИЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФОТОНИКИ
Евлюхин А.Б.……*276*

СПЕКТРОСКОПИЯ МОЛЕКУЛ И НАНОМАТЕРИАЛОВ УСИЛЕННАЯ ПЛАЗМОНАМИ
Драчев В.П.……*277*

КАРТИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ МЕТОДАМИ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ НАНОСКОПИИ ОДИНОЧНЫХ МОЛЕКУЛ И КВАНТОВЫХ ТОЧЕК
Наумов А.В., Гладуш М.Г., Горшелев А.А., Еремчев И.Ю., Koehler J., Kador L.……*278*

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ В ДИСКРЕТНОЙ ФОТОНИКЕ
Маймистов А.И.……*280*

ТЕОРИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЗАДАЧЕ РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА НАНОЧАСТИЦАХ
Береза А.С., Немыкин А.В., Фрумин Л.Л., Перминов С.В., Шапиро Д.А.……..281

ДИПОЛЬНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ И ФУРЬЕ МОДАЛЬНЫЙ МЕТОД ДЛЯ ОПИСАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕШЁТОК НАНОЧАСТИЦ
Фрадкин И.М., Дьяков С.А., Гиппиус Н.А.……..283

ВИБРАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ КОЛЕБАНИЙ МОЛЕКУЛ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ SERS КАК РАМАНОВСКИЙ СПАЗЕР
Шишков В.Ю., Андрианов Е.С., Пухов А.А., Виноградов А.П., Лисянский А.А.……..284

СПЕКТРОСКОПИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЗБУЖДЁННЫХ СОСТОЯНИЙ МНОГОАТОМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НАНОФОТОНИКИ
Обухов А.Е.……..285

ОПТОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ВБЛИЗИ НАНОВОЛОКОННЫХ СТРУКТУР
Тофтул И.Д., Петров М.Г.……..287

СТИМУЛИРОВАННАЯ КОНДЕНСАЦИЯ ФРЕНКЕЛЕВСКИХ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОНОВ
Заседателев А.В., Бараников А.В., Лагудакис П.……..289

Стендовые доклады……...*290*

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ПО ТЕХНОЛОГИИ RADIO-OVER-FIBER С УПЛОТНЕНИЕМ ПО ОРБИТАЛЬНОМУ УГЛОВОМУ МОМЕНТУ В W-ДИАПАЗОНЕ
Виноградова И.Л., Абдрахманова Г.И., Гизатулин А.Р., Грахова Е.П., Мешков И.К., Багманов В.Х., Султанов А.Х.……..290

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ НА СТОЙКОСТЬ К СЕЙСМИЧЕСКИМ И ВИБРАЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ
Корякин А.Г., Ларин Ю.Т.……..292

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ
Чаймарданов П.А.……..293

СПОСОБ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО АКУСТО-ОПТОВОЛОКОННОМУ КАНАЛУ СВЯЗИ МАЛОМОДОВОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ
Бурдин В.А., Губарева О.Ю., Гуреев В.О., Масюк С.С.……..295

ПОЛЯРИЗАЦИОННО-СЕЛЕКТИВНОЕ УСИЛЕНИЕ ДЕФЕКТНОЙ МОДЫ В ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ С ПЛАЗМОННЫМ МЕТАСЛОЕМ
Моисеев С.Г., Глухов И.А., Дадоенкова Ю.С., Бентивенья Ф., Иванов О.В.……..296

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АНАЛИЗА КОНЦЕНТРАЦИИ ОН-ГРУПП В КРУПКЕ ЧИСТОГО КВАРЦА НА ОСНОВЕ ПОГЛОЩЕНИЯ НА 1,4 МКМ
Бурдин В.В., Клод Д., Константинов Ю.А., Смирнов А.С., Первадчук В.П.……..298

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЛИБРОВОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ
Первадчук В.П., Давыдов А.Р.……..300

ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ФОТОДИОДА В ПЕТЛЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ЭРБИЕВОГО СВИ
Ширинкин В.Д., Ременникова М.В.……..302

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ
Львов А.Е., Салимгареев Д.Д., Лашова А.А., Корсаков А.С., Жукова Л.В.……..304

МОДЕЛЬ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ФОТОНИКИ
Киреев К.В., Герасимов М.В., Пьянзин Д.В., Ушаков С.Н., Волков И.А., Нищев К.Н.……..306

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ АНАЛИЗА КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР В ДИССИПАТИВНЫХ СИСТЕМАХ
Чеховской И.С., Штырина О.В., Федорук М.П., Медведев С.Б., Турицын С.К.……..308

БЫСТРОЕ ИНДИКАТОРНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР И ДЕФОРМАЦИЙ МЕТОДОМ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-БРИЛЛЮЭНОВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ
Кривошеев А.И., Носова Е.А., Константинов Ю.А., Барков Ф.Л., Бурдин В.В., Смирнов А.С.……..310

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ
Салгаева У.О., Волынцев А.Б.……..312

УСТРОЙСТВО ДЛЯ АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТРАКТАХ
Дашков М.В., Бурдин В.А., Долгополов В.Н.……..314

СПЕКТРАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР НА ЭФФЕКТЕ НАВЕДЕННОЙ СВЯЗИ МОД В ДВУХСЕРДЦЕВИННОМ ВОЛОКНЕ
Симонов В.А., Ульзутуев Б.Б.……..316

СПЕКТРОГРАФЫ С ВЫСОКОЙ ДИСПЕРСИЕЙ ДЛЯ РАДИОФОТОННЫХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ
Муслимов Э.Р., Нуреев И.И., Морозов О.Г., Кузнецов А.А., Фасхутдинов Л.М., Сахабудтинов А.Ж., Бакшаев М.К.……318

ДАТЧИК УРОВНЯ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ИЗ ДВУХ ВОЛОКОННЫХ ВСТАВОК С ТОНКОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ
Иванов О.В.……320

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ РЕФЛЕКТОГРАММ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ
Шевцов Д.И., Пономарев Р.С., Барков Ф.Л., Бочкова С.Д., Владимирова Д.Б., Константинов Ю.А.……322

ЛОКАЛИЗАЦИЯ «СОБЫТИЙ БЕЗ ОТРАЖЕНИЯ» НА ХАРАКТЕРИСТИКАХ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА
Бурдин А.В., Бурдин В.А., Дельмухаметов О.Р., Евтушенко А.С., Желудков М.А., Зайцева Е.С.……324

СВЕТОВОДЫ И СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЖГУТОВ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНЫ И НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Зубов Б.В.,Даниелян Г.Л., Чевокин В.К., Подвязников В.А., Шилов И.П., Кочмарев Л.Ю., Савосин С.В.……326

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ СЕНСОР КОНТРОЛЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ В СТЕНДАХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
Даниелян Г.Л., Иванов С.В., Молокович И.Н., Стешаков Е.Г., Иванов Н.А., Вихрова О.В.……328

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИППС СТРУТКУР С ПОМОЩЬЮ ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННОГО ИСТОЧНИКА ЧИРПИРОВАННЫХ ДИССИПАТИВНЫХ СОЛИТОНОВ
Кузнецов А.Г., Харенко Д.С., Бронников К.А., Достовалов А.В., Бабин С.А.……330

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ФИЛЬТРА ФАБРИ-ПЕРО В УСЛОВИЯХ ЧАСТОТНОГО СКАНИРОВАНИЯ В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ
Белокрылов М.Е., Оглезнев А.А., Константинов Ю.А.……332

ВАРИАЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ТОКА НА СВЕТОВОДАХ ТИПА TWIST И SPUN
Ловчий И.Л.……334

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО
Фадеев К.М., Минкин А.М., Ларионов Д.Д., Созонов Н.С.……336

МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В СВЕТОВОДЕ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ЗАВИСИМОСТИ ДИСПЕРСИИ ОТ ДЛИНЫ
Золотовский И.О., Лапин В.А., Семенцов Д.И.……338

ФОТОННАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОБРАТНО РАССЕЯННЫХ И ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ
Кутлуяров Р.В., Любопытов В.С., Фатхиев Д.М., Султанов А.Х.……340

АКТИВНЫЙ И ПАССИВНЫЙ АНИЗОТРОПНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ ДЛЯ ВОГ
Цибиногина М.К., Осипчук М.К., Шарипов Я.М., Кель О.Л., Джанджгава Н.Т., Пищальников К.Д., Гагарина К.И., Перетрухина И.А.……341

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ОБРАСТАЮЩИХ КОРНЕЙ РАСТЕНИЙ
Ременникова М.В., Бочкова С.Д., Константинов Ю.А.……342

ВОЛОКОННЫЕ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ ДЛЯ ДОЗИМЕТРИИ
Алексеев А.С., Приходько В.В., Трегубов А.В.……344

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ СУПЕРКОНТИНУУМА В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ НАКАЧКА-ЗОНДИРОВАНИЕ
Жукова М.О., Мельник М.В., Путилин С.Э., Цыпкин А.Н.……346

РАЗРАБОТКА МОЛЕКУЛЯРНЫХ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ФИТОПАТОГЕНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЛУОРЕСЦЕНТНО-МЕЧЕНЫХ ОЛИГОНУКЛЕОТИДОВ
Максимов А.Ю., Шилова А.В., Варушкина А.М.……348

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ БИОФОТОНИКИ НА БАЗЕ НАУЧНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ ПЕРМИ
Максимов А.Ю., Луговская Н.П.……..…350

ДАТЧИК ДЕФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ–ПЕРО, СФОРМИРОВАННОГО В СЕРДЦЕВИНЕ КОМПОЗИТНОГО ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА
Егорова О.Н., Лихачев И.Г., Васильев С.А., Сверчков С.Е., Галаган Б.И., Денкер Б.И., Семенов С.Л., Пустовой В.И.……..…351

РАСШИРЕННЫЕ ФОРМАТЫ МОДУЛЯЦИИ ДВУХЭЛЕКТРОДНОГО МОДУЛЯТОРА МАХА-ЦЕНДЕРА
Щербаков В.В., Солодков А.Ф., Задерновский А.А.……..…353

АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМИ ИМПУЛЬСОВ С ТЕРАГЕРЦОВОЙ ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ
Мельник М.В., Цыпкин А.Н., Путилин С.Э., Козлов С.А.……..…356

ГЕНЕРАЦИЯ ШУМОВЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРАХ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД
Комаров А.К., Комаров К.П., Терентьев В.С., Ли Л., Чжао Л.М.……..…358

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАРЦЕВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА С РАССЕИВАЮЩЕЙ СВЕТООТРАЖАЮЩЕЙ ОБОЛОЧКОЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИМЕРА
Маковецкий А.А., Замятин А.А., Ряховский Д.В.……..…360

РАДИАЦИОННО НАВЕДЕННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В СВЕТОВОДАХ С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ НЕЛЕГИРОВАННОГО КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА В БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ: ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВЫТЯЖКИ
Кашайкин П.Ф., Томашук А.Л., Салганский М.Ю., Вечканов Н.Н., Гурьянов А.Н., Косолапов А.Ф., Семёнов С.Л.……..…362

ГЕНЕРАЦИЯ СУПЕРКОНТИНУУМА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСИЛЕННЫХ ШУМОПОДОБНЫХ ИМПУЛЬСОВ
Волков И.А., Ушаков С.Н., Нищев К.Н., Камынин В.А., Цветков В.Б., Лихачев М.Е., Салганский М.Ю.……..…364

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ТЕЛЛУРОМ
Алышев С.В., Харахордин А.В., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Фирстова Е.Г., Мелькумов М.А., Гурьянов А.Н.……366

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ РАДИАЦИОННО-СТОЙКОГО АНИЗОТРОПНОГО ЭРБИЕВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В ПАО ПНППК
Вахрушев А.С., Нурмухаметов Д.И., Вохмянина О.Л., Азанова И.С., Димакова Т.В., Рогожников П.Ю., Яшков М.В.……..…368

ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ МУЛЛИТОВОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ, АКТИВИРОВАННОЙ ХРОМОМ
Абрамов А.Н., Плехович А.Д., Яшков М.В., Гурьянов А.Н., Раевский А.С.……..…370

ОПТИМАЛЬНОЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ВЫТЯЖКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В УСЛОВИЯХ НЕИЗОТЕРМИЧНОСТИ
Первадчук В.П., Владимирова Д.Б., Гордеева И.В.……..…371

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МНОГОМОДОВОГО ВОЛОКНА С ВЫСОКИМИ ОПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В СОЧЕТАНИИ С РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТЬЮ
Рахматуллина А.Р., Мальцев И.А., Азанова И.С., Вохмянина О.Л., Кашина Р.Р.……..…373

СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ И ВЫТЯЖКА ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ДВУХВАЛЕНТНОГО ОЛОВА
Вельмискин В.В., Галаган Б.И., Денкер Б.И., Сверчков С.Е.……..…374

АКТИВИРОВАННЫЕ РЕДКИМИ ЗЕМЛЯМИ КАЛЬЦИЙ-АЛЮМИНАТНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СТЕКЛА И ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА НА ИХ ОСНОВЕ
Вельмискин В.В., Галаган Б.И., Денкер Б.И., Колташев В.В., Сверчков С.Е.……..…376

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСИЛЕНИЯ СИГНАЛА В ИТТЕРБИЕВОМ ВОЛОКНЕ
Штырина О.В., Кохановский А.Ю., Иваненко А.В., Ефремов С.А., Яруткина И.А., Скидин А.С., Чеховской И.С., Федорук М.П.……..…378

ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ЭРБИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ПУТЕМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОТ КАЛИБРОВОЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ
Летов Д.А., Ременникова М.В.……..…380

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ В ГЕРМЕТИЧНОМ УГЛЕРОДНОМ ПОКРЫТИИ К ПРОНИКНОВЕНИЮ ВОДОРОДА
Саранова И.Д., Булатов М.И., Трутнев К.С., Косолапов А.Ф., Азанова И.С.……..382

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫТЯЖКИ КВАРЦЕВЫХ КАПИЛЛЯРОВ В УСЛОВИЯХ МАЛЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
Деревянкина А.Л., Первадчук В.П., Владимирова Д.Б.……..384

РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНОГО ГОЛЬМИЕВОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ХИРУРГИИ
Селезнев Д.А., Ременникова М.В., Кашина Р.Р., Рыбалтовский А.А., Рогожников П.Ю.……..386

МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ С БОЛЬШИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ ДИАПАЗОНОМ ОДНОМОДОВОГО РЕЖИМА
Денисов А.Н., Семенов С.Л.……388

ВЫЖИГАНИЕ ДЫР В СПЕКТРЕ НЕОДИМОВОГО ВОЛОКОННОГО УСИЛИТЕЛЯ
Содномай А.Б., Лобач И.А., Каблуков С.И.……390

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ РЕЗОНАТОРА НА ГАРМОНИЧЕСКУЮ СИНХРОНИЗАЦИЮ МОД В ЭРБИЕВОМ ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ
Парфентьева В.Б., Камынин В.А., Трикшев А.И., Цветков В.Б.……392

ПОЛУЧЕНИЕ ОСОБО ЧИСТЫХ СТЕКОЛ СИСТЕМЫ GE-GA-S(SE), ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, ДЛЯ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА
Вельмужов А.П., Суханов М.В.……394

УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХОДИМОСТИ СИСТЕМЫ КОГЕРЕНТНОГО СЛОЖЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СЕМИКАНАЛЬНОГО ОПТОВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА
Козлова Т.И., Коновальцов М.И., Течко О.Л., Тютин С.В., Хохлов С.В.……395

МЕТОД ПРЕЦИЗИОННОГО ВЫРАВНИВАНИЯ ДЛИНЫ ОПТОВОЛОКОННЫХ КАНАЛОВ С ПОСЛЕДУЮЩИМ КОГЕРЕНТНЫМ СЛОЖЕНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ
Тютин С.В., Коженкова Т.Ю., Течко О.Л., Хохлов С.В., Коновальцов М.И.……397

МЕТОД КОРРЕКТИРОВКИ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
Козлова Т.И., Коновальцов М.И., Лебедев Р.С., Течко О.Л., Тютин С.В., Цыкин В.С.……399

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЛОКОННОГО ИТТЕРБИЕВОГО УСИЛИТЕЛЯ. УРАВНЕНИЯ БАЛАНСА
Слобожанина М.Г., Бочков А.В., Лукин А.В., Слобожанин А.Н.……401

РАЗРАБОТКА ТИПОВОГО ЛАЗЕРНОГО КАНАЛА ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОГЕРЕНТНОГО СЛОЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
Бочков А.В., Слобожанин А.Н., Слобожанина М.Г.……402

ИЗМЕРЕНИЕ ДИСПЕРСИИ И МОЩНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНЫХ ЭРБИЕВЫХ СВЕТОВОДОВ
Мишевский М.С., Жданов И.С., Харенко Д.С.……403

ЭРБИЕВЫЕ СВЕТОВОДЫ С НАКАЧКОЙ ПО ОБОЛОЧКЕ С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА, ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО ФТОРОМ
Худяков М.М., Яшков М.В., Липатов Д.С., Вечканов Н.Н., Абрамов А.Н., Гурьянов А.Н., Лихачев М.Е.……405

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СВЕТОВОДОВ ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА НА ИХ ПРОЧНОСТЬ
Ероньян М.А., Мешковский И.К., Реуцкий А.А., Парфенов П.С., Перевислов С.Н.……407

ГЕНЕРАЦИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИДЕНТИЧНЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ФАЗОЙ НЕСУЩЕЙ ОТНОСИТЕЛЬНО ОГИБАЮЩЕЙ
Дмитриев А.К., Головин Н.Н., Горохов Е.А., Бычев Ю.П., Нюшков Б.Н., Толстиков А.С., Гусар Д.Ф.……409

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ СВЕТОВОДА, ЛЕГИРОВАННОГО ВИСМУТОМ, ДИАПАЗОНА 1430-1490 НМ
Двойрин В.В., Пушкарев Д.В., Мазаева И.В., Мелькумов М.А., Турицын С.К.……411

ОДНОЧАСТОТНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР НА СВЕТОВОДЕ, ИЗГОТОВЛЕННОМ МЕТОДОМ СПЕКАНИЯ ФОСФАТНОГО СТЕКЛА В ТРУБКЕ ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА
Егорова О.Н., Рыбалтовский А.А., Журавлев С.Г., Васильев С.А., Сверчков С.Е., Галаган Б.И., Денкер Б.И., Семенов С.Л.……413

ПОЛЯРИЗОВАННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ВИСМУТОВЫХ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ В ГЕРМАНОСИЛИКАТНЫХ СТЕКЛАХ
Рюмкин К.Е., Фирстов С.В., Хегай А.М., Хопин В.Ф., Мелькумов М.А.……415

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ДОСТИЖЕНИЯ ОДНОМОДОВОГО РЕЖИМА В ПОЛЫХ АНТИРЕЗОНАНСНЫХ СВЕТОВОДАХ С БОЛЬШОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ МОДОВОЙ ПЛОЩАДЬЮ
Демидов В.В., Ананьев В.А., Хохлов А.В., Комаров А.В., Тер-Нерсесянц Е.В., Леонов С.О., Карасик В.Е.…..…..417

ПАМЯТИ ЕВГЕНИЯ МИХАЙЛОВИЧА ДИАНОВА

Семенов С.Л.[1], Чурбанов М.Ф.[2], Андреев А.Г.[3], Мещанов Г.И.[4]

[1]Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[2]Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г.Девятых РАН, г. Нижний Новгород
[3] Пермская научно-производственная приборостроительная компания, г. Пермь
[4] ОАО ВНИИКП, г. Москва
E-mail: sls@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16001



30 января 2019 года на восемьдесят третьем году жизни после тяжелой продолжительной болезни скончался организатор и бессменный председатель Всероссийской конференции по волоконной оптике академик Евгений Михайлович Дианов, выдающийся ученый в области волоконной оптики, лазерной физики и оптического материаловедения, основатель Научного центра волоконной оптики Российской академии наук, его многолетний директор и научный руководитель.

Работы Евгения Михайловича Дианова определяли передовой край мировых исследований в области волоконной оптики. Благодаря таким людям наша страна сохраняла и укрепляла статус великой научной державы.

Научные достижения Е.М. Дианова, его научно-организационная деятельность отмечены многими отечественными и зарубежными премиями, званиями и наградами, включая орден "За заслуги перед Отечеством" IV степени, орден "Знак Почета", орден "Дружбы", две Государственные премии, Золотую медаль РАН им. С.И. Вавилова, премию АН СССР им. А.С. Попова, премию АНСССР – АНГДР, а также премию IEEE Photonics Society – Optical Societyof America им. Джона Тиндаля.

Е.М.Дианов родился 31 января 1936 года в селе Красное Тульской области в учительской семье. В 1960 году, после окончания Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, он начал работу в Лаборатории колебаний Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР. После защиты кандидатской диссертации в 1966 году он продолжил научные исследования под непосредственным руководством Нобелевского лауреата академика А.М. Прохорова, заметившего талант и трудолюбие молодого ученого, его живой интерес к бурно развивавшейся в те годы квантовой электронике.

Первой крупной работой Е.М.Дианова стало создание и внедрение в производство атермального лазерного стекла с неодимом, обеспечивающего высокую направленность лазерного излучения. За эту работу в 1974 году вместе с сотрудниками Государственного оптического института им. С.И. Вавилова (ГОИ) и Лыткаринского завода оптического стекла он был удостоен Государственной премии СССР.

В те годы в мире происходило зарождение волоконной оптики как ветви квантовой электроники. По предложению А.М. Прохорова, в 1972 году Евгений Михайлович возглавил работы по созданию технологии получения волоконных световодов с малыми оптическими потерями на основе кварцевого стекла (совместно с Институтом химии АН СССР) и исследованию физических свойств таких световодов. С тех пор Е.М. Дианов целиком посвящает свой талант и энергию волоконной оптике. Уже в 1975 году были получены первые отечественные световоды, соответствующие мировому уровню, а несколько позже – радиационно-стойкие, высокопрочные, металлизированные, активные и другие типы световодов, часто по своим свойствам превосходящие мировой уровень. Работы Е.М. Дианова, многие из которых выполнены в сотрудничестве с Институтом химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН (ИХВВ РАН), получили широкое мировое признание.

Евгений Михайлович с соавторами детально изучил нелинейное распространение лазерного излучения в световодах, в том числе, провел исчерпывающее теоретическое и экспериментальное исследование генерации и распространения солитонов в световодах. Им открыт эффект ВКР-саморассеяниесолитонов, впервые дано теоретическое описание их взаимодействия на расстоянии, установлено, что это взаимодействие обусловлено эффектом электрострикции. Под руководством Е.М. Дианова впервые в мире экспериментально осуществлена генерация высокочастотной последовательности солитонов в световодах. Эти исследования заложили физические основы для

использования солитонов в протяженных линиях оптической связи и привели к созданию волоконных лазеров ультракоротких импульсов.

Под его научным руководством разработаны высокоэффективные волоконные ВКР-усилители для линий оптической связи и волоконные ВКР-лазеры, способные генерировать излучение в широкой спектральной области 0,92-2,2 мкм.

Е.М.Дианов с соавторами разработаны различные модификации микроструктурированных и фотоннокристаллических волоконных световодов с уникальными дисперсионными свойствами, а также полые волоконные световоды с малыми оптическими потерями и оригинальным физическим механизмом удержания света в полой сердцевине (т.н. «револьверные» световоды). Эти инновационные световоды востребованы как среда для передачи лазерного излучения, генерациии широкополосного когерентного излучения («суперконтинуума»), а также для применения в датчиках и доставки излучения в медицине и научных исследованиях.

Среди достижений Евгения Михайловича – разработка и исследование халькогенидных и поликристаллических световодов из галогенидов серебра для среднего ИК диапазона. Научные и практические результаты в этой области, полученные совместно с сотрудниками ИХВВ РАН и ГОИ, были отмечены в 1998 году Государственной премией РФ.

Последним ярким достижением Е.М.Дианова стали волоконные световоды, легированные висмутом, – новый тип активных волоконных световодов. В 2005 году он с соавторами впервые в мире наблюдал лазерную генерацию в этой новой лазерной среде. Его дальнейшие исследования показали, что «висмутовые» световоды позволяют эффективно генерировать и усиливать оптический сигнал в широкой спектральной области 1,15-1,8 мкм, в том числе на длинах волн, на которых традиционные активные световоды неприменимы. Разработанные Е.М.Дианов «висмутовые» световоды открывают возможности для использования в оптической связи значительно более широкого спектрального интервала, что приведет к повышению скорости передачи информации.

Сложившаяся за четыре десятилетия научная школа Е.М.Дианова заслуженно считается одной из ведущих в мире. Среди учеников Евгения Михайловича – 2 члена-корреспондента РАН, 10 докторов и более 70 кандидатов наук. «Выпускники» школы Е.М.Дианова работают в научных и промышленных организациях в России и по всему миру.

В базе данных WebofScience содержится более 1000 работ Е.М.Дианова, и они широко цитируются: его индекс Хирша – 48.

В последние годы Евгений Михайлович много времени и сил уделял организации промышленного производства волоконных световодов и волоконно-оптических датчиков в России. При Минпромторге РФ под его руководством функционировала Рабочая группа по развитию производства оптического волокна. Он внес существенный вклад в создание промышленного производства ряда видов специальных волоконных световодов, а также волоконно-оптических гироскопов в Пермской научно-производственной приборостроительной компании. При его непосредственном участии впервые в стране в АО «Оптиковолоконные Системы» (г. Саранск) было запущено промышленное производство стандартных волоконных световодов для оптической связи. Также под научным руководством Е.М.Дианова в АУ «Технопарк-Мордовия» (г. Саранск) был создан Инжиниринговый центр волоконной оптики, где ведутся работы по организации производства специальных волоконных световодов для волоконных лазеров, датчиков и других актуальных применений.

В 1987 году Е.М.Дианов был избран членом-корреспондентом АН СССР, в 1994 году – академиком РАН. С 2002 по 2013 год он был членом Президиума РАН. С момента образования НЦВО РАН в 1993 году и до 2015 года Е.М.Дианов был его бессменным директором.

Евгений Михайлович был членом Совета Государственной Думы по инновациям, членом редколлегии многих отечественных и зарубежных научных журналов, он регулярно приглашался в программные комитеты отечественных и зарубежных конференций, постоянно выступал с приглашенными докладами. Е.М. Дианов был членом международных научных обществ OSA, IEEE, MRS и ACerS.

Кончина Евгения Михайловича Дианова – невосполнимая утрата для его коллег, учеников, для науки, которой он посвятил всю свою жизнь. Светлая память о Евгении Михайловиче навсегда останется в наших сердцах.

КАЛИБРОВОЧНЫЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В ОБЛАСТИ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

Батурин А.С., Кравцов В.Е., Крутиков В.Н., Митюрев А.К., Савкин К.Б.*, Тихомиров С.В.

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ВНИИОФИ), г. Москва
**E-mail: savkin@vniiofi.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16002

Волоконная оптика в России и мире развивается высокими темпами. Этому способствуют возрастающие потребности в высокоскоростной волоконно-оптической связи, квантовых коммуникациях, измерительных системах и оборудовании на основе волоконно-оптических датчиков, волоконных лазерах и лазерном технологическом оборудовании, системах аналоговой фотоники и др. При этом любые научные и прикладные исследования в области волоконной оптики, разработка, испытания и эксплуатация продукции на ее основе требуют проведения достоверных измерений большого количества параметров.

Обеспечение единства измерений в области волоконной оптики регулируется в России на законодательном уровне. На протяжении последних 30 лет создавались национальные эталонная и методическая базы в части измерений таких физических величин, как средняя мощность, ослабление и длина волны оптического излучения для волоконной оптики, длина и время распространения сигнала в оптическом волокне, поляризационная модовая (ПМД) и хроматическая (ХД) дисперсии и другие.

Национальные эталоны России [1], воспроизводящие единицы указанных физических величин, разработаны и эксплуатируются во ВНИИОФИ – Государственном научном метрологическом институте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарта):

Государственный первичный специальный эталон (ГПСЭ) единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для волоконно-оптических систем передачи информации ГЭТ 170-2006;

ГПСЭ единицы ХД в оптическом волокне ГЭТ 184-2010;

ГПСЭ единицы ПМД в оптическом волокне ГЭТ 185-2010.

От первичных эталонов посредством рабочих эталонов единицы физических величин передаются средствам измерений, эксплуатируемым предприятиями и организациями, поэтому от точности первичных эталонов зависят результаты измерений во всей области волоконной оптики.

Для подтверждения достоверности результатов воспроизведения единиц физических величин, обеспечения взаимного признания результатов калибровки и измерений Росстандарт подписал Декларацию о взаимном признании (CIPM MRA) [2]. В рамках CIPM MRA на основе результатов международных сличений национальных эталонов стран-участниц устанавливается степень их эквивалентности, а в базе данных ключевых сличений Международного бюро мер и весов (МБМВ) публикуются международно признанные калибровочные и измерительные возможности стран – СМС (Calibration and Measurement Capabilities).

В настоящее время Россия по общему количеству строк СМС уверенно занимает второе место в мире после США и продолжает увеличивать их количество. В области волоконной оптики деятельность по официальным международным сличениям началась около 10 лет назад и на сегодняшний день Россия имеет 8 строк СМС в данной области и в ближайшие годы планирует увеличить их количество до 18, догнав по этому показателю Швейцарию и США, разделяющих между собой 1 место в мире.

Первые международные сличения в области волоконной оптики ВНИИОФИ провел в 1999 – 2001 гг. вместе с NIST (США), это были двусторонние сличения по средней мощности оптического излучения [3]. Указанные работы не носили официального статуса, но подтвердили высокую сходимость результатов измерений национальных эталонов России и США. Накопленный опыт позволил институту принять участие в официальных международных сличениях:

1 *APMP.PR-S2* – Сличения по средней мощности для волоконной оптики в рамках Азиатско-Тихоокеанской метрологической программы APMP, 2009 – 2015 гг., участники – KRISS (Корея), NMISA (ЮАР), CMS/ITRI (Китайский Тайбэй), NMC-A*STAR (Сингапур), NMIJ/AIST (Япония), NIMA (Австралия), NML-SIRIM (Малайзия), NIM + CMS/ITRI (Китай) и ВНИИОФИ [4];

EURAMET.PR-S3 – Сличения по ХД в оптическом волокне в рамках Европейской ассоциации национальных метрологических институтов EURAMET, 2010 – 2013 гг., участники – METAS (Швейцария) и ВНИИОФИ [5];

2 COOMET.PR-S6 – Сличения в области измерений средней мощности для волоконной оптики в рамках Организации Евро-Азиатского сотрудничества государственных метрологических учреждений стран Центральной и Восточной Европы, Азии и близлежащих стран COOMET, 2012 – 2014 гг., участники – BelGIM (Беларусь), PTB (Германия) и ВНИИОФИ [6].

По результатам указанных сличений в базе данных МБМВ были опубликованы 2 строки СМС по чувствительности волоконно-оптических измерителей мощности оптического излучения и 6 строк по ХД в оптическом волокне.

В настоящее время ВНИИОФИ участвует в следующих сличениях по волоконной оптике [6]:

3 APMP.PR-S8 – Сличения в области измерений длины оптического волокна в рамках APMP, 2016 – 2019, участники – CMS/ITRI (Китайский Тайбэй), KRISS (Корея), INMETRO (Бразилия), NIM (Китай), NIMA (Австралия), NMIJ/AIST (Япония), NMISA (ЮАР), NML-SIRIM (Малайзия), NMX-A*STAR (Сингапур) и ВНИИОФИ;

4 COOMET.PR-S8 – Сличения эталонов единицы длины волны для волоконной оптики в рамках COOMET, 2017 – 2019, участники – BelGIM + NASB (Беларусь), INMETRO (Бразилия), NIM (Китай), NIS (Египет), NMISA (Южная Африка), PTB (Германия) и ВНИИОФИ;

5 COOMET.PR-S9 – Сличения эталонов единицы ПМД в оптическом волокне в рамках COOMET, 2017 – 2019, участники – INMETRO (Бразилия), KRISS (Корея), METAS (Швейцария) и ВНИИОФИ.

После завершения данных сличений ВНИИОФИ планирует внести для опубликования в базе сличений МБМВ 2 строки СМС по длине в оптическом волокне, 3 строки по длине волны для волоконной оптики и 1 строку по ПМД в оптическом волокне.

Результаты завершенных международных сличений и предварительные оценки проводимых в настоящее время работ подтверждают сопоставимость точностных характеристик национальной эталонной базы России с метрологическими характеристиками национальных эталонов ведущих метрологических институтов мира, что способствует обеспечению единства измерений во всей отрасли волоконной оптики и повышению конкурентоспособности отечественной продукции на мировом рынке.

При этом работы по расширению калибровочных и измерительных возможностей России в области волоконной оптики продолжаются и на период до 2025 г. запланировано опубликование 4 новых строк СМС (диаметр пятна модового поля, полоса пропускания и геометрические параметры оптического волокна, ослабление в оптическом волокне) и 7 обновленных строк как по результатам международных сличений, так и по результатам модернизации национальных эталонов ГЭТ 170-2011 и ГЭТ 185-2010.

Таким образом, существующие калибровочные и измерительные возможности России в области волоконной оптики, полученные по результатам международной метрологической деятельности ВНИИОФИ как Государственного научного метрологического института, а также ближайшие перспективы по их расширению, подтверждают, что Россия уверенно входит в группу лидеров метрологии волоконной оптики.

Авторы выражают благодарность коллегам из Росстандарта и международных метрологических институтов за активное участие в сличениях национальных эталонов, обсуждении и организации работ.

Литература

1. *Глазов А.И., Григорьев В.В., Иванов В.С., Кравцов В.Е., Митюрев А.К., Тихомиров С.В., Крутиков В.Н., Эталонная база ВНИИОФИ в области волоконно-оптических систем передачи информации // Фотон-экспресс. – 2015. – №8(128). – С.18-25*
2. *Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes (CIPM MRA). Paris, 14 October 1999*
3. *S V Tikhomirov et al 2000 Metrologia 37 347*
4. *Seung Kwan Kim et al 2015 Metrologia 52 02002*
5. *Jacques Morel et al 2013 Metrologia 50 02001*
6. *Alexey Svetlichny et al 2014 Metrologia 51 02003*
7. *Glazov, A.I., Grigor'ev, V.V., Kravtsov, V.E. et al. Meas Tech (2018) 60: 1064*

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ DWDM-СИСТЕМ СВЯЗИ РОССИЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Трещиков В.Н.[1,2]

[1] *ООО «Т8 НТЦ», г. Москва*
[2] *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино*
E-mail: vt@t8.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16003

В докладе рассмотрены технические возможности серийных отечественных высокоскоростных DWDM-систем связи, использующих оборудование на платформе «Волга».

Платформа содержит более 100 блоков для передачи клиентских сигналов от 100 Мбит/с до 400 Гбит/с, это оборудование мирового класса, на котором установлено несколько мировых рекордов передачи информации на большие расстояния [1-4]. Ведется разработка транспондера со скоростью 1,2 Тбит/с, в 2019 году планируется организация серийного производства. Оборудованию присвоен статус отечественного производителя ТОРП. Оборудование «Волга» обладает высокой степенью конкурентоспособности и неоднократно выигрывало в тендерах ведущих телекоммуникационных компаний, в том числе в конкуренции с зарубежными компаниями.

Все производимое оборудование на платформе «Волга» – результат собственных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проведенных высококвалифицированной командой разработчиков, с привлечением последних мировых достижений. Эта работа позволяет достигать лучших целевых параметров систем связи за счет выбора оптимального сочетания формата модуляции, принципов детектирования и кодирования информации использования лучших мировых достижений при разработке аппаратуры, оптимизации проектных решений и организации современных сервисных служб [5,6].

В настоящее время происходит планомерное увеличение канальной скорости DWDM систем связи, на смену прекрасно зарекомендовавшим себя системам с канальной скоростью 100G приходят системы 200G и 400G. Увеличение канальной скорости связано не только с необходимостью увеличения пропускной способности систем связи, но и с требованием снижения удельных затрат на передачу информации. Сегодня 400G DWDM-системы – самые экономичные решения.

Основные направления дальнейшего развития оборудования DWDM «Волга» связаны не только с увеличением его производительности и экономичности, но также с повышением надежности и защищенности от несанкционированных воздействий как самого оборудования, так и сетей связи на его основе. Информационная безопасность страны может быть обеспечена только использованием отечественного оборудования DWDM «Волга» - единственного 100G оборудования в России, имеющего статус ТОРП.

Литература

1. *Starykh D. et al., 200 Gb/s per Channel Unrepeatered Transmission over 520 km Terrestrial Fibers, IEEE Photonics Technology Letters, 2019, в печати*
2. *Gainov V.V., et al., Record 500 km unrepeatered 100 Gb s^{-1} transmission. Laser Physics Letters, 2013. 10: 075107 (4pp)*
3. *Gainov V, et al., Record 500 km unrepeatered 1 Tbit/s (10x100G) transmission over an ultra-low loss fiber. Optics Express. 2014. 22: p. 22308-22313*
4. *Gainov V., et al., 500 km unrepeatered 200 Gbit·s−1 transmission over a G.652-compliant ultra-low loss fiber only. Laser Physics Letters, 2015. 12: 066201 (6pp)*
5. *Konyshev V., et al., New method to obtain optimum performance for 100Gb/s multi-span fiber optic lines. Optics communications, 2015. 355: p. 279-284*
6. *Gurkin N.V, et al., Experimental investigation of nonlinear noise in long haul 100 Gb/s DP-QPSK communication systems using real-time DSP. Laser Physics Letters. 2014. 11: 095103*

РЫНОК ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА И КАБЕЛЯ В МИРЕ И В РОССИИ

Мещанов Г.И.[1], Николаев А.В.[2]

[1] ОАО ВНИИКП
[2] АО «Оптиковолоконные Системы», Саранск
Email: vniikp@vniikp.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16004

В докладе приведены данные о состоянии мирового и отечественного рынка оптических кабелей и оптического волокна. Отмечена динамика развития к текущему моменту и даны прогнозы развития отрасли на ближайшую и отдалённую перспективу.

ФОТОНИКА: ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ В СНГ И В МИРЕ

Ковш И.Б.

Лазерная ассоциация, г. Москва,
E-mail: las@tsr.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16005

Рассмотрено современное состояние фотоники как научно-технической области и как высокотехнологичной отрасли, в т.ч. динамика мирового рынка фотоники.

Обсуждается состав и структура отечественного лазерно-оптического сообщества, действующие и планируемые отраслевые программы, возможные сценарии развития фотоники в России.

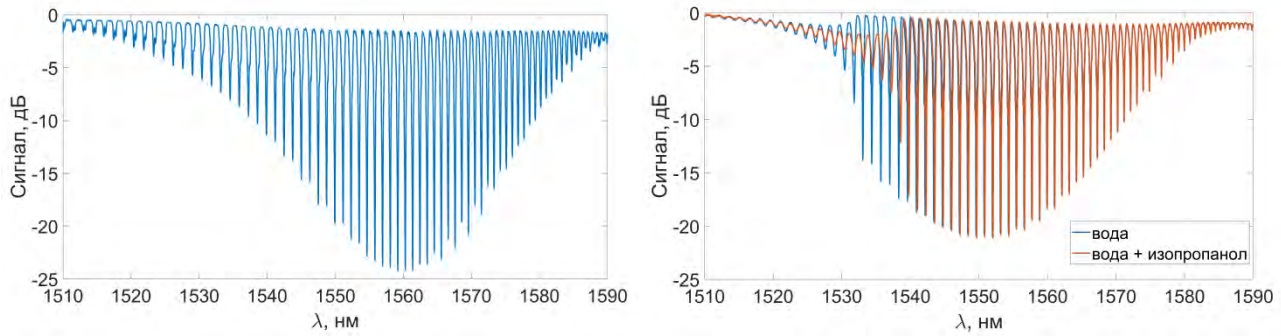
ВОЛОКОННЫЕ ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК С НАКЛОННЫМИ ШТРИХАМИ

Бутов О.В.*, Томышев К.А.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва
**E-mail:* obutov@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16006

Волоконно-оптические датчики различных физических величин на основе брэгговских решеток в настоящее время уже получили широкое распространение и активно применяются в различных областях промышленности, для решения целого ряда инженерных задач. Общий принцип работы таких датчиков основан на изменении брэгговской длины волны под действием внешних воздействий. Однако спектр возможных конструкций сенсорных элементов не ограничивается классическими брэгговскими структурами. Особое место в линейке подобных устройств занимают брэгговские решетки с наклонными штрихами. Благодаря наклонными штрихам в световоде на такой решетке возбуждается дискретный набор оболочечных мод, который проявляется на спектре пропускания в виде череды спектральных провалов в широком диапазоне длин волн (рис.1а). Поскольку оболочечные моды излучения взаимодействуют с внешней поверхностью световода, данное свойство может быть использовано в сенсорных системах для измерения физических параметров внешней среды. Одним из возможных применений таких решеток в качестве сенсора является датчик показателя преломления, принцип действия которого основан на частичном вытекании некоторых оболочечных мод в зависимости от величины показателя преломления внешней среды, в которую погружен сенсор. Данный эффект находит отражения в спектре пропускания сенсора (рис.1б).



а) *б)*

Рис. 1. Спектр пропускания наклонной брэгговской решетки вне измеряемой среды (а), и погруженной в жидкости с различным показателем преломления (б)

Отдельный интерес брэгговские решетки с наклонными штрихами представляют в качестве основы перспективных плазмонных сенсоров, т.е. сенсоров, работающих на эффекте поверхностного плазмонного резонанса [1]. Общий принцип работы таких систем основан на высокой степени зависимости дисперсионного соотношения поверхностных плазмонов от показателя преломления внешней среды, на границе с которой этот плазмон возбуждается. Любые изменения вблизи поверхности металла, будь то изменения в составе окружающей среды или модификация поверхности самого сенсора вследствие его взаимодействия с окружающей средой, немедленно найдут отражение в значении длины волны, на которой наблюдается плазмонный резонанс.

В классических, планарных схемах Кречмана [2] и Отто [3] поверхностные плазмоны возбуждаются оптическим излучением, падающим под некоторым углом к поверхности металла, при этом измеряется интенсивность отраженного сигнала в зависимости от угла падения. Минимум этой зависимости и определяет угол, соответствующий поверхностному плазмонному резонасу. При изменении показателя преломления внешней среды меняется и характерный угол, что позволяет с высокой точностью отслеживать изменения в ближайшем окружении плазмонного сенсора.

Волоконная оптика, по сравнению с планарными структурами, предоставляет целый ряд преимуществ, таких как мобильность, компактность, удобство работы с микрофлюидными системами, на их основе можно создавать перспективные высокочувствительные волоконные плазмонные сенсоры, в том числе и для биомедицинских применений. Для создания условий

генерации поверхностных плазмонов в световоде необходимо вывести часть оптического излучения к поверхности волокна, что и обеспечивает брэгговская решетка с наклонными штрихами [4-6]. При нанесении на цилиндрическую поверхность волокна слоя золота толщиной порядка 40 нм создаются условия для возникновения поверхностного плазмонного резонанса (рис.2).

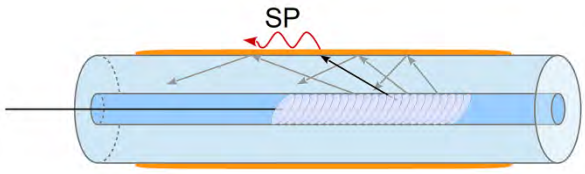


Рис. 2. Возбуждение плазмонного резонанса с помощью наклонной брэгговской решетки

Как и в случае с классической схемой Кречманна, резонансное возбуждение происходит при совпадении проекции волнового вектора некоторых мод оболочки на боковую поверхность волокна с волновым вектором поверхностного плазмона. В таком случае энергия эффективно передается от мод оболочки поверхностному плазмону. На спектре пропускания наклонной решетки подобный процесс отражается в виде характерной “перетяжки” – сужения картины пиков и провалов (рис.3). При изменении показателя преломления внешней среды изменяется и положение “перетяжки” на спектре, что позволяет проводить измерения с помощью подобного сенсора.

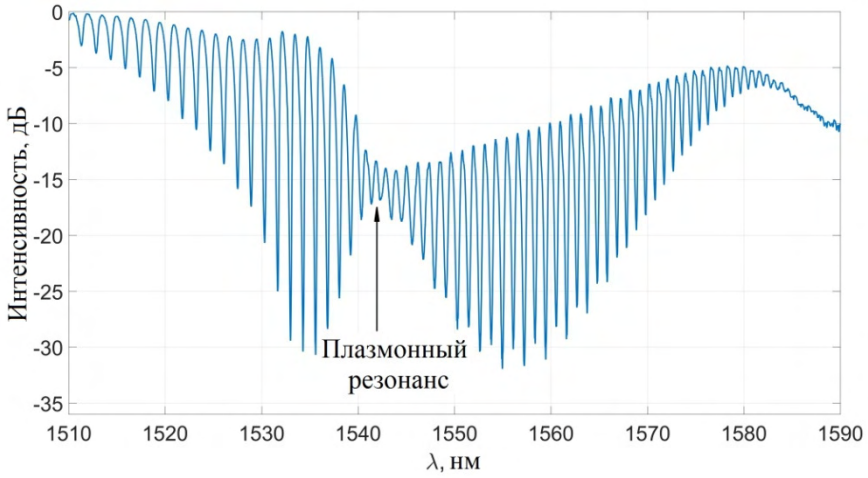


Рис. 3. Характерный спектр пропускания волоконного плазмонного сенсора на базе наклонной брэгговской решетки

На физическом уровне такой сенсор реагирует именно на изменения в показателе преломления внешней среды в непосредственной близости от цилиндрической поверхности волокна (на расстоянии порядка нескольких микрон). Однако, на практике такой сенсор может использоваться для определения изменений в составе, например, биологических растворов, таких как кровь или плазма. Адгезия частиц к поверхности сенсора значительно изменяет показатель преломления ближайшего окружения, также приводя к изменению спектра пропускания датчика.

Особый интерес представляют сенсоры, позволяющие определить концентрацию одного конкретного белка в многосоставном биологическом растворе. Для этого металлическая поверхность может быть функционализирована антителами, обеспечивающими специфику связывания для детектируемого белка. Развитие подобных сенсоров и систем на их основе является крайне актуальной задачей, особенно для биомедицинских применений. На основе волоконных плазмонных сенсоров, в рамках набирающей обороты концепции «лаборатория на чипе», могут быть созданы перспективные портативные комплексы для иммунного анализа [4-8].

Литература

1. *Homola J., Yee S. S., Gauglitz G., Sens. Actuators, B 54, 3-15 (1999)*
2. *Kretschmann E., Raether H., Z. Naturforsch. 23, 2135–2136 (1968)*
3. *Otto A., Z. Phys. 216, 398–410 (1968)*
4. *Caucheteur C., Guo T., Albert J., Anal. Bioanal. Chem. 407, 3883-3897 (2015)*
5. *Albert J., et al, Methods 63, 239–254 (2013)*
6. *Tomyshev K. A., et al, J. Appl. Phys. 124, 113106 (2018)*
7. *Yuan Y., et al, Anal. Chem. 88, 7609-7616 (2016)*
8. *Tomyshev K. A., et al, Phys. Status Solidi A 216, 1800541 (2019)*

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА ДЛЯ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК С НАКЛОННЫМИ ШТРИХАМИ

Томышев К.А.*, Мануйлович Е.С., Бутов О.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва
** E-mail: scatterdice@gmail.com*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16007

Поверхностный плазмонный резонанс является актуальным предметом современных научных исследований. На его основе разрабатываются датчики и измерительные комплексы, которые находят применения в целом спектре различных научных и инженерных задач [1]. Особый интерес представляют волоконные плазмонные датчики как перспективное направление мобильных биосенсорных систем. Среди них большое внимание уделяется датчикам на основе брэгговских решеток с наклонными штрихами [2 – 4]. Эффект поверхностного плазмонного резонанса в таких датчиках наблюдается на спектре их пропускания в виде характерной «перетяжки», спектральное положение которой является основной характеристикой данного типа сенсоров (рис.1). Следует отметить, что что такие параметры, как точность и разрешение сенсора, напрямую зависят от точности определения длины волны плазмонного резонанса по экспериментально измеренному спектру пропускания сенсора.

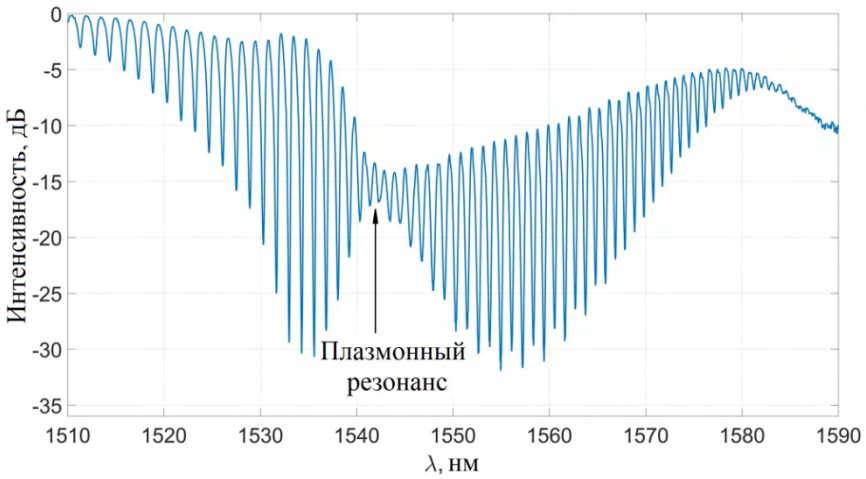


Рис. 1. Характерный спектр пропускания волоконного плазмонного сенсора на базе наклонной брэгговской решетки

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных данным сенсорам, до сих пор не был найден более-менее универсальный способ отслеживания изменения длины волны плазмонного резонанса с высокой точностью. В литературе описываются методы, основанные на измерении интенсивности отдельных спектральных пиков вблизи длины волны резонанса [5 – 8]. Однако, применение таких методов может приводить к значительным ошибкам в измерениях. . Кроме того, методы определения интенсивности отдельных спектральных пиков могут показывать ограниченную точность и воспроизводимость еще и вследствие спектральных шумов как источника, так и приемника зондирующего излучения.

В нашей работе предлагается принципиально новый, универсальный подход, основанный на математической идее, заключающейся в анализе положений множества точек спектра датчика.

После ряда предварительных шагов, представленных выравниванием и частотной фильтрацией спектра с целью минимизации влияния шумов источника и приемника, вычисляются положения нижних и верхних экстремумов для построения огибающих. На этом этапе спектр представляет собой гладкую кривую, поэтому экстремумы могут определяться как нули производной (рис.2).

Нижняя и верхняя группа экстремумов аппроксимируются двумя соответствующими 6-ти параметрическими независимыми кривыми.

$$f^{top} = \frac{\beta_{11}}{1+\exp\left(\beta_{21}(x-\beta_{31})\right)} + \frac{\beta_{41}}{1+\exp\left(-\beta_{51}(x-\beta_{61})\right)}$$
$$f^{bot} = \frac{-\beta_{21}}{1+\exp\left(\beta_{22}(x-\beta_{32})\right)} + \frac{-\beta_{42}}{1+\exp\left(-\beta_{52}(x-\beta_{62})\right)} \quad (1)$$

Здесь f^{top} и f^{bot} — кривые, аппроксимирующие верхнюю и нижнюю группы экстремумов соответственно, а β_{ij} — параметры, определяемые по методу Нелдера — Мида [9], при минимизации среднеквадратичного отклонения от экспериментальных точек. Внешний вид 6-и параметрической аппроксимационной кривой для верхней группы экстремумов представлен на рис.3.

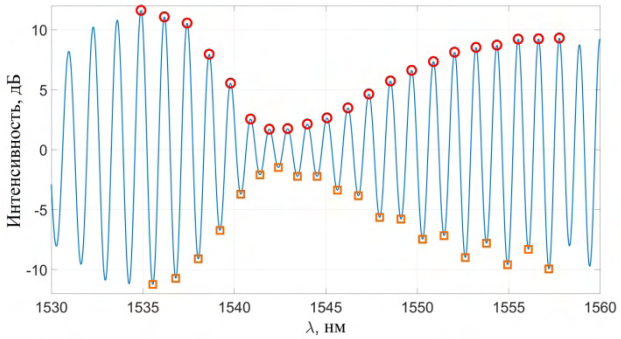


Рис. 2. Нижняя (квадраты) и верхняя (круги) группы экстремумов спектральной характеристики, прошедшей стадию предобработки

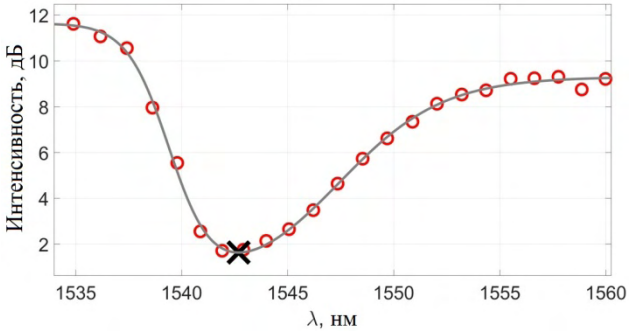


Рис. 3. Аппроксимационная кривая для верхней группы экстремумов и ее минимум (крест)

Положение резонанса на спектре определяется как точка пересечения прямой, проведенной через минимум верхней аппроксимационной кривой и максимум нижней с прямой Y = 0.

$$\lambda^{top} = \arg\left(f^{top} = \min(f^{top})\right)$$
$$\lambda^{bot} = \arg\left(f^{bot} = \max(f^{bot})\right)$$
$$\lambda^{SPR} = f^{top}\left(\lambda^{top}\right)\frac{\lambda^{top}-\lambda^{bot}}{f^{bot}\left(\lambda^{bot}\right)-f^{top}\left(\lambda^{top}\right)} + \lambda^{top} \quad (2)$$

Здесь λ^{top} и λ^{bot} — минимум и максимум нижней и верхней аппроксимационной кривой соответственно, а λ^{SPR} — итоговое положение резонанса.

Для проверки эффективности работы алгоритма был использован массив экспериментальных данных, соответствующий изменению показателя преломления ближайшего окружения сенсора на величину порядка 10^{-4} единиц показателя преломления. Оценка разрешения сенсора при использовании разработанного алгоритма составила величину $2{,}8\text{x}10^{-6}$ единиц показателя преломления, что превосходит известные результаты, использующие “классический” алгоритм, по крайней мере, на порядок. Кроме того, разработанный алгоритм отлично зарекомендовал себя при работе в большом диапазоне экспериментальных данных, вплоть до 0,04 единиц показателя преломления, тогда как “классический” метод применим только в узком диапазоне порядка $5\text{x}10^{-4}$.

Таким образом, нами был разработан универсальный алгоритм, демонстрирующий высокое разрешение в большом рабочем диапазоне показателей преломления. Достигнутые параметры открывают широкие перспективы для задач, требующих особой точности измерений. В частности, такие датчики могут эффективно использоваться в биосенсорике для проведения иммунного анализа.

Литература

1. *Homola J., Yee S. S., Gauglitz G., Sens. Actuators, B 54, 3-15 (1999)*
2. *Caucheteur C., Guo T., Albert J., Anal. Bioanal. Chem. 407, 3883-3897 (2015)*
3. *Tomyshev K. A., et al, J. Appl. Phys. 124, 113106 (2018)*
4. *Tomyshev K. A., et al, Phys. Status Solidi A 216, 1800541 (2019)*
5. *Yuan Y., et al, Anal. Chem. 88, 7609-7616 (2016)*
6. *Ribaut C., et al, Biosens. Bioelectron. 92, 449–456 (2017)*
7. *Albert J., et al, Methods 63, 239–254 (2013)*
8. *Han L., et al, J. Lightwave Technol. 35, 3360–3365 (2017)*
9. *Nelder J. A., Mead R., Computer J. 7, 308–313 (1965)*

ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННЫЙ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДАТЧИК ИЗГИБА ДЛЯ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Бутов О.В.[1*], Базакуца А.П.[1], Чаморовский Ю.К.[1], Федоров А.Н.[2], Шевцов И.А.[2]

[1] *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва*
[2] *ООО «Пролог», г.Обнинск*
[*] *E-mail:* obutov@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16008

Внутриволоконные брэгговские решетки получили широкое распространение в качестве датчиков физических величин, в частности, датчиков деформации. Одним из ключевых преимуществ таких датчиков, помимо высокой точности измерений, является их возможность объединения в массивы путем записи брэгговских структур на одном волоконном световоде с индивидуальной брэгговской длиной волны для каждого датчика. Брэгговские датчики обладают высоким разрешением на уровне 1 микрострейн, а для целого ряда задач проблема измерения именно малых величин деформаций и изгибов является крайне актуальной. Такой тип сенсоров может применяться и для измерения изгибных деформаций. Однако для корректной работы сенсор должен быть установлены максимально удаленно от центральной оси изгиба. Для измерения изгибных деформаций, например внутри каналов и труб, необходимо создавать специальные составные конструкции на основе трансдьюсеров, передающих деформацию изгиба в линейную деформацию сенсоров, закрепленных на боковой поверхности трансдьюсера. Такие сенсорные системы позволяют, например, производить измерения методом погружения конструкции в измеряемый канал. Применение дифференциальных схем позволяет минимизировать чувствительность датчика к температуре и другим, не связанным с деформацией конструкции, воздействиям [1]. Отметим, что точность и надежность работы сенсорной системы зависит от методов крепления, выбранных материалов и условий эксплуатации. Применение составных конструкций трансдьюсера может быть в ряде случаев затруднительно. Более того, с уменьшением поперечного размера датчика падает его чувствительность и возрастает вероятность ошибки из-за нестабильности используемых клеевых соединений, которые имеют ненулевую пластичность. Различие в температурных коэффициентах расширения различных элементов конструкции также является причиной возможного увеличения ошибок измерения. Применение датчиков в условиях повышенного фона ионизирующего излучение многократно усугубляет проблему стабильной работы датчиков. Большинство клеевых соединений не способны работать при высоком уровне радиационного фона, а радиационный нагрев, как правило металлического, основания конструкции приводит к существенному уменьшению динамического диапазона работы датчиков и уменьшению точности их показаний.

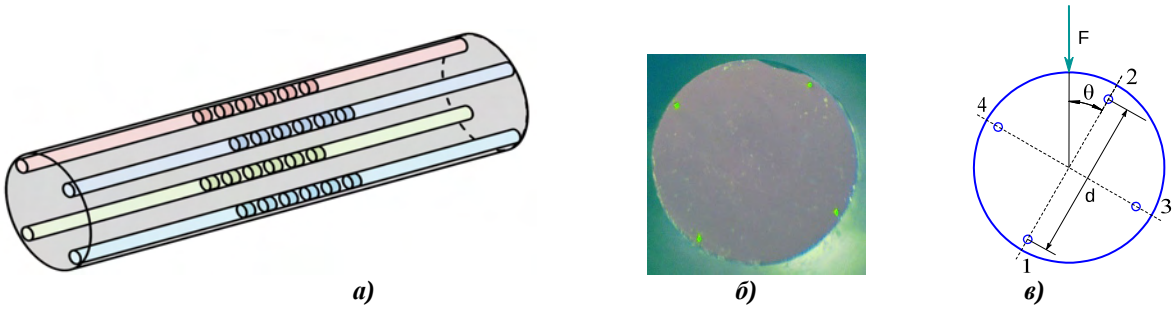
Ранее в ряде работ были предложены сенсоры изгиба, основанные на многосердцевинных волоконных световодах или световодных сборках, в которых записаны брэгговские решетки [2, 3]. Величина изгиба такого световода также определялась по принципу дифференциальной схемы. Однако, из-за малого диаметра волоконного световода чувствительность таких сенсоров к малым изгибам остается невысокой. В нашей работе мы предлагаем оригинальную, полностью волоконную конструкцию высокочувствительного датчика изгиба на основе брэгговских структур, лишенного вышеизложенных недостатков.

Конструкция нового типа датчика изгиба использует схожий принцип измерения и основана на специально разработанном стержне-световоде из кварцевого стекла с внешним диаметром 2.1 мм и содержащем 4 световедущие одномодовые сердцевины, диаметром 7-8 μm. Сердцевины расположены равномерно через 90° по периметру сечения несущего волокна. В каждой из сердцевин в одном сечении записываются брэгговские решетки на одну и ту же длину волны. Схематично конструкция такого световода с записанными брэгговскими решетками и фотография его торца с подсвеченными зеленым лазером сердцевинами, показаны на рис.1а и рис.1б соответственно.

Благодаря относительно большому, по сравнению со стандартным волоконным световодом, диаметру и, соответственно, далеко расположенными от центральной оси световода сердцевинами, такой датчик имеет многократно большую чувствительность. Суммарный сдвиг длин волн двух ортогональных датчиков при изгибе волоконного световода можно оценить, исходя из формулы [3]:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{d}{R} \qquad (1)$$

где ε_1 и ε_2 – величина деформации верхней и нижней решеток соответственно, d – расстояние между сердцевинами, а R – радиус изгиба волокна.



а) *б)* *в)*

Рис.2 – Структурная схема участка волоконного световода с четырьмя сердцевинами и брэгговскими решетками (а), фотография торца волоконного световода (б), схематичное изображение нагрузки (в)

Значение чувствительности брэгговской решетки с резонансной длиной волны в районе 1.5 мкм составляет примерно 1.1 pm/με. Принимая во внимание, что стандартное разрешение системы на основе брэгговских сенсоров составляет 1 pm, для системы из двух сенсоров с учетом ошибки минимально детектируемая величина Δε будет составлять величину порядка 10^{-6}. Из формулы (1) нетрудно оценить, что при расстоянии между сердцевинами в 2 мм, в случае соосного воздействия на датчик, ожидаемый детектируемый радиус изгиба датчика составляет 2000 м.

Предложенная конструкция датчика позволяет проводить измерение с произвольным направлением деформации изгиба. В общем случае величина и направление деформации, а именно, кривизна k для четырехсердцевинного датчика может быть вычислена по общей формуле (2):

$$k = \frac{1}{R} = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\cdot\cos\theta + (\varepsilon_3 - \varepsilon_4)\cdot\sin\theta}{d} \qquad (3)$$

где ε_1, ε_2, ε_3 и ε_4 – величины относительных деформаций решеток, расположенных в сердцевинах 1, 2, 3 и 4 соответственно (рис 1в).

Новая конструкция датчика не имеет клеевых и механических соединений в точках проведения измерений и представляет собой единую систему, собранную из материала с одинаковыми физическими свойствами. Таким образом, данная измерительная система является оптимальной для работы при сложных условиях эксплуатации, а именно при большом перепаде температур, а в случае применения сердцевин из радиационно-стойкого стекла может быть использована и в условиях высокого фона ионизирующего излучения. Так, например, данная сенсорная система может с успехом заменить ранее предложенную в работе [4] конструкцию для проведения измерений кривизны графитовой кладки канального реактора РБМК-1000. В ней использовался металлический стержень с четырьмя линиями световодов, в котором были записаны брэгговские датчики. Однако конструкция обеспечивала работоспособность при температурах не более 200 °C. Как и в работе [4], в новой конструкции были использованы сердцевины из кварцевого стекла, легированного азотом [5]. Данный тип световода обеспечивает приемлемый уровень стойкости к воздействию ионизирующего излучения [6, 7] и высокую термическую стойкость брэгговских решеток, записанных в нем [8, 9]. Новая сенсорная система позволяет проводить измерения уже непосредственно на работающем реакторе при температурах до 500 °C и обеспечивает приемлемый для проведения необходимых измерений уровень радиационно-наведенных потерь при длине активной зоны 8 м.

Литература

1. *Xu M.G., et al, SPIE, 2292, 407-414 (1994)*
2. *Gander M.J., et al, Electron.Lett., 36, 120-121 (2000)*
3. *MacPherson W.N., et al, Meas. Sci. Technol., 17, 1180–1185 (2006)*
4. *Butov O.V., et al, SPIE, 9157, Article 91570X (2014)*
5. *Butov O.V., et al, OFS-26 conference, OSA Technical Digest, TuE103 (2018)*
6. *Dianov E.M., et al, Electron. Lett., 31 (17), 1490-1491 (1995)*
7. *Волошин В.В. и др., Радиотехника и электроника, 54, 890-894 (2009)*
8. *Butov O.V., Golant K.M., Nikolin I.V., Electron.Lett, 38, 523-525 (2002)*
9. *Butov O.V, Dianov E.M., Golant K.M., Meas. Sci. Technol., 17, 975–979 (2006)*

РАСПРЕДЕЛЁННЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ РЕГИСТРАЦИИ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ СЛАБООТРАЖАЮЩИХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Пнев А.Б.*, Степанов К.В., Жирнов А.А., Чернуцкий А.О., Нестеров Е.Т., Карасик В.Е.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
** E-mail:* apniov@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16009

Распределённые волоконно-оптические датчики регистрации вибрационных воздействий находят широкое применение в различных сферах мониторинга и контрольно-оповещательных системах [1-3]. Принцип работы таких систем заключается в регистрации обратного рэлеевского рассеяния зондирующего импульса от узкополосного источника излучения с длиной когерентности больше длительности импульса. Особенностью систем также можно считать низкую мощность приходящего на приёмник сигнала: для импульса длительностью 200 нс доля обратного рэлеевского рассеяния составит 10^{-6}[4]. Для увеличения приходящего на приёмник полезного сигнала было предложено использование слабоотражающих брэгговских решёток. Технология таких решёток на сегодняшний день отработана и они могут наноситься на этапе вытяжки волокна с коэффициентом отражения 0,1% и меньше [5], что превосходит мощность обратного рэлеевского рассеяния на три порядка. В работе описано экспериментальное исследование чувствительности распределённой волоконно-оптической системы с использованием слабоотражающих брэгговских решёток в сравнении с системой на обратном рэлеевском рассеянии.

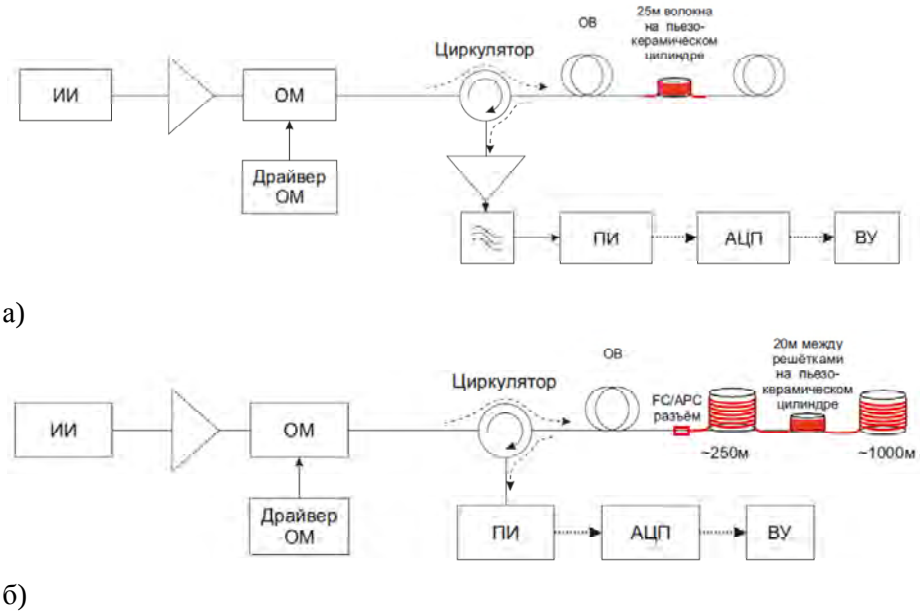
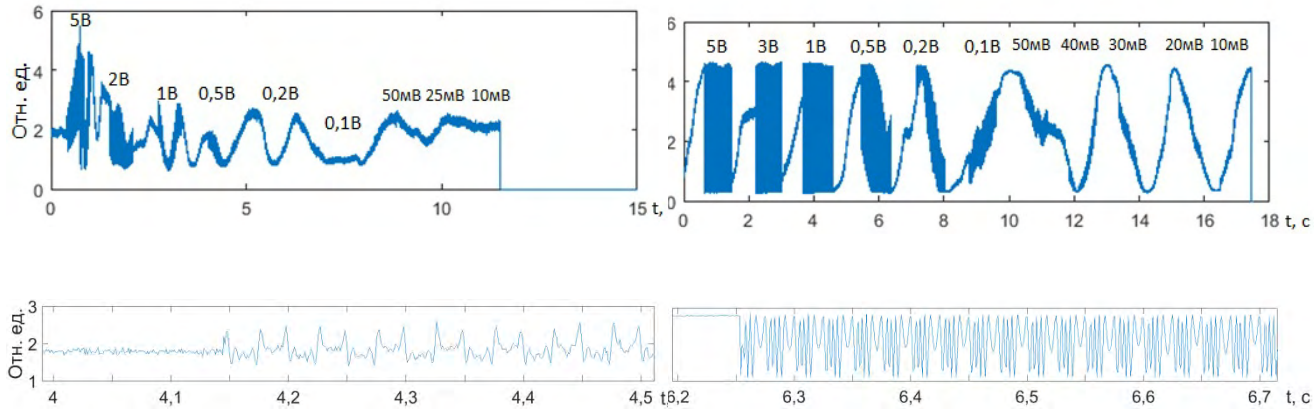


Рис. 1: (а) Схема эксперимента для регистрации сигнала обратного рассеяния; (б) Схема эксперимента для регистрации сигнала от слабоотражающих брэгговских решёток

Экспериментальная установка по определению чувствительности для системы с использованием слабоотражающих брэгговских решёток, схема которой представлена на рисунке 1(а) отличалась от системы на обратном рэлеевском рассеянии, рисунок 1(б), отсутствием предусилителя с последующим узкополосным фильтром, стоящих перед приёмником излучения. Их отсутствие вызвано тем, что мощность излучения от слабоотражающих решёток достаточна для регистрации приёмником без предварительного усиления. В качестве источника воздействия применялся пьезокерамический цилиндр, на который было намотано волокно длиной 25 м в случае обратного рэлеевского рассеяния, и идентичный цилиндр с 20 м волокна между слабоотражающими решётками.

На пьезокерамический цилиндр генератором сигналов специальной формы АКИП-3409/5 подавался синусоидальный электрический импульс частотой 20 Гц напряжением по убыванию от 5 В до 10 мВ.



а)

Рис. 2: (а) Экспериментальная зависимость регистрируемого сигнала обратного рассеяния. Снизу: участок длительностью 0,5 с при мощности воздействия 5 В; (б) Экспериментальная зависимость регистрируемого сигнала со слабоотражающих решёток. Снизу: участок длительностью 0,5 с при мощности воздействия 5 В

В ходе экспериментальных исследований были получены регистрируемые приёмником сигналы для двух типов схем, представленные на рисунке 2. В случае схемы регистрации обратного рэлеевского рассеяния был получен минимальный регистрируемый сигнал сигнал от пьезокерамического цилиндра при подаваемом напряжении 50 мВ. Отношение сигнал-шум отфильтрованного сигнала в полосе частот от 15 до 25 Гц, вычисленное по отношению СКО участка сигнала с воздействием к участку сигнала без воздействия в данном случае составило 2,72. Для системы с использованием слабоотражающих брэгговских решёток при напряжении 50 мВ при идентичной фильтрации составило 24,99, а минимально регистрируемый сигнал составил 5 мВ, при котором ОСШ 2,56.

Основными причинами, генерирующими шумы системы, являются механические колебания сенсора и нестабильность частоты лазерного источника, так как это две основных величины, определяющие фазу интерференционного сигнала.

Также стоит отметить, что при достаточно высоком подаваемом напряжении изменение фазы сигнала больше π. Так, для максимально выставленного напряжении в 5 В (рисунок 2(б)) для обоих схем происходит «перескок» фазы (phase wrapping). Однако для схемы с использованием брэгговских решёток это изменение происходит на одном уровне интенсивности, в то время как в рефлектометрической системе каждый переход через π может происходить на своём уровне и расстояние между ними не одинаково.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что распределённые волоконно-оптические датчики регистрации вибрационных воздействий на основе слабоотражающих брэгговских решёток имеют на порядок большую чувствительность, чем системы, использующие обратное рэлеевское рассеяние.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00688.

Литература

1. *Нестеров Е.Т. и др. T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. 8, 25-28 (2014)*
2. *Цоколенко Д.В., Слепцов М.А., Дюжиков В.И. Оптические технологии, материалы и системы. 86-88 (2016)*
3. *Zhirnov A.A. et al. 2016 International Conference Laser Optics (LO). R1-5-R1-5 (2016)*
4. *Листвин А.В. Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРарт, 2005. 208 с.*
5. *Popov S.M. et al. 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS). 1568-1573 (2017)*

БОРТОВАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗНОСА ТОКОПРИЁМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА МЕТРОПОЛИТЕНА

Морозов О.Г., Артемьев В.И.*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ»
** E-mail:* vadimartemev93@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16010

Введение

Из всех узлов электропоезда токоприемники работают в наиболее сложных условиях. Они испытывают различные динамические нагрузки, подвергаются сильному действию электрического тока. Так, в ряде источников сообщается, что из всех повреждений узлов электропоезда на долю токоприемников приходится 10-20% [1]. Наиболее частыми повреждениями являются повышенный износ контактной вставки, нарушение контакта и образование электрической дуги при токосъёме, вследствие чего нагрев контактных частей токоприемника [2]. На данный момент степень износа контактной вставки токоприемника определяют при плановом техническом обслуживании путем замера толщины башмака в рабочей области.

Таким образом, разработка системы контроля состояния износа токоприемника является актуальной задачей.

В данной работе предложен вариант создания волоконно-оптического датчика износа токоприемника на основе волоконной брэгговской структуры состоящей из волоконной решетки Брэгга (ВРБ) с гауссовым профилем отражения и адресной волоконной решетки Брэгга с двумя симметричными фазовыми π-сдвигами.

Принцип работы волоконно-оптических датчиков износа

На данный момент существуют разработки в области волоконно - оптических датчиков износа изделия при трении, где в качестве чувствительного элемента датчика используют волоконные брэгговские структуры [3]. Для определения уровня износа необходимо осуществлять измерения амплитуды (мощности) отраженного от нее излучения на определенной длине волны. Существует множество способов определения центральной длины волны отражения ВРБ. Их все можно условно разделить на два класса: с непосредственным определением значения длины волны и радиофотонные. Указанные способы позволяют осуществлять высокоточные измерения, однако, эти устройства являются довольно дорогостоящими. В данной работе используется радиофотонный метод опроса волоконно-оптических датчиков, но вместо дорогостоящего электрооптического модулятора Маха-Цендера для формирования двухчастотного лазерного излучения используется широкополосный источник лазерного излучения и адресная волоконная решетка Брэгга с двумя симметричными фазовыми π-сдвигами [4]. Благодаря такой структуре существенно упрощается схема устройства.

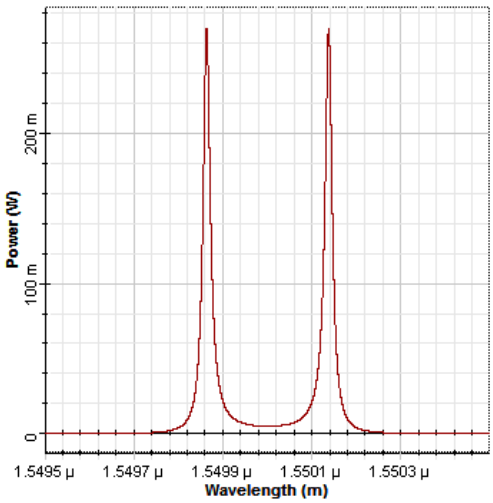


Рис. 1. Спектр пропускания адресной ВРБ с двумя симметричными фазовыми π-сдвигами

Компьютерное моделирование

Моделирование проводилось в программной среде Optisystem 7.0. На рис. 2 изображена схема измерительной системы, которая состоит из широкополосного источника лазерного излучения, волоконной решетки Брэгга с двумя симметричными фазовыми π-сдвигами, классической ВРБ с гауссовым профилем отражения, которая используется в качестве чувствительного элемента датчика износа,

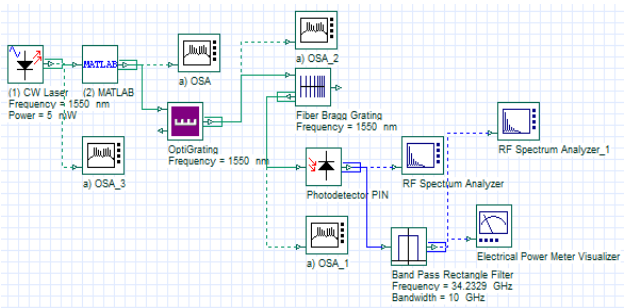


Рис. 2. Схема измерительной системы

фотоприемник, полосовой фильтр, измеритель мощности и анализатор спектра.

Для моделирования были выбраны следующие параметры элементов: центральная длина волны оптических компонентов λ = 1550 нм, разнос фазовых сдвигов составляет 0.00028нм (34.94 ГГц), начальная длина волоконной решетки Брэгга L = 3 мм, полосовой фильтр на частоте 34.94 ГГц и шириной полосы пропускания 10 ГГц.

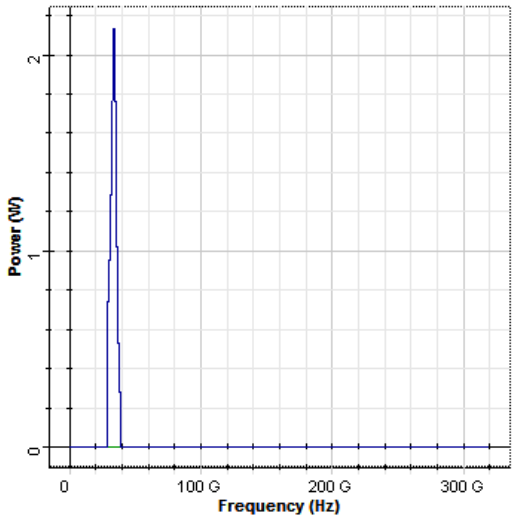


Рис. 3. Спектр сигнала биений при длине классической ВРБ L = 3 мм

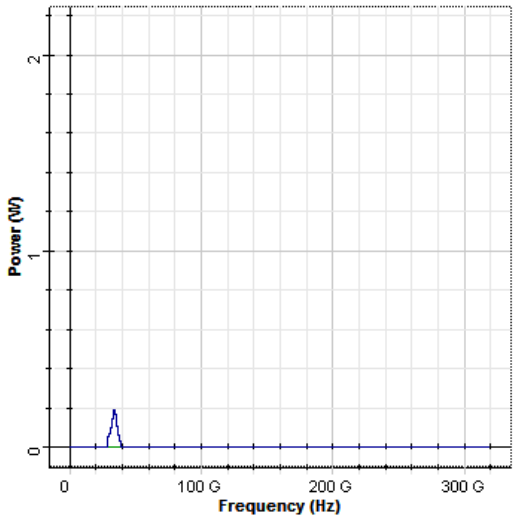


Рис. 4. Спектр сигнала биений при длине классической ВРБ L = 1 мм

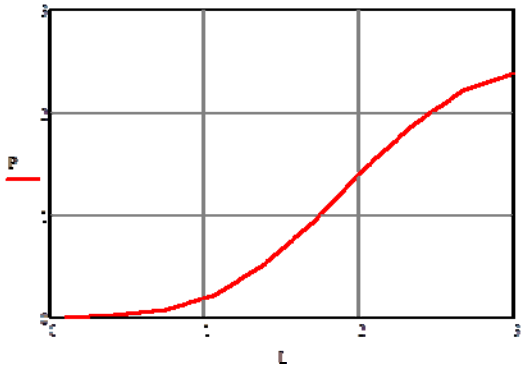


Рис. 5. Зависимость изменения мощности полученного сигнала от изменения длины классической ВРБ

На рис. 5 изображена зависимость изменения мощности сигнала от изменения длины ВРБ с гауссовым профилем отражения. Компьютерное моделирование показало, что при уменьшении длины классической ВРБ мощность полученного сигнала на промежуточной частоте уменьшается. Таким образом, по значению мощности сигнала можно определить степень износа контактной вставки токоприемника.

Заключение

В работе описана система контроля состояния износа токоприёмников электропоезда метрополитена, в основе которой лежит ВРБ в качестве чувствительного элемента датчика износа и метод опроса датчика состоящий из широкополосного источника лазерного излучения и адресной ВРБ с двумя симметричными фазовыми π-сдвигами. Представлена схема измерительной системы, а также результаты моделирования, которые показали, что с уменьшением длины классической ВРБ мощность полученного сигнала на промежуточной частоте уменьшается.

Литература

1. *Грищенко А.В., Стрекопытов В.В., Ролле И.А. Устройство и ремонт электровозов и электропоездов. М.: Академия, 2008*
2. *Добровольская Э.М. Электропоезда метрополитена: Учебник для нач. проф. образования / Эльза Михайловна Добровольская. – М.: ИРПО: Издательский центр «Академия», 2003. – 320 с.*
3. *Патент 170835 Российская Федерация, МПК G01K 11/32, G01N 3/56. Устройство для измерения величины износа и температуры изделия при трении / Морозов О.Г., Нуреев И.И., Артемьев В.И. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ» (RU). - № 2016124796; заявл. 21.06.2016, опубл. 11.05.2017., Бюл. № 14*
4. *Рус.Ш. Мисбахов, Рин.Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, А.А. Кузнецов, А.Ж.Сахабутдинов, В.И. Артемьев, В.В. Куревин, В.В. Пуртов Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей // Инженерный вестник Дона. 2017. **№ 3**. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4343*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ДРЕЙФА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С ТЕРМОЗАВИСИМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МАТЕРИАЛОВ КОНТУРА

Есипенко И.А., Лыков Д.А.*

Пермская научно-производственная приборостроительная компания, г. Пермь
* *E-mail: lykovdaperm@gmail.com*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16011

В настоящее время к системам стабилизации, управления и навигации различных объектов на волоконно-оптических гироскопах (ВОГ) предъявляются все более жесткие требования по точности при воздействии внешних факторов. К одному из таких факторов можно отнести нестационарное тепловое воздействие. Появление неоднородного поля скоростей температур в оптическом волокне контура ВОГ (Рис. 1) приводит к возникновению кажущейся угловой скорости (тепловому дрейфу), которая существенно снижает точность прибора.

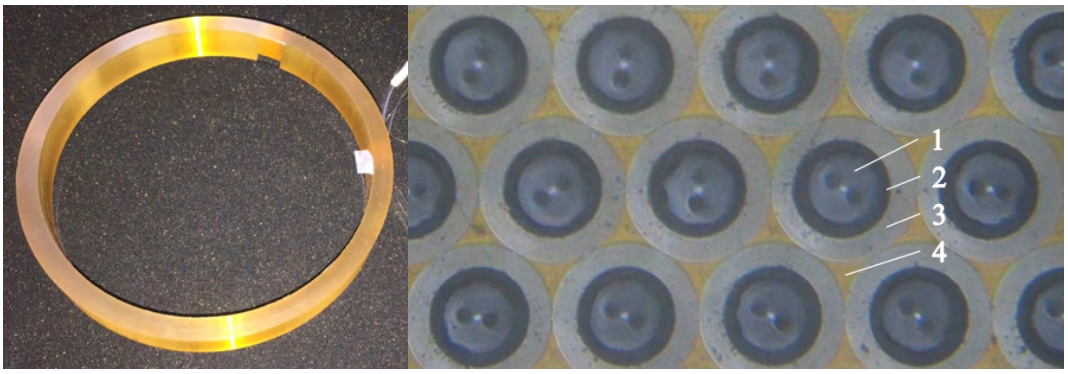


Рис. 1. Волоконный контур производства ПАО «ПНППК» и фрагмент его поперечного сечения: 1 – оптическое волокно типа «Panda», 2 – первичное покрытие, 3 – вторичное покрытие, 4 – эпоксидный компаунд

Для оценки величины теплового дрейфа на этапе проектирования ВОГ строится его математическая модель. Как известно [1], основной вклад в тепловой дрейф при квадрупольной схеме намотки волоконного контура вносит упругооптический эффект. Функционал кажущейся угловой скорости, учитывающий данный эффект [2]:

$$\Omega_{\dot{\varepsilon}} = \frac{1}{LD}\int_0^L n^2\left(1-\frac{n^2}{2}\left[\left(1-\nu\right)p_{12}-\nu p_{11}\right]\right)\dot{\varepsilon}\left(L-2l\right)dl\,, \qquad (1)$$

где L – длина оптического волокна в контуре, D – средний диаметр волоконного контура, n – показатель преломления, ν, p_{11}, p_{12} – коэффициент Пуассона и упругооптические константы жилы оптического волокна, $\dot{\varepsilon}$ – скорость диагональной компоненты тензора упругих деформаций, действующей вдоль волокна.

Для определения неизвестных скоростей температур и деформаций, как правило, ставится квазистационарная задача термоупругости с материальными константами. Однако такая постановка корректна для узкого диапазона температур, когда нет существенных изменений физико-механических характеристик полимерных материалов, составляющих волоконный контур. В противном случае кривые теплового дрейфа ВОГ различны. В связи с этим для полимеров требуется учитывать изменение физико-механических свойств от температуры в определяющих соотношениях.

У полимеров (2, 3 и 4 на рис. 1), составляющих волоконный контур, были определены модули упругости и коэффициенты линейного температурного расширения в зависимости от температуры. Далее, как с коэффициентами в зависимости от температуры, так и с константами, принятыми для 20 °C, были решены краевые квазистационарные задачи термоупругости при прочих равных условиях. Найденные скорости температур и деформаций из решения обеих задач были подставлены в выражения (1). Суммарные кажущиеся угловые скорости в сравнении с экспериментальным тепловым дрейфом представлены на рисунке 2.

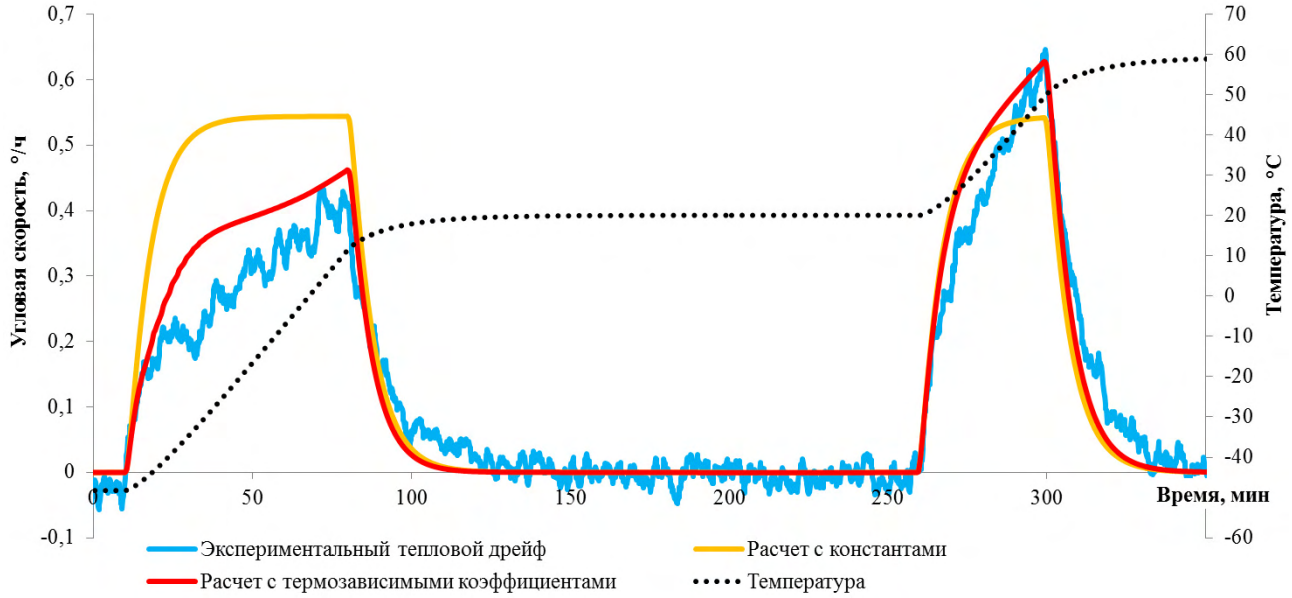


Рис. 2. Кажущиеся угловые скорости и экспериментальный тепловой дрейф ВОГ

Из рисунка видно, что использование термозависимых коэффициентов в определяющих соотношениях задачи термоупругости позволяет более адекватно описать тепловой дрейф в широком диапазоне температур.

Литература

1. *Есипенко И.А., Лыков Д.А., Вычисл. мех. сплошных сред. 3, 313–323 (2017)*
2. *Mohr F., Schadt F., SPIE. 5502, 410–413 (2004)*

МНОГОМОДОВЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ГИРОСКОП

Сахаров В.К.[1*], Машинский С.С.[2]

[1]АО «Центр ВОСПИ», Москва
[2]Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь
E-mail: vk_sach@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16012

Чувствительность полупроводникового лазерного гироскопа была существенно повышена при использовании световода большой длины в качестве кольцевого резонатора и частотной подставки, создаваемой с помощью внутрирезонаторной фазовой модуляции [1]. Экспериментальную часть дальнейшей работы составили исследования вариантов схемы устройства, характеристик излучения, способов создания частотной подставки и пр. В теоретической части была предложена модель ЛГ, описывающая взаимодействие встречных волн в кольцевом резонаторе через обратное рассеяние с помощью рекуррентных уравнений [2].

С самого начала неожиданным и необъяснимым оказалась большая амплитуда биений, возникающая в результате интерференции многомодового излучения, а также динамика амплитуды биений с периодически повторяющимся постепенным спадом, а затем быстрым восстановлением. Объяснение этих неординарных и стабильно повторявшихся особенностей является главной целью настоящей работы.

В качестве активного элемента в экспериментах использовались два образца полупроводникового оптического усилителя на кристалле InGaAsP/InP – один фирмы «Govega», а другой «Нолатех»; оба лазерные структуры с квантовыми ямами. Для создания подставки применялись фазовые модуляторы на основе пьезокерамики и кристалла $LiNbO_3$. На Рис.1*a* представлена блок-схема устройства, в котором использовался электрооптический модулятор.

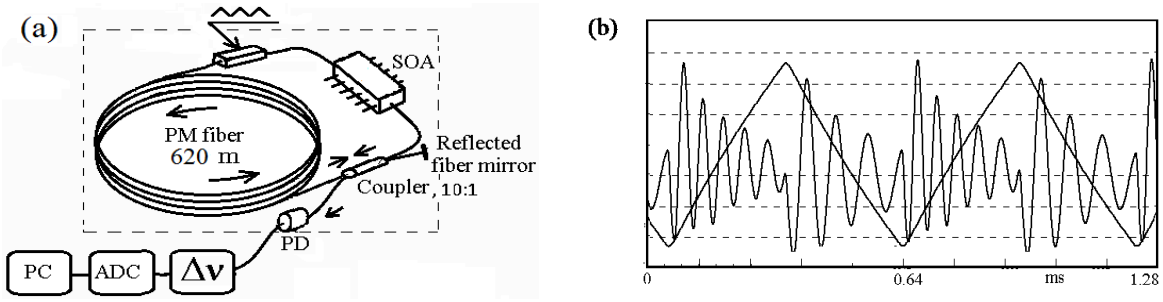


Рис.1 Блок-схема устройства (a), осциллограмма биений при вращении и сигнал фазовой модуляции треугольной формы (b)

На Рис.1*b* показаны биения на выходе устройства при вращении и сигнал фазовой модуляции в форме треугольника, создающий реверсивную частотную подставку в виде меандра. Биения с большой амплитудой стабильно воспроизводились при накачке в диапазоне 80-200 мА, полная спектральная ширина излучения составляла 2-5 нм. В интервале токов накачки 200-250 мА амплитуда биений резко падала, а ширина спектра увеличивалась до 10 нм.

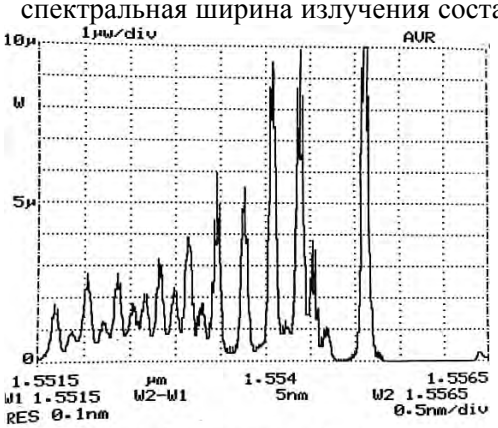


Рис.2 Оптический спектр

Оптический спектр в оптимальном режиме работы представлял собой структуру из узких линий с преимущественным интервалом между соседними линиями, равным примерно $\Delta\lambda \approx 0{,}3$ нм (Рис.2). Ширина линий не разрешалась оптическим спектрометром, но о ней позволял судить спектр межмодовых биений в фототоке, измеряемый с помощью быстродействующего фотодиода и радиоспектрометра. Он представлял собой частотную гребенку в относительно небольшой полосе 150-200 МГц с интервалом

324,5 кГц. Ширина полосы позволяла оценить ширину линий в оптическом спектре, составлявшую в нанометрах $\delta\lambda\approx(1\text{-}1.5)\cdot10^{-3}$ нм, а интервал определял частоту биений соседних мод. В отсутствие подставки «зубцы» частотной гребенки имели небольшую ширину, не более 1 кГц, из чего следовало, что спектральная ширина мод была около 0,5 кГц. При подставке ширина «зубцов» увеличивалась до 20-50 кГц, но в этом случае она определялась амплитудой частотной подставки.

Как можно видеть на Рис.1, выводимые из кольцевого резонатора встречные волны сбивались и направлялись к фотоприемнику, фототок которого далее пропускался через узкополосный фильтр. Так как частота отсечки фильтра, около 100 кГц, была ниже частоты межмодовых биений, то суммарная амплитуда биений на выходе формировалась в результате сложения биений пар встречных мод, имеющих одинаковые продольные индексы. Очевидно, причиной большой амплитуды биений была синхронность биений всех, или большого числа, участвующих в генерации пар мод. В свою очередь синхронность биений была результатом, как полагаем, механизма самоорганизации мод в полупроводниковой среде усиления.

Представить действие данного механизма возможно, предполагая однородный характер спектрального уширения в полупроводнике, так как только в этом случае моды могут взаимодействовать. Механизм заключается, по-видимому, в следующем. Пары мод с одинаковыми индексами, циркулирующие в кольцевом резонаторе навстречу друг другу, образуют в резонаторе стоячие волны. Благодаря однородному характеру излучения каждый носитель заряда в полупроводнике усиливает и/или поглощает излучение всех пар мод равным образом. Чтобы при этом моды не подавляли друг друга, их пары должны создавать в пределах небольшой длины полупроводника максимально одинаковые структуры стоячих волн. Таким образом, рассматриваемый механизм осуществляет синхронизацию мод в области полупроводника, тогда как за пределами полупроводника синхронизация мод быстро теряется, но встречные моды одного индекса благодаря своей малой спектральной ширине способны интерферировать в любой точке протяженного кольцевого резонатора.

Рассмотренный механизм синхронизации мод не тождествен хорошо известному явлению синхронизации мод, используемому для формирования сверхкоротких оптических импульсов. Основное отличие в различном механизме возникновения, а также в том, что в нашем случае область синхронизации локализована, тогда как в известном явлении она циркулирует в резонаторе вместе с оптическим импульсом.

Так как профиль стоячих волн описывается гармонической функцией с аргументом $2kx$ ($k-$ волновое число, $x-$ координата), то ширина каждой отдельной линии в оптическом спектре определяется требованием, чтобы для всех мод, формирующих линию, значения данного аргумента были максимально равными в пределах полупроводника. Из этого условия следует малая величина $\delta\lambda$. Интервал же между соседними линиями $\Delta\lambda$ определяется тем, что значения данного аргумента для мод соседних линий должны отличаться на 2π, откуда $\Delta\lambda\approx\lambda^2/2ln$. Тогда при длине полупроводника l=1200-1600 мкм, n=3.6 и λ=1.55 мкм интервал между линиями должен составлять 0,21-0,28 нм.

Постепенное падение амплитуды биений на периодах действия подставки определяется процессом накопления фазовых флуктуаций в модах в результате спонтанной эмиссии фотонов. Учет статистического характера данного процесса приводит к тому, что амплитуда биений определяется распределением разности фазовых флуктуаций в парах мод, которое в результате каждого очередного пробега через среду усилении уширяется, вызывая постепенное падение амплитуды биений.

Восстановление амплитуды биений происходит в короткие промежутки времени между соседними периодами подставки, когда реально действует явление захвата. Модель работы ЛГ [2] показывает, что благодаря захвату случайная разность случайных фаз в парах мод, какой бы она ни была, быстро уменьшается. Это приводит в итоге к скорому возрастанию амплитуды биений.

В заключение отметим, что рассмотренное устройство требует дальнейших исследований, так как далеко не все стороны физики его работы и возможности практического использования исследованы.

Литература

1. *Прокофьева Л., Сахаров В., Щербаков В., Квантовая электроника, 44 , 362-363 (2014)*
2. *Сахаров В, Квантовая электроника, 46 , 567-573 (2016)*

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Григорьев В.В., Митюрев А.К.*, Погонышев А.О., Савкин К.Б., Тихомиров С.В.

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ВНИИОФИ), г. Москва
**E-mail:* mak@vniiofi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16013

В настоящее время в России всё более широкое применение находят информационно-измерительные системы (ИИС) на основе волоконно-оптических датчиков (ВОД). К основным видам ИИС на основе ВОД можно отнести распределённые системы на базе различных оптических рефлектометров, а также квазираспределённые системы на базе брэговских датчиков (БД). В случае распределённых систем чувствительным элементом (первичным преобразователем) является само оптическое волокно (ОВ) – одномодовое или многомодовое, со специальным защитным покрытием или без, в кабеле или в специальной конструкции. Регистрирующим устройством выступает оптический рефлектометр, использующий эффекты рассеяния излучения Рэллея, Рамана и Мандельштама-Бриллюэна в ОВ. Данный вид систем позволяет получить распределение измеряемой величины (температуры, деформации, давления и т.п.) вдоль всего ОВ. Такие системы обычно применяют для мониторинга протяжённых объектов – нефте- и газо-трубопроводов, скважин, железнодорожного рельсового полотна. В квазираспределённых ИИС используют «точечные» датчики, количество которых в системе ограничено и пространственная разрешающая способность гораздо меньше, чем у распределенных. Такие системы, как правило, используют в различных локальных конструкциях – зданиях, мостах, корпусных изделиях в авиа- и кораблестроении.

В связи с применением ИИС на основе ВОД для измерений параметров ответственных объектов актуальной становится потребность в их метрологическом обеспечении – калибровке, проведении испытаний в целях утверждения типа средств измерений и последующей поверке. Для выполнения перечисленных задач во ВНИИОФИ применяются эталоны единиц длины и времени распространения сигнала в ОВ, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем передачи [1, 2]. Например, для ИИС на основе БД нормируемым оптическим параметром является длина волны лазерного излучения, отражённого брэгговским датчиком. При этом регистрирующим устройством является анализатор оптического спектра (измеритель длины волны) лазерного излучения в ОВ, поверка и калибровка которого осуществляется с помощью рабочего эталона единиц длины и ослабления в световоде или Государственного первичного специального эталона единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для волоконно-оптических систем передачи ГЭТ 170-2011. Стоит отметить, что для распределённых ИИС важным параметром измерений является расстояние до места события (например, локальное изменение температуры), нормирование которого также осуществляется с помощью рабочего эталона единиц длины и ослабления в световоде или государственного первичного специального эталона ГЭТ 170-2011.

В процессе метрологического обеспечения необходимо учитывать особенности эксплуатации таких систем [2], а именно – отсутствие возможности перемещений ранее установленных ВОД для проведения их калибровки или периодической поверки в составе ИИС. Это обусловлено тем, что в большинстве случаев первичный преобразователь связан с объектом измерений с помощью неразрывного соединения, а также сами условия эксплуатации объекта могут запрещать к нему доступ в течение долгого времени, например, во взрывоопасных средах, скважинах и проч. Таким образом, калибровка ИИС на основе ВОД как всей системы (регистрирующее устройство вместе с первичным преобразователем) бывает в большинстве случаев возможна только на этапе проведения испытаний в целях утверждения типа средства измерений и первичной поверки. Возможность прохождения периодической поверки в этом случае есть только у регистрирующего устройства. Однако, первичные преобразователи на основе ОВ сохраняют свои метрологические характеристики на протяжении достаточно длительного периода времени [3], поэтому межповерочный интервал для них может быть увеличен до десяти и более лет. Основанием для такого шага могут служить результаты исследований долговременной стабильности преобразовательных свойств чувствительных элементов в соответствующих условиях на заводе-изготовителе с нормированием данного параметра при выпуске продукции.

На сегодняшний день во ВНИИОФИ уже проведены испытания нескольких типов ИИС на основе БД и оптических рефлектометров на эффектах Рамана и Мандельштама-Бриллюэна в ОВ (Заявители: ООО «Инверсия Сенсор», ООО «Нева Технолоджи», ООО «Петрофайбер», ООО «Мониторинг Солюшенс», ООО «Рустек», ЗАО «Лазер Солюшенс», ЗАО «ТКС», ООО «Йокогава электрик СНГ»). При этом начинают широко применяться и другие типы ИИС.

Одним из активно развивающихмя в России видов ИИС на основе ВОД являются распределённые системы на базе когерентных рефлектометров (так называемые ф-OTDR, Phase-sensitive Optical Time Domain Reflectometer). От обычных OTDR они отличаются источником лазерного излучения, который имеет бóльшую длину когерентности. Вследствие этого на рефлектограмме можно получить мгновенный интерференционный сигнал от каждой точки исследуемого ОВ по всей его длине. При механическом воздействии на участок исследуемого ОВ фазовая картина меняется, что свидетельствует о наличии воздействия. Такие системы используются для систем охраны периметров, мониторинга состояния железнодорожного полотна, колёсных пар и др. В настоящее время во ВНИИОФИ проводятся работы по разработке и исследованиям методов калибровки, поверки и испытаний ИИС на основе ф-OTDR.

Для диагностики бортовых систем связи, а также изделий интегральной оптики, используют перспективный класс оптических рефлектометров, работающих в частотной области – так называемые OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometr), отличительной особенностью которых является сочетание быстродействия и высокого разрешения (от десятков микрометров до единиц миллиметров) при измерениях ряда параметров волоконно-оптических трактов длиной от нескольких десятков до пары тысяч метров. Принцип работы OFDR основан на методе частотной интерферометрии [4], который заключается в регистрации интерференционного сигнала, полученного смешением излучения от опорного отрезка ОВ с излучением от исследуемого участка ОВ при сканировании длины волны одночастотного источника света. Данные рефлектометры также могут применяться для измерений температуры и деформации в ОВ. В настоящий момент во ВНИИОФИ поданы две заявки на проведение испытаний в целях утверждения типа таких рефлектометров.

Исходя из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

ИИС на основе ВОД находят широкое применение во многих отраслях науки и техники, что требует организации их метрологического обеспечения, в т.ч. в области государственного обеспечения единства измерений;

из-за особенностей применения ИИС на основе ВОД периодической поверке могут быть подвергнуты только регистрирующие устройства;

для обеспечения достоверности измерений ИИС необходимо проводить исследования долговременной стабильности параметров ВОД (первичных преобразователей) при их производстве с последующим учётом результатов исследований при проведении испытаний и дальнейшей эксплуатации;

необходимо проводить поиск и исследования параметров ВОД, контроль которых во время эксплуатации может дать оценку о стабильности их нормируемых метрологических характеристик и ИИС в целом;

периодическую поверку регистрирующего устройства из состава ИИС необходимо проводить по тому промежуточному оптическому параметру (сдвиг длины волны, брилюэновской частоты), в который ВОД преобразует измеряемые величины (например, температуру, деформацию и др.);

ВНИИОФИ постоянно совершенствует эталонную базу для метрологического обеспечения современных и перспективных ИИС на основе ВОД.

Литература

1. *Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрёв А.К., Тихомиров С.В., Хатырев Н.П. Методы и средства калибровки информационно-измерительных систем на основе волоконно-оптичекских брэгговских датчиков // Фотон-экспресс. – 2015. – №6(126). – С. 182-183*
2. *Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрев А.К., Тихомиров С.В., Хатырев Н.П. Распределенные волоконно-оптические датчики температуры и деформации и вопросы их метрологического обеспечения // ВНТК «Метрологическое обеспечение фотоники», Тезисы докладов. – М. – 2015. – С. 130*
3. *Пнев А.Б., Тихомиров С.В., Хатырев Н.П. Особенности метрологического обеспечения информационно-измерительных систем на основе волоконно-оптических датчиков // Фотон-Экспресс. – 2013. – №6(78).– С.98-99*
4. *B. J. Soller, M. Wolfe, M. E. Froggatt Polarization resolved measurement of Rayleigh backscatter in fiber-optic components // OFC Technical Digest 2005, paper NWD3*

ОДНОРОДНОЕ УШИРЕНИЕ В СПЕКТРЕ СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ЭРБИЕВОГО ИСТОЧНИКА

Моршнев С.К.[1,2], **Губин В.П.**[1,2], **Старостин Н.И.**[1,2], **Пржиялковский Я.В.**[1,2], **Сазонов А.И.**[1]

[1]*Институт радиотехники и электроники им.В.А.Котельникова РАН, г.Фрязино*
[2]*АО «Профотек», г.Москва*
**E-mail: nis229@ire216.msk.su*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16014

В простых оптических схемах регистрации магнитных полей от больших импульсных электрических токов (например, при ударе молнии) может быть использована интерференция между волнами ортогональных поляризаций [1]. В этом случае с помощью анализатора получают проекции электрических векторов этих волн на выделенное направление и следят за тем, чтобы задержка по времени цуга одной поляризации от цуга другой поляризации не превышала длительности этих цугов. В противном случае – интерференция отсутствует. Длина цуга – эквивалент длины когерентности излучения. Возникает задача определения длительности этих цугов или их длины, отсутствующая, например, в схеме отражательного интерферометра [2-5].

Пусть, например, используется широкополосный (полоса Δλ~20 нм) суперлюминесцентный эрбиевый источник. Ясно, что ширина его неоднородная: во-первый спектр имеет два пика разной ширины и интенсивности, во-вторых основным состоянием иона Er^{3+} является $I_{15/2}$, расщепленное Штарковским расщеплением на 8 уровней. Кроме этого, ионы Er^{3+} помещены в волоконный световод, т.е. матрицей является стекло с большим разбросом электрических полей, инициированных окружением иона Er^{3+}. Можно представить спектр источника в виде набора однородных линий различной природы (переходы на различные Штарковские уровни), сдвинутых относительно друг друга по длине волны. Все это позволяет предположить существование в спектре источника квазимонохроматических цугов с однородной шириной спектра δλ << 20 нм. Однородная ширина δν спектра связана с длительностью цуга τ_z соотношением $\tau_z = 1/\delta\nu$, а его длина $l_z = c \cdot 3\tau_z = 3\lambda^2/\delta\lambda$. Целью настоящей работы является экспериментальное определение однородной ширины спектра эрбиевого источника в окрестности длины волны λ = 1544 нм.

Экспериментальная установка представляла собой последовательно соединенные: эрбиевый источник, волоконный поляризатор, Hi-Bi-волокно длиной L_f = 3,5 м с групповой длиной биений $L_{b\,g}$ = 3 мм (см. [6]), сварочный аппарат FSU 975 PM-A, волоконный анализатор и спектроанализатор AQ637OC. Волоконный поляризатор был приварен к Hi-Bi-волокну при взаимном расположении осей под углом 45°. В установке сварочный аппарат использовался как юстировочное устройство при настройке вращением волокон на максимальную видность интерференционной картины.

Спектроанализатор позволяет ступенчато изменять свое разрешение δλ: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 и 2,0 нм. В нашем эксперименте разрешение играет роль узкополосного фильтра, выделяющего из спектра источника квазимонохроматические цуги длиной $l_z = 3\lambda^2/\delta\lambda$ как у излучения одной поляризации, так и из излучения ортогональной поляризации, задержанных друг относительно друга на расстояние $l_{xy} = \left(L_f / L_b\right) \cdot \lambda$. Теперь цуги перекрываются лишь частично и видность интерференционной картины определяется величиной *V*:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = 1 - \frac{l_{xy}}{l_z} = 1 - \frac{L_f}{3L_b \cdot \lambda}\delta\lambda \qquad (1)$$

Когда цуги задерживаются на длину l_{xy}, превышающую длину цуга $l_{xy} > l_z$, интерференция становится невозможной. Однако, когда ширина спектра фильтра превышает однородную ширину спектра источника механизм интерференции становится другим.

Рассмотрим экспериментальную зависимость, приведенную на рис.1, функции видности от ширины спектра фильтра (разрешения спектроанализатора) полученную нами на приведенной установке. Видно, что слабые изменения видности (сплошная линия) при δλ ~ 0,4 нм сменяются более быстро спадающей зависимостью (пунктир).

Поведение функции видности по сплошной линии рис.1 можно объяснить на основе вышеизложенного (формула (1)), поведение же по пунктирной линии требует дополнитеьного рассмотрения.

На качественном уровне это можно понять следующим образом. Когда спектральная ширина фильтра δλ становится шире однородно уширенной линии источника, интерференция наблюдается на нескольких таких линиях, заполняющих промежуток δλ . Если пренебречь изменением интенсивности линий на этом промежутке, то уменьшение видности характеризуется множителем вида sin *x/x*, где $x = \pi \cdot \delta\lambda \cdot l_{xy} / 3\lambda^2$. При увеличении спектральной ширины δλ фильтра множитель sin *x/x* уменьшается, обращаясь в нуль при $\delta\lambda = 3\lambda^2 / l_{xy}$. Значение ширины спектра фильтра, при котором сплошная и пунктирная прямые на рис.1 пересекаются может характеризовать ширину однородно уширенной линии δλ ≈ 0,4 нм в спектре широкополосного источника. Она соответствует длине когерентности (длине цуга) равной l_z = 6 мм.

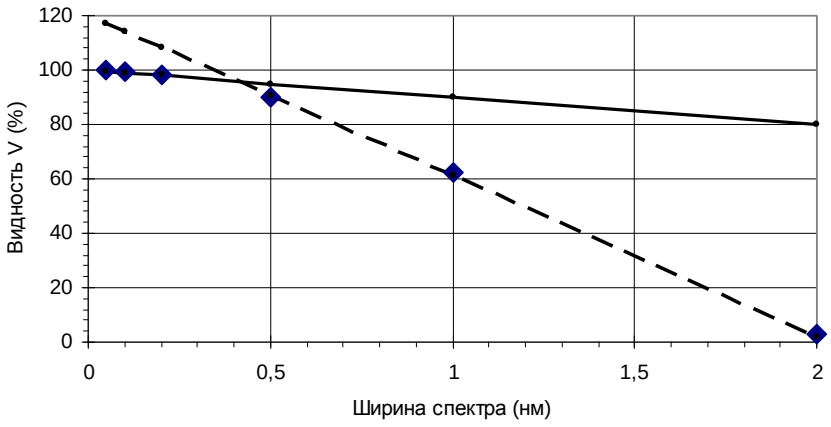


Рис.1. Функция видности от ширины спектра фильтра. Точки - эксперимент

Литература

1. *Пржиялковский Я.В., Квант.Электрон., 48, 62, (2018)*
2. *Enokihara A., Isutsu M., Sueta T., J.Lightwave Tehnol., 5, 1584, (1987)*
3. *Laming R.I., Payne D.N., J.Lightwave Tehnol., 7(12), 2084, (1989)*
4. *Bohnert K., et al, J.Lightwave Tehnol., 20, 267, (2002)*
5. *Губин В.П., и др., Квант.Электрон., 36, 287, (2006)*
6. *6.Моршнев С.К. и др., Квант. Электрон., 43, 1143, (2013)*

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК С ПОДАВЛЕНИЕМ ИЗБЫТОЧНОГО ШУМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

Пржиялковский Я.В.[1,2*], **Старостин Н. И.**[1,2], **Губин В. П.**[1,2], **Моршнев С. К.**[1,2], **Сазонов А. И.**[1,2]

[1] *НПЦ Профотек, г. Москва*

[2] *Фрязинский филиал Института Радиотехники и Электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино*

[*] *E-mail:* yankus.p@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16015

Волоконно-оптические датчики электрического тока (ВОДТ) [1, 2], основанные на эффекте Фарадея, обладают рядом ключевых преимуществ, поэтому в настоящее время всё активнее применяются в промышленности. Принцип работы ВОДТ заключается в регистрации фазового сдвига между циркулярно поляризованными световыми волнами, индуцированного магнитным полем тока. Одной из особенностей эффекта Фарадея является его быстродействие (~1 нс), поэтому оптический метод измерения тока перспективен также для регистрации импульсных токов. Основная особенность измерения импульса тока ВОДТ связана с протяжённостью чувствительного элемента и проявляется при длительности импульса, сравнимой или меньшей времени распространения света в чувствительном волокне. В этом случае происходит неполное накопление фазового сдвига Фарадея, и выходной сигнал может существенно отличаться от формы импульса тока.

Для достижения высокой точности ВОДТ, предназначенных для измерения импульсных токов, необходимо не только уменьшить длину оптического волокна чувствительного контура, но и иметь широкую полосу частот. Однако оба эти фактора приводят к уменьшению отношения сигнал/шум выходного сигнала датчика, что негативно сказывается на пороговой чувствительности датчика. Основными источниками шумов современных ВОДТ, использующих низкокогерентное оптическое излучение, являются шумы оптического излучения: фотонный шум, связанный с квантовой природой света, и избыточный шум (шум интенсивности) [3, 4] из-за биения спектральных компонент излучения. Относительное значение последнего, в отличие от фотонного шума, не может быть уменьшено путем увеличения мощности излучения, но может быть уменьшено с помощью двухканальной оптической схемы. В данной работе впервые экспериментально продемонстрирован ВОДТ на основе низкокогерентного отражательного интерферометра с подавлением шума интенсивности.

Схема ВОДТ для регистрации токовых импульсов (длительность ~100 нс, амплитуда ~10А) представлена на рис. 1. В качестве источника излучения 1 в ВОДТ использовался суперлюминесцентный волоконный источник с центральной длиной волны λ = 1550 нм и шириной спектра $\Delta\lambda$ = 20 нм. С помощью РМ ответвителя 4 линейно поляризованное излучение направляется в сигнальный (5,6,8) и опорный (9,10,11б) каналы. Сигнальный канал предназначен для регистрации фазового сдвига, индуцированного магнитным полем тока, при этом встроенный в оптический тракт ротатор 5 определяет начальную рабочую точку в середине выходной характеристики интерферометра. Чувствительный контур 6 выполнен из spun-световода (длина биений встроенного линейного двулучепреломления L_b = 10 мм, шаг спиральной структуры L_s = 3 мм) длиной 20 м. Для повышения количества витков в чувствительном контуре и, как следствие, чувствительности датчика, spun-световод был намотан на катушку уменьшенного диаметра 10 мм, в результате чего количество витков составило N = 555. Однако при таком диаметре намотки линейное двулучепреломление, вызванное изгибом spun-волокна, становится значительным. Это приводит к существенной связи винтовых поляризационных мод spun-волокна и к возникновению некогерентной составляющей излучения. В результате видность интерференционной картины датчика снижается, а временная зависимость интенсивности шума в сигнальном канале искажается, что приводит к значительному снижению эффективности подавления шума интенсивности. Для минимизации некогерентных волн излучения при намотке spun-световода с малым радиусом был использован специальный метод [5], который заключается в плавном уменьшении радиуса намотки начального отрезка spun-волокна от большого к требуемому и, аналогичным образом, плавном увеличении радиуса намотки конечного участка контура (как показано схематически на рис. 1).

Опорный канал используется для формирования шума с параметрами, идентичными шуму на выходе сигнального канала. Оптический тракт опорного канала включает волоконную линию

задержки 9 на основе PM световода, длина которого (43 м) подбиралась по критерию наилучшей синхронизации шумовых составляющих между каналами, аттенюатор 10 и фотодетектор 11б. Аттенюатор необходим для выравнивания интенсивностей падающего на фотодетекторы света, что необходимо для достижения максимальной эффективности вычитания шума интенсивности. Выходные сигналы обоих фотодетекторов поступают на вычитающее устройство 12. Полоса фотодетекторов с электронной схемой обработки составила $\Delta F = 2$ МГц. Шум на выходе сигнального и опорного каналов ВОДТ, а также разность шумов, представлены на рис. 2. Экспериментально полученное подавление шума, используя описанный подход, составило до 14 дБ.

Результаты исследования позволяют оптимизировать чувствительный контур ВОДТ, предназначенного для измерения коротких импульсов тока, а также повысить точность измерения.

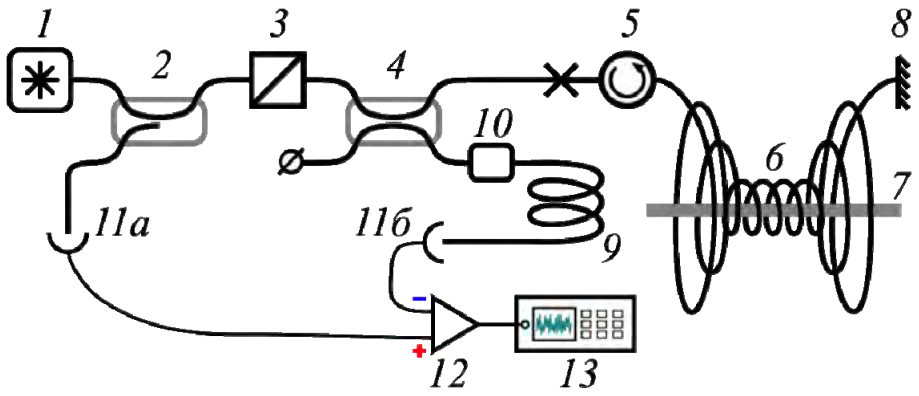


Рис. 1. Оптическая схема ВОДТ с подавлением шума интенсивности

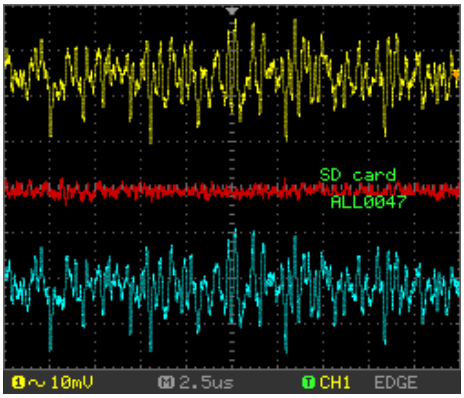


Рис. 2. Выходные шумы сигнального и опорного каналов и их разность

Литература

1. *Bohnert K., et al, Optics and Lasers in Engineering, 43, 511 (2005)*
2. *Starostin N. I., et al, Key Engineering Materials, 437, 314 (2010)*
3. *Morkel P. R., et al, Electronics Letters, 26, 96 (1990)*
4. *Burns W. K., et al, IEEE photonics technology letters, 2, 606 (1990)*
5. *Пржиялковский Я. В. и др., Квантовая электроника, 45:11, 1075–1082 (2015)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОГРАНИЧЕННОЙ ЧАСТОТНОЙ ПОЛОСЫ В ВОЛОКОННОМ ДАТЧИКЕ ТОКА НА ЭФФЕКТЕ ФАРАДЕЯ

Старостин Н.И.[1,2*], **Губин В.П.**[1,2], **Пржиялковский Я.В.**[1,2], **Моршнев С.К.**[1,2], **Сазонов А.И.**[1,2]

[1]*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, ,г.Фрязино*
[2]*ООО НПЦ Профотек, г. Москва*
**E-mail: nis229@ire216.msk.su*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16016

Интерферометрический волоконно-оптический датчик тока (ВОДТ) на эффекте Фарадея позволяет измерять постоянные и переменные токи, в том числе короткие токовые импульсы [1,2]. Датчик использует низкокогерентное излучение суперлюминесцентного источника, а измерение основано на индуцировании магнитным полем тока фазового сдвига между ортогональными циркулярно поляризованными световыми волнами в оптическом чувствительном волокне, охватывающем токопровод. Интерференция этих волн на выходе оптической схемы ВОДТ преобразует фазовый сдвиг в изменение интенсивности излучения, регистрируемой фотоприемником. В результате на выходе фотоприемника формируется отклик на измеряемый ток. Форма отклика на короткий импульс зависит от полосы фоторегистрации ВОДТ и времени прохода излучения по контуру. При этом для получения отклика с малой погрешностью требуется широкая полоса фоторегистрации существенно превышающая обратное время распространения излучения по волокну. Однако при широкой полосе значительно возрастает шум на выходе датчика, что увеличивает предельный порог регистрации малых токов. Простое увеличение мощности излучения на фотоприемнике не решает проблему, поскольку в этих условиях определяющим становится избыточный шум суперлюминесцентного источника, величина которого растет пропорционально падающей на фотоприемник мощности. Наши исследования показали, что при регистрации коротких импульсов тока существует оптимальная частотная полоса, при которой отношение сигнала к шуму максимально.

В работе экспериментально и теоретически изучались амплитудные и шумовые параметры отклика волоконно-оптического датчика тока на прямоугольный импульс тока при разной частотной полосе фоторегистрации (фотоприемника). Использовались импульсы тока с длительностью T_c не превышающей время прохода излучения по чувствительному волоконному контуру датчика T_t. Схема экспериментальной установки дана на рис.1.

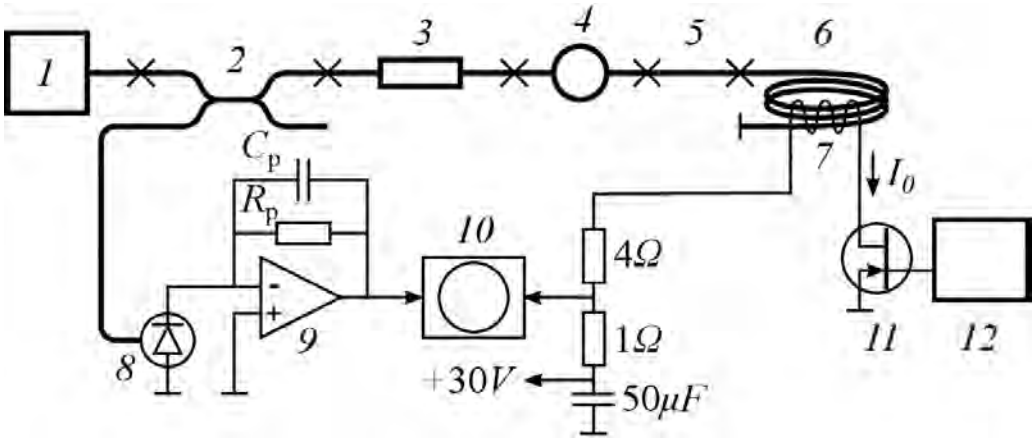


Рис.1 Экспериментальная установка

1 – волоконный источник излучения, 2 – направленный ответвитель, 3 – поляризатор, 4 – фарадеевский дискретный ротатор, 5 – соединительная линия, 6 – чувствительный контур, 7 – соленоид, 8 – фотодиод, 9 –фильтр низких частот с изменяемой полосой пропускания, R_p – резистор, C_p – конденсатор для подбора полосы пропускания, 10 – двухлучевой осциллограф, 11 – усилитель импульсного тока, 12 – задающий генератор импульсов

Установка представляла собой цельноволоконный низкокогерентный интерферометр, выходной сигнал которого детектировался фотодиодом 8. Многовитковый чувствительный контур 6 на основе spun-волокна состоял из N_1 = 2000 витков, намотанных на оправку с начальным диаметром

намотки 14 мм. Расчетное время двойного прохода света для этого контура составляло T_t = 1100 нс. Отклик ВОДТ на прямоугольный импульс, пропорциональный фарадеевскому сдвигу $\Delta\varphi_F$, снимался с выхода фильтра низкой частоты 9, полоса которого изменялась с помощью конденсатора C_p, и регистрировался на экране осциллографа 10. Измеряемый импульс тока пропускался через медный соленоид 7 с числом витков 5, охватывающих волоконный контур. Импульсы тока формировались с помощью полевого транзистора 7 и имели амплитуду 6 А при длительностях 1.1 мкс и 0.275 мкс.

При расчете формы отклика ВОДТ использовалось дифференциальное уравнение первого порядка $T_p\, dU_s(t)/dt + U_s(t) = U_i(t)$ для напряжения $U_s(t)$ на выходе фильтра низких частот при входном напряжении $U_i(t)$ в виде трапеции, где T_p постоянная времени фильтра низкой частоты (фотоприемника). Такую форму $U_i(t)$ имеет отклик на прямоугольный импульс при бесконечно широкой полосе фоторегистрации [2]. На рис.2 показаны экспериментальная и расчетная зависимости нормированного отношения сигнала к шуму от нормированной постоянной времени T_p/T_t фотоприемника при различной относительной длительности импульса тока T_c/T_t.

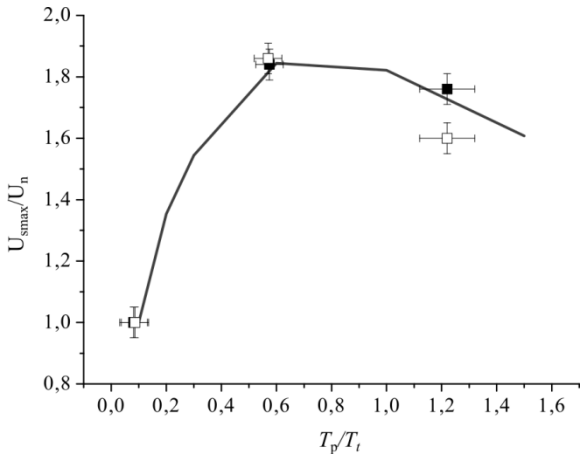


Рис.2. Зависимость сигнала к шуму от постоянной времени фотоприемника. Сплошная линия: расчет (среднее) в диапазоне T_c/T_t = 0.25 … 1.0. Экспериментальные точки: темные – T_c/T_t = 1.0, светлые – T_c/T_t = 0.25

Данная зависимость показывает наличие оптимальной полосы фоторегистрации, при которой отношение сигнала к шуму имеет выраженный максимум. При этом данная полоса близка по величине обратному времени прохода света по волокну. Обнаруженную закономерность мы объясняем различными зависимостями амплитуды отклика и величины белого шума оптического излучения от частотной полосы фотоприемника. Максимальное увеличение отношения сигнала к шуму при выборе оптимальной полосы может достигать двух и более раз по сравнению с режимом фоторегистрации, при котором искажения формы отклика, обусловленные полосой фотоприемника малы.

Рассмотрены также вопросы коррекции амплитудных искажений отклика ВОДТ при оптимальной частотной полосе и приводится обоснование методики такой коррекции.

Результаты исследований позволяют без значительной потери в точности снизить требования к быстродействию фотоэлектронного блока регистрации при разработке ВОДТ для регистрации импульсных токов.

Литература

1. *Laming R.I., Payne D.N. Journal of Lightwave Technology 7(12), 2084-2094 1989*
2. *Пржиялковский Я.В., и др. Квантовая электроника 48 (1), 62-69 (2018)*

ОПТИЧЕСКИЙ ЧАСТОТНЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР НА ОСНОВЕ САМОСКАНИРУЮЩЕГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

Ткаченко А.Ю.[1*], Лобач И.А.[1,2], Каблуков С.И.[1,2]

[1] *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*
[2] *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*
[*] *E-mail: alinka.tkacenko@yandex.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16017

Оптическая рефлектометрия является ключевой технологией, как для диагностики оптических систем, так и для распределенных сенсорных измерений [1]. Чаще всего, волоконные распределённые сенсорные системы основаны на технике временной рефлектометрии (OTDR), которая позволяет получать распределение физической величины с пространственным разрешением порядка 1 метра, что определяется длительностью зондирующего импульса. Дальнейшее уменьшение разрешения (до субмиллиметровых масштабов) может быть получено с помощью оптической частотной рефлектометрии (Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR). Принцип работы OFDR основан на анализе сигнала интерференции между исходным сигналом и рассеянным от волоконной линии [2] при частотном сканировании зондирующего излучения. Для реализации последнего условия требуется применение перестраиваемого лазерного источника. Полученный при сканировании частоты сигнал содержит информацию о точном положении и величине отражающих событий по длине волоконной сенсорной линии и может быть получен с помощью Фурье-преобразования. OFDR системы демонстрируют высокое пространственное разрешение до 5.5 мкм [3], возможность измерения относительно длинных линий до 10 км и более [4] и высокую чувствительность по отношению к величине коэффициента обратного рассеяния ~ -150 дБ [5].

Ключевым элементом в схеме OFDR является источник перестраиваемого узкополосного излучения, который является достаточно дорогим и сложным устройством. По этой причине ищутся новые подходы для создания более простых перестраиваемых источников излучения. В настоящей работе, в качестве источника перестраиваемого излучения предлагается использовать новый тип перестраиваемого лазера - лазер с самосканированием частоты, в котором перестройка оптической частоты происходит без использования внешних перестраиваемых элементов [6]. В этом случае лазер генерирует регулярную последовательность импульсов, каждый из которых состоит из одной продольной моды резонатора лазера, а оптическая частота меняется от одного импульса к другому ступенчатым образом.

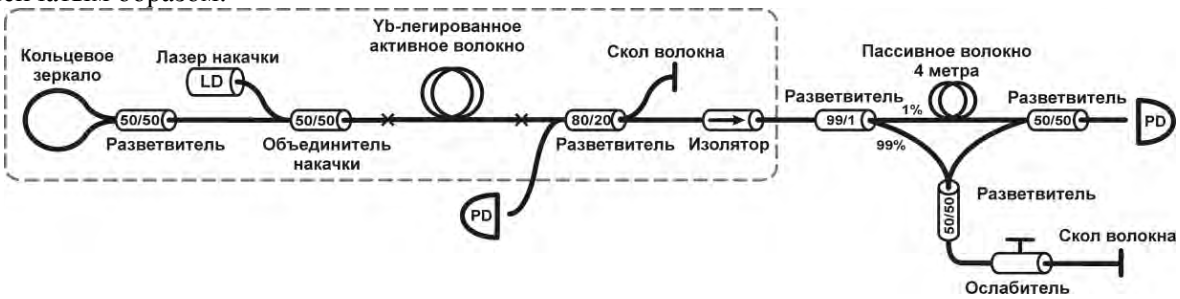


Рис.1. Схема оптического частотного рефлектометра на основе самосканирующего лазера

Схема рефлектометра на основе волоконного самосканирующего лазера представлена на Рис.1. Схема лазера (штриховой прямоугольник на Рис.1) аналогична схеме из работы [7]. Лазер работает в режиме самосканирования длины волны в диапазоне 1050-1070 нм с генерацией последовательности регулярных импульсов линейно-поляризованного излучения. При этом каждый импульс содержит только одну продольную моду со спектральной шириной порядка 1 МГц, а частота лазера изменяется между импульсами на один межмодовый интервал (~ 5.7 МГц). Выходная мощность лазера после изолятора составила 100 мВт.

Излучение лазера поступало в интерферометр Маха-Цандера у которого в одно из плеч вставлялась измеряемая линия. Интерферометр состоял из трех разветвителей, образующих два канала распространения излучения – опорный и отраженный. Дополнительно в интерферометр был добавлен отрезок пассивного волокна для согласования его плеч. Все элементы рефлектометра были сделаны на основе компонент и волокон с сохранением линейной поляризации. В качестве исследуемой линии была выбрана система, состоящая из волоконного ослабителя и отрезка PM

волокна длиной 1 метр со сколотым под прямым углом концом. В экспериментах с помощью двух фотоприемников измерялась динамика интенсивности самого лазера и интерференции после прохождения интерферометра.

На выходе из интерферометра наблюдались импульсы с медленно изменяющейся амплитудной. Форма огибающей связана с перестройкой длины волны самосканирующего лазера и несет в себе информацию о положении и интенсивности отражателей в исследуемой линии. Для извлечения формы огибающей была проделана процедура поимпульсной нормировки сигналов, аналогично работе [8]. Так как оптическая частота каждого импульса отстает от предыдущего на частоту межмодовых биений лазера, то все они являются эквидистантными в частотной области. В результатт обработки извлекалась зависимость нормированной амплитуды импульса от его номера (частоты). Для получения продольного распределения отражателей вдоль исследуемой линии (рефлектограммы) к нормированному сигналу интерференции применялось преобразование Фурье.

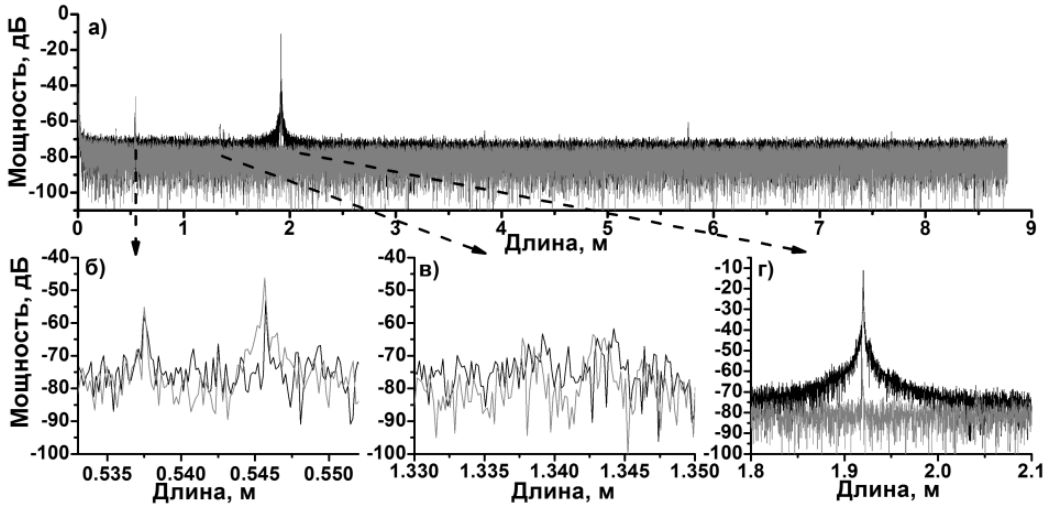


Рис.2. Рефлектограмма исследуемой линии, состоящей из волоконного ослабителя и сколотого под прямым углом волокна а) общий вид, б) отражение от ослабителя, в) паразитное отражение, г) отражение от прямого скола

В экспериментах измерялись рефлектограммы при различных потерях, вносимых ослабителем (Рис.2). Из рисунка видно, что в случае малых потерь на ослабителе наблюдается интенсивный пик отражения от выходного конца (Рис.2г). Постепенное увеличение потерь с помощью ослабителя приводит к уменьшению пика отражения от прямого скола. При этом наблюдается линейная связь между эффективным коэффициентом отражения от скола волокна и амплитудой пика. В случае, когда ослабитель полностью закрыт, т.е. потери максимальны, пик соответствующий отражению от скола становиться меньше уровня шумов и поэтому не наблюдается. Однако в этом случае появляется пик, соответствующий отражению от ослабителя (Рис.2б). Помимо полезных сигналов в рефлектограмме наблюдаются паразитные пики, например, пик на длине 1.34 м (Рис.2в) соответствует амплитудной модуляции, которая присутствует в сигнале самого источника.

Реализованный оптический частотный рефлектометр на основе самосканирующего лазера позволяет опрашивать линию длиной до 9 метров с разрешением между двумя соседними точками ~ 200 мкм и чувствительностью до ~-80 дБ.

Экспериментальное исследование Ткаченко А.Ю. выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00563. Работа выполнена в рамках государственного задания ИАиЭ СО РАН (№ 0319-2019-0004).

Литература

1. *Hartog A.H., An introduction to distributed optical fibre sensors, CRC Press, (2018), 440*
2. *MacDonald R.I., Appl. Opt. 20, 1840-1844 (1981)*
3. *Zhao D. et al, IEEE Photon. Technol. Lett., 29, 1379, (2017)*
4. *Wang B. et al., Opt. Express 25, 3514-3524 (2017)*
5. *Mussi G. et. al, Electronics Letters 32, 926 - 927 (1996)*
6. *Lobach I.A.* et al., *Laser Phys. Lett. 11(4), 045103-045109 (2014)*
7. *Tkachenko A.Yu.* et al, *Opt. Express 25, 17600-17605 (2017)*
8. *Ткаченко А.Ю., и др., Прикладная фотоника, 3, 37-49 (2016)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИРПИРОВАННОГО ИМПУЛЬСА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФАЗЫ В КОГЕРЕНТНОМ РЕФЛЕКТОМЕТРЕ

Яцеев В.А.[1*], **Зотов А.М.**[2], **Бутов О.В.**[3]

[1]*ООО «ОСБ», г. Москва*

[2]*Физ-фак. МГУ имени М.В.Ломоносова, г. Москва*

[3]*Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, г. Москва*

[*]*E-mail: yatseev@gmail.com*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16018

Актуальность

Когерентный рефлектометр используется для получения больших объемов акусто-вибрационной информации с протяженных участков волокна и находит применение в системах безопасности, измерения вибраций вдоль ствола скважин, системах мониторинга целостности конструкций.

Одна из проблем, которая решается при разработке и применении подобных систем - это восстановление фазы с учетом стохастического распределения Рэлеевских центров отражения вдоль волокна. Для ее решения имеются несколько подходов: зондирование двухчастотным импульсом, использование систем с задержкой копии импульса, использование фазовых сдвигов и прочие методы. В данной работе предлагается использовать чирпированный зондирующих импульс для восстановления фазоподобной функции в каждой точки рефлектограммы.

Теория и предложенная модель

На сегодняшний день основным решением для восстановления фазы в когерентном рефлектометре является схема с модуляцией и последующей демодуляцией сигнала. Использование более простых схем отчасти ограничено из-за сложностей связанных с определением направления изменения сигнала и малой чувствительностью в мертвых точках. Численное моделирование и получение реального сигнала, проведенное в рамках НИОКР показало, что применение чирпированного импульса и последующая математическая обработка позволяет получить достаточного качества сигналы фазы простыми средствами.

Предложенный нами способ обработки тесно связан с использованием естественных особенностей формирования импульса в лазерном источнике, амплитуда которого модулируется током.

На рис. 1 показана интерференция на отражателях (низкодобротные интерферометры Фабри-Перо) при использовании нечирпированного 1(а) и чирпированного импульса 1(б).

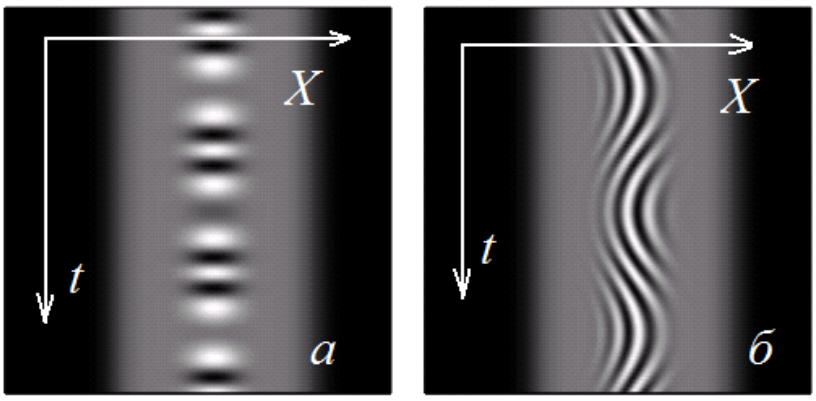


Рис.1. Численное моделирование интерференции двух импульсов, сдвинутых относительно друг друга (а)- интерференция строго когерентных импульсов, (б)- интерференция чирпированных импульсов

При воздействии на волокно и происходит изменение расстояний между центрами рассеивания в волокне, изменяются условия интерференции, происходит искажение интерференционной картины. При использовании чирпированного импульса, помимо изменения амплитуды интерференционной картины происходит смещение интерференционных полос (рис 1б). Суть алгоритма заключается в восстановлении фазы в зависимости от сдвига максимумов и минимумов в интерференционной картине.

Реализация

Описанный выше алгоритм реализован в программе обработки сигналов для рефлектометрических систем. Управляющий модуль посылает серии коротких чирпированных лазерных импульсов в оптоволокно с частотой порядка 5кГц. На рис. 2 показана возможность реконструирования фазы, полученного в определенной точке рефлектограммы. Преобразованные импульсы возвращаются в приемное устройство и оцифровываются с разрешением 100МГц, что примерно соответствует дискретизации порядка 1м (рис. 2а), далее происходит вычисление фазы сигналы, которое развертывается по времени (рис. 2б). Как видно, фазовый сигнал, развернутый во времени является гладкой функцией и в целом отражает характер воздействия на волокно.

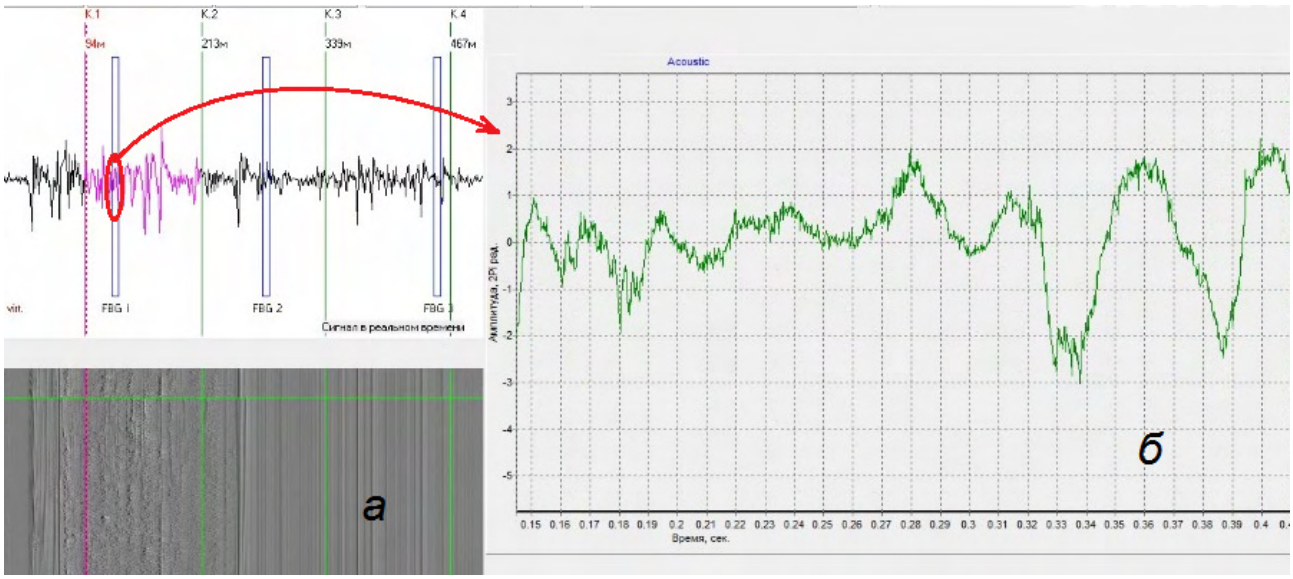


Рис.2. Пример восстановления акустического сигнала: а — оцифрованный сигнал с приемника, б-развернутый во времени сигнал фазы

Литература

1. *Куликов Андрей Владимирович автореферат; “Волоконно-оптические акустические сенсоры на брэгговских решетках”, (2012)*
2. *J. H. Cole, C. Sunderman, A. B. Tveten, C. Kirkendall, and A. Dandridge, “Preliminary investigation of air-included polymer coatings for enhanced sensitivity of fiber-optic acoustic sensors,” inProc. 15th Optical Fiber Sensors Tech. Digest, Portland, USA, vol. 1, pp. 317–320, (2002)*
3. *Зотов А.М., Качан И.П., Корженевский Д.С., Яцеев В.А., «Фазовая модуляция лазерного импульса в системе опроса волоконно-оптического гидрофона», Датчики и системы, № 2, стр. 61, (2017)*

ХАРАКТЕРИСТИКА УЗКОПОЛОСНЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ РЕФЛЕКТОМЕТРОВ

Фомиряков Э.А.[1,2], Харасов Д.Р.[1,3*], Никитин С.П.[1], Наний О.Е.[1,2], Трещиков В.Н.[1,4]

[1] *Группа компаний Т8, г. Москва*
[2] *МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва*
[3] *Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный*
[4] *ФИРЭ РАН им. В.А. Котельникова, г. Фрязино*
[*] *E-mail:* kharasov@phystech.edu

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16019

Фазочувствительные импульсные рефлектометры на эффекте рассеяния Рэлея (Ф-OTDR) широко используются в качестве распределенных вибро-акустических датчиков для мониторинга и охраны протяженных объектов (трубопроводы, границы и др.). В Ф-OTDR в волокно периодически посылаются оптические импульсы длительностью T, сформированные высококогерентным лазером и внешним модулятором. Рассеянное назад излучение от разных частей импульса случайным образом интерферирует, в результате интенсивность рефлектограммы Ф-OTDR случайным образом зависит от времени задержки, постепенно спадая вследствие затухания в волокне.

Чувствительность Ф-OTDR ограничивается шумами сигнала Ф-OTDR, при этом оптические шумы, возникающие от спонтанного излучения оптических усилителей, относительного шума интенсивности (RIN) и фазового шума лазера являются наиболее существенными. В случае, когда RIN пренебрежимо мал, а интенсивность сигнала Ф-OTDR велика, вклад дают фазовые шумы зондирующего лазера. В данной работе предложен новый метод измерения фазовых шумов лазерного излучения и продемонстрирована корреляция их с уровнем шума в сигнале Ф-OTDR.

Если Ф-OTDR зондирует волокно прямоугольным импульсом длительностью T, много короче времени когерентности $\tau_{ког}$, то нормированная мощность шума фототока во всей полосе приема[1]:

$$< N >_{норм} = \frac{< N >}{< I >^2} \approx \frac{2T}{3\tau_{ког}}, \qquad (1)$$

где $<N> = < \sigma_I^2 >$ – мощность шума N равная дисперсии интенсивности фототока, а $<I>$ – интенсивность рефлектограммы, усредненные по участку волокна много большему, чем длительность импульса, но меньшем длины затухания в волокне. Величина обратная $< N >_{норм}$ имеет смысл отношения «сигнал-шум» для мощности фототока:

$$ОСШ = \frac{< I >^2}{< N >} = \frac{< I >^2}{< \sigma_I^2 >} = \frac{3}{2\pi T \Delta\nu}, \qquad (2)$$

где $\Delta\nu = 1/(\pi \cdot \tau_{ког})$ – мгновенная ширина спектральной линии. Стабильность оптической частоты описывается дисперсией Аллана [2]:

$$\sigma_\nu^2(\tau) = < (\nu_{n+1} - \nu_n)^2 > /2, \qquad (3)$$

где ν_n – последовательно измеренные, усредненные за время τ значения частоты, а угловые скобки означают усреднение по n. Измерения дисперсии Аллана позволяют оценить $\Delta\nu$ и уходы частоты [2].

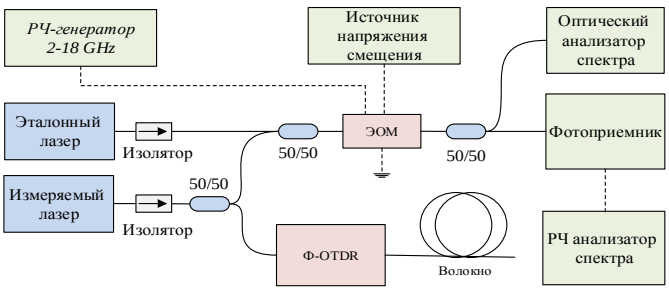


Рис.1. Блок-схема гетеродинного измерения с ЭОМ

Схема экспериментальной установки показана на рис.1. Для измерения дисперсии Аллана используется метод оптического гетеродинирования, когда излучение измеряемого лазера сбивается с излучением эталонного лазера, а частота результирующего сигнал биений измеряется фотоприемником и анализатором РЧ спектра. Для увеличения допустимой разницы длин волн сбиваемых лазеров, в оптическую схему добавлен электрооптической модулятор (ЭОМ), подключенный к генератору РЧ и формирующий в оптическом спектре боковые компоненты. Регистрация сигнала биений боковых компонент спектра вместо основных частот позволяет расширить частотный диапазон измерений до величины, равной сумме удвоенной частоты генератора и рабочей полосы фотоприемника. В эксперименте использовался InGaAs-фотоприемник с полосой приёма до 2.3 ГГц (Tektronix Optical Receiver System ORS20), ЭОМ Oclaro Powerbit SD-40 (полоса 30 ГГц), РЧ-генератор (Hewlett Packard 8672A) с частотой выходного сигнала от 2 до 18 ГГц. Таким образом допустимое отличие длин волн сбиваемых лазеров ≈ 0,3-0,4 нм. В качестве эталонных

использовались лазер “OE Waves OE4023” с шириной линии ≪1kHz, и “Clarity NLL-1550-HP”, с длиной волны привязанной к одному из оптических переходов молекулы HCN. Сигнал биений оцифровывался и записывался РЧ-анализатором спектра (Rhode and Schwartz FSW-8) в режиме измерения I/Q-квадратур с частотой семплирования до 128 МГц с последующим вычислением дисперсии Аллана на компьютере. Схожий подход ранее использовался в [3] для измерения ширины лазерной линии.

Тестировалось несколько различных лазеров разных изготовителей. Результаты измерений девиаций Аллана $\sigma_\nu(\tau)=\sqrt{\sigma_\nu^2(\tau)}$ показаны на рис.2(а). Штрих-пунктирные линии слева соответствуют мгновенным ширинам спектра 100 Гц, 1, 10, 100 кГц и 1 МГц, а штриховые линии справа - линейным уходам частоты 250, 500 кГц/с и 1, 2 МГц/с. Полученные из $\sigma_\nu^2(\tau)$ мгновенные ширины линий, линейные дрейфы частоты и $ОСШ_{теор}$ ожидаемый в соответствии с (2) приведены в табл. 1.

Тестируемые лазеры использовались в качестве источника излучения в Ф-OTDR компании «Т8 Сенсор» (см. рис.1). Длительность зондирующих импульсов в эксперименте составляла T=200 нс, а частота повторений импульсов 1 кГц. На рис.2(б) показана экспериментально измеренная зависимость ОСШ рефлектометра в зависимости от расстояния вдоль волокна. Соответствующие значения в начале линии также приведены в Табл. 1.

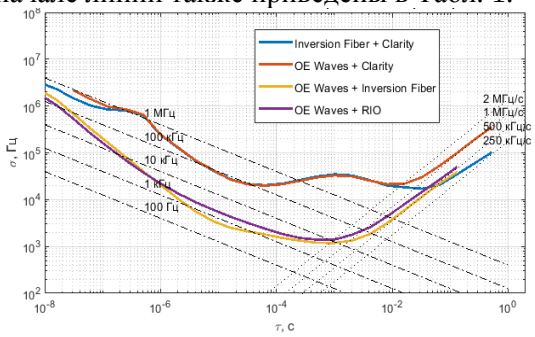


Рис.2(а). Девиация Аллана частоты сигнала-биений для разных пар лазеров

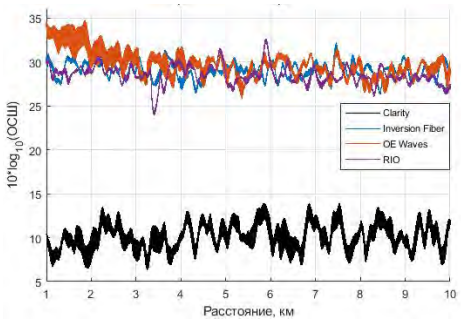


Рис.2(б). ОСШ сигнала Ф-OTDR с первых километров при использовании разных лазеров

Табл.1. Результаты измерений девиации Аллана для частоты биений и ОСШ для лазеров

Лазер	Центральная длина волны, нм	Ширина линии, кГц	Линейный частотный дрифт, МГц/с	$ОСШ_{эксп}$ для 200 нс, дБ	$ОСШ_{теор}$ для 200 нс, дБ
“Inversion Fiber”	1550,10-1550,30	0,7	0,3	30,0	35,3
“RIO”	1550,12	2,0	0,5	29,5	30,8
“Clarity”	1550,51	300 (100*)	<0,1	10,0	9,0 (13,5*)
“OE Waves”	1550,00-1550,19	<0,5	0,5	33	>36,7

* – мгновенная ширина линии без учета высокочастотной модуляции по девиации Аллана.

Анализ данных из табл.1 указывает, что в целом чувствительность Ф-OTDR зависит как от мгновенной шириной лазерной линии, так и от стабильности его частоты, при этом максимально возможный ОСШ рефлектометра определяется мгновенной шириной линии.

Выводы

Предложена новая схема регистрации сигнала биений пары лазеров, использующая оптический модулятор для расширения рабочего спектрального диапазона, с помощью которой измерена дисперсия Аллана оптической частоты для нескольких типов высоко-когерентных лазеров. Экспериментально подтверждена связь уровня шума в сигнале когерентного рефлектометра Рэлея с мгновенной шириной лазерной линии и стабильностью оптической частоты зондирующего лазера, определяемых из дисперсии Аллана.

Литература

1. *Alekseev, A. E., Tezadov, Y. A., & Potapov, V. T. (2017). Intensity noise limit in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer with a semiconductor laser source. Laser Physics, 27(5), 055101, (2017).Hartl I., et al, Opt. Lett. 26, 608-610 (2001)*
2. *Riehle, F. (2006). Frequency standards: Basics and applications. John Wiley & Sons*
3. *Von Bandel, et al, Time-dependent laser linewidth: beat-note digital acquisition and numerical analysis. Optics express, 24(24), 27961-27978,(2016)*

ТЕОРЕМА ВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКОВ И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Беловолов М.И.

Научный центр волоконной оптики РАН, г.Москва
E-mail: bmi@fo.gpi

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16020

На Всероссийской конференции ВКВО-2017 была сформулирована и доложена теорема о сравнительной чувствительности волоконных интерферометрических датчиков /1/, а в публикации /2/ было дано ее строгое доказательство. Работа и функционирование волоконно-оптических датчиков базируется на тех же принципах физической и квантовой оптики, что и вся волоконно-оптическая связь. Наличие теоремы, специфической только для волоконных датчиков как вида технической деятельности, является верным признаком науки и оформляет эту деятельность в самостоятельное направление, имеющее широкие перспективы развития. Однако, после первых публикаций требуется популяризация направления и разъяснение новых возможностей для датчиков и физических измерений. Теорема датчиков (ТД) /1,2/ по существу является не сложнее теоремы Пифагора (ТП) в геометрии и имеет как графическое, так и математическое выражение /2/. Для ее понимания и применений требуются знания на уровне решения квадратного уравнения и извлечения квадратного корня, как в случае теоремы Пифагора – ТП. Здесь отмечается аналогия ТД и ТП по форме, но не по содержанию.

О чем теорема ТД? О том, как построить волоконный датчик с идеальными или оптимальными свойствами чувствительности. Поскольку идеальные датчики построить невозможно, но создать датчики с некоторыми функциями идеальных или оптимальных волоконных датчиков вполне возможно. К числу оптимальных (или идеальных) свойств волоконных датчиков можно отнести следующие.

1. Стабильная в «0» рабочая точка для любого физического воздействия.
2. Линейность функции преобразования физического воздействия F в выходной электрический сигнал $\Delta U_{вых} \sim \Delta\varphi \sim F$, где $\Delta\varphi$ – набег фазы, вызванный модуляцией F.
3. Большой и, желательно, регулируемый динамический диапазон по величине допустимых внешних воздействий $[F_{min}, F_{max}]$ на чувствительный элемент волоконного датчика.
4. Возможность регулирования чувствительности датчика выбором длины волокна $L_д$ в чувствительном элементе датчика.

Из практики разработки интерферометрических волоконно-оптических датчиков известно, что их чувствительность $\Delta U_{ИМ}$ пропорциональна длине волокна **L** в чувствительном плече датчика:

$$\mathbf{\Delta U_{ИМ} \approx a_{им} \cdot L \cdot F,} \qquad \mathbf{(1)}$$

где коэффициенты пропорциональности $\mathbf{a_{им}}$ можно взять из экспериментов или таблицы для известных физических воздействий /3/. Формула чувствительности (1) применима для датчиков на волоконных интерферометрах Майкельсона (ИМ), Маха-Цандера (МЦ) или Фабри-Перо (ФП).

Волоконные датчики на интерферометрах Саньяка выделяются из ряда указанных датчиков вследствие их специфических свойств при соблюдении правил схемотехнического построения. Так волоконные гироскопы отличаются стабильностью в «0» рабочей точкой (пункт 1 выше) и это обстоятельство используется для прецизионного измерения угловой скорости вращения. Волоконные интерферометры Саньяка единственные, у которых величина отклика на физическое воздействие линейно зависит от координаты **x** локального воздействия на волокно, отсчитываемой от середины контура с **x** = 0. На этом свойстве чувствительности основано применение волоконных датчиков как распределенных координатно чувствительных датчиков, систем мониторинга и охраны. Если регистрировать воздействие половиной контура в виде малогабаритной катушки (датчик звука, гидрофон), то интегрирование отклика приводит к квадратичной зависимости чувствительности датчика на интерферометре Саньяка $\mathbf{\Delta U_C}$ от длины волокна **L** в чувствительной катушке /2/:

$$\mathbf{\Delta U_C \approx b \cdot \omega \cdot L^2,} \qquad \mathbf{(2)}$$

где $\mathbf{b > 0}$ – коэффициент пропорциональности (берется из эксперимента), $\mathbf{\omega \neq 0}$ – частота внешнего воздействия.

Суть теоремы датчиков (ТД) заключается в том, что чувствительность ΔU_C волоконного датчика на интерферометре Саньяка может превысить или быть сравнимой с чувствительностью $\Delta U_{ИМ}$ волоконного датчика на любом из перечисленных выше интерферометров ИМ, МЦ и ФП , если выбрать соответствующую длину чувствительного волокна датчика L (см. также /2/). Параметры a,b,ω в формулах (1) и (2) считаются ненулевыми и положительными.

Условием применимости формул (1,2) для волоконных датчиков является условие квазистационарности: внешний сигнал не должен существенно изменяться за время пробега излучения по волоконным плечам интерферометров или контуру циркуляции (в случае Саньяка)

T >> 2nL/c и при длинах L ≈1 км это условие выполняется для частот внешнего сигнала вплоть до ω ~ 1/T ~ 100 кГц.

Верхняя граничная частота $\omega_в$ рабочего диапазона чувствительности волоконного датчика практически определяется длиной волокна $L_д$ в чувствительной части датчика (в случае его прямолинейной конфигурации) или поперечным размером D многовитковой катушки как приемной антенны из волокна и ее можно определить из формулы синфазности: $\omega_в \leq V_з/2{\cdot}D$. Если принять размер катушки датчика D = 10 см, то оценки дают $\omega_в \leq 7{,}5$ кГц для случая регистрации звука в воде. Очевидно, что верхняя граница рабочих частот датчика будет определяться размерами волоконного датчика D как приемной антенны и условие квазистационарности будет выполняться с запасом.

Если длина волокна в чувствительной части волоконного датчика $L_д$ будет меньше половины длины L контура Саньяка, то есть $L_д < L$, то чувствительность волоконного датчика можно определить, модифицировав формулу (2) с учетом квадратичной зависимости от длины L:

$$\mathbf{\Delta U_C(L_д) \approx b{\cdot}\omega{\cdot}[\, L^2 - (\, L - L_д)^2] \ ,} \qquad \mathbf{(3)}$$

Практическое применение модифицированной формулы (3) для чувствительности волоконных датчиков на интерферометре Саньяка для сравнительно коротких отрезков волокна $L_д$ несколько снижает интегральную чувствительность $\mathbf{\Delta U_C}$, но сохраняет все достоинства волоконных датчиков из числа оптимальных, перечисленных выше в пунктах 1 – 4. Использование коротких отрезков волокна в качестве чувствительных элементов волоконных датчиков может оказаться удобным при регистрации таких сигналов, как акустическая эмиссия или ударные воздействия, когда требуются верхние рабочие частоты вплоть до ~1 МГц, широкий динамический диапазон по силе внешних воздействий и линейность функции преобразования воздействия в выходной электрический сигнал, когда можно изучать физику ударных воздействий или динамику сигналов акустической эмиссии с помощью встроенных волоконных датчиков.

Литература

1. *Беловолов М.И. Теорема чувствительности волоконных датчиков. ВКВО-2017. Фотон-Экспресс, стр. 173-174*
2. *М.И.Беловолов и др., Квантовая электроника, 47, 1128–1134, (2017)*
3. *Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические датчики и измерительные сети. Владивосток. Дальнаука, 1999 г.*

ВОЛОКОННО - ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ВИБРАЦИИ

Бурдышева О.В.*, Шолгин Е.С.

Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Пермь
**E-mail: Burdyshevaolga@gmail.com*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16021

В современном мире из множества существующих и применяемых технологий контроля и измерений физических параметров наиболее перспективными считаются волоконно-оптические датчики (ВОД) на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) и распределенные датчики на основе комбинационного рассеяния света (эффекта Рамана) [1]. Волоконно-оптические датчики обладают множеством преимуществ по сравнению со своими электрическими аналогами [2-4]. Эти преимущества делают их весьма привлекательными для применения во всех основных отраслях промышленности. Но по-прежнему остается актуальной задача совершенствования конструкции датчиков, увеличения их чувствительности и надежности, расширения диапазона измерений уже существующих устройств, поиска новых физических принципов, используемых при построении датчиков.

Целью данной работы является разработка точечного волоконно-оптического амплитудного датчика вибрации отражательного типа, расчет его конструктивных параметров, создание экспериментального макета ВОД вибрации и проведение измерений его рабочих характеристик.

Для проведения исследований реализована экспериментальная установка для тестирования чувствительного элемента, содержащая широкополосный волоконный эрбиевый источник генерирующий излучение на длине волны 1550 нм, чувствительный элемент, закрепленный на источнике вибрации, генератор частот задающий сигнал для источника вибрации, осциллограф производящий съем сигнала с фотоприемного модуля (рис. 1).

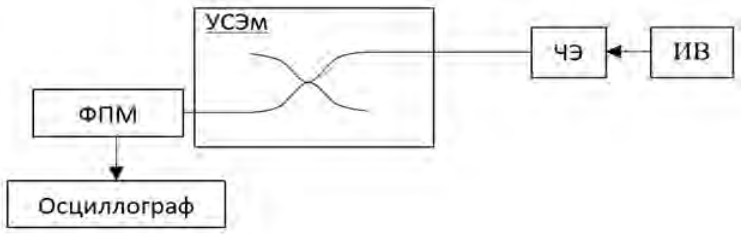


Рис.1. Схема экспериментальной установки

Чувствительный элемент датчика вибрации выполнен в виде микроподвижки, на неподвижной части которой (2) закреплена отражающая пластина (1) с полосами (4) отражательная способность которых отлична от отражательной способности пластины, торец волокна (3) закреплен на подвижной части (5) микроподвижки, благодаря которой можно проводить юстировку торца относительно пластины (рис. 2)

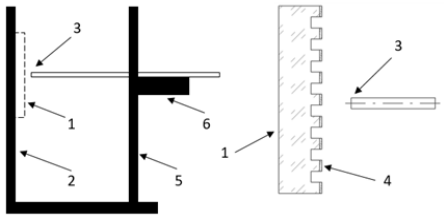


Рис. 2. Экспериментальная схема чувствительного элемента

В ходе проведения эксперимента был получен сигнал с датчика, сопоставимый с исходным сигналом генератора.

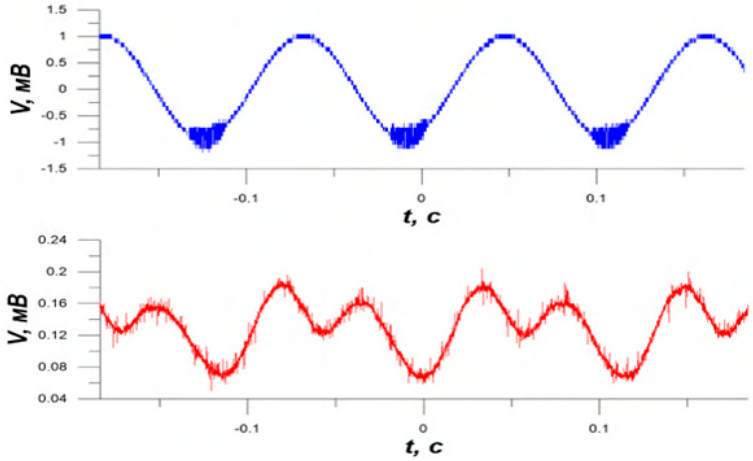


Рис. 3. Сигнал, снятый с осциллографа при частоте вибрации 8,7 Гц

Планируется теоретический расчет длины подвижной части чувствительного элемента и размер полос на отражающей поверхности, подбор материала, проработка оптимальной конструкции, построение аналитической зависимости выходной мощности от параметров вибрации.

Литература

1. *Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / В.Б. Гармаш [и др.] // Спецвыпуск «Фотон-Экспрес» - Наука. – 2005. – №6. – С. 128-140*
2. *Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси [и др.]; Под ред. Т. Окоси: Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 256 с*
3. *Джексон Р.Г. Новейшие датчики / Р.Г. Джексон. – под ред. В.В. Лучинин пер. с англ. – Москва. Техносфера, 2007. – 384 с.*
5. *Бусурин В.И., Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения / Бусурин В. И., Носов Ю. Р. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.*

ВИБРАЦИОННАЯ ДИНАМИКА ТОНКИХ ПЛЕНОК МОДЕЛЕЙ БАРАБАННЫХ ПЕРЕПОНОК И МЕТОДИКА ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ЗОНДОМ

Беловолов М.М.[1], Парамонов В.М.[1], Беловолов М.И.[1], Тимашев С.Ф.[2], Свистушкин М.В.[2], Мокоян Ж.Т.[2], Тимофеева В.А.[2]

[1] Научный центр волоконной оптики РАН, г.Москва
[2] Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М.Сеченова, г.Москва
E-mail: bmi@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16022

Разработана волоконно-оптическая система мониторинга вибрационной динамики тонких пленок и моделей барабанных перепонок (БП) на основе одночастотного лазера с узкой линией генерации и фазочувствительной бесконтактной системы регистрации вибраций при возбуждении звуком в диапазоне частот слышимости человеческого уха. Схема экспериментальной установки показана на рис.1. Чувствительным измерительным датчиком в установке является интерферометр Фабри-Перо, образуемый плоским торцом с 4% Френелевским отражением от FC-наконечника одномодового волокна типа SMF28 и поверхностью пленки модели БП, имеющим коэффициент отражения такого же порядка ~ 1 - 10%. Интерферометр получался как правило низкодобротным, однако имеющим синусоидальную функцию преобразования и высокую фазовую чувствительность к вибрациям и перемещениям поверхности БП. Расстояние между торцом волоконного зонда и поверхностью модели БП составляло 0,5 – 1 мм. Получены и исследованы АЧХ ряда тонких пластинок из материалов, которые можно рассматривать в качестве моделей барабанных перепонок. Работа и методика ориентированы на задачи регенеративной медицины в области диагностики и лечения органов слуха и голосовых связок, для которых требуется подбор свойств чувствительности и слуховой динамики барабанных перепонок с высокой точностью идентичных чувствительности и динамике реальных барабанных перепонок органов слуха.

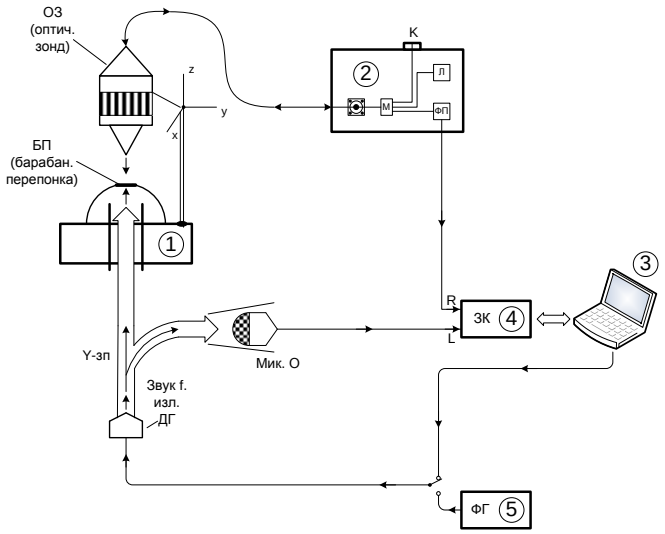
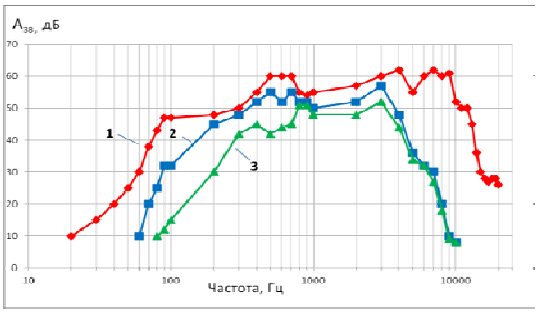


Рис.1. Функциональная схема волоконно-оптической системы зондирования моделей барабанных перепонок БП

Найдены материалы и конструкции моделей барабанных перепонок, подходящие для моделирования барабанных перепонок человека и животных с порогом чувствительности на уровне порога слышимости человеческого уха (по звуковому давлению $P_{пор} \approx 2 \cdot 10^{-5}$ Па) и работоспособные в диапазоне частот речи человека от ~ 50 Гц до ~ 10÷15 кГц при силе звука 30 – 70 дБ. Показано, что такие типовые дефекты, как отверстия (перфорации) в барабанных перепонках, снижают уровень слуха в области низких частот ≤ 1 кГц, оставляя неизменными верхние частоты диапазона чувствительности. Такие дефекты, как рубцы и утолщения из силикона, снижают общую чувствительность на средних частотах на ~ 10 дБ и несколько сужают НЧ и ВЧ края диапазона

чувствительности, приводя к заметной «глухоте». На рис.2, в качестве примера, приведены АЧХ серийного электрического микрофона и модели БП на пленке из лавсана с силиконом толщиной ~100 мкм диаметром 6 мм. На рис.3 приведены примеры АЧХ моделей БП на основе пленок из лавсана толщиной 30 мкм с дефектами и без таковых («здоровых»).

Проведено сравнение чувствительности и формы АЧХ моделей барабанных перепонок с чувствительностью типового электрического конденсаторного микрофона с рабочим диапазоном частот от 50 Гц до 15 кГц, использованного в качестве образцового и подобного «здоровому» уху человека. Полученные результаты показывают, что разработанную систему мониторинга моделей барабанных перепонок на базе волоконно-оптического зонда, малошумящих одночастотного лазера на 1,55 мкм и фотоприемника на фотодиоде (германиевом или на InGaAsP) с системой регистрации и обработки на PC с помощью специального программного обеспечения можно использовать для оперативных измерений и исследований вибрационной динамики барабанных перепонок и голосовых связок от живых организмов в реальном времени.



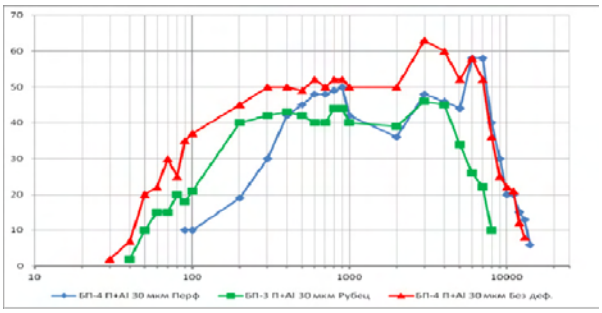


Рис.2. АЧХ моделей барабанных перепонок на основе тонкой полимерной пленки со слоем силикона толщиной 100 мкм. 1 - АЧХ электрического микрофона (верхняя кривая, точки – ромбы). 2 – АЧХ модели БП на пленке с силиконом. 3 – АЧХ модели БП с дефектом (перфорация)		***Рис.3. АЧХ моделей барабанных перепонок на основе полимерной пленки толщиной 30 мкм. Верхняя кривая (треугольники) – АЧХ для БП без дефектов. Средняя кривая (точки-квадраты) - АЧХ для модели БП с дефектом типа рубца из силикона. Ромбы – АЧХ модели БП с дефектами типа перфораций (3 отв. диаметром 1 мм)***

Дефекты типа перфораций заметно снижают чувствительность моделей барабанных перепонок на низких частотах меньше 1 кГц. На высоких частотах рабочего диапазона чувствительность остается неизменной (рис.1). Падение чувствительности в области средних частот на ~ 10 дБ означает заметную потерю слуха. Из данных рис.3 следует, что дефект на БП типа рубца приводит к заметному снижению слуха на низких частотах <400 Гц, на средних частотах падение чувствительности БП составляет в среднем на 10 дБ (ухудшение слуха в 3 раза), на высоких частотах больше 4 кГц также регистрируется существенное падение чувствительности вследствие повышения жесткости БП. Модель барабанной перепонки на полимерной пленке 30 мкм с дефектами типа перфорации (3 отв. диаметром 1 мм) обнаруживает существенное ухудшение чувствительности на низких частотах меньше 1 кГц (рис.3), но сохраняет неизменную чувствительность на верхних частотах в диапазоне 7-10 кГц, подтверждая такую же тенденцию для модели БП на силиконовой пленке толщиной 100 мкм (см. рис.2).

Полученные результаты показывают, что разработанную систему мониторинга вибрационной активности и чувствительности моделей барабанных перепонок на базе волоконно-оптического зонда можно использовать для оперативных измерений и исследований вибрационной динамики барабанных перепонок от живых организмов и человека в реальном времени. Для перенесения методики на исследование барабанных перепонок и органов слуха животных и человека необходимо разработать специальные наконечники волоконно-оптических зондов, чтобы ориентировать торец волоконного зонда перпендикулярно поверхности барабанной перепонки.

Данная работа выполнена при поддержке проектом РФФИ № 18-02-00658.

МЕХАНИЗМ И СВОЙСТВА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКОВ НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ ЗВУКА

Беловолов М.И., Парамонов В.М., Беловолов М.М.

Научный центр волоконной оптики РАН, г.Москва
E-mail: bmi@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16023

Волоконные приемники звука и гидрофоны подчиняются общим принципам построения и регистрации сигналов при любой конфигурации приемной антенны, имеющей размер D, и схеме включения в измерительную систему. Свойства чувствительности волоконных гидрофонов сравнивают со свойствами гидрофонов на пьезоэлектрических чувствительных элементах, которые обычно представляют собой шайбы диаметром D = 20 – 40 мм и толщиной ~ 1 мм. По условию синфазности для таких приемников акустических сигналов размер антенны D не должен превышать половины длины звуковой волны $\lambda_{зв}$:

$$D \le \lambda_{зв}/2 = V_з/2 \cdot f_{зв}. \qquad (1)$$

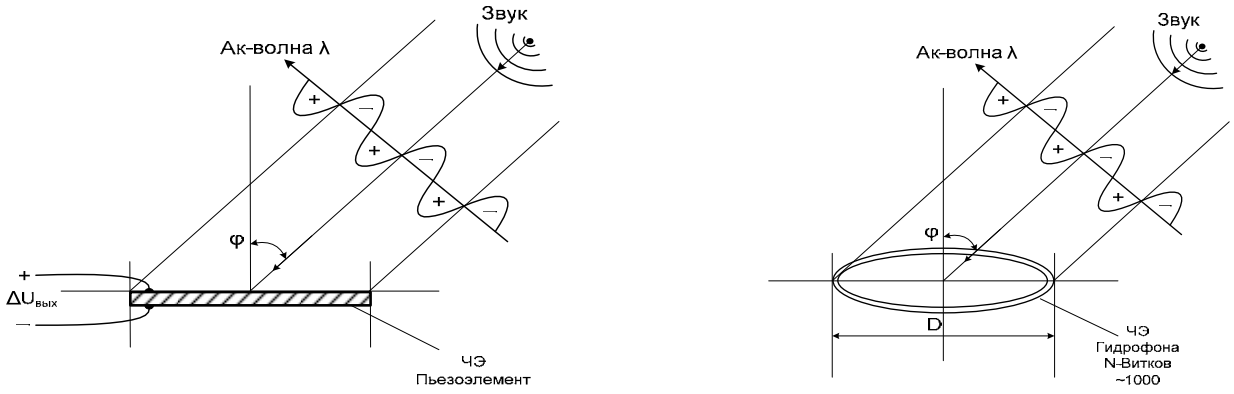
Отсюда следует ограничение верхней границы регистрируемых частот звука: $f_{зв} \le V_з/2 \cdot D$, где $V_з$ – скорость звука в среде распространения. Так для водной среды с $V_з \approx 1500$ м/с и размера акустического датчика при диметре катушки волокна $D \approx 50$ мм верхняя граничная частота составляет $f_в \approx 15$ кГц. На частотах выше 15 кГц чувствительность ухудшается. В работах /1,2/ было экспериментально обнаружено, что волоконные датчики работают и на более высоких частотах звука. В водной среде уверенно регистрировались сигналы дельфинов.

В данной работе показано, что волоконные приемники звуковых волн и гидрофоны на многовитковых элементах обладают заметной чувствительностью на высоких частотах звука вплоть до ~1 МГц, когда условие синфазности (1) уже не выполняется. Дано объяснение чувствительности к высокочастотным звуковым сигналам на основе различия механизмов чувствительности пьезокерамических и волоконных приемников звука. Обнаружен новый эффект замирания (федингa) сигнала, связанный с регистрацией на высоких частотах звука.

На рис.1 для сравнения изображены два типа датчиков звуковых волн на пьезоэлектрической пластинке (а) с посеребренными токоотводящими гранями и на многовитковом чувствительном элементе (б) – малогабаритной катушке из одномодового волокна типа SMF28e$^+$ или CS980. Проведен анализ физики формирования выходного сигнала при воздействии поля звуковой волны в этих двух случаях, когда частота звука уже не удовлетворяет условию синфазности (1). На размере приемника звука D одновременно укладываются несколько периодов звукового воздействия с чередующимися участками сжатия/разрежения. Мы полагаем, что при рассмотрении физики воздействия звука на чувствительный элемент приемной антенны работает гидродинамическая модель, когда локальные сжатия и разряжения в пучностях звуковой волны приводят к соответствующим воздействиям на чувствительные элементы и генерируется локальный электрический сигнал на пьезоэлектрике. Вследствие того, что пьезоэлектрическй чувствительный элемент имеет посеребренные грани, индуцированные заряды сразу обобществляются и сигналы усредняются. Более того, участки сжатия и разрежения производят заряды разных знаков на обкладках и суммарный сигнал устремляется к нулю. Нескомпенсированный небольшой сигнал на пьезоэлементе датчика возможен, если звуковая волна на последнем периоде не точно накрывает чувствительное поле. Большого выходного сигнала на звуковое воздействие ждать не приходится, он не образуется. Выходной сигнал формируется за счет разностного эффекта по регистрируемому звуковому полю.

Другой механизм воздействия имеет место в случае приема многовитковым волоконным чувствительным элементом, который может иметь такие же размеры катушки D, как и пьезоэлектрический датчик. Число витков волокна в катушке гидрофона может достигать 1000 и каждый виток работает как отдельный приемный элемент, а результат суммируется N- кратно. Каждый волоконный виток приемника звукового поля ориентируется одинаково по отношению к фронту звуковой волны. Два полусегмента витка принимают звуковую волну перпендикулярно фронту, а два других полусегмента витка ориентированы параллельно фронту звуковой волны. Ясно, что эти две пары частей антенны формируют выходной сигнал по-разному. Если фронт волны

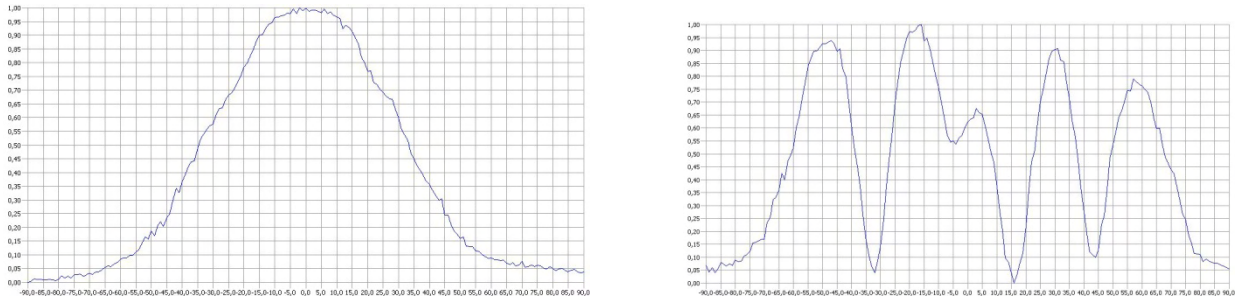
проходит волокно в витке параллельно, то регистрация происходит подобно точечному приемнику с максимальным быстродействием и высокой верхней регистрируемой частотой. Два других полусегмента витка ориентированы перпендикулярно фронту и работают как линейная антенна с усреднением эффекта. Максимальный сигнал на высокой частоте будет только при первой ориентации, когда волна проходит поперек волокна. В пучностях звука сигнал будет максимальный , а в узлах – нулевым.



а) б)

Рис.1. К механизму регистрации звуковых волн пьезоэлектрическим датчиком (а) и волоконным гидрофоном на многовитковом чувствительном элементе (б)

При изменении угла φ приема волны, то есть при сканировании по диаграмме направленности, такой датчик на многовитковом элементе должен демонстрировать максимумы сигнала, чередующиеся с его замиранием. Для подтверждения этого эффекта мы провели сканирование диаграммы направленности по углу приема φ. На рис.2 показан вид диаграммы направленности на монохроматической частоте звука ω=20 кГц (а) и на высокой частоте ω=80 кГц (б). Видно, что в случае б) имеет место замирание сигнала, обусловленное эффектом фединга при приеме монохроматического звука волоконным гидрофоном на многовитковом чувствительном элементе.



а) б)

Рис.2. Диаграммы направленности волоконно-оптического приемника гидроакустических сигналов на частоте звука 20 кГц (а) и 80 кГц (б). Диаметр катушки чувствительного элемента 5 см

Таким образом, экспериментально подтверждена чувствительность волоконных датчиков на многовитковых элементах (катушках) вплоть до частот ~100 кГц, включающих область чувствительности современных сонаров и эхолотов. Обнаружен новый эффект замирания (фединга) сигналов регистрации звука на высоких частотах, обусловленный диаграммным эффектом, когда в плоскости сечения волоконной антенны укладывается четное число полуволн гидростатического сжатия и разрежения звуковой волны (рис.1б). Диаграммный эффект фединга не наблюдается при регистрации звука пьезоэлектрическим гидрофоном.

Работа выполнена при частичной поддержке проектом РФФИ № 18-02-00658.

Литература

1. *Беловолов М.И. и др., ВКВО-2017. Фотон-Экспресс, 6, 217-218 (2017)*
2. *Belovolov M.I. et al., OFS-17, Proceedings of SPIE, Vol.5855, 948-951 (2005)*

ИНТЕРФЕРОМЕТР НА ОСНОВЕ ДВУХ ВОЛОКОННЫХ ВСТАВОК С ТОНКОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ

Иванов О.В.[1,2,3]

[1] *Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск*
[2] *Ульяновский государственный университет, Ульяновск*
[3] *Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск*
E-mail: olegivvit@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16024

Оптоволоконные структуры со вставками нестандартных волокон, спектральные характеристики которых определяются взаимодействием и преобразованием нескольких волоконных мод различных типов, привлекают значительный интерес благодаря простоте их создания, компактности, возможности использования для измерения параметров внешней среды [1–3]. Волоконные структуры со вставками, возбуждающими оболочечные моды, находят применения в качестве датчиков влажности [4], температуры [5], показателя преломления внешней среды [6], уровня жидкости [7] и других. В качестве вставок могут использоваться много- и маломодовые волокна, волокна с тонкой сердцевиной, микроструктурированные волокна и другие. Чувствительность структур, возбуждающих оболочечные моды, может быть существенно увеличена созданием интерферометров. Ранее нами были исследованы интерферометры на основе волокна с двойной оболочкой, волокна с тонкой сердцевиной, структуры с покрытиями и со стравленным волокном [9,10].

Спектр пропускания волоконного интерферометра представляет собой осциллирующую кривую. С точки зрения практического применения необходимо получить осцилляции максимальной амплитуды с достаточно узкими пиками, ширина которых определяется периодом, обратно пропорциональным длине базы интерферометра. При создании интерферометра из отрезка волокна с тонкой сердцевиной амплитуда сигнала существенно падает с увеличением длины волокна-вставки. В связи с этим в данной работе предложен новый тип волоконного интерферометра, основанный на двух коротких вставках волокна с тонкой сердцевиной, между которыми находится отрезок стандартного волокна. Вставки волокна с малой сердцевиной возбуждают оболочечные моды и обеспечивают обмен энергией между различными волоконными модами, а отрезок стандартного волокна является базой интерферометра, при прохождении которого мода сердцевины и моды оболочки накапливают разность фаз. Экспериментально измерены спектры пропускания интерферометра в зависимости от его длины.

Структура интерферометра из двух коротких вставок волокна с тонкой сердцевиной и ход лучей в ней показаны на Рис. 1. Длина вставок составляет от долей миллиметра до нескольких миллиметров, а длина базы интерферометра – от сантиметра до десятков сантиметров.

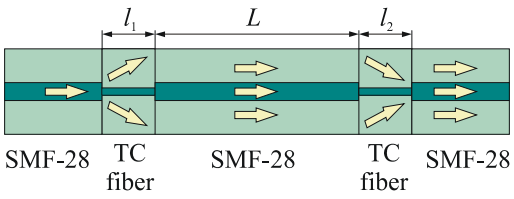


Рис. 1. Структура волоконного интерферометра и ход лучей в ней

Вставка волокна с тонкой сердцевиной имеет профиль показателя преломления существенно отличный от профиля стандартного волокна, поэтому распределения полей мод также сильно различаются, и на стыке этих двух волокон происходит передача энергии моды сердцевины одного волокна в моды оболочки второго волокна. Если длина вставки мала, то различные моды оболочки после выхода на первом стыке не успевают набрать значительную разность фаз и на втором стыке в стандартном волокне просто восстанавливается мода сердцевины. Если длина вставки большая, то на втором стыке моды оболочки приходят с разными фазами, результат интерференции которых будут зависеть от длины волны, параметров волокна и окружающей среды. В идеальном случае для получения хорошего спектра в интерферометре должно быть две моды равной амплитуды, т.е. потери моды сердцевины должны составлять не менее 50%. С другой стороны на стыке возбуждаются не одна оболочечная мода, а несколько. На них также уходит часть энергии. Поэтому для получения

равных амплитуд мод сердцевины и оболочки необходимо на вставке иметь потери 20–40%. На Рис. 2 приведены зависимости пропускания одиночных вставок из волокон SM450 и SM600 различных длин, откуда видно, что оптимальная длина вставки составляет 0.2–0.5 мм.

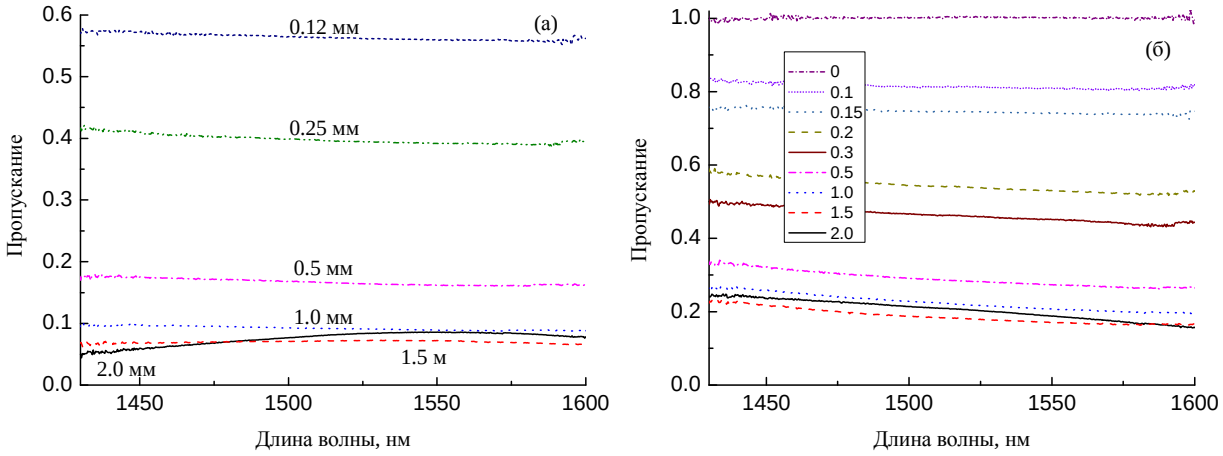


Рис. 2. Спектры пропускания одиночных вставок различной длины из волокон SM450 (а) и SM600 (б)

Для измерения спектров волоконного интерферометра сначала была создана структура с максимальной длиной вставки стандартного волокна (базы интерферометра), которая затем укорачивалась вырезанием отрезка волокна, длина которого определялась возможностями используемого скалывателя. На Рис. 3 представлены спектры пропускания интерферометра со вставками волокна SM600 длиной 0.3 и 0.5 мм для различных длин базы от 194 до 21 мм в диапазоне длин волн 1430–1600 нм.

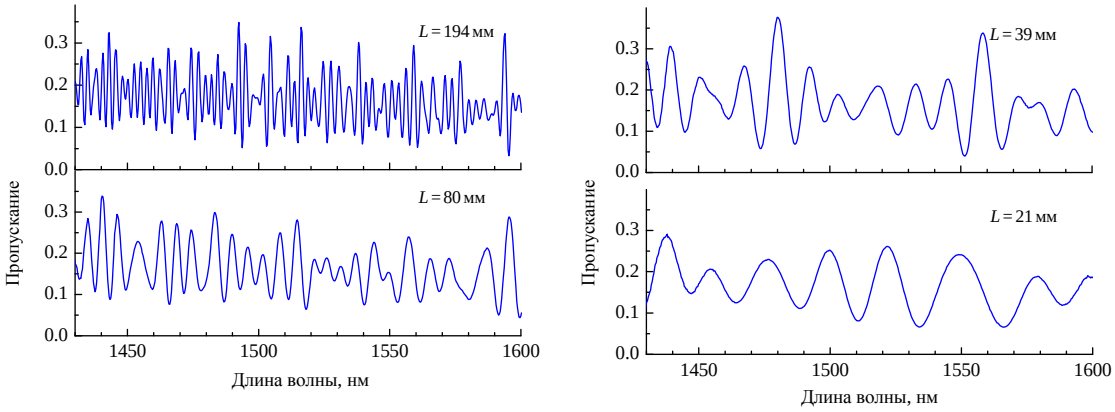


Рис. 3. Спектры пропускания интерферометра для различных длин его базы

Литература

1. *Иванов О.В., Никитов С.А., Оболочечные моды волоконных световодов и длиннопериодные волоконные решетки, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012, 252 с.*
2. *Tong, C., Chen, X., Zhou, Y., et al, Optical Review 25, 295-300 (2018)*
3. *Dong X., Su L., Shum P., et al, Opt. Commun. 258, 159-163 (2006)*
4. *Akita S., Sasaki H., Watanabe K., et al, Sens. Act. B: Chem. 147, 385-391. (2010)*
5. *Bao W., Hu N., Qiao X., et al, IEEE Photonics Technol. Lett. 28, 2245-2248 (2016)*
6. *Zhao Y., Pang F., Dong Y., et al, Opt. Express 21, 26136-26143 (2013)*
7. *Gu B., Qi W., Zhou Y., et al, Opt. Express 22, 11834-11839 (2014)*
8. *Иванов О.В., Радиотехника и электроника 63, 1041-1050 (2018)*
9. *Ivanov O.V., Yang F., Tian F., Du H., Opt. Express 25, 31197-31203 (2017)*

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ ФОТОАКТИВНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ТЕРМОМЕТРИИ И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ

Матросова А.С.[1,2*], Евстропьев С.К.[2], Миронов Л.Ю.[2], Комаров А.В.[1], Демидов В.В.[1], Никоноров Н.В.[2]

[1] Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, г. Санкт-Петербург
[2] Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург
** E-mail:* matrosova@goi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16025

На протяжении двух последних десятилетий на практике активно внедряются сенсорные устройства различной конструкции для непрерывного контроля параметров окружающей среды (температуры, давления, деформации, вибрации и т.д.). Из всего многообразия существующих датчиков выделяют волоконно-оптические, преимуществами которых относительно аналогичных по функциям устройств другого типа являются возможность детектирования параметров внешней среды в удаленных и труднодоступных местах, устойчивость к воздействию электромагнитного излучения и радиации, компактность, надежность, высокая точность измерений [1]. Для ряда приложений перспективным представляется использование волоконно-оптических датчиков люминесцентного типа, отличающихся быстродействием и высокой чувствительностью [2]. Целью настоящей работы было создание и исследование макетов волоконно-оптических элементов (ВОЭ) простой конструкции, принцип работы которых построен на явлении температурного тушения люминесценции, для измерения температуры окружающей среды и детектирования УФ излучения.

Для создания макета термочувствительного ВОЭ была синтезирована композиция на основе фотополимера (эпоксиакрилата марки DeSolite 3471-3-14), в состав которого введены комплексные соединения европия (Eu^{3+}) с 2-нафтоилтрифторацетоном и триоктилфосфиноксидом. Известно [3], что эта композиция характеризуется сильным поглощением в ближней УФ области спектра и ярко выраженной люминесценцией на длине волны λ = 615 нм, соответствующей полосе электронного перехода $^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ (Рис. 1).

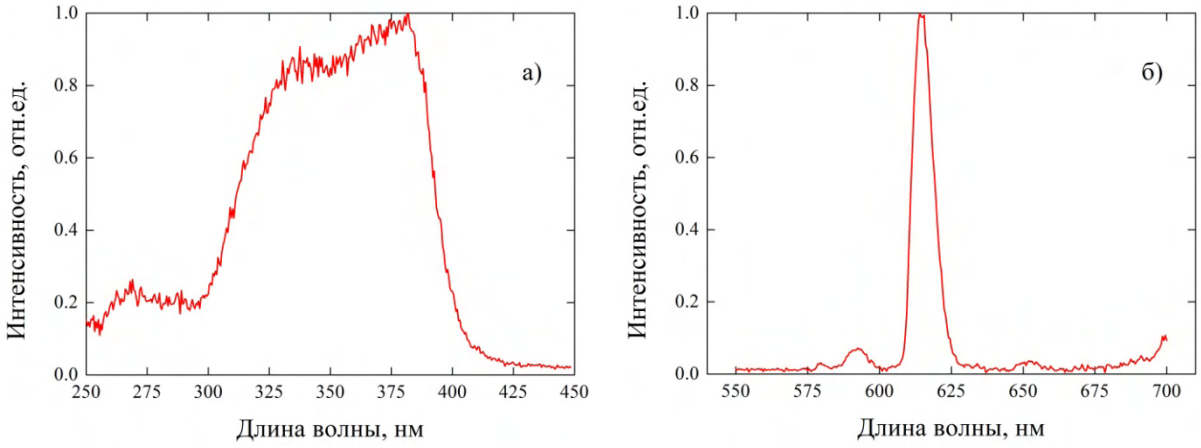


Рис. 1. Спектры возбуждения люминесценции (λ_{ex} = 350 нм) (а) и люминесценции (λ_{em} = 615 нм) (б) комплексов Eu^{3+} в составе фотоактивной полимерной композиции

Конструкция ВОЭ состояла из многомодового волоконного световода и кварцевого капилляра с внутренним диаметром 0,45 мм длиной 2 см, заполненного термочувствительным материалом. В связи с необходимостью передачи одновременно возбуждающего излучения УФ диапазона и преобразованного фотоактивной композицией излучения видимого диапазона для экспериментального исследования был выбран световод с сердцевиной из кварцевого стекла с низким содержанием ОН групп диаметром 400 мкм, который характеризовался коэффициентом пропускания более 90 %/м в спектральной области от 350 до 650 нм. Два отрезка такого световода длиной 7 м каждый с механически очищенными от защитного покрытия и отполированными торцами были помещены с двух противоположных сторон в кварцевый капилляр вплотную к фотоактивной композиции, отвержденной под воздействием излучения УФ лампы в течение 1 мин.

Исследование чувствительности ВОЭ к изменению температуры проводилось на экспериментальной установке, схематическое изображение которой представлено на Рис. 2.

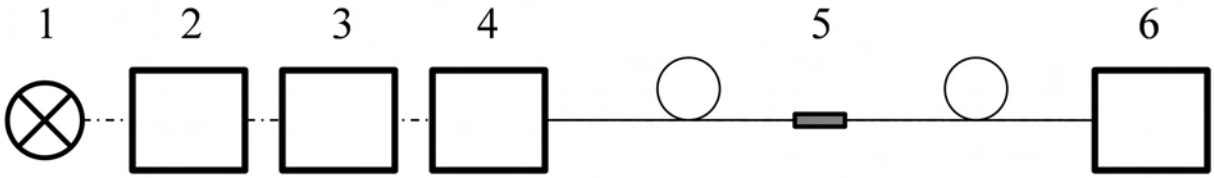


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования чувствительности ВОЭ к изменению температуры: 1 – ксеноновая лампа, 2 – монохроматор, 3 – модулятор, 4 – элементы согласования, 5 – ВОЭ, 6 – фотоприемник

Для исследования температурной зависимости интенсивности оптического сигнала на выходе ВОЭ капилляр с чувствительным материалом помещался в климатическую камеру. В результате серии испытаний был установлен экспоненциально спадающий характер изменения интенсивности люминесценции фотоактивной полимерной композиции в составе ВОЭ в температурном диапазоне от 20 до 100 °C (Рис. 3а).

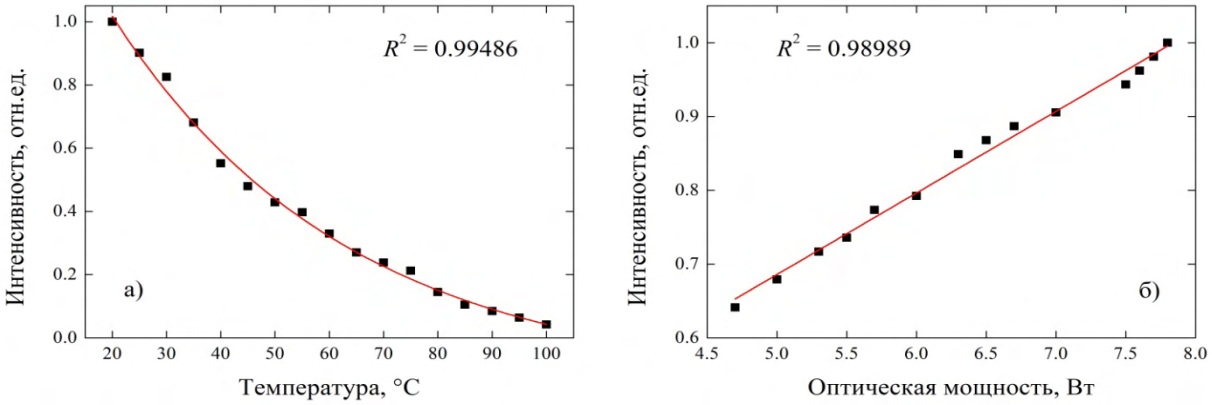


Рис. 3. Зависимость интенсивности оптического сигнала на выходе ВОЭ от температуры (а) и мощности вводимого УФ излучения (б)

Исходя из тех соображений, что полученное комплексное соединение Eu^{3+} с 2-нафтоилтрифторацетоном и триоктилфосфиноксидом характеризуется сильным поглощением в области ближнего УФ диапазона и имеет яркую люминесценцию в видимой части спектра, была экспериментально изучена возможность применения описанного ВОЭ в качестве детектора УФ излучения в окружающей среде. Для проведения такого исследования был изготовлен макет ВОЭ с конструкцией несколько отличной от той, которая использовалась в предыдущем эксперименте. К кварцевому капилляру с идентичными геометрическими параметрами был подведен один отрезок многомодового волоконного световода длиной 2 м. Излучение ксеноновой лампы фокусировалось непосредственно на полость капилляра, заполненную фотоактивной полимерной композицией рассматриваемого состава. Фотоприемник регистрировал интенсивность оптического сигнала в зависимости от мощности излучения ксеноновой лампы. В результате серии опытов был определен квазилинейный характер зависимости интенсивности оптического сигнала на выходе ВОЭ от мощности вводимого УФ излучения (Рис. 3б).

Таким образом, проведено экспериментальное исследование макета волоконно-оптического сенсорного устройства на основе фотоактивной композиции из эпоксиакрилата и комплексного соединения Eu^{3+} с 2-нафтоилтрифторацетоном и триоктилфосфиноксидом для измерения температуры окружающей среды. Установлен экспоненциально спадающий характер зависимости интенсивности люминесценции фотоактивной композиции в составе сенсора от температуры в диапазоне значений от 20 до 100 °C, что обусловлено ее температурным тушением. В дополнение, обнаружено квазилинейное изменение интенсивности люминесценции от мощности вводимого УФ излучения, что позволяет рассматривать такое устройство в качестве детектора УФ излучения в окружающей среде.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00596).

Литература

1. *Grattan K.T.V., et al, Sensors and Actuators A: Physical 82, 40-61 (2000)*
2. *Jackson R.G., Novel sensors and sensing. London: CRC Press, 512 p. (2004)*
3. *Mironov L.Yu., et al, Optical Engineering 58, 027113 (2019)*

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ МИКРООПТОМЕХАНИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСНЫХ СТРУКТУР

Егоров Ф.А.[1] **,Пестерев Е.Н.**[1,2*]**,Потапов В.Т.**[1]

[1]*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино*
[2]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва*
[*]*E-mail: jserver370@gmail.com*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16026

В настоящее время в России и за рубежом большое внимание уделяется развитию водородной энергетики, что диктует (с учетом повышенной пожаро-взрывоопасности водорода) необходимость создания систем контроля содержания водорода в воздухе, обладающих высокой надежностью и точностью измерений, достаточным быстродействием. Одним из перспективных путей решения этой задачи является разработка волоконно-оптических датчиков (ВОД) водорода, которые благодаря целому ряду преимуществ ВОД [1,2], существенно упрощают решение данной задачи. Значительный технологический прогресс, достигнутый в последние годы в таких областях, как микромеханика, волоконная оптика, лазерная физика открывает широкие возможности для создания новых типов ВОД, основанных на лазерном возбуждении и считывании параметров резонансных колебаний микрооптомеханических резонансных структур (МОМРС), возбуждаемых светом [3].

В настоящей работе исследованы основные характеристики (чувствительность, быстродействие) предложенных волоконно-оптических резонансных датчиков (ВОРД) водорода (Рис.1 (а)), принцип действия которых основан на зависимости резонансной частоты составных МОМРС, содержащих тонкую пленку палладия, от концентрации водорода в воздухе. Были разработаны ВОРД водорода, функционирующие в режимах свободных и вынужденных колебаний составных МОМРС на основе кремниевых микромеханических резонаторов [4], что обусловлено превосходными упруго-механическими свойствами кремния, а также их высокой стабильностью; наличием достаточно развитой технологии изготовления рассматриваемых МОМРС и сопряжения их с широко применяемыми кварцевыми волоконными световодами.

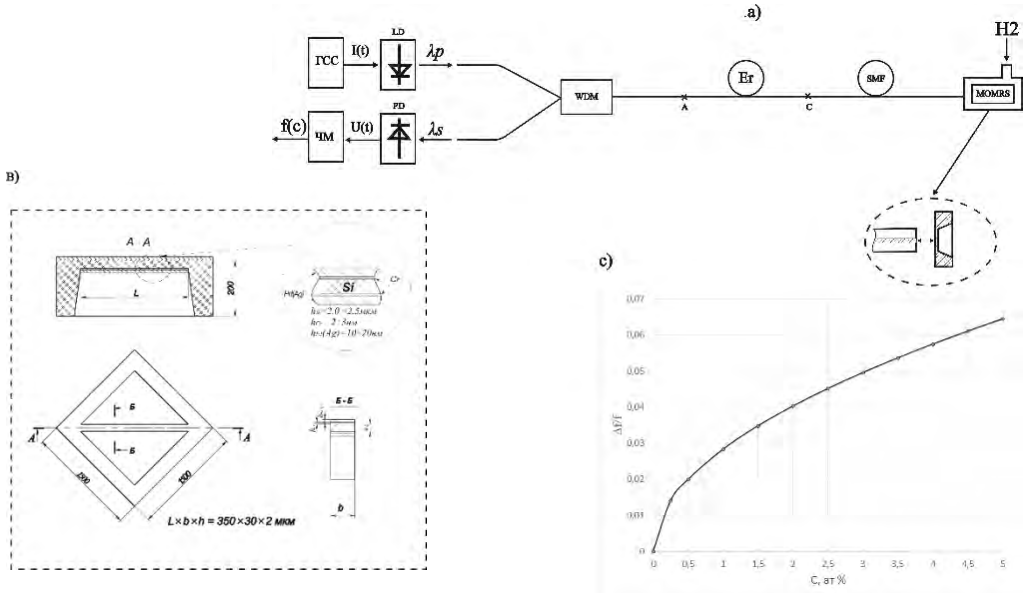


Рис.1. Схема ВОРД водорода на основе кремниевых МОМРС с палладием (а). LD –источник излучения накачки (λ_p); WDM– спектральный мультиплексор; PD – фотоприемник излучения ВЛ(λ_s); АС – эрбиевый активный световод; SMF–одномодовый (транзитный) световод (SMF-28); ГСС – генератор синусоидальных сигналов; ЧМ – частотомер;в - МОМРС - «микромостик» с тонкой пленкой палладия; с – график расчетной зависимости $\frac{\Delta f}{f}(c)$

Резонансные частоты (f) мод собственных поперечных (изгибных) колебаний МОМРС (микроосциллятор) зависят от внешних воздействий на микроосциллятор; условий эксплуатации (давление, температура), а также состава окружающей среды вследствие эффекта присоединенной

массы, связанной с адсорбцией (десорбцией) на поверхности колебательного элемента (КЭ) той или иной компоненты среды за счет нанесения на КЭ соответствующего селективного адсорбента.

Одним из эффективных и достаточно селективных адсорбентов для водорода является палладий (Pd), который с водородом образует химическое соединение переменного состава PdH_x, где (x) характеризует содержание водорода в палладии и зависит от парциального давления (P_{H_2}) молекулярного водорода в окружающей среде [5]:

$$x = \frac{1}{k} \cdot \sqrt{P_{H_2}} \quad (1)$$

где $k = 360\ Torr^{1/2}$. Отличие упруго-механических свойств соединения PdH_xот аналогичных параметров чистого палладия приводит к тому, что резонансная частота МОМРС, покрытой тонкой пленкой палладия, зависит от концентрации водорода в воздухе, при этом указанная зависимость обусловлена изменением как эффективных упруго-механических параметров составного КЭ (покрытого пленкой палладия), так и вследствие увеличения массы КЭ в результате адсорбции водорода. Поглощение водорода приводит к объемному расширению и к линейному удлинению образца палладия, при этом зависимость относительного линейного удлинения от концентрации водорода описывается выражением:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = 0{,}026 \cdot x = \frac{0{,}026}{k} \cdot \sqrt{P_{H_2}} \quad (2)$$

Анализ показывает, что для достижения максимальной чувствительности ВОРД целесообразно использовать МОМРС с КЭ типа «микромостик» (рис.1 (в)), в которой оба указанных фактора (продольное сжатие КЭ и «присоединенная» масса) – приводят к уменьшению резонансной частоты МОМРС, зависимость которой от присоединенной массы (Δm) и эффективной продольной деформации сжатия КЭ $(\varepsilon_{эфф})$ выражается формулой [6]:

$$f(c) = f\left(\Delta m(c),\ \varepsilon_{эфф}(\mathrm{c})\right) = f_0 \cdot \left[1 + \frac{\Delta m}{M}\right]^{-1/2} \cdot \left[1 + \left(\frac{l}{h}\right)^2 \cdot \varepsilon_{эфф}\right]^{1/2} \quad (3)$$

где $f_0 = f(c = 0)$– резонансная частота в отсутствие водорода, $\mathrm{c} = \frac{P_{H_2}}{P_0}$– объемная концентрация водорода ($P_0 = 760\ Torr$ – нормальное давление); $\Delta m(c)$ – масса поглощенного водорода; M– масса колебательного элемента без водорода; $\varepsilon_{эфф}(c) = -\frac{2 \cdot Y}{1+2Y} \cdot \varepsilon(c), Y = \frac{E_{Pd} \cdot h_{Pd}}{E_{Si} \cdot h_{Si}}$, E_{Pd}, E_{Si} – модули Юнга, соответственно палладия и кремния (материала МОМРС);h_{Pd}, h_{Si}– толщины пленки палладия и «микромостика». Расчетная зависимость$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_0 - f(c)}{f_0}$, полученная с использованием численных значений величин: $h_{Pd} = 10\ nm$; $h_{Si} = 2000\ nm$ $(2\ \mu m)$; $E_{Pd} = 121\ GPa$; $E_{Si} = 131\ GPa$; $l = 350\ \mu m$ представлена на рис. 1 (с). В условиях c≪1 % имеем:$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_0 - f(c)}{f_0} \approx 7 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{c}$

Учитывая то, что при типичных значениях добротности МОМРС $Q \simeq 10^2$(на воздухе) и значениях частоты $f_0 \simeq 100\ kHz$, точность измерения резонансной частоты составляет, по крайней мере, не хуже $\langle \frac{\Delta f}{f} \rangle_{ФЛ.} \simeq 10^{-5}$ [2], порог чувствительности ВОРД на основе рассматриваемых МОМРС можно оценить как $\mathrm{c}_{min} \simeq 0{,}01\%$ (100 ppm), что вполне сопоставимо с характеристиками лучших отечественных и зарубежных систем контроля концентрации водорода. На основе литературных данных о быстродействии датчиков водорода с пленками Pd[5-7], ожидаемое быстродействие рассматриваемых ВОРД можно оценить как: 3-5 сек по переднему фронту (нарастания), 10-20 сек по фронту релаксации.

Литература

1. *Окоси Т. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.*
2. *Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с*
3. *AspelmeyerM., KippenbergT.J., MarquardtF.Cavity Optomechanics, Nano- and Micromechanical Resonators Interacting with Light. M.: Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2014. – 353 c.*
4. *Egorov F. and Potapov V. Laser Physics.21 №2, 1-5, (2011)*
5. *Fisser M., et al, Sensors and Actuators, 259, 10-19, (2018)*
6. *Henriksson J., Villanueva L. G., Brugger J., Nanoscale, 4, 5059 – 5064, (2012)*
7. *Butler M. A., Ginley D.S.,Journal of Applied Physics, 64, 3706 – 3712, (1988)*

АГРОБИОФОТОНИКА - ВЛИЯНИЕ СВЕТА НА РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ

Кульчин Ю.Н.

ФГБУН Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН. г.Владивосток
690041, Владивосток, ул.Радио, 5
kulchin@iacp.dvo.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16027

В настоящее время фотоника рассматривается как приоритетное направление развития науки и техники во многих ведущих странах мира, включая Россию, поскольку служит ключевым элементом для решения многих социальных задач: от выработки энергии и ее эффективного использования до обеспечения здоровья населения, безопасности, адекватного реагирования на изменение климата и др. Сегодня фотоника активно проникает в химию, биологию, медицину, инженерию, что привело к разработке новых технологий создания оптических материалов, открытия новых оптических явлений и эффектов, которые легли в основу создания принципиально новых элементов, приборов и систем. Однако, несмотря на впечатляющие успехи, значительный прогресс в развитии и использовании достижений фотоники наблюдается только в последние три-четыре десятилетия. В тоже время в Природе живая материя давно использует энергию солнечного излучения для формирования и обеспечения жизнедеятельности биологических объектов, без повышенных требований к исходным материалам и энергетике процессов и экстремальных технологических условий.

Свет является одним из важных факторов, необходимых для фотосинтеза и развития растения. Кроме того, свет оказывает непосредственное влияние на рост, на многие процессы дифференциации в клетках и тканях, и на само органообразование. Управляя параметрами и характеристиками света можно влиять на эффективность процесса роста растений и запасания ими полезных веществ [1, 2]. Практически это важно для успешного выращивания культурных и сельскохозяйственных растений, например, при содержании оранжерей и теплиц, поскольку правильная организация освещённости выращиваемых растений будет способствовать лучшему росту и развитию растений и повышению их урожайности.

Основными характеристиками света при производстве хлорофилла и управления процессом морфогенеза считают спектральный состав, интенсивность, суточную и сезонную динамику. Учет потребностей растений в определенном спектральном составе света необходим при правильном подборе источников искусственного освещения. Но до сих пор нет ответа на такие вопросы, что происходит с белковым и гормональным обменом под влиянием различного освещения. Целью настоящего доклада является рассмотрение с единых позиций этих чрезвычайно важных для совершенствования технологий выращивания растений в защищенном грунте вопросов.

Литература

1. *Kulchin Y., et al., Defect and Diffusion Forum 386, 201-206 (2018)*
2. *Субботин Е., и др. Turczaninowia 21(2),32-39 (2018)*

СВЕТОДИОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ АГРОБИОФОТОНИКИ

Долин Е.В.*

Ассоциация Производителей Светодиодов и Систем на их основе, г. Москва
**E-mail:* dolin@nprpss.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16028

В связи с прорывом в конце 20 века в области производства энергоэффективных полупроводниковых источников света практически любого спектра и интенсивности со сроком службы более 50000 часов возникла технологическая возможность построения систем для воздействия на биологические объекты (растения, животные, биомасса).

Агрофотоника – новое направление применения светодиодных технологий для стимуляции и облучения растений и животных с целью увеличения продуктивности и эффективности их производства. В светодиодной светотехнике накоплен 20 летний опыт по разработке облучателей и источников излучения, что позволяет активно переходить к их массовому применению в различных областях агропромышленного комплекса.

Производство светодиодных источников света в России и за рубежом.
Светодиоды, как полупроводниковые компоненты, оформленные в виде герметизированного в полимерном или керамическом корпусе чипа (набора чипов) квазимонохромного или смешанного (за счет применения люминофоров) спектра излучения, производятся крупными компаниями в США (CREE), Японии (Nichia), Германии (Osram Optosemiconductor), Южной Корее (Seoul Semiconductor), Китае (Refond, National Star, MLS и другие). В России производство светодиодов ведется в Санкт Петербурге (ООО «ПК Клевер» - торговая марка «Оптоган»), в Калуге («Пандора ЛЕД»), в Томске (НИИ полупроводниковых приборов), в Орле (ООО «Протон») и других. В Белоруссии в Бресте построен новый завод российской компании «Арлайт» по сборке светодиодов. Все вышеперечисленные предприятия способны выпускать светодиоды, предназначенные для создания светодиодных облучателей агробиофотоники.

Производство светодиодных облучателей в России.
Основные направления разработки облучательных систем на основе светодиодов:
- облучатели над растениями (top lighting)
- облучательные установки для многоярусных систем
- межрядные установки (interlighting)

Светодиодные технологии делают возможным индустриальное выращивание в закрытых от естественного света установках без климатических рисков и сезонных факторов – это направление получило название city-farming или городские фермы. Преимуществом этой технологии является упрощение многофакторной модели обычной теплицы, кардинальное снижение применения средств подавления вредителей, эффективная автоматизация, замкнутый цикл выращивания, кардинальное снижение логистических издержек.

Разработки метрологии, стандартизация и сертификация создают основу массового промышленного производства. Метрология агрофотоники основана на фотосинтетической фотонной системе величин. В основе – фотосинтетический поток фотонов (кол-во фотонов в ед. времени), Соответствие световой и фотосинтетической фотонной систем величин:

Световая	***Фотосинтетическая фотонная***
Световой поток – ***лм***	Фотосинтетический фотонный поток – **мкмоль/с**
Освещенность – лм/м^2 = ***лк***	Фотосинтетическая фотонная облученность – **мкмоль/(м^2*с)**
Световая отдача – ***лм/Вт***	Фотосинтетическая фотонная отдача – **мкмоль/(с*Вт)**

Стандартизация. Действуют стандарты:
ГОСТ Р 57671- 2017 ПРИБОРЫ ОБЛУЧАТЕЛЬНЫЕ СО СВЕТОДИОДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА ДЛЯ ТЕПЛИЦ Общие технические условия.
ПНСТ 211 – 2017 ОБЛУЧЕНИЕ РАСТЕНИЙ СВЕТОДИОДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА Методы измерений.
В июне 2018 г. разработана первая редакция проекта ГОСТ Р «Светокультура растений. Термины и определения»

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ВЛИЯНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ

Чуб В.В.[1], Миронова О.Ю. [1]*, Морозов Я.А. [1], Волков А.В.[2]

[1] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва
[2] Научно-исследовательский центр экспериментального растениеводства «ЭКЗОБИО», г. Москва
** E-mail:olgmirr@mail.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16029

Стремительное развитие светотехнической отрасли позволяло внедрять новейшие разработки в промышленном и частном секторе. Растениеводство, животноводство, садово-парковое и городское освещение являются перспективными направлениями в области применения светодиодного освещения. Развитие вертикальных ферм, разработка живых стенок и переход в тепличных комплексах на светодиодное освещение предусматривают знание физиологии, биохимии и биофизики растений, а также агротехнологий.

Большое внимание уделяется технологиям выращивания огурцов, томатов, перцев и баклажанов. Более 15 отечественных и зарубежных фирм тестируют и получают овощную продукцию с применением светодиодных светильников (СС).

Светодиодные светильники Philips вывешены на 25 га в компании «Агро-Инвест» на томатах и огурцах. Лампы для теплиц «ЭМИС-СВЕТ 170» уже успешно эксплуатируются в одном из блоков тепличного комбината г. Челябинска агрокомплексе «Чурилово» — крупнейшем на Урале тепличном хозяйстве по выращиванию овощей и зелени. Компания «ЭлПромЭнерго» (г. Пермь) выпустила линейку светильников для теплиц для культивирования томатов, огурцов, баклажанов. Тестирование данных светильников на томатах и огурцах показало положительную динамику роста и развития растений, урожайность баклажанов превышала контроль (ДНаТ) более, чем на 15%.

Вертикальные фермы становятся все более привлекательными в России, так как достаточно большое количество промышленных площадей свободно, и может быть модернизировано под производство растительной продукции. В настоящее время запускается проект «РУСЭКО» (г. Москва) по производству зеленных культур 25 тонн в сутки при использовании светодиодного освещения.

Эйндховен, Нидерланды- Signify (Euronext: LIGHT), мировой лидер в области освещения, помогает японскому поставщику продуктов питания Prime Delica (Япония) выращивать высококачественные сорта салата, шпината и кориандра круглый год, используя линейку светодиодных модулей Philips GreenPower, и предлагать клиентам 7-Eleven культур с более высоким уровнем витаминов и питательной ценностью. Prime Delica автоматизировала весь процесс от посева до сбора урожая, минимизируя время ручной работы и улучшая гигиену посевов. Роботы выполняют логистические операции. Полный цикл роста салата от посева до сбора урожая в настоящее время занимает около 39 дней, по сравнению с 70 днями в открытом грунте. Производство может достигать даже 3 200 кг салата в день.

Основной акцент при выборе источников света потребители делают на спектральный состав изучения, его интенсивность. Важным фактором при выборе светодиодного светильника является культура, ее требования к свету, питанию, климатическим условиям, а также цель выращивания – рассада, микрозелень, беби-салаты, готовая продукция в виде плодов. Стимулирование процессов фотосинтеза дает не более 15% прибавки к урожаям. Также следует учитывать, что в растении помимо фотосинтеза происходит еще долее 5 природных/естественных процессов- дыхание, обмен веществ/ выделение веществ в окружающую среду, деление и рост клеток, а также процессы их отмирания, прочность, чувствительность к различным факторам окружающей среды (температура, влажность, качество воды и т.д.). К внешним воздействиям на растения можно отнести химические обработки, искусственное формирование растений (пасынкование, ослепление и т.д.). Таким образом, свет является одним из компонентов технологии выращивания растений, который может влиять на рост и развитие растений.

Используя вертикальные фермы можно проводить несколько исследований одновременно, что позволяет четко зафиксировать различия в росте и развитии растений с сохранением остальных параметров одинаковыми. Особый интерес вызывают растения, которые выращивают в России и за

рубежом в промышленных масштабах: пеларгонии зональные, примулы, фуксии, рассада многолетних и однолетних цветов, а также редких растений.

Для разработки технологий выращивания удобен стеллажный комплекс со светодиодными светильниками, регулирование которых происходит с помощью автоматического управления (интенсивность, режим освещения, изменение спектра и т.д.). Так были полностью разработаны технологии по получению качественной рассады петуний, примул, пионов, бальзамина, нескольких видов колокольчиков. Особый интерес вызывают перцы не только сладкие, но и острые сорта и гибриды, низкорослые генотипы томатов, а также зеленные культуры и съедобные цветы, земляника садовая.

Так, например, работы проводили на кустовых фуксиях. Сорта были выбраны в связи с востребованностью в летнем оформлении Ботанического сада МГУ и возможностью в дальнейшем формировать штамбовые формы. Черенки срезали в несколько периодов (март, апрель, май). Укоренение проводили на воде, хорошо развитые корни были получены при полном спектре, наличии дополнительно красного, синего и дальнего красного света. Укореняемость составила 100%. Высаженные в контейнеры укорененные черенки были помещены в одинаковые условия, разница по спектру была в наличии/отсутствии дальнего красного (ДК) света. Выращиваемые под СС с ДК молодые растения фуксий отличались от растений без ДК-досветке длиной стебля (разница достигала 1,5-1,7 раза), окраской листьев (зеленая - с ДК, бордовая – без ДК), развитием боковых побегов – ярко-выраженное апикальное доминирование у растений с ДК и его отсутствие в условиях без ДК, побеги во втором случае достигали 12-14 см против 3-4см у растений с ДК. В дальнейшей работе была учтена светочувствительность культуры, и для получения посадочного материала для высоких штамбовых форм применяли СС с ДК, для получения растений шарообразной формы –СС без ДК. Более раннее формирование бутонов и зацветание наблюдали у фуксий при выращивании под СС с ДК, данный эффект связан со спецификой культуры - формирование цветков происходит на концах ветвей текущего прироста, а в данном случае наблюдали активное развитие центрального побега.

Аналогичные исследования проводятся еще по ряду ценных пищевых растений. Важным фактором при производстве пищевой продукции является экологическая безопасность, бактериальная загрязненность, а также накопление нитратов и др. компонентов. Соблюдение параметров агротехнологий выращивания, чистоты производства, знание биологических наук, в том числе защиту растений, позволяет получать экологически безопасную, ценную по пищевым показателям растительную продукцию.

Литература

1. *Современная светотехника, № 6 (50), 2017, с.42*
2. *http://www.lighting.philips.ru/products/horticulture/city-farming*

ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ СРЕДСТВ КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ РАСТЕНИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Макаренков Д.А., Глушко А.Н., Убаськина Ю.А., Поплевин Д.С.

НИЦ «Курчатовский институт»-ИРЕА, г. Москва
E-mail: office@irea.org.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16030

В век динамично развивающихся и взаимно дополняющих друг друга науки и технологии особенно важным становится применение результатов научных исследований и продуктов инновационных технологий на практике, особенно внедрение научно-технических достижений в отраслях, требующих принципиально новых подходов для качественного скачка, в частности в сельском хозяйстве [1].

Одним из самых передовых направлений в научной среде и в сфере новых технологий, относящихся к данной отрасли, является агробиофотоника. Ее целью является изучение природы и механизмов фотосинтетического аппарата растений, как комплексного процесса взаимодействия радиации светового излучения с их генетической и биохимической подсистемами, являющегося значимым фактором, улучшающим эффективность роста, развития и адаптационные возможности растений, прежде всего культивируемых в искусственных условиях, а актуальной задачей – разработка технологических основ создания средств комплексного управления развитием растений, обеспечивающих повышение производительности сельскохозяйственных культур.

Комплексное управление развитием растений, обеспечивающих повышение урожайности и качества сельскохозяйственных культур, предполагает, в первую очередь, комфортный для развития растений вегетационный период. В настоящее время, благодаря инновационным технологиям, период вегетации можно контролировать. Для этого используется светотрансформирующие материалы, позволяющий сформировать фактически любой спектр для конкретной культуры и фазы ее развития. Известно, что, помимо традиционно упоминаемых пигментов хлорофилла с пиками поглощения в диапазоне 400-500 нм и 650-700 нм, на процессы роста также влияют вспомогательные пигменты из семейства светособирающих фикобилипротеинов. Самое большое количество хлорофилла вырабатывается при синем свете, меньшее – при белом и красном, самое меньшее - при зеленом свете и в тени. При разном свете, соотношение хлорофилла А и В также не одинаковое. Самая большая разница в соотношении А и В при желтом и синем свете. Красный свет способствует большой выработке хлорофилла типа А. Для светолюбивых растений подходит синий свет, для тенелюбивых растений подходит красный свет [2]. Для комплексного управления процессом развития растений могут применяться пленки, краски и аэрозоли, содержащие люминофоры, способные преобразовывать ультрафиолет в узкополосное люминесцентное излучение.

НИЦ «Курчатовский институт» - ИРЕА располагает возможностью и опытом получения светотрансформирующих материалов, а также их испытанием в полевых условиях. Ранее в Институте была получена светотрансформирующая пленка, содержащая люминофор «Орлюм красный 630Т» [3]. Люминофор способен поглощать большую часть видимого излучения, испускаемого солнцем и преобразовывать его в красное излучение. Максимум люминесценции этого люминофора расположен при 630 нм, а квантовый выход близок к 100%. «Орлюм красный 630Т» имеет высокую фотоустойчивость. В период испытаний пленки с люминофором «Орлюм красный 630Т» достигнуто повышение урожайности перца на 30,9%, увеличение массы растений (посадочного материала ив, тополей, лиственниц) на 40-80 %, сокращение срока созревания огурцов на 10-12 дней.

Также комплексное управление развитием растений невозможно без применения специальных питательных растворов пролонгированного действия. Это, как правило, различные формы некорневых подкормок растений, содержащие необходимые для роста и развития растений микроэлементы в хелатной форме. Хелаты микроэлементов обладают рядом ценных свойств: практически не токсичны, хорошо растворимы в воде, обладают высокой устойчивостью (не изменяют своих свойств) в широком диапазоне кислотности (значений pH), хорошо адсорбируются на поверхности листьев и в почве, длительное время не разрушаются микроорганизмами, хорошо сочетаются с различными пестицидами. Комплексоны (ДТПА, ОЭДФ, ЭДТА), при внесении их в

почву способствуют переводу недоступных микроэлементов в биологически активную форму. Хелаты микроэлементов являются водорастворимыми, в отличие от минеральных солей, практически не закрепляются в почвенном поглощающем комплексе (ППК) и длительное время остаются доступными для растений.

В настоящее время НИЦ «Курчатовский институт» проводит испытания созданных ранее инновационных питательных растворов пролонгированного действия - «Хелатон Экстра», «Хелат цинка», «Хелат железа», «Тиатон».

Совместно с ФГБНУ ВНИИКХ им. А.Г. Лорха, сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА при поддержке Государственного университета по землеустройству на протяжении многих лет проводятся успешные агрохимические исследования получаемых жидких комплексных удобрений в разных почвенно-климатических зонах и на различных сельскохозяйственных культурах (картофель, топинамбур и др.). 3-годичные испытания препаратов «Хелатон Экстра» и «Тиатон» на картофеле сорта «Колобок» показали, что только за счет использования препарата «Хелатон Экстра» в вегетационный период урожайность может быть увеличена на 13,5%, а товарность клубней - до 97,5%. При использовании органического серосодержащего препарата «Тиатон» может быть достигнуто повышение урожайности на 14,2%, а товарность клубней может быть увеличена до 97,5%.

Агрохимические исследования проводятся также совместно с ФГУП «ПАО «Массандра» и ФГБУН «ВННИИВиВ «Магарач» РАН». Данные исследования нацелены на исследование влияния различных микроэлементов в хелатной форме на рост, развитие, урожайность и качество винограда, а также на оценку эффективности применения биологически активных комплексонатов железа для предупреждения развития неинфекционного хлороза винограда, с применением разработанных в Институте препаратов микроэлементов «Хелатон Экстра», «Хелат железа». После испытаний в вегетационный период 2018 г. на промышленных участках ценных технических сортов Каберне-Совиньон и Алиготе Южнобережной зоны виноградарства Крыма препарата «Хелатон Экстра» было обнаружено увеличение урожайности винограда на 15,9%, увеличение содержания сахара на 4%, препарата «Хелат железа» - повышение урожайности винограда – на 6 ц/га, увеличение содержания сахара – на 7%. Также ведутся совместные работы с Российским государственным аграрным университетом - МСХА имени К.А. Тимирязева. Работы посвящены изучению влияния разработанных препаратов на рост, развитие, урожайность и потребительские свойства льна. В вегетационный период 2018 г. применение препарата «Хелатон Экстра» привело к повышению урожайности льносоломки на 2,2 ц/га на сорте Альфа, тресты на 2,4-4,4 ц/га, волокна 1,3-1,7 ц/га, семян до 0,5 ц/га. При применении «Хелата цинка», к которому лен наиболее чувствителен, урожайность льносоломки увеличилась на 5-5,9 ц/га, тресты на 2,7-5,5 ц/га, волокна 1,1-1,5 ц/га, семян 0,6-0,8 ц/га относительно контроля на льне-долгунце в среднем по 2-м сортам.

Кроме того, комплексное управление развитием растений, обеспечивающих повышение урожайности и качества сельскохозяйственных культур невозможно без аналитического сопровождения, в частности, контроля роста и развития растений в период вегетации. НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА является единственным предприятием в Российской Федерации, аккредитованным Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии в качестве органа по сертификации в системе ГОСТ Р по химическим реактивам, особо чистым веществам и химической продукции. Институт располагает определенным опытом в проведении аналитических исследований и материальной базой для их проведения, успешно сотрудничая с крупными предприятиями, такие, как Погарская картофельная фабрика, ПАО «Акрон», АО «Апатит», Буйский химический завод. Например, для Буйского химического завода была проведена апробация спектрофотометрического метода определения устойчивости хелатного соединения в средах с различным pH.

Таким образом, можно сделать вывод, что комплексное управление развитием растений, обеспечивающих повышение урожайности и качества сельскохозяйственных культур может осуществляться путем создания и применения специальных средств – светотрансформирующих материалов, способных определять длительность периода вегетации, а также количество и качество попадающего на растения излучения, питательных растворов пролонгированного действия, а также аналитического контроля in situ роста и развития растений.

Литература

1. *Глушко А.Н. Материалы с заданными свойствами на переходе к новому технологическому укладу: химические технологии. Сб. материалов I научно-технической конф. М.: НИЦ «Курчатовский институт»-ИРЕА, 16-17 (2018)*
2. *Спектры в агрофотонике. URL:https://aurora-leds.ru/material/spektry-v-agrofotonike/. Дата обращения: 22.05.19.*
3. *Красовицкий Б.М., Болотин Б.М., М. (1984)*

СТАНОВЛЕНИЕ АГРОБИОФОТОНИКИ КАК ЗАКОНОМЕРНОЕ РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ

Соснин Э.А.[1,3]*, Кульчин Ю.Н.[2], Астафурова Т.П.[3]

[1] *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск*
[2] *Институт автоматики и процессов управления ДО РАН, г. Владивосток*
[3] *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск*
* *E-mail:* badik@loi.hcei.tsc.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16031

По мере овладения человеком различными явлениями природы сначала используются преимущественно механические и акустические поля, и далее другие виды энергии. В теории решения изобретательских задач каждое из полей обозначают своей литерой, а последовательность их использования изображают так, как показано на рис. 1. Такую запись иногда называют «линейкой



Рис. 1. Классическая линейка использования полей МАТХЭМ [1, с. 69]

МАТХЭМ», подразумевая под этим наиболее вероятный сценарий использования полей в ходе совершенствования изобретений. Линейка прогнозирует появление новых научно-технических решений в любой области целенаправленной деятельности человека. Например, если в данном объекте техники (ОТ) уже используется акустическое поле для выполнения его главной полезной функции, то переход к тепловому или электрическому полям всегда повышает производительность ОТ и/или качество продукта и/или расширяет диапазон использования ОТ. Т.е. объекты техники совершенствуются, чему отвечает «движение» слева направо вдоль линейки.

Со временем, по мере овладения перечисленными видами энергии, появились предпосылки для использования парных комбинаций, как это показано на рис. 2. Практика показала, что в сравнении с одинарными полями, пары ещё более эффективны. Но среди этих пар также существует определенная иерархия: научно-технические решения, основанные на использовании электромагнитных полей (ЭМ) по целому ряду показателей сильнее, чем решения, основанные на парах-предшественницах.

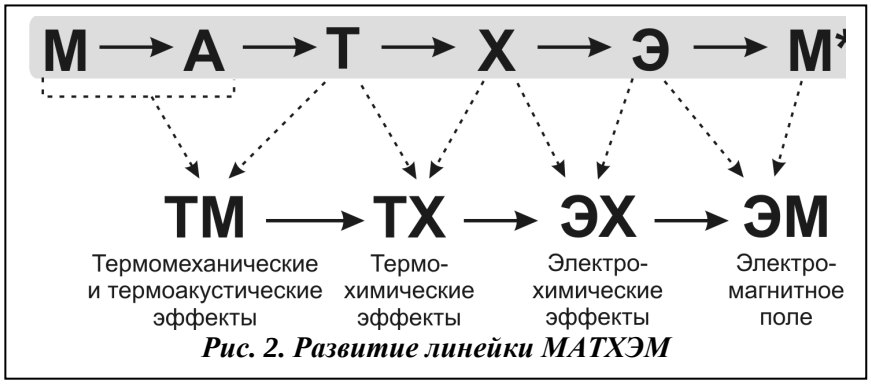


Рис. 2. Развитие линейки МАТХЭМ

Линейка МАТХЭМ хорошо описывает изменения, произошедшие с объектами техники за последние три столетия, но не учитывает целого ряда фундаментальных открытий, оказывающих существенное влияние на ход НИОКР. Например, рассмотрим открытие вынужденного излучения, на основе чего были созданы первые лазеры (термин предложен Г. Гулдом, 1959) и далее появилась фотоника. Это «наука о способах генерации, обнаружения и практического использования света и других форм излучений, единицей измерения которых является фотон» [2, с. 304]. По существу, фотоника была названа по аналогии с электроникой, т.к. в этой области используют не электроны, а кванты электромагнитного поля. Термин «фотоника» впервые предложил академик А.Н. Теренин (1967), обозначив её как «совокупность взаимосвязанных фотофизических и фотохимических процессов» [3]. Однако термин «фотоника» получил публичную и мировую репрезентацию, а также наиболее широкое толкование только на 9-м Международном конгрессе по скоростной фотографии в Денвере, США (1970).

Электромагнитное излучение может использоваться как самостоятельно, так и обеспечивать несколько классов эффектов, в которых задействованы все прочие виды энергии (рис. 3). Они могут применяться как дополнительные, так и быть результатом конверсии электромагнитного излучения.

Применение электромагнитного излучения позволило существенно увеличить качество и скорость выполнения различных операций, расширить диапазон задач по управлению свойствами веществ и процессов [4].

В частности, появились совершенно новые возможности для работы с биологическими объектами, что привело к оформлению такого направления как биофотоника: «Биофотоника изучает явления испускания, обнаружения, поглощения, селекции, модификации и генерации излучений живыми организмами и органическими материалами (что находит широкое применение в медицине, генетике, биологии, агротехнике и экологии)». Также биофотоника - это наука и технологии, имеющие дело со взаимодействием органического вещества со светом и другими формами излучений, в которых квантовой единицей служит фотон [2, с. 27].

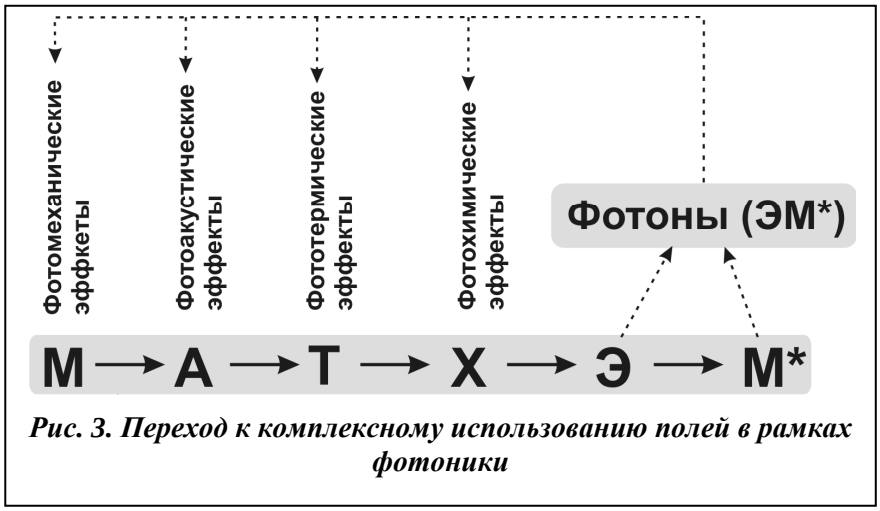


Рис. 3. Переход к комплексному использованию полей в рамках фотоники

В последние годы в рамках биофотоники было отдельно выделена специализированная подотрасль знаний, получившая название «агрофотоника» или «агробиофотоника». Агробиофотоника изучает указанные явления, но не для всех живых организмов и органических материалов, а только тех, которые имеют отношение к получению продуктов питания в сельском хозяйстве и животноводстве. Такая трактовка была одобрена участниками пленарного заседания VIII Конгресса технологической платформы «Фотоника», проходившего 5 марта 2019 г. в рамках международной специализированной выставки «Фотоника. Мир лазеров и оптики 2019».

Актуальность выделения обусловлена тем, что население мира растёт, и по прогнозу ООН к 2050 г. оно составит 10 миллиардов человек. Это потребует существенно увеличить производство продовольствия. В агротехнике все простые виды энергий и их парные комбинации практически использованы, а потенциал полученных на их основе научно-технических решений почти исчерпан. Выход из положения состоит в переходе на комплексное использование полей, т.е. в переходе к использованию плазменной и фотонной технологий.

В настоящее время в рамках агробиофотоники уже активно изучаются и внедряются фотонные системы стимулирования эффективного роста сельскохозяйственных культур, фотонные датчики для мониторинга состояния растений, продуктов питания, почвы, воздуха в хранилищах и на фермах и прогнозирования сроков хранения продукции [5].

Итак, в рассмотренном сюжете мы видим, как изменяется линейка МАТХЭМ. Отдельная отрасль целенаправленной деятельности человека вначале проходит линейку слева направо. Затем качество и диапазон применимости научно-технических решений повышаются за счёт использования парных полей. После этого, когда возможности использования парных комбинаций исчерпываются, происходит переход к комплексным способам воздействия. Примером действия этой закономерности являются фотоника и её суботрасль - агробиофотоника.

В статье использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта, в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТГУ (тема № 8.1.29.2018).

Литература

1. *Злотин Б. Л., Зусман А. В. Законы развития и прогнозирования технических систем: методические рекомендации. Кишинев: Картя Молдавянескэ, МНТЦ «Прогресс», 1989. 114 с.*
2. *Ковалевская Т.Е., и др. Фотоника: Словарь терминов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 342 с.*
3. *Теренин А.Н. Фотоника молекул красителей и родственных органических соединений. Л.:Наука, 1967. 616 с.*
4. *Соснин Э.А. Теория решения изобретательских задач в фотонике. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2019. 336 с.*
5. *Yeong T.J., et al, Molecules. 27, E2025 (2019)*

МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ КАЧЕСТВА СРЕЗАННЫХ ЛИСТЬЕВ САЛАТА ПО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Соловченко А.Е.[1*], Шурыгин Б.М.[2], Николенко А.А.[2], Чивкунова О.Б.[1], Соловченко О.В.[1], Ахаев Д.Н.[1]

[1] *Биологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва*
[2] *Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Москва*
[*] *E-mail:* solovchenko@mail.bio.msu.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16032

Анализ взаимодействия света с растениями дает важную информацию о процессах их жизнедеятельности: эффективности фотосинтеза, физиологическом состоянии, действии стрессоров и прохождении стадий развития. Соответственно, измерение спектров отраженного света широко используются в настоящее время для неинвазивной дистанционной оценки качества сельскохозяйственной продукции. Появление формирующих изображения гиперспектрометров (imaging hyperspectrometers) вызвало прорыв в разработке сенсоров качества фруктов и овощей для теплиц и сортировочных линий. Однако развитие в этой области часто сдерживается недостатком фундаментальных знаний для разработки эффективных алгоритмов обработки гиперспектральных данных для получения объективной информации о состоянии растений.

Исследовали связь изменения отражательных характеристик срезанных растений салата сорта «Revolution» с темпами деградации их качества при хранении в полиэтиленовой упаковке при постоянной температуре + 15 °C в климакамере Liebherr (Германия). В качестве опорных параметров использовали относительное содержание воды в тканях, а также содержание суммы хлорофиллов и каротиноидов, определенное спектрофотометрическим методом [1]. Гиперспектральные изображения растений регистрировали кадровым спектрометром IQ (Specim, Финляндия; спектральный диапазон — 400–1000 нм, спектральное разрешение — 1 нм.) с использованием белого тела из материала Spectralon в качестве отражательного стандарта при освещении объекта 150-Вт люминесцентными лампами (4500 K). Для каждого пиксела гиперспектрального изображения рассчитывали отражающий содержание хлорофилла индекс $CI_{678} = R_{800}/R_{678}$ ([2], рис. 1, 2). Строили гистограммы распределений значений индекса CI_{678} в диапазоне 0–10 (рис. 1), суммировали число пикселов по интервалам шириной в 2 ед. и нормировали полученные суммы на общее число обработанных пикселов.

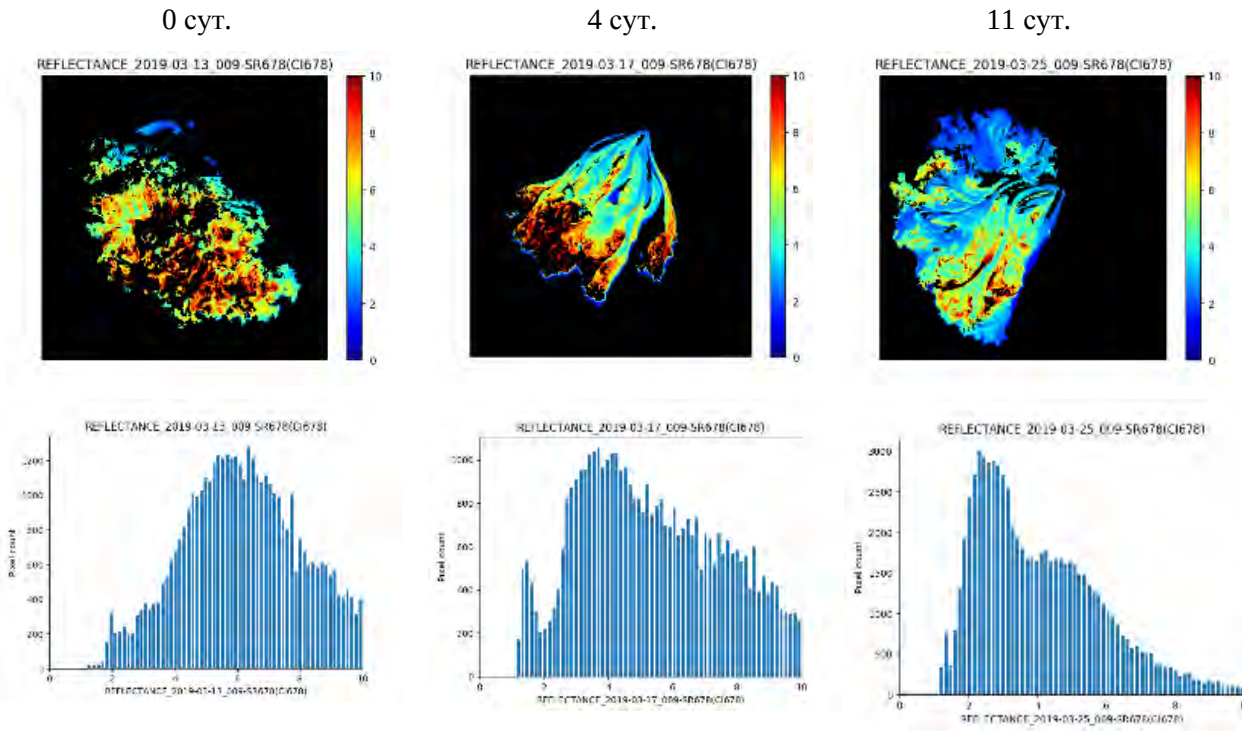


Рис. 1. Типичные изменения распределения значения индекса CI_{678} по поверхности листьев салата. Верхний ряд: изображения, пикселы которых представляют значения индекса CI_{678}, рассчитанные

по гиперспектральным коэффициентам отражения. Нижний ряд: гистограммы значений индекса CI_{678}, построенные по этим изображениям

На основании обработанных гистограмм для каждого гиперспектрального изображения рассчитывали значения разработанного авторами индекса Hyperspectral Chlorophyll Index, HCI_{678} (рис. 2), основанного на индексе CI_{678}:

$$\mathrm{HCI}_{678} = \int_{6}^{10} CI_{678} \left(\int_{2}^{4} CI_{678} \right)^{-1}$$

Сопоставление динамики индекса с изменениями содержания хлорофилла при хранении срезанных растений салата выявило высокую (r^2 > 0.84; n = 80) корреляцию между изменениями содержания Хл, измеренными традиционным спектрофотометрическим методом, и интегральной оценкой динамики содержания этих пигментов, выполненной по гиперспектральным изображениям.

Снижение качества хранящейся сельскохозяйственной продукции, включая листовые и зеленые овощи (включая листья салата), сопровождается, наряду с увяданием (потерей воды), снижением содержания полезных биохимических компонентов. К таковым относятся Хл, Кар, полиненасыщенные жирные кислоты. В силу физиолого-биохимических особенностей растений, содержание этих метаболитов тесно связано, и во многих случаях сильно коррелирует [3]. Это позволяет судить об основных параметрах качества листьев салата по динамике параметров, отражающих содержание Хл. Одним из наиболее точных и чувствительных среди спектральных индексов является индекс CI_{678} [4,5].

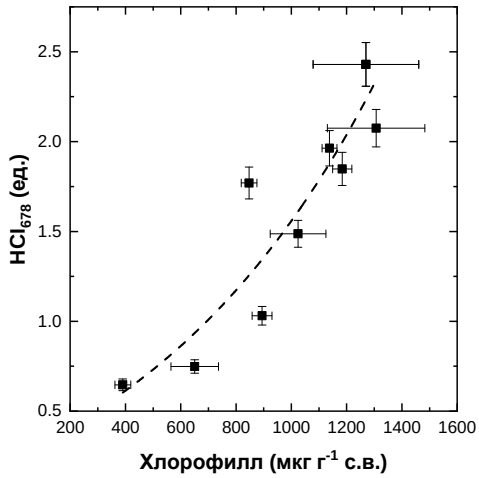


Рис. 2. Изменения индекса HCI678 при обесцвечивании срезанных листьев

Использование этого индекса в сочетании с гиперспектральной камерой, формирующей изображения, позволило получить количественную информацию о распределении содержания Хл по всей поверхности исследуемых растений. Это обстоятельство является критически важным для разработки чувствительных и эффективных методов мониторинга качества листовых овощей и сельскохозяйственной продукции в целом, поскольку позволяет учесть значительную физиолого-биохимическую гетерогенность тканей, характерную для растительных объектов. Так, различные участки поверхности листьев характеризовались разными темпами снижения содержания Хл при хранении (рис. 1), поэтому эффективный мониторинг состояния листьев требует классификации участков их поверхности по данному признаку. Эту задачу удалось решить с помощью разработанного нами индекса HCI_{678} (рис. 2), позволяющего количественно регистрировать снижение качества листьев срезанных растений салата по истечении даже коротких сроков хранения (вплоть до 1 суток).

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности методов, основанных на регистрации содержащих данные о коэффициентах отражения гиперспектральных изображений для мониторинга качества растительных объектов, включая культурные растения, такие как салат. Возможно дальнейшее совершенствование данного подхода путем перехода от гиперспектральных к более доступным для массового практического применения мультиспектральным сенсорам. Однако подобная оптимизация требует обоснованного выбора спектральных каналов, максимально насыщенных целевой информацией о состоянии растительных объектов.

Работа выполнена при поддержке ООО «Панасоник Рус» и РФФИ (проект 18-416-680007).

Литература

1. *Соловченко и др, Физиол. раст. 48, 801-808 (2001)*
2. *Merzlyak M., et al, Postharv. Biol. Technol. 27, 197-211 (2003)*
3. *Watada A. et al, Postharv Biol Technol. 15, 201-205 (1999)*
4. *Gitelson A., et al, Geophys. Res. Lett. 44 9293-9298 (2017)*
5. *Merzlyak M. et al, Plant Physiol. Biochem. 40 679-684 (2002)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ КАРТОФЕЛЯ IN VITRO

Фомин Д.С.*, Чухланцев Н.В.

ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь
**E-mail:* akvilonag@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16033

Картофель выгодно выделяется из всех сельскохозяйственных культур своей универсальностью. Россия производит около 10% общемирового объема картофеля, однако урожайность этой культуры в стране остается одной их самых низких (12 т/га) [1]. Картофель во всех категориях хозяйств Пермского края занимает 41,3 тыс.га, в сельхозпредприятиях – 4,5 тыс. га (при среднем сборе за 2013-2018 годы 71,5 тыс. тонн) [2]. Министерством сельского хозяйства Пермского края планируется довести данный показатель до 99 тыс. тонн в год. Один из способов увеличения производства – это семеноводство картофеля. В семеноводстве картофеля важную роль играет получение оздоровленного семенного материала по технологии in vitro.

Использование люминесцентных ламп при выращивании картофеля in vitro способствуют повышению температуры воздуха в помещении, что может привести к высыханию питательной среды в пробирках и негативно сказаться на росте и развитии растений вплоть до их гибели. Светодиодные светильники не приводят к увеличению температуры окружающей среды.

Цель данной работы являлось определение эффективности использования различных источников света на продуктивность и качество микрорастений картофеля in vitro различных групп спелости. Исследование проводилось в лаборатории семеноводства Пермского НИИ сельского хозяйства Пермского Федерального Исследовательского Центра Уральского Отделения РАН.

Объектом исследования являлись сорта картофеля различных групп спелости, выращенных в лабораторных условиях по технологии in vitro при выращивании под искусственным освещением светодиодными светильниками «ECOLED-60-LX Fito IP65» производства ООО «ГК «СЭТ» (г. Пермь) и люминесцентными лампами ЛБ-40.

За время наблюдения было проведено 6 микроклональных черенкований. На всем протяжении эксперимента в климатической камере поддерживались постоянные условия: температура 22-26^0 С, влажность воздуха 70-80 %, искусственная вентиляция воздуха одновременно с кварцеванием. Период суточного освещения составлял 15 часов (с 6-00 часов утра до 21-00 часов вечера). Включение и выключение проводилось в автоматическом режиме, перебои отсутствовали. В исследовании участвовали 3 пробирки каждого сорта, в каждой пробирке находилось два растения.

Результаты наблюдений представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Сравнительные характеристики осветительных элементов, которые были использованы в наблюдении

Показатели	Результат		Сравнение	
	Светодиодные лампы	Люминесцентные лампы	%	Количественное
PPF-D	138,42	28,18	20,36	4,91
PPF-B	20,97	6,67	31,80	3,14
PPF-G	41,63	14,34	34,44	2,90
PPF-R	75,87	7,15	9,42	10,61
LUX	6713	2163	32,22	3,10

При освещении люминесцентными лампами (ЛЛ) растения картофеля по всем сортам превосходили в длине растения, чем выращенные под светодиодными светильниками (СС). Различия в высоте достигали от 1 мм (сорт Луговской) и до 32 мм (сорт Симфония). Визуально наблюдали вытягивание растений, а не качественный рост, т.к. показатели диаметра стебля (0,1-0,4 мм) показывают соотношение «высота-диаметр».

Растения, выращенные под СС, имеют более мощный стебель, развитую листовую пластину, что положительно влияло на процесс фотосинтеза и, значит, накопление сухого вещества и крахмала.

Таблица 2. Биометрические показатели растений картофеля

Вариант досвечивания	Высота растений, мм	Количество междоузлий, шт	Корнеобразование, мм	Диаметр стебля, мм	Длина листа в поперечном сечении, мм
Раннеспелый сорт Белларoза					
Люм. лампа	60	4	47	0,8	10
СД свет.	42	4	56	1,1	15
$НСР_{05}$	13,1	3,1	17,6	2,3	2,7
Среднепоздний Сорт Симфония					
Люм. лампа	73	4	55	0,8	5
СД свет.	41	3	70	0,9	9
$НСР_{05}$	24,6	1,2	8,5	0,4	8,4
Среднеранний сорт Невский					
Люм. лампа	50	4	55	0,9	6
СД свет.	45	4	67	1,3	8
$НСР_{05}$	9	1,4	4,3	3,6	4,7
Среднеранний сорт Елизавета					
Люм. лампа	40	2	72	0,9	7
СД свет.	28	2	57	1,0	11
$НСР_{05}$	9,8	1,9	11,9	2,8	6,4
Среднеспелый сорт Луговской					
Люм. лампа	41	2	41	0,7	5
СД свет.	40	2	65	0,8	12
$НСР_{05}$	2,4	2,6	5,6	1,7	3,8

междоузлий по сортам Белларoза, Невский, Елизавета и Луговской было одинаково при обоих типах освещения. У сорта Симфония количество междоузлий 4 шт., при высоте 73 мм (ЛЛ) и 3 шт., при высоте 41 см (СС). Расстояние от одного междоузлия до другого составляет 18 мм и 13 мм соответственно, а также слабое развитие листовой пластины в первом случае. Сорт Белларoза также имеет различия по высоте, но при этом количество междоузлий одинаково. При использовании СС растения отличаются достаточно мощными стеблями и хорошо развитой листовой пластиной.

Наиболее важен показатель корнеобразования, т.к. большая длина корней способствует большему поглощению доступной влаги из почвы и растворенных в ней органических и минеральных элементов, что способствует скорейшему преодолению стресса в период пересадки растений в тепличные условия. Практически по всем сортам при СС, длина корней превосходит длину корней при ЛЛ (9-24 мм), кроме сорта Елизавета (биологические особенности сорта: при недостатке освещения и вследствие замедленного процесса фотосинтеза происходит активное корнеобразование).

Выявлено очевидное преимущество светодиодных светильников перед люминесцентными лампами при выращивании картофеля in vitro. Растения, выращенные при светодиодных светильниках, имеют более мощный стебель, развитую корневую систему, листовую пластину, что является важным условием при пересадке в грунт. Такие растения более подготовлены к пересадке, а значит их выживаемость выше. Следует отметить, что такая технология выращивания приведет к экономической выгоде вследствие снижения затрат на электроэнергию.

Литература

1. *Попов Ю.В. Мониторинг фитосанитарного состояния картофеля. В сборнике: Агротехнологии XXI века Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 105-летию Воронежского государственного аграрного университета. 2017. – С.140-146*
2. *Чухланцев Н.В., Фомин Д.С. Сравнительная оценка сортов картофеля в условиях Пермского края. Овощи России. 2018;(6):101-103. https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-6-101-103*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОПЛАНАРНОЙ ЛИНИИ СВЧ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ БУФЕРНОГО СЛОЯ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Журавлев А.А.[1*], Мушинский С.С.[1], Вобликов Е.Д.[1], Малкин А.И.[2], Князев Н.С.[2]

[1] ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь
[2] ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург
[*] E-mail: aaz@ppk.perm.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16034

Основой конструкции СВЧ-тракта интегрально-оптического модулятора является копланарная линия, сформированная на поверхности электрооптического кристалла, в частности ниобата лития. С целью снижения оптических потерь в местах пересечения копланарной линии и оптического волновода и увеличения рабочего диапазона частот модулятора между металлом копланарной линии и поверхностью пластины ниобата лития создается диэлектрический буферный слой. Этот слой должен обладать малой, по сравнению с пластиной, диэлектрической проницаемостью и малым тангенсом диэлектрических потерь. Параметры буферного слоя оказывают большое влияние на финальные характеристики модулятора, а, следовательно, требуют детального изучения.

В работе представлены результаты исследования эффективного показателя преломления копланарных линий, сформированных на подложках с различной технологией постобработки буферного слоя. Также приведены результаты исследования параметра пропускания (S_{21}) для тех же образцов в частотной области от 1,0 до 43,5 ГГц.

Для исследования были подготовлены 4 пластины, параметры которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры исследованных образцов

Наименование параметра	Пластина 1	Пластина 2	Пластина 3	Пластина 4
Материал подложки	ниобат лития конгруэнтный, X-срез	ниобат лития конгруэнтный, X-срез	ниобат лития конгруэнтный, X-срез	ниобат лития конгруэнтный, X-срез
Толщина подложки	1 мм	1 мм	1 мм	1 мм
Буферный слой	нет	SiO2 без отжига	SiO2 отжиг 354 °C	SiO2 отжиг 600 °C
Толщина буферного слоя	1 мкм	1 мкм	1 мкм	1 мкм
Толщина электродов	22 мкм	22 мкм	22 мкм	22 мкм

Топологии копланарной линии на всех пластинах были идентичны.

В связи с технологическими особенностями, для выполнения измерения пластины были разделены на кристаллы шириной 3,5 мм каждый. Исследование проводилось на зондовой станции с помощью трехконтактных зондов с рабочей частотой до 50 ГГц. В качестве измерительного оборудования использовался векторный анализатор цепей R&S ZNA43. Перед измерением была выполнена калибровка измерительной цепи с использованием калибровочной пластины. Выполнены измерения параметра S_{21} в формате магнитуды и в формате фазы. Таким образом, получены пропускания СВЧ-излучения в частотном диапазоне от 1,0 до 43,5 ГГц. Для оценки фазовая характеристика была преобразована в эффективный показатель преломления для СВЧ-волны.

В результате исследования получены зависимости, представленные на Рис. 1 и Рис. 2.

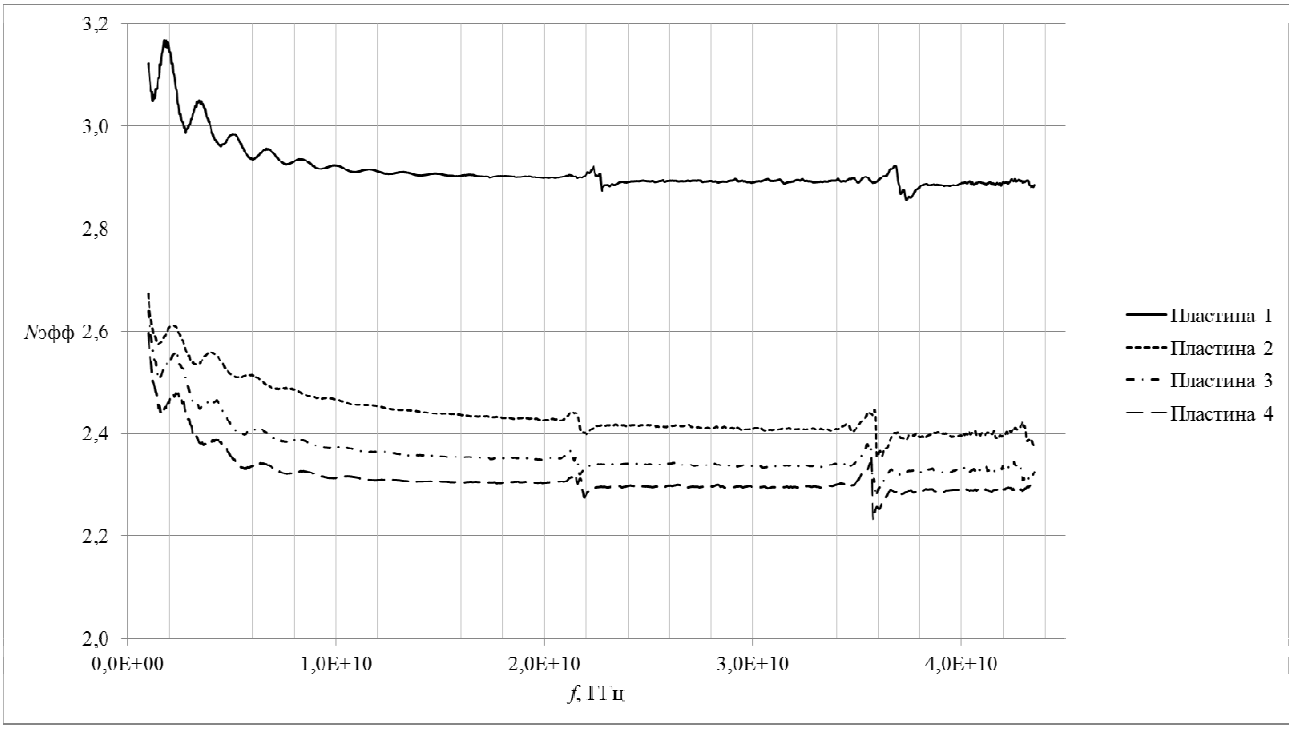


Рис. 1 Зависимость эффективного показателя преломления для СВЧ волны от параметров буферного слоя диоксида кремния

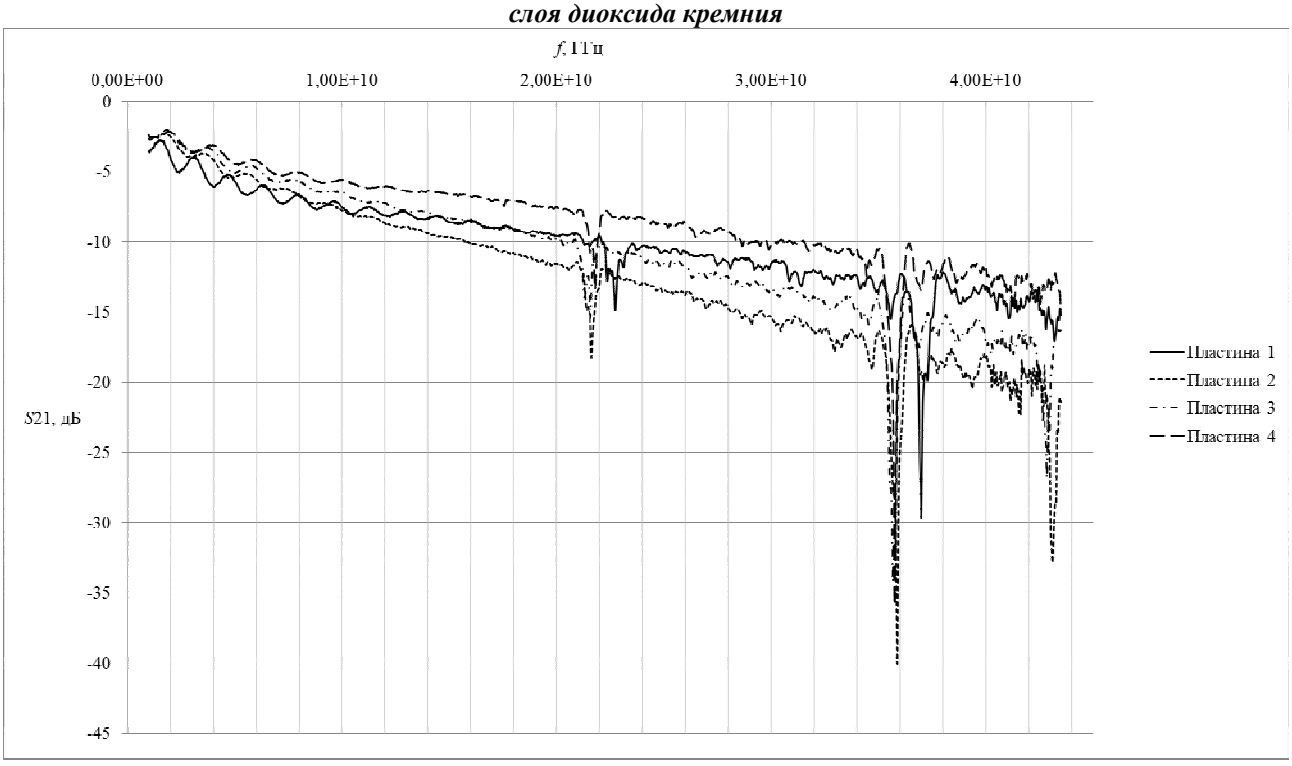


Рис. 2 Зависимость параметра пропускания СВЧ-волны от параметров буферного слоя диоксида кремния

Для обеспечения наилучших частотных характеристик модулятора необходимо, чтобы эффективный показатель преломления для СВЧ волны на активном участке копланарной линии соответствовал эффективному показателю преломления для оптического излучения, проходящего по каналам. В протонно-обменных канальных волноводах этот показатель равен 2,22. В связи с этим можно заключить, что наилучшие свойства буферного слоя с точки зрения согласования показателей преломления достигаются при отжиге слоя диоксида кремния при температуре 600 С. Что касается потерь СВЧ-энергии, то опять же наилучшие показатели продемонстрированы на пластине с отжигом 600 °С. Выбросы на кривых обусловлены резонансами внутри подложки кристаллов.

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОТОНИКЕ

Пшеничнюк И.А.[1*], Назариков Г.И.[1], Малышева Е.Д.[1], Казаков И.А.[1], Косолобов С.С.[1], Маймистов А.И.[2], Драчев В.П.[1,3]

[1] Сколковский институт науки и технологий, г. Москва
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва
[3] Университет Северного Техаса, г. Дентон, США
[*] E-mail: i.pshenichnyuk@skoltech.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16035

Плазмоны представляют собой кванты колебаний электронного газа в твердых телах. Вблизи поверхности тел они могут связываться с электромагнитными волнами, образуя квазичастицы, называемые поверхностными плазмон-поляритонами. Эти распространяющиеся гибридные моды обладают рядом свойств, полезных в интегральной фотонике. В отличии от классических оптических мод, размер которых ограничен дифракционным пределом, плазмонные моды позволяют достигать субволновой компрессии света. Это, в свою очередь, позволяет решить проблему несоответствия характерных размеров в современной электронике (определяемых размером транзисторов) и фотонике (задаваемых длиной волны света). Представляя собой смешанное состояние света и вещества, поверхностные плазмоны реализуют механизм сильного взаимодействия электронов и фотонов (в классической фотонике это взаимодействие слабо), что позволяет достигать высоких интенсивностей электромагнитного поля, а также обещает широкие перспективы в оптоэлектронных применениях [1].

В нашей работе демонстрируется, как использование плазмонных мод позволяет усовершенствовать компоненты интегральных фотонных схем. Это относится как к пассивным элементам, таким как волноводы, вращатели поляризации, кольцевые резонаторы и решетки ввода-вывода, так и к активным элементам, в особенности электронно-оптическим модуляторам и переключателям. Плазмоны, как правило, позволяют значительно уменьшить размеры устройств и увеличить их быстродействие.

В процессе разработки новых устройств широко используется идея гибридного плазмонного волновода [2], реализуемого посредством совмещения обычного кремниевого наноразмерного волновода и металлической плазмонной поверхности. Полученное таким образом устройство обеспечивает компромисс между высокой компрессией плазмонов и низкими оптическими потерями в кремниевых волноводах, а также позволяет эффективно конвертировать плазмонную моду в волноводную и обратно. Расчет эволюции гибридной плазмонной моды во времени является актуальной фундаментальной задачей современной плазмоники. В работе продемонстрировано, как внедрение данной концепции приводит к сокращению размеров электрооптических модуляторов, а также созданию эффективных вращателей поляризации [4].

Еще одним эффектом, используемым в нашей работе при разработке активных плазмонных компонентов интегральной фотоники, является эффект обнуления диэлектрической проницаемости [3]. Он проявляется в определенных классах материалов, например, таких как прозрачные проводящие оксиды, и состоит в том, что при определенных условиях (концентрация зарядов, длина волны света, внешнее поле) действительная часть диэлектрической проницаемости материала обращается в нуль. Это, в свою очередь, значительно влияет на оптические свойства материала. Возможность инициировать эффект обнуления с помощью внешнего электрического поля делает его полезным для реализации механизма переключения и, соответственно, применения в активных фотонных устройствах.

Работа поддержана Министерством Образования и Науки Российской Федерации, проект RFMEFI58117X0026.

Литература

1. *Stockman M.I., et al, J. Opt. 20, 043001 (2018)*
2. *Alam M.Z., et al, Laser Photonics Rev. 8, 394-408 (2014)*
3. *Caspani L., et al, PRL 116, 233901 (2016)*
4. *Pshenichnyuk I.A., et al, Quantum Electron. 48, 1153-1156 (2018)*

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ ВЕКТОРНЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ СЕТЕЙ: ВОЗМОЖНОСТИ, ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Морозов О.Г., Папазян С.Г., Сахабутдинов А.Ж.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань
E-mail: OGMorozov@kai.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16036

Измерение амплитудно- и фазо-частотных характеристик оптических элементов сетей является важным процессом как при их изготовлении, так и при настройке и эксплуатации систем, в которых они используются. Указанные характеристики могут быть получены с помощью оптического векторного анализатора (ОВА) с широкой полосой пропускания (десятки ГГц) и высоким разрешением (единицы кГц).

В первой части доклад представлен обзор решений по построению электрооптических ОВА. В начале 2000-х годов для получения частотных характеристик оптических элементов были предложены два базовых подхода: метод на основе измерения сдвига фазы модулированной несущей [1] и интерферометрический метод [2]. Оба метода подразумевают зондирование оптических элементов сканирующим по длине волны излучением лазера, что отражается на их низкой разрешающей способности (сотни МГц).

В начале 2010-х годов для получения измерений со сверхвысокой разрешающей способностью был развит метод зондирования с помощью оптической однополосной модуляции (ООМ) [3-6]. Преимущества метода заключаются в возможности реализации ОВА с широкой полосой пропускания, линейно-изменяющейся частотой и широким динамическим диапазоном измерений. Несмотря на то, что было реализовано множество различных схем реализации ООМ, только некоторые из однополосных ОВА смогли удовлетворить указанным требованиям и получили распространение в практике измерений. Это было определено в первую очередь узкополосностью и сложностью формирования управляющих оптическим излучением микроволновых полей. Кроме того, учитывая однополосность модуляции, диапазон измерений остается ограниченным, условно позволяющим сканировать только одну сторону оптического элемента, и при использовании типовой микроволновой и электрооптической элементной базы (ниобат лития) составляет в максимуме около 40 ГГц. Нельзя забывать и о том, что при реализации ООМ неизбежно возникновение высших гармоник модуляционного преобразования, особенно при высоких индексах модуляции, что вызывает появление значительных ошибок в результатах измерений.

Середина 2010-х годов была отмечена предложением ОВА на основе оптической двухполосной модуляции (ОДМ) [7-8]. По сравнению с ООМ ОДМ более широкополосна, позволяет сканировать ОЭ в полосе 80 ГГц на той же элементной базе ниобата лития, проста в реализации и эффективна как в энергетике, так и в использовании спектра полос. Однако симметричность модуляции приводит к тому, что после фотодетектирования образуются составляющие биений нижней и верхней спектральной составляющих с несущей, равные по частоте, что не позволяет получить их раздельный отклик. Для решения данной проблемы было предложено разделить оптическую несущую на два канала, один из которых сдвинуть по частоте [7]. После прохождения излучения с ОДМ через тестируемый оптический элемент (ТОЭ) оно складывается с излучением несущей сдвинутой по частоте. После фото-детектирования формируются две спектральные компоненты биений разные по частоте, по которым может быть построена амплитудно-частотная характеристика ТОЭ. К сожалению, фазочастотная характеристика не может быть измерена в этом случае в силу возникновения фазовых шумов высокого уровня, вызванных различными оптическими путями спектральных компонент, распространяющихся по разным каналам схемы. Несмотря на это, метод получил развитие в виде схемы с двумя гетеродинами, что позволило получить ОВА для измерения АЧХ узкополосных оптических фильтров с разрешением до 50 кГц и обеспечением самокалибровки процесса измерений [8].

Дальнейшее развитие ОВА, построенных по схеме ОДМ, происходит в настоящее время по двум основным направлениям.

Первое касается внесения асимметрии по амплитуде для составляющих ОДМ сигнала с использованием различных устройств [9-11] и проведение измерений в два этапа на различающихся компонентах. В [9] используется два электрооптических модулятора интенсивности и фазы, у

которых отличаются амплитуды нижней боковой полосы. В [10] применен двухпортовый параллельный модулятор Маха-Цендера (ДППММЦ), для каждого этапа измерений в котором меняется фаза, а, следовательно, величина амплитуды не-сущего излучения. В [11] предложен ОВА с поэтапно перестраиваемым фильтром, вносящем различное ослабление в амплитуду верхней боковой полосы.

Вычисление АЧХ и ФЧХ оптических элементов на двух интерферирующих компонентах с различными амплитудами требует достаточно объемных вычислений, использования сложных методик калибровки и обеспечения высокой стабильности измерительной схемы, поскольку вычисления касаются амплитудных измерений.

Второе направление продолжает реализацию методик поиска эффективных устройств сдвига несущей частоты [12-13] с возможностью организации общего канала для перестраиваемых компонент и сдвинутой по частоте несущей. В данных ОВА оптическая несущая делится на два канала, в одном из которых производится линейное сканирование частоты боковых полос ОДМ излучений, а во втором формируется опорное одночастотное излучение путем применения формирователя ООМ на одной частоте [12], или с использованием фильтров на основе эффекта Мандельштама-Бриллюэна [13]. В обоих случаях достигнуто разрешение 667 кГц, которое определяется числом выборок электрического векторного анализатора (ЭВА), регистрирующего информацию и управляющего процессом сканирования боковых полос несущей в диапазоне измерений 80 ГГц с использованием элементной базы измерений с верхней граничной частотой 40 ГГц.

Несмотря на использование одноэтапных измерений, что существенно сокращает время анализа на один элемент по сравнению с ОВА на основе ОДМ с асимметричными по амплитуде составляющими, использование единой элементной базы и минимального количество модуляторов, устранение влияния гармоник высших порядков, данные ОВА требуют дальнейшего упрощения и совершенствования. Это объясняется остающейся сложностью получения ООМ излучений, и, тем более, формирования бриллюэновских контуров усиления и поглощения в одномодовом оптическом волокне, длина которого составляет 8 км [13].

В второй части доклада мы представим новый ОВА [14], основанный на ОДМ с подавленной несущей (ПН) и волоконной брэгговской решетке с фазовым сдвигом (ВБРФС), который способен измерять и регистрировать как АЧХ, так и ФЧХ тестируемых оптических элементов сетей (ТОЭС). Ключевым устройством ОВА является ДППММЦ, в первом плече которого формируется линейно-сканирующее двухполосное излучение, а во втором фиксированное на заданной частоте.

В третьей части доклада мы представим ОВА [15] на основе ОДМ с различным коэффициентом подавления оптической несущей и уровнем боковых составляющих. Классический вариант получения ОДМ с ПН заключается в применении режима работы ММЦ в «нулевой» точке модуляционной характеристики. Энергетически и спектрально более выгодный вариант основан на применении метода модуляционного преобразования одночастотного когерентного излучения в двухчастотное с помощью тандемной амплитудно-фазовой модуляции.

Предложенные варианты отражают как ассиметричные по амплитуде, так и по частоте ОВА с повышенным отношением сигнал/шум измерений и чувствительностью, способные получать спектральные характеристики ТОЭС, характеризующихся сверхузкополосным резонансом Фано.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации государственного задания КНИТУ-КАИ №8.6872.2017/8.9.

Литература

1. *Niemi T., Uusimaa M., and Ludvigsen H., IEEE Photon. Tech. Lett. 13, 1334-1336 (2001)*
2. *VanWiggeren G.D., Motamedi A.R., and Barley D.M., IEEE Photon. Tech. Lett. 15, 263-265 (2003)*
3. *Voges E., et al., IEEE J. Quantum Electron. 18, 124 -129 (1982)*
4. *Román J.E., Frankel M.Y., and Esman R.D., Opt. Lett. 23, 939-941 (1998)*
5. *Pan Sh. and Xue M., IEEE 12th ICOCN, 1-3 (2013)*
6. *Xue M., et al., IEEE 12th ICOCN, 1-4 (2013)*
7. *Qing T., et al., Opt. Lett. 39, 6174–6176 (2014)*
8. *Zou X., et al., Optical Engineering 55, 056105 (2016)*
9. *Xue M., et al., IEEE Photonics Technology Lett. 30, 491-494 (2018)*
10. *Jun W., et al., Optics Letters. 42, 4426-4429 (2017)*
11. *Wang M., et al., IEEE Photonics Technology Letters. 25, 753-756 (2013)*
12. *Qing T., et al., Optics Express. 25, 4665-4671 (2017)*
13. *Qing T., et al., Optics Letters. 41, 3671-3674 (2016)*
14. *Morozov O.G., et al., Proc. of SPIE. 11146, 1114606 (2019)*
15. *Morozov O.G., et al., Proc. of SPIE. 9807, 980717 (2016)*

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЛАДКОГО ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ДЛЯ ОДНОМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Попов А.В., Прокопович Д.В.*, Баскаков В.А.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова РАН, г. Троицк, г. Москва
E-mail: dvprokopovich@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16037

Параметрический резонанс − резкое нарастание амплитуды колебаний, возникающее при кратности частоты изменения параметров осциллятора частоте свободных колебаний. Одним из применений теории параметрического резонанса является конструирование структур с периодически меняющимся профилем показателя преломления (фотонных кристаллов). Такого рода структуры используются как частотные фильтры, оболочки световодов или волноведущие структуры [1, 2].

Элементарная теория фотонных кристаллов хорошо известна [3, 4]. Показатель преломления чередующихся диэлектрических слоев рассчитывается так, чтобы френелевские отражения падающей волны на границах раздела складывались в фазе. Это приводит к экспоненциальному затуханию поля в периодической структуре и полному отражению падающей волны. Поскольку фазовый набег зависит от частоты, декремент затухания и коэффициент отражения также зависит от длины волны, а вне некоторой полосы экспоненциальное затухание сменяется осциллирующим режимом.

При конструировании оболочки брэгговского световода возникает задача обеспечить максимальное затухание поля в периодической структуре при минимальном числе слоев [5].

Для решения возникающей задачи оптимизации обратимся к теории распространения электромагнитных волн в периодических средах. Одномерное распространение электромагнитных волн в неоднородной среде с показателем преломления $n(x)$ описывается волновым уравнением:

$$E(x,t)=u(x)\exp(-i\omega t),\quad u''+q^2(x)u=0,\quad q(x)=k\,n(x),\quad k=\omega/c \qquad (1)$$

Аналитическое решение одномерного волнового уравнения известно лишь для ряда модельных потенциалов [6]. В случае периодической зависимости $n(x+\Lambda)=n(x)$ легко строятся решения для ступенчатого профиля показателя преломления методом матрицы перехода [7]. Также наиболее изученным является пример уравнения Матье $u''+\omega_0^{\,2}(1+h\cos\gamma x)u=0$ [8]. В большинстве остальных случаев приходится полагаться на численные методы.

Теорема Флоке-Блоха позволяет предсказать общий характер решения: $u(x)=P(x)\exp(\mu x)$, где $P(x+\Lambda)=P(x)$. Произведение мультипликаторов $\rho_{1,2}=\exp(\mu_{1,2}\Lambda)$ двух фундаментальных решений равно единице. Возможны два случая: показатели $\mu_{1,2}$ вещественны, $\rho_2=1/\rho_1$ − одно из решений экспоненциально растет, а другое убывает; показатели чисто мнимые, а мультипликаторы комплексно сопряжены и по модулю равны единице. Для создания интерференционного зеркала или оболочки брэгговского световода нужно реализовать экспоненциально убывающее решение. В общем случае периодического потенциала его декремент затухания находится численными методами.

В данной работе развивается альтернативный подход, впервые предложенный нами в работе [9]. Он состоит в параметрическом представлении показателя преломления и волновой функции в терминах фазы искомого решения. Для произвольной периодической среды оказывается возможным построить в явном виде решение Флоке-Блоха и найти декремент затухания в зависимости от фазового параметра. Фазовая переменная для уравнения (1) вводится как $\psi(x)=\operatorname{arcctg}\left[u'(x)/q(x)u(x)\right]$. Если ввести обозначение $q(x)\equiv Q(\psi)=\bar{q}\exp G(\psi)$, то оказывается, что уравнение (1) интегрируется в явном виде при произвольной зависимости $G(\psi)$:

$$X(\psi)=x_0+\frac{1}{2\bar{q}}\left(e^{-G(\psi)}\sin 2\psi+4\int_0^{\psi}e^{-G(\varphi)}\sin^2\varphi\,d\varphi\right),\qquad u(x)\equiv U(\psi)=\frac{1}{\bar{q}}\sin\psi\;e^{-G(\psi)\cos^2\psi-\int_0^{\psi}G(\varphi)\sin 2\varphi\,d\varphi} \qquad (2)$$

Период модуляции $\Lambda = 1/2\bar{q}\int_0^{\pi} e^{-G(\varphi)}\sin^2\varphi d\varphi$ и декремент затухания $\nu = \int_0^{\pi} G(\varphi)\sin 2\varphi d\varphi$ для 2Λ -периодического решения $u(x) = \tilde{u}(x)\exp(-\nu x/\Lambda)$, где $\tilde{u}(x+2\Lambda) = \tilde{u}(x)$.

Метод фазового параметра указывает очень простую связь характеристического показателя Флоке с законом периодической модуляции параметров среды. Из разложения $G(\psi)$ в ряд Фурье $G(\psi) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty}(a_{2m}\cos 2m\psi + b_{2m}\sin 2m\psi)$ видим, что вклад в затухание дает единственная гармоника $b_2 \sin 2\psi$. При заданном контрасте $n_1 > n(x) > n_2$ для двух законов модуляции имеем:

$$G(\psi) = \begin{cases} \ln n_1, 0 < \psi < \pi/2 \\ \ln n_2, \pi/2 < \psi < \pi \end{cases} \text{ и } \nu = \ln\frac{n_1}{n_2} \quad (3), \quad G(\psi) = \frac{1}{2}\ln\frac{n_1}{n_2}\sin 2\psi \text{ и } \nu = \frac{\pi b_2}{2} = \frac{\pi}{4}\ln\frac{n_1}{n_2} \quad (4)$$

Максимальный декремент достигается при ступенчатом изменении параметров (четвертьволновом профиле) − случай (3). Оптимальный профиль, плавно нарастает, соответствует случаю (4).

На Рис. 1 представлен оптимальный профиль показателя преломления $n(x)$ и соответствующая ему функция $u(x)$, рассчитанные по формулам (2).

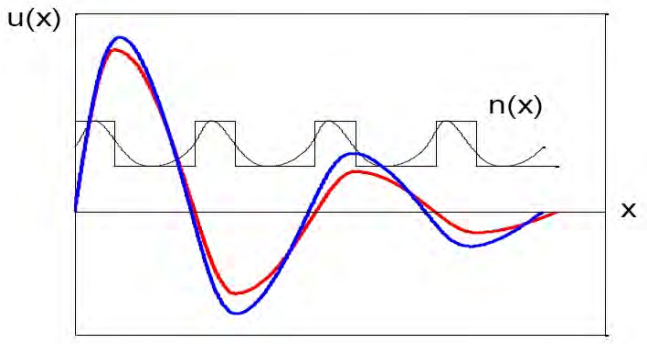


Рис. 1. Профили показателя преломления (3)-(4)и распределение поля в структуре, красная линия для четвертьволновой структуры (3) и синяя линия для гладкого профиля (4).

Используя метод фазового параметра, можно получить описание частотной зависимости решений волнового уравнения (1). Трудность параметризации частотно-зависимого решения $u(x) = U(\psi, k)$, $x = X(\psi, k)$ состоит в необходимости обеспечить постоянство профиля показателя преломления $n(x) = N(\psi, k) = \bar{n}\exp[G(\psi, k)]$ при разных k [10]. Характерной особенностью оптимального гладкого профиля (4) является регулярность и узость зон непрозрачности см. Рис. 3.

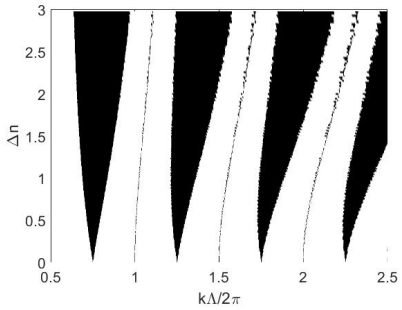


Рис. 2. Зоны прозрачности (белые) и непрозрачности (черные) для ступенчатого четвертьволнового профиля (3) в зависимости от частоты k и контраста $\Delta n = n_1 - n_2$.

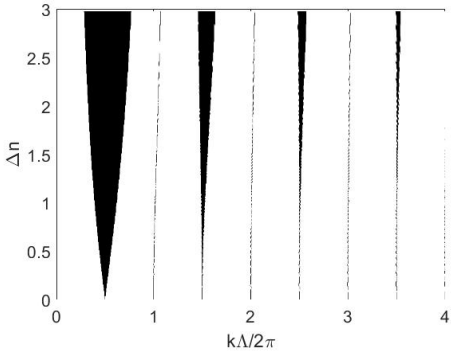


Рис. 3. Зоны прозрачности (белые) и непрозрачности (черные) для гладкого профиля (4) в зависимости от частоты k и контраста $\Delta n = n_1 - n_2$.

Литература

1. *Yeh P., Yariv A., and Marom E., J. Opt. Soc. Am. 68, 1196-1201 (1978)*
2. *Knight J., Birks T., et al, J. Opt. Soc. Am. A 15, 748-752 (1998)*
3. *Yeh P., Yariv A., and Hong C., J. Opt. Soc. Am. 67, 423-438 (1977)*
4. *Skorobogatiy M., and Yang J., Cambridge University Press (2008)*
5. *Février R., Jamier R., et al, Opt. Express 14, 562-569 (2006)*
6. *Morozov G., and Sprung D., J. Opt. 17, 035607 (2015)*
7. *Ярив А., и Юх П., Мир (1987)*
8. *Бриллюэн Л., Пароди М., Издательство иностранной литературы (1959)*
9. *Vinogradov A., Popov A., and Prokopovich D., Comput. Math. and Math. Phys. 49, 1069-1079 (2009)*
10. *Popov A., Proc. 11th ICTON '09 (2009)*

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЙ СИСТЕМ СРАВНЕНИЯ И СИНХРОНИЗАЦИИ ШКАЛ ВРЕМЕНИ ПРОСТРАНСТВЕННО УДАЛЕННЫХ ЭТАЛОНОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

Колмогоров О.В.[*], **Прохоров Д.В., Донченко С.С.**

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г.п. Менделеево, Московская область, Солнечногорский район

[*] *E-mail:* kolmogorov@vniiftri.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16038

Синхронизация шкал времени пространственно удаленных эталонов единиц частоты и времени необходима при решении задач по обеспечению потребностей государства в эталонных сигналах времени и частоты [1], в частности, для обеспечения функционирования глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) ГЛОНАСС и достижения требований, заданных к её характеристикам, для обеспечения работы высокоскоростных цифровых систем связи и автоматизированных систем, применяемых на транспорте, а также при обеспечении единства измерений, при проведении научных исследований. Физической реализацией шкал времени эталонов являются импульсные сигналы меток времени с периодом 1 с. Синхронизация предполагает измерение расхождения между шкалами времени эталонов и приведение этих шкал к синхронному состоянию. Современные требования к точности синхронизации шкал времени пространственно удаленных эталонов (в частности, для эталонов наземных комплексов метрологического обеспечения ГНСС ГЛОНАСС [2]) предусматривают погрешность не более 100 – 200 пс, а для решения задач перспективных научных исследований требуется на порядок более высокая точность [3].

Для проведения измерений расхождения шкал времени удаленных эталонов необходимо организовать между эталонами канал передачи сигналов, несущих метки времени, и информационный канал для обмена данными о результатах измерений между пунктами размещения эталонов. При этом важным фактором, определяющим точность сравнений шкал времени, является погрешность, вносимая каналом передачи сигналов, несущих метки времени. При расстояниях между эталонами до сотен километров обеспечить требуемый уровень сравнений шкал времени можно только за счет использования волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) для передачи сигналов с метками времени [4]. Преимуществами ВОЛС по сравнению с другими каналами связи, используемыми для сличений эталонов, являются низкое ослабление сигнала, значительно меньшее влияние температуры на задержки распространения сигнала, отсутствие влияния электромагнитных помех.

Для проведения сравнения и синхронизации шкал времени удаленных эталонов с использованием ВОЛС предложены схемы систем сравнений и синхронизации шкал времени для ВОЛС протяженностью до 30 км [5, 6] и для ВОЛС протяженностью до 100 км [7, 8]. Принцип действия систем основан на передаче по ВОЛС оптических импульсов между пунктами размещения эталонов, регистрации моментов времени их излучения и приема в шкалах времени, формируемых эталонами, обмене данными между двумя пунктами о моментах регистрации импульсов и последующем расчете расхождения шкал времени с использованием поправок для учета аппаратурных задержек сигналов и хроматической дисперсии оптического волокна. На основе полученных результатов измерений расхождения шкал времени аппаратурой системы при необходимости формируются команды на коррекцию шкалы времени одного из эталонов для обеспечения её синхронизации с шкалой времени другого эталона.

При проведении работ по созданию систем на основе схем систем одно- и двухсторонних сравнений шкал времени (СОДС ШВ) [5, 6] в ходе экспериментальных исследований установлено, что системы позволяют проводить измерения расхождений шкал времени с случайной погрешностью на уровне 50 – 70 пс при использовании в их составе одностоповых измерителей временных интервалов (ИВИ), а при использовании многостоповых ИВИ с пикосекундным разрешением случайную погрешность можно уменьшить до значений менее 15 – 20 пс. Для проведения высокоточных измерений расхождения шкал времени эталонов при расстояниях до 30 км разработана система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени СОДС ШВ, построенная на основе многостоповых ИВИ. Результаты экспериментальных исследований системы СОДС ШВ показали, что её погрешность не превышает ± 100 пс.

Для повышения максимального расстояния между синхронизируемыми эталонами проведены исследования по возможности реализации систем, построенных по схеме встречных сравнений шкал времени [7, 8]. В докладе представлены результаты экспериментальных исследований макета такой системы, подтверждающие возможность повышения дальности действия систем сравнений и синхронизации шкал времени, использующих ВОЛС, до 100 км без снижения уровня точности. Также в докладе представлены предполагаемые пути дальнейшего повышения дальности действия и точности систем сравнений и синхронизации шкал времени, использующих ВОЛС.

Литература

1. *Положение о Государственной службе времени, частоты и определения параметров вращения Земли, утвержденное постановлением Правительства РФ от 23 марта 2001 г. № 225*
2. *Колмогоров О.В. и др., Измерительная техника 9, 29-32 (2017)*
3. *Фатеев В.Ф., Релятивистская метрология околоземного пространства-времени, ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017, 438 с.*
4. *Rost M., et al, Metrologia 49(6), 772-778 (2012)*
5. *Колмогоров О.В., Прохоров Д.В., Способ сличения шкал времени и устройство для его осуществления, патент на изобретение № 2547662 от 13.03.2015*
6. *Прохоров Д.В., Колмогоров О.В., Донченко С.С., Устройство для сравнения шкал времени, патент на изобретение № 2640455 от 09.01.2018*
7. *Прохоров Д.В., Колмогоров О.В., Донченко С.С., Устройство для сравнения и синхронизации шкал времени, патент на изобретение № 2604852 от 22.11.2016*
8. *Прохоров Д.В., Колмогоров О.В., Донченко С.С., Буев С.Г., Устройство для сравнения шкал времени, патент на изобретение № 2662175 от 24.07.2018*

РАДИФОТОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МГНОВЕННЫХ ЧАСТОТ МНОЖЕСТВА РАДИОСИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНОГО ЧАСТОТНОГО СМЕЩЕНИЯ С РАСШИРЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ ИЗМЕРЯЕМЫХ ЧАСТОТ

Иванов А.А.[*], **Морозов О.Г., Сахабутдинов А.Ж., Сарварова Л.М., Колесников В.Ю.**

Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им. А. Н. Туполева – КАИ, г. Казань
[*] *E-mail:* aleste1@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16039

Введение. С развитием оптико-электронных систем радиофотонные методы измерения мгновенной частоты (ИМЧ) радиосигналов являются перспективным инструментом как в военной (радиотехническая разведка, радиоэлектронная борьба), так и в гражданской области (оценка электромагнитной обстановки, программно-определяемое радио и т.д.). Радиофотонные методы позволяют проводить обработку радиосигналов в оптическом диапазоне и использовать такие присущие фотонным технологиям достоинства как более широкий рабочий диапазон (по частоте и амплитуде) по сравнению с электронными методами, малые потери, невосприимчивость к электромагнитным полям, упрощенная конструкция и малый размер [1]. Среди фотонных методов ИМЧ радиосигналов на основе преобразования «частота-амплитуда» наиболее часто используются методы с использованием волоконной решетки Брэгга (ВРБ) в качестве дисперсионного элемента [2].

На основе предложенного и исследованного ранее метода ИМЧ одного сигнала с использованием ВРБ: аддитивного частотного разнесения несущей [3] предложен способ и написан алгоритм одновременного измерения и определения множества частот принимаемого полигармонического радиосигнала.

Описание метода. Идея измерения основана на электрооптическом свойстве модулятора Маха-Цендера (ММЦ), которое позволяет напрямую связать разностную частоту оптически модулированного сигнала с частотой электрического модулирующего сигнала. Узкополосное лазерное излучение направляется на модулятор, работающий в нулевой рабочей точке с подавлением несущего сигнала. Модуляция оптической несущей производится внешним полигармоническим электрическим сигналом, частоты которого подлежат измерению.

На Рис. 1 приведен пример оптико-электронной схемы реализации такого измерительного преобразования. Излучение с источника – ЛД, модулируется на – ММЦ1 сигналом с частотой {fDF} для разноса двухчастотного излучения на середину линейного участка склонов АЧХ ВРБ и затем модулируется на – ММЦ2 полигармоническим электрическим сигналом – MS с неизвестным набором частот {fRFk}, и, отражаясь от ВБР, возвращается через оптический циркулятор – ОЦ, принимается на фотодетекторе – ФД и оцифровывается на АЦП. Блок обработки, в котором производится определение мгновенных частот, на рисунке не приведен. При данном способе измерения в зависимости от величины значений составляющих частот сигнала на фотодетекторе будут возникать биения гармоник искомых частот с одного либо с прилегающих склонов ВРБ. Схемы АЧХ лазерного излучения для этих случаев и спектры сигналов на выходе фотоприемника приведены на Рис. 2 и Рис. 3 соответственно.

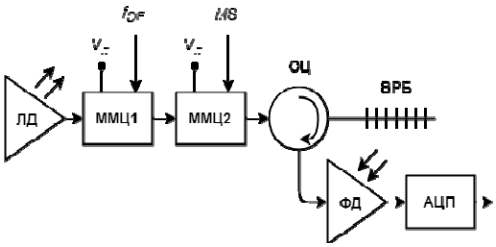
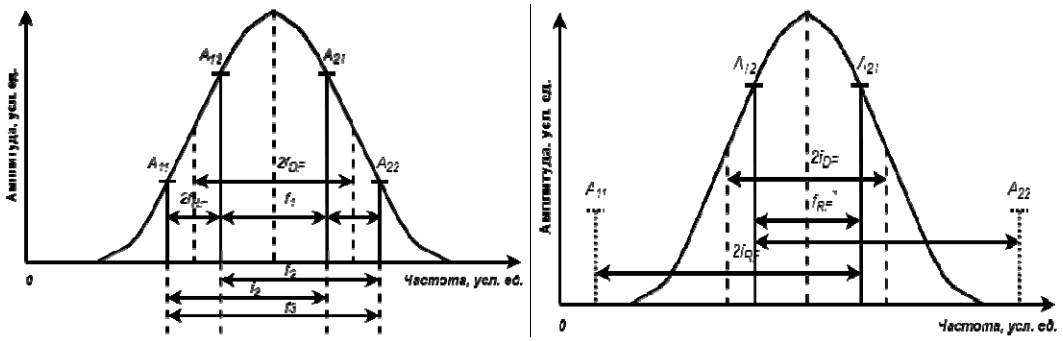


Рис. 1. Структурная оптико-электронная схема реализации приемной части ИМЧ

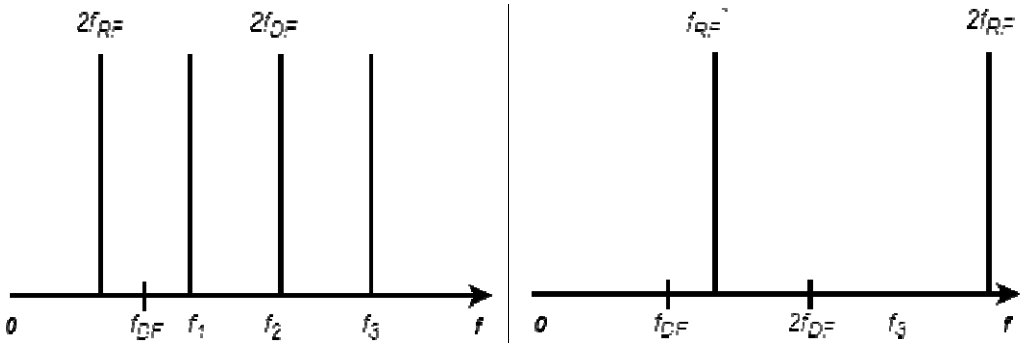
Выбирая полосу пропускания фотоприемника равной полуширине АЧХ ВРБ {2fDF}, для случая на Рис. 3,а на выходе фотоприемника мы получаем сигнал с частотами {2fRF}, {f1} и {f2} равную {2fDF}, что позволяет исключить ее из дальнейших вычислений. При этом {2fRF} и {f1} будут равноудалены от частоты разнесения {fDF}. Для случая на Рис. 3,б на выходе фотоприемника мы получаем сигнал с частотой {fRF*}. Частота исходного сигнала для этого случая определяется как ({fRF*}+{2fDF})/2. Это позволяет проводить измерения сигналов с частотами, превышающими полосу пропускания фотоприемника.

После ММЦ сигнал будет представлять собой полигармоническое оптическое излучение с оптическими частотами, которые разнесены от несущей частоты лазера на частоты модуляции.



а) *б)*

Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики спектральной формы сигнала, принимаемого на фотоприемнике для: а) измерений на одном из склонов ВРБ; б) измерений на прилегающих склонах ВРБ



а) *б)*

Рис. 3. Схема спектра сигнала после фотоприемника в амплитудно-частотной плоскости для: а) измерений на одном из склонов ВРБ; б) измерений на прилегающих склонах ВРБ

На фотоприемнике, как на квадратичном элементе будут происходить все парные перекрестные биения оптических частот. Оцифрованный результирующий сигнал затем подвергается преобразованию Фурье, а полученный массив частот разделяется на два подмассива по критерию наличия равноудаленных частот от {fDF} для определения случая измерения на одном склоне АЧХ ВРБ либо на прилегающих склонах. Затем подмассивы направляется на вход алгоритма определения частот, описанный в [4].

Для расширения диапазона измеряемых частот в два раза можно использовать амплитудно-фазовое модуляционное преобразование оптической несущей в симметричное двухчастотное излучение по методу Ильина-Морозова [5].

Заключение. Предложенный метод позволяет проводить измерения мгновенных частот радиосигналов с частотами до 2 раз превышающими полосу пропускания фотоприемника. Работа алгоритма возможна при измерении нескольких периодов поступающего сигнала и требует необходимости дискретного преобразования Фурье и получения его спектра для выделения искомых частот. Точность измерения частот зависит от производительности процессора, входящего в контроллер, проводящий математическую обработку сигнала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания КНИТУ-КАИ № 8.6872.2017/8.9.

Литература

1. *Ghelfi P., et al, Nature 507, 341-345 (2014)*
2. *Li Z., et al, Optics Communication 283, 396-399 (2010)*
3. *Ivanov A.A., et al, Proc. of XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), 427-430 (2017)*
4. *Иванов А.А., Сахабутдинов А.Ж., Сборник трудов XXVI Всероссийской открытой научной конференции "Распространение радиоволн" (РРВ-26) (2019) в печати*
5. *Морозов О.Г., Ильин Г.И., Вестник поволжского государственного технологического университета 1, 6-42 (2014)*

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ КОЛЕСНОГО ПОДШИПНИКА НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ АДРЕСНЫХ СТРУКТУР

Аглиуллин Т.А.[*], **Губайдуллин Р.Р., Сахабутдинов А.Ж., Морозов О.Г.**

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань
[*] *E-mail:* taagliullin@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16040

Введение. В настоящее время уделяется большое внимание разработке беспилотных транспортных средств (ТС). Для обеспечения безопасного движения таких ТС необходимо создание более надежных систем управления их динамикой с более достоверным определением дорожных условий по сравнению с классическими системами активной безопасности автомобилей. В связи с этим возникает необходимость применения новых типов сенсорных систем для определения характеристик сцепления колес с дорожным полотном, в частности, сил, действующих на колеса.

Существующие методы измерения колесных сил можно разделить на следующие категории по месту расположения чувствительных элементов: 1) методы с датчиками, встроенными в колесную шину (акселерометры [1], датчики деформации протектора [2], датчики деформации боковины [3]); 2) методы с датчиками деформации колесного диска (используются в испытательном оборудовании); 3) методы, использующие датчики в элементах подвески (датчики деформации втулок подвески [4], датчики перемещения поворотного кулака относительно тормозного суппорта [5], датчики деформации или перемещения ступичного подшипника [6, 7]). Вычисление колесных сил, основанное на измерении деформации подшипников, имеет ряд преимуществ по сравнению с другими подходами, что обуславливает пригодность такого подхода к практическому применению. Во-первых, измерение осуществляется на не вращающемся кольце подшипника, что значительно облегчает процесс получения данных. Во-вторых, в отличие от шин, подшипник не требует замены, как правило, в течение всего срока службы автомобиля. В-третьих, методы измерения сил на основе подшипников невосприимчивы к смене шин и колес. Кроме того, измерение нагрузки на подшипнике позволяет измерить тангенциальную тормозную силу. Наконец, благодаря малому весу измерительных устройств неподресоренные массы увеличиваются незначительно, что практически не влияет на динамику автомобиля.

Система измерения на основе адресных волоконно-оптических структур. В современных волоконно-оптических сенсорных системах (ВОСС) опрос датчиков на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) осуществляется с помощью оптико-электронных интеррогаторов, которые включают в себя широкополосные источники оптического излучения для зондирования датчиков и узкополосные оптические фильтры или узкополосные лазеры с широким диапазоном перестройки частот для их опроса [8]. Сложность и высокая стоимость таких устройств препятствуют широкому применению ВОСС во многих сферах промышленности. Для решения данных проблем в настоящей работе предложена система измерения деформации подшипников на основе радиофотонных методов опроса адресных волоконных брэгговских структур (АВБС), в частности АВБС с двумя симметричными π-сдвигами (2π-ВБР) [9]. Адресная структура 2π-ВБР представляет собой три последовательные ВБР с фазовыми π-сдвигами между ними. На рисунке 1 представлено схематическое изображение структуры такой АВБС и спектральная характеристика пропускания. Брэгговские частоты (центральные длины волн) АВБС одинаковы, они имеют равную полосу пропускания, а адресность измерений обеспечивается уникальным разносом частот между двумя окнами прозрачности в спектре АВБС, который не изменяется при наложении на 2π-ВБР деформационных или температурных полей [10].

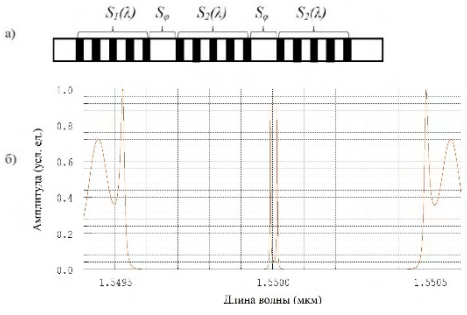


Рис. 1. Структура 2π-ВБР (а), спектр пропускания (б)

Желаемая адресная частота АВБС с двумя фазовыми π-сдвигами может быть получена путем задания соответсвующей длины среднего участка такой структуры [10]. С целью нахождения зависимости адресной частоты 2π-ВБР от длины среднего участка, было проведено компьютерное моделирование АВБС в программе OptiGrating 4.2.2. В качестве основы был выбран аналог серийно выпускаемого оптического волокна SMF-28 с

диаметром сердцевины 8,2 мкм, показателем преломления 1,4682, диаметром оболочки 125 мкм и показателем преломления оболочки 1,4500. Длины первого и третьего участков были приняты равными 1999,84 мкм, а период решетки 0,52836 мкм. Величина наведенного показателя преломления принята равной 0,0007 ед. Аподизация наведенного показателя преломления задана равномерной, форма штриха – прямоугольная. Длина среднего участка исследуемых 2π-ВБР структур изменялась от 2799,78 мкм до 1400,15 мкм, а адресные частоты лежат в диапазоне от 1,125 ГГц до 9,375 ГГц, что обеспечивает возможность использования таких структур в качестве чувствительного элемента адресной измерительной системы. Полученная зависимость представлена на рис. 2. На основе данных моделирования была построена аппроксимирующая кривая четвертого порядка, что позволяет сформировать профиль 2π-ВБР структуры с любой наперед заданной адресной разностной частотой между двумя фазовыми π-сдвигами.

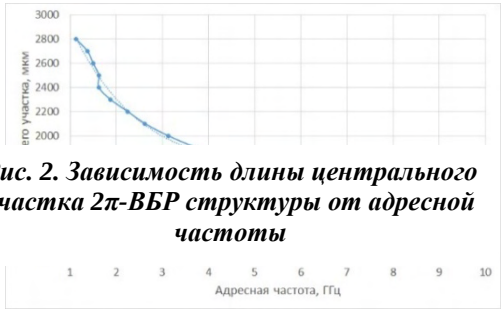


Рис. 2. Зависимость длины центрального участка 2π-ВБР структуры от адресной частоты

На рисунке 3 представлена структурная схема системы опроса трех АВБС с различными адресами Ω_1, Ω_2 и Ω_3, две из которых служат для измерения деформации внешнего кольца подшипника, а третья – для учета температурных изменений [10]. Широкополосный источник – 1 формирует непрерывное лазерное излучение (диаграмма a), соответствующее диапазону измерений, которое проходит через оптоволоконный разветвитель – 9 и поступает на три АВБС – 2.1, 2.2 и 2.3. Каждая из трех АВБС пропускает двухчастотное излучение, которое суммируется в одно общее излучение (диаграмма b) с помощью оптоволоконного сумматора – 10. На выходе с оптоволоконного сумматора формируется шестичастотное лазерное излучение (диаграмма c), которое проходит через оптоволоконный разветвитель – 6. Разветвитель делит оптический сигнал на два канала – измерительный и опорный для контроля мощности. В измерительном канале установлен наклонный фильтр с известной линейной характеристикой в амплитудно-частотной плоскости – 3, модифицирующий амплитуды шестичастотного излучения в асимметричное излучение (диаграмма d), после чего сигнал поступает на измерительный фотоприемник – 4 и принимается на измерительный АЦП – 5. Сигнал с АЦП – 5 методом частотной (аналоговой или цифровой) фильтрации служит для определения положения АВБС. В опорном канале сигнал (диаграмма e) поступает на опорный фотоприемник контроля мощности входного оптического сигнала – 7 и принимается на опорный АЦП – 8. Анализ сигнала ведется на основе отношения мощностей в измерительном и опорном каналах, таким образом достигается нормировка интенсивности выходного сигнала.

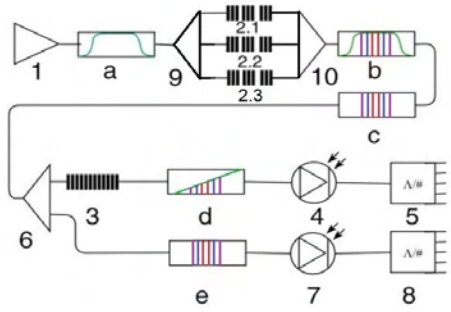


Рис. 3. Схема системы опроса 2π-ВБР

Заключение. Использование АВБС с двумя симметричными фазовыми π-сдвигами в качестве чувтсвительных элементов ВОСС позволяет значительно уменьшить стоимость измерительной системы, поскольку в этом случае не требуется установка оптического интеррогатора в системе опроса, а также сохранить все преимущества, присущие волоконно-оптическим датчикам, такие как малые габариты и вес, нечувствительность к электромагнитным воздействиям и отсутствие систем питания. Компьютерное моделирование 2π-ВБР подтверждает возможность получения таких структур с требуемым оптическим откликом и наперед заданной адресной частотой, пригодных к применению в системе измерения деформации подшипника ступицы колеса.

Литература

1. *Cheli, F., et al, SAE Tech. Paper 2011-01-0990 (2011)*
2. *Roveri, N., Pepe, G., Carcaterra, A., Mech. Syst. and Sign. Proc. (2015)*
3. *Pohl, A., Steindl, R., and Reindl, L., IEEE Trans. on Instr. and Meas. 48, 1041-1046 (1999)*
4. *Suzuki, M., et al, SAE Tech. Paper. 2007-01-0830 (2007)*
5. *Ohkubo, N., et al, SAE Tech. Paper 2007-01-0867 (2007)*
6. *Ono K., Takizawa T., and Aoki M., Appl. PCT/JP2007/054725; Publ. no: EP1995580 (A1), D. of Pat.: 26.11.2008*
7. *Kerst, S., Shyrokau, B., Holweg, E., Proc. of EuroBrake2015, Dresden, Germany, 4-6 May 2015 (2015)*
8. *Sakhabutdinov, A.Zh., Morozov, O.G. Morozov, G.A., Adv. Tech. of Quant. Key Distr. (2018)*
9. *Agliullin, T.A., et al, 2019 Syst. of Sign. Gen. and Proc. in the Field of on Board Com. 1-5 (2019)*
10. *Sahabutdinov, A.Zh.., Eng. J. of Don 3 (2018)*

ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК КОНТРОЛЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ЩЕТОЧНО-КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ВБР

Липатников К.А.*, Кузнецов А.А., Фасхутдинов Л.М., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ»

** E-mail:* klipatnikov87@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16041

Мониторинг температуры щеточно-коллекторного узла (ЩКУ) является одной из главных задач при эксплуатации тяговых электродвигателей (ТЭД). Причиной превышения температуры в ЩКУ, могут быть: искрения, протекание токов больше номинального, отказ или нарушение работы системы охлаждения и т.д. [1]. Все это может привести к выходу ТЭД из работоспособного состояния, что несет за собой колоссальные убытки. Контроль температуры ЩКУ дает возможность косвенно определять общее техническое состояние ТЭД, что в свою очередь ведет к повышению безопасности эксплуатации и более эффективному использованию его ресурса. Вопрос контроля температуры не является новой задачей, и существуют различные методы и средства для его осуществления [2, 3]. Указанные методы обладают рядом недостатков, поэтому требуется более эффективный метод оперативного определения распределения тепловых полей в ЩКУ.

В настоящей работе предлагается метод контроля температуры и износа ЩКУ на основе волоконно-оптического датчика с использованием нескольких волоконных брэгговских решеток (ВБР) в качестве чувствительных элементов. ВБР представляет собой периодическую структуру, записанную в оптическом волокне, которая отражает определенную длину волны в зависимости от периода структуры. При физическом воздействии (температура, истирание, механическое растяжение) на ВБР происходит ее спектрального отклика. На рисунке 1 представлена схема совмещенного датчика износа и температуры, которая построена из соображений минимизации количества чувствительных элементов.

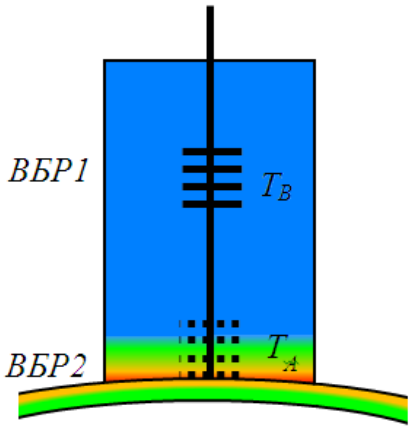


Рис.1 Схема волоконно-оптического датчика износа и температуры

ВБР 1 контролирует температуру всей щетки, ВБР 2 - износ и температуру непосредственно в точке контакта щетка-коллектор. В момент начала эксплуатации начинается сбор данных о параметрах ВБР 2 в массив, это делается для определения динамики износа щетки. Износ определяется по спектральной ширине решетки, чем больше износ, тем шире ее спектр. Впоследствии, когда ВБР 2 полностью стирается, массив полученных данных используется для расчета температуры в точке контакта щетка-коллектор по данным о средней температуре щетки с ВБР 1. ВБР 1 установлена на метке предельного износа и ее полное истирание свидетельствует о необходимости замены щетки.

Выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук МК-3421.2019.8 (соглашение № 075-15-2019-309).

Литература

1. *Кузнецов, А.А. Щетка как интеллектуальный узел электродвигателя / О.Г. Морозов, А.А. Кузнецов, И.И. Нуреев и др. // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 1. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3525*
2. *ГОСТ Р МЭК 773-96. Щетки электрических машин. Методы испытаний и средства измерений рабочих характеристик. – М: Изд-во стандартов, 1996. – 21с.*
3. *Щербатов, В. В. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса / В.В. Щербатов, О.Л. Рапопорт, А.Б. Цукублин // Известия ТПУ. – 2005. – №7 – С. 156 – 159*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ С ФАЗОВЫМ П-СДВИГОМ КАК ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ

Липатников К.А.*, Кузнецов А.А., Фасхутдинов Л.М., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ»
** E-mail:* klipatnikov87@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16042

Современные тенденции развития измерительных устройств из года в год требуют повышение точности, надежности и чувствительности от производителей. В связи с этим бурное развитие получили оптические датчики различных величин чувствительным элементом, которых являются ВБР, а так же часто встречающиеся в литературе ВБР с фазовым сдвигом.

В литературе можно часто встретить упоминание о ВБР с фазовым сдвигом и их повышенной разрешающей способностью по сравнению с обычными ВБР. В различных статьях этот выигрыш в разрешении варьируется, к примеру, в источниках [1-3] говориться о повышении разрешающей способности в 20 раз.

Главной задачей исследования является определение реального практического преимущества использования волоконно-оптических решеток с фазовым сдвигом, а в частности определение и сравнение разрешающих способностей обычной ВБР и ВБР с фазовым сдвигом при поочередном воздействии температуры и растяжения.

Основные требования к методике проведения эксперимента:

- Исследуемые ВБР должны быть помещены в одинаковые условия;
- Метод определения параметров ВБР, воздействия на ВБР должны быть идентичны;
- Измеряемы параметр – центральная длина волны ВБР, в случае ВБР с фазовым сдвигом – центральная длина волны сверхузкополосной зоны пропускания;
- Изоляция от дестабилизирующих факторов (вибрации, пе-репады температуры и т.д.);
- Запись данных производить только при установившемся (стационарном) процессе.

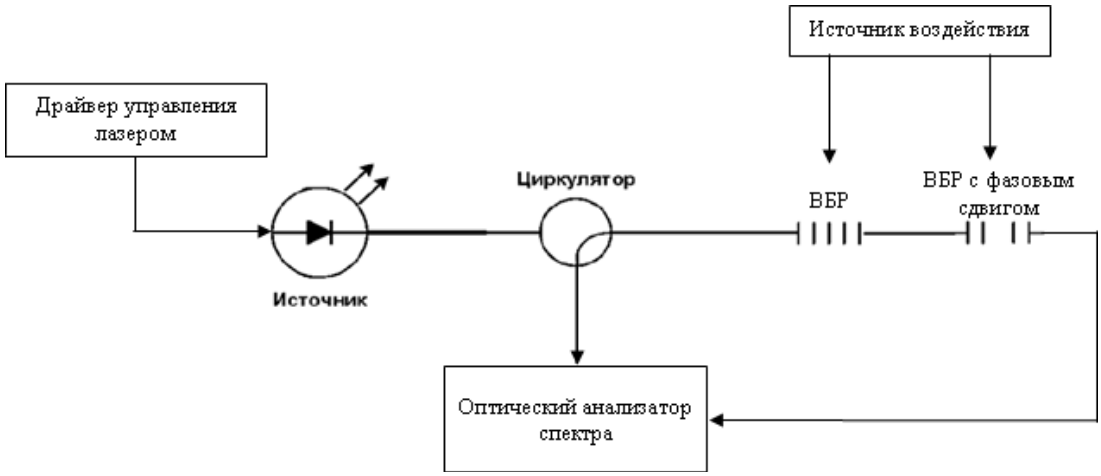


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки

В нашем эксперименте решетки были подвержены двум воздействиям: температуре и растяжению. За измеряемый параметр была взята центральная длина волны ВБР, а для ВБР с фазовым сдвигом центральная длина волны сверхузкополосной зоны пропускания. Для анализа отклика на воздействие использовался оптический анализатор спектра YOKO-GAWA AQ6370C. Первым воздействием было температурное, решетки помешались в область с установившейся температурой. Проводилось 50 итераций измерения длины волны ВБР, показания температуры фиксировались термометром ЛТ-300. На рисунках 2 и 3 представлены показания длин волн решеток при температуре -0.05ºC.

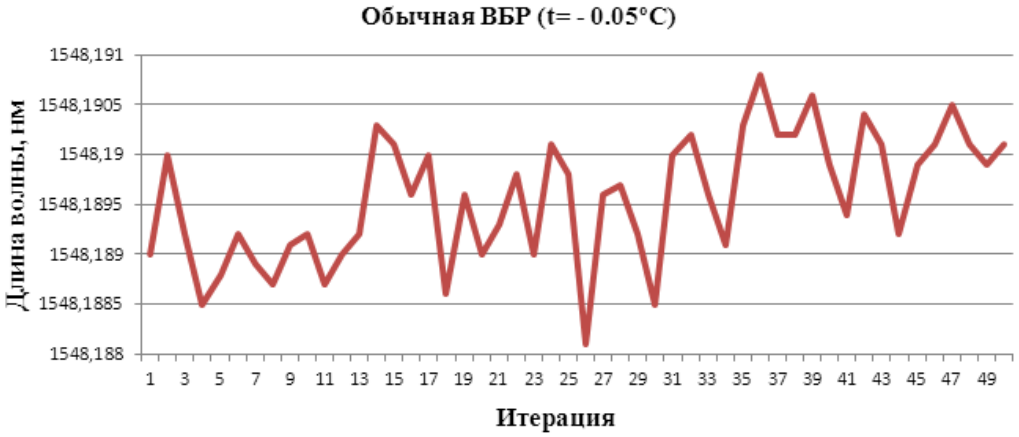


Рис. 2. График зависимости центральной длины волны от температуры для обычной ВБР на точке t = -0.05°C

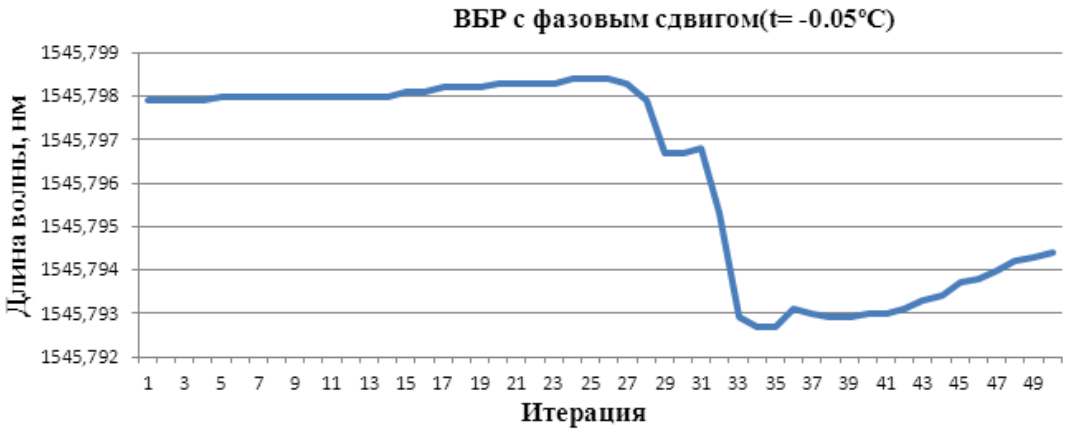


Рис. 2. График зависимости центральной длины волны от температуры для ВБР с фазовым сдвигом на точке t = -0.05°C

Как видно из графиков, разрешающая способность ВБР с фазовым сдвигом действительно выше, но отличается от значений в работах [1-3] и варьируется от 10 до 15 раз. Более подробные результаты и методика эксперимента будут представлены в докладе.

Выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук МК-3421.2019.8 (соглашение № 075-15-2019-309)

Литература

1. *Кузнецов, А.А. Щетка как интеллектуальный узел электродвигателя / О.Г. Морозов, А.А. Кузнецов, И.И. Нуреев и др. // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 1. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3525.*
2. *Morozov, O. G. Smart photonic carbon brush / Oleg G.Morozov, Artem A. Kuznetsov, Gennady A. Morozov, Ilnur I. Nureev, Airat Zh. Sakhabutdinov, Lenar M. Faskhutdinov, Vadim I. Artemev // Proc. SPIE 9807. – 2016. – Vol. 98070M*
3. *Сахабутдинов, А.Ж. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплек-сирования сенсорных сетей / Рин.Ш. Мисбахов, Руст.Ш. Мисбахов, А.Ж. Сахабутдинов и др. // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3. – URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4343*

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ИЗНОСА ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ШИНЫ

Губайдуллин Р.Р. [*], **Аглиуллин Т.А., Сахабутдинов А.Ж.**

КНИУТУ-КАИ, г. Казань
[*] *E-mail:* diablogrr@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16043

Тормозная система колесных транспортных средств является средством активной безопасности. В работах [1,2] приводятся зависимости, согласно которым эффективность торможения транспортных средств снижается с увлечением износа. В связи с этим встает проблема оценки величины износа шины. В данной работе для решения данного вопроса была предложена оптоэлектронная система контроля износа шины основанная на применении волоконных брэгговских решетках (ВБР). Согласно работам [3,4] предложенная система обладает следующими достоинствами: малые габариты и вес датчиков, устойчивость системы к электромагнитным и радиационным излучениям, потребление малого количества электроэнергии.

В качестве объекта исследования в данной работе была выбрана высота протектора шины, так как на территории Российской Федерации минимальная величина данного параметра для допуска на дороги общего пользования регламентирована и составляет для легковых автомобилей 1,6 мм, для грузовых автомобилей 1 мм, для автобусов 2 мм [5]. В качестве чувствительного элемента отражающая решетка Брэгга.

Конструкция измерительной система схожа с конструкциями систем представленных в [3,4]. Где источник излучения, устройства приема и обработки оптического сигнала с их блоками питания расположены в центре колеса для минимализации дисбаланса колеса при движении, а легкий чувствительный элемент расположен радиально в каркасе шины, что бы обеспечить прямо пропорциональную зависимость истирания шины и сокращения длины ВБР.

На рисунке 1а представлена оптоэлектронная схема опроса системы износа основанная на принципах радиофотонных измерений и предназначена для анализа отклика отражения ВБР. Широкополосный лазерный источник – 1 генерирует непрерывное лазерное излучение (диаграмма a), которое отражается от ВБР (диаграмма a). Циркулятор – 2 перенаправляет сигнал (диаграмма b) на оптоволоконный разветвитель – 4, который делит оптический сигнал на два – опорный и измерительный. В измерительном канале устанавливается фильтр – 5, представляющий собой ВБР с широкой прямоугольной формой спектра отражения (диаграмма c). Данный фильтр служит для отсечения из измерительного сигнала спектров отражения, полученные в момент, когда ВБР – 3 находится не в пяте контакта и на нее воздействуют лишь температура шины (диаграмма d). Данный шаг позволяет увидеть на фотоприемнике – 6 периоды возникновения скачков механического напряжения и оценить угол ρ трапециевидного скачка мощности электрического сигнала (рисунок 1 б). По периоду измерительная система оценивает частоту вращения колеса, а по углу ρ величину полосы пропускания измерительной ВБР и как следствие величину износа шины, так как решетки с длинной полосой пропускания будут придавать трапециевидную форму скачкам мощности из-за частичного прохождения отклика отражения измерительного ВБР находящегося вблизи границ фильтра. Электрический сигнал от фотоприемника – 6 попадает на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) – 7. В опорном канале, сигнал (диаграмма e) без изменения мощности попадает на опорный фотоприемник – 8 и предается в опорный АЦП – 9. Все дальнейшие расчеты ведутся не с абсолютным значением мощности светового потока, а с отношением мощностей в измерительных и опорных каналах. Соотношение мощностей оптического сигнала на фотоприемниках – 6 и 8 позволяет избавиться от недостатка, связанного с колебаниями мощности светового потока, возникающих в оптико-электронной системе.

В ходе работы над системой были произведены моделирования отклика измерительной ВБР решетки с начальной длинной 10 мм при износе шины от 0 до 5 мм, так как современные шины легковых автомобилей имеют высоту протектора порядка 6-8 мм. В качестве среды моделирования был использован пакет программ OptiGrating, полученные данные были объединены в среде Matlab и представлены на рисунке 1 в.

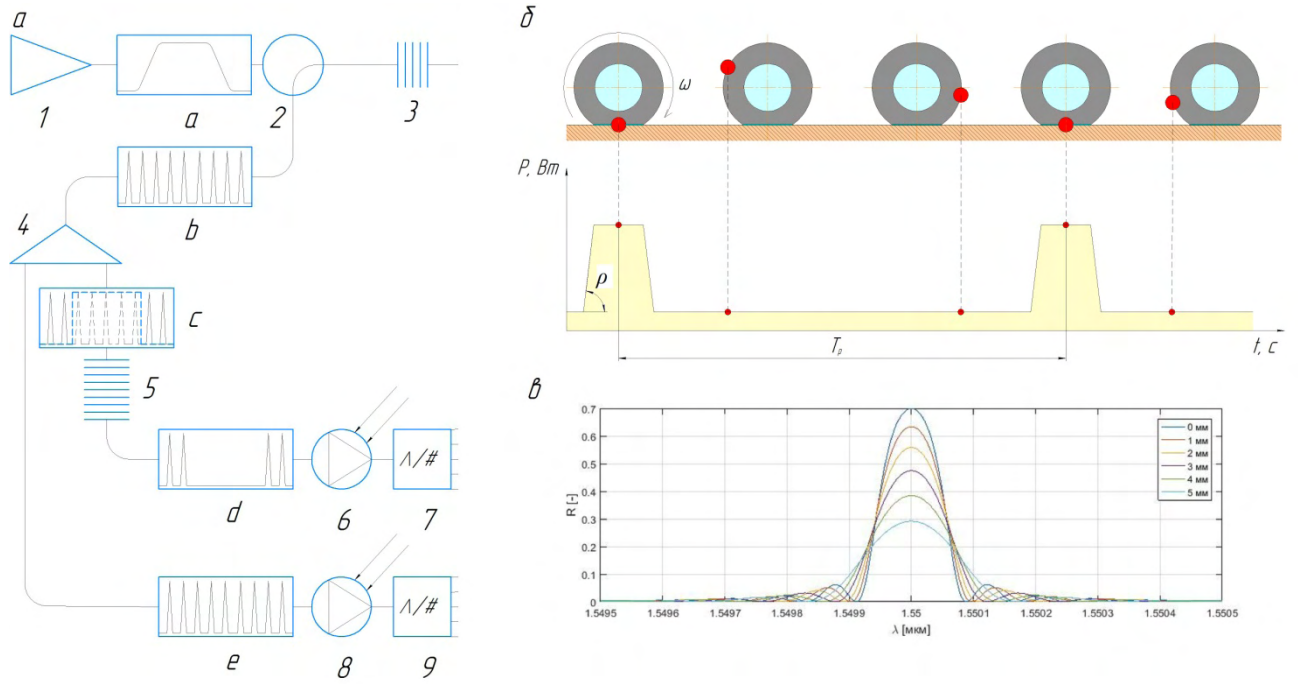


Рис. 1. а) оптоэлектронная схема опроса систем, где отображены отклики измерительной ВБР в разные периоды времени; б) схема возникновения скачков мощности на измерительном фотоприемнике вследствие вращения колеса; в) зависимость изменения отклика отражения измерительной ВБР от величины износа

Предложенная система демонстрирует возможности оценки величины износа шины и измерения частоты вращения колеса с помощью радиофотонных методов измерения. В работе была предложена оптоэлектронная схема измерительной системы. Данная работа нацелена внести вклад в развитие активных систем безопасности и средств контроля технического состояния транспортных средств.

Литература

1. *Марков А.С., Яньков О.С., Федотов А.И. Исследование влияния износа рисунка протектора шины на её реализованный коэффициент сцепления с плоской и цилиндрической опорной поверхностью// Материалы 99-й международной научно-технической конференции «БЕЗОПАСНОСТЬ КОЛЁСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ», – 2017, – с. 95-102*
2. *Марков А.С., Яньков О.С., Бойко А.В. Исследование по повторяемости результатов измерения тормозных сил на роликовом силовом стенде в зависимости от износа автомобильной шины // Материалы 99-й международной научно-технической конференции «БЕЗОПАСНОСТЬ КОЛЁСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ», – 2017, – с. 452-458*
3. *Gubaidullin R.R., Agliullin T.A., Morozov O.G. Microwave-Photonic Sensory Tire Control System Based on FBG // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications – Moscow, 2019*
4. *Agliullin T.A., Gubaidullin R.R., Morozov O.G. Tire Strain Measurement System Based on Addressed FBG-Structures // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications – Moscow, 2019*
5. *Приложение 1 ПДД РФ*

ИЗМЕРЕНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ В ШИРОКОПОЛОСНЫХ АНАЛОГОВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ РАДИОСИГНАЛОВ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ

Иванов С.И.[1], Лавров А.П.[1], Саенко И.И.[1], Звегинцев В.Н.[2], Подстригаев А.С.[2]

[1] *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. С.-Петербург*
[2] *АО «НИИ «Вектор», г. С.-Петербург*
[*] *E-mail:* lavrov_ap@spbstu.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16044

Перспективы построении современных радиоэлектронных систем различного назначения все чаще связывают с применением в них аналоговых волоконно-оптических (ВО) линий передачи (ВОЛП) УВЧ- и СВЧ-радиосигналов [1, 2]. В ряде систем, например, при построении сверхширокополосных (с мгновенной полосой до нескольких октав) диаграммоформирующих устройств для фазированных антенных решеток, реализующих принцип «true-time-delay», при построении аналоговых ВОЛП с увеличенным динамическим диапазоном за счет использования в них интегрально-оптических модуляторов с парафазным выходом и балансных фотоприемников, при передаче синхросигналов на пространственно разнесенные приемные модули в радиоинтерферометрах [1, 3-6], необходим тщательный контроль электрической длины (ЭД) различных участков (ветвей) ВОЛП с высокой точностью – до единиц градусов фазы – и в реальном масштабе времени. На рынке представлена специализированная аппаратура для измерения электрических длин ВО трактов – рефлектометры двух основных видов: а) импульсные рефлектометры OTDR (optical time domain reflectometry), б) частотные рефлектометры OFDR (optical frequency domain reflectometry). Но первые не обеспечивают требуемую точность (в доли миллиметра при работе в X-, Ka- диапазонах), а вторые весьма дороги. Заметим, что в радиоэлектронных системах ЭД важна применительно именно к СВЧ-сигналу, передаваемому по ВОЛП. Такая задача – измерение, контроль ЭД аналоговых ВОЛП на частотах СВЧ-сигнала – нами успешно решалась для разных ВО трактов, работающих как на прохождение [3, 4], так и на отражение (случай чирпированных бреговских решеток большой длины) [5].

Для измерения ЭД аналоговой ВОЛП, рассматриваемой нами как «гибридный» СВЧ четырехполюсник, содержащий внутри себя разнородные компоненты, в том числе и преобразователи «радио-оптика», «оптика-радио» и волноведущие тракты как радио, так и оптического диапазонов длин волн, нами используется векторный анализатор цепей (ВАЦ), позволяющий измерять *S*-параметры СВЧ-четырехполюсников – комплексные величины *S*11, *S*12, *S*21 и *S*22. Для решения нашей задачи важен параметр *S*21: $|S21(f)|$ – это АЧХ четырехполюсника, а $\arg[S21(f)]$ – его ФЧХ. По измеренной ФЧХ $\varphi(f)$ во всем рабочем (или интересующем) диапазоне частот Δf аналоговой ВОЛП определяется групповое время задержки Td: $T\text{d} = \Delta\varphi(f)/(\Delta f \cdot 360)$, и отсюда определяется ЭД линии $L\text{э} = c \cdot T\text{d}$, где c – скорость э.м. волн в свободном пространстве, а $\Delta\varphi$ – изменение фазы, в градусах. Такая оценка ЭД Lэ линии справедлива для аналоговых ВОЛП с $L\text{э} >> \lambda_{RF}$, где $\lambda_{RF} = c/f$. Заметим, что для расчета ЭД Lэ нужна развернутая фаза (unrapping phase) $\Delta\varphi(f)$, что выдвигает требование к ВАЦ на число используемых частотных точек Np в его измерительной «трассе», которое зависит от ЭД Lэ линии и полосы частот Δf. Реально по массиву экспериментально полученных отсчетов $[\varphi_n, f_n]$ мы выполняем аппроксимацию $\varphi_n(f_n)$ линейной функцией $\varphi(f) = A \cdot f + B$, и уже по найденному значению A рассчитываем Td и Lэ.

С применением ВАЦ мы выполнили измерения ЭД Lэ нескольких различных ВОЛП, формируемых на основе модулей OTS-2 Optiva (фирма Emcore): передающего модуля OTS-2T/3.5-.0518-27-10-FA и приемного модуля OTS-2R/3.5-.0518-10-FA. Эти два модуля образуют аналоговую ВОЛП с рабочим диапазоном частот по СВЧ-сигналу 0,1…18 ГГц и оптической несущей 1555,75 нм. Измерения ЭД выполнены для ВОЛП с разной длиной ВО тракта (и составом входящих в него компонент) между передатчиком и приемником, в частности: линия № 1, где ВО тракт – короткий патч-корд с физической длиной 729 мм; линия № 2, где ВО тракт – кабель с физической длиной около 100 м; линия № 3, где ВО тракт – кабель с физической длиной около 1000 м. Другие ВОЛП включали дополнительные элементы, например, волоконный стретчер FST-001-B (фирма General Photonics).

Для оценки точности измерений, реализуемых с применением ВАЦ, были выполнены несколько последовательных измерений ФЧХ одной и той же ВОЛП в неизменных условиях. Для ВОЛП с малой длиной (№ 1) были получены такие значения величины L1э (для трех измерений): L1э,1 = 12,115066 м, L1э,2 = 12,115067 м, L1э,3 = 12,115069 м. Как видно, разность ΔL1э составила 0,003 мм. Заметим, что большая ЭД этой линии (с коротким соединительным патч-кордом 729 мм) обусловлена большОй (и не контролируемой производителем Emcore) длиной используемых внутри модулей отрезков волокна, соединяющих друг с другом отдельные интегрально-оптические и волоконно-оптические компоненты в единое целое.

Измерения ЭД L2 линии №2 дали такие результаты: L2э,1 = 161,34781 м, L2э,2 = 161.34773 м, L2э,3 = 161.34767 м, и для них разность ΔL2э составила 0,14 мм. Для линии №3 получено значение L3э = 1490,467 м.

Возмущения (вариации) ЭД Lэ аналоговых ВОЛП вследствие изменений температуры и механических, в частности, акустических, воздействий приводят к изменениям временных задержек и, соответственно, фаз СВЧ-сигналов на выходе ВОЛП [1, 6]. Так, например, вариации рабочей температуры ВОЛП приводят к изменению времени распространения сигнала в стандартном одномодовом оптическом волокне типа SMF-28e в соответствии с коэффициентом 30 пс/км/°С [1, 7].

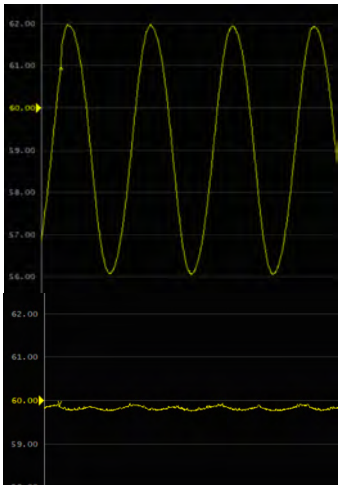


Рис. 1. Работа стретчера – компенсация внешних возмущений фазы СВЧ сигнала на выходе ВО

Для стабилизации ЭД Lэ аналоговых ВОЛП мы рассматриваем как перспективное применение волоконного стретчера типа FST-001-B, управляемого через пьезопривод электрическим сигналом.

Рис. 1 демонстрирует работу стретчера по компенсации возмущений, вносимых извне в линию с ЭД Lэ ≈ 40 м. Внешнее гармоническое воздействие осуществляется на частоте 1 Гц. Величина вносимых возмущений составляет около 6 градусов (по фазе, измерения на частоте f = 5 ГГц) – см. рис. вверху, а остаточные возмущения не превышают 0,2 градуса – см. рис. внизу; масштаб по вертикали на рисунках – 1 градус.

Отметим, что такого типа стретчер был успешно применен для реализации активно стабилизируемых ВОЛП, предназначенных для передачи СВЧ-синхросигналов из общего центра на гетеродины удаленных (расстояния – километры) СВЧ-приемников в уникальном многоантенном радиоинтерферометре миллиметрового диапазона длин волн ALMA [8].

Таким образом, на основании проведенных исследований мы констатируем полезность применения ВАЦ для измерения ЭД Lэ аналоговых ВО линий (с их сложной внутренней структурой) применительно к передаче по ним СВЧ-сигналов. Относительная точность измерений ЭД может достигать величины около 10^{-7}.

Литература

1. *1Урик В.Дж., МакКинни Дж.Д., Вильямс Л.Дж. Основы микроволновой фотоники, (М.: Техносфера, 2016)*
2. *Голов Н.А., и др., Успехи современной радиоэлектроники, № 3, 18-31 (2016)*
3. *Ivanov S.I., et al, Lecture Notes in Computer Science 9870, 670–679 (2016)*
4. *Volkov V.A., et al, J. of Physics Conf. Series 737, paper 012002 (6) (2016)*
5. *Ivanov S.I., et al, Proc. SPIE 10774, paper 107740W (2018)*
6. *Емельянов А.А., и др., Радиотехника, № 8, 121-126 (2017)*
7. *Zhang F., et al, Int. Topical Meeting on Microwave Photonics, 1-4 (2015)*
8. *Shillue B., et al, Proc. SPIE 8452, paper 845216 (2012)*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОИСКА С ВОСХОЖДЕНИЕМ К ВЕРШИНЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ЮСТИРОВКИ КАНАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА И ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА

Карнаушкин П.В.[1*], **Пономарев Р.С.**[2]

[1] *Пермская научно-производственная приборостроительная компания, г. Пермь*
[2] *Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь*
[*] *E-mail:* KarnaushkinPV@pnppk.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16045

Введение

Работа посвящена особенностям информационного обеспечения и алгоритмизации процесса сборки устройств на основе фотонных интегральных схем (ФИС). Разработка решений на базе ФИС включает ряд трудо-, науко- и капиталоемких задач, что ограничивает рентабельность производства и распространенность данных устройств. Одна из задач – оптическая стыковка ФИС с волоконными световодами (ВС), являющаяся ключевым этапом сборки ФИС. Оптическая стыковка включает юстировку волновода ФИС и ВС и фиксацию полученного соединения.

В данной работе показан метод автоматизации юстировки канального волновода ФИС и ВС по уровню оптического сигнала вдоль двух поступательных степеней свободы *y* и *z* с помощью метода поиска с восхождением к вершине (МПВВ). Для наглядности юстировка выполняется только с одной стороны волновода, в то время как для противоположной стороны юстировка не требуется.

На языке математики юстировка волновода ФИС и ВС по уровню оптического сигнала является задачей многомерной оптимизации. В качестве целевой функции выступает мощность оптического сигнала, выведенная из волновода ФИС. Целевая функция не задана аналитически и зависит от двух линейных координат *y* и *z*.

Хотя в литературе упоминаются разные методы [1, 2], в современных системах стыковки ФИС наиболее распространен метод покоординатного спуска – один из вариантов МПВВ [3]. Суть метода заключается в максимизации целевой функции сначала вдоль одной координаты, затем вдоль другой. Процесс повторяется итерационно, пока не будет достигнут максимум целевой функции. Распространенность метода обусловлена простотой реализации; хорошей сходимостью и быстрым поиском максимума целевой функции у пучков с гауссовым распределением. Недостатками являются: длительное время работы с эллиптическими пучками; плохая сходимость при наличии плато у пучков.

В данной работе предложена иная интерпретация МПВВ. В отличие от покоординатного спуска, максимизация целевой функции ведется сразу вдоль двух координат. Такой подход позволяет не тратить время на определение направления движения, улучшить сходимость и скорость юстировки эллиптических пучков, сделать метод более универсальным.

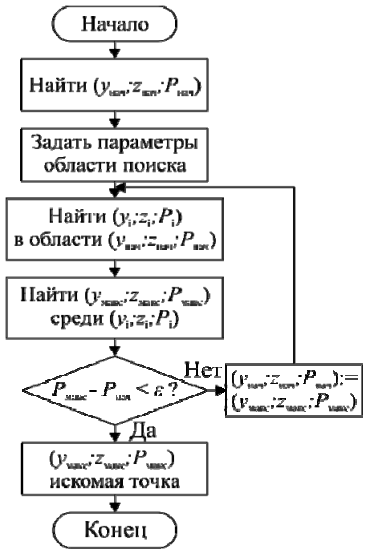


Рис. 1. Блок-схема метода поиска восхождением к вершине

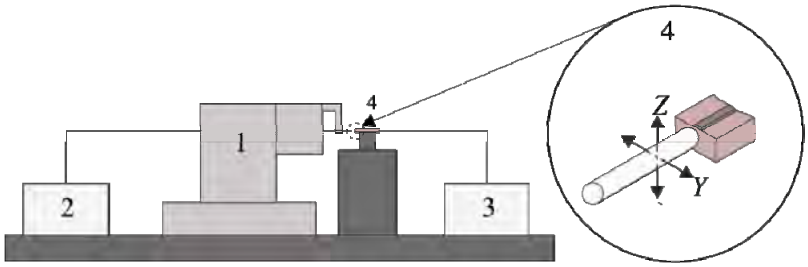
Метод поиска с восхождением к вершине

Согласно блок-схеме МПВВ (рис. 1), в начальной точке измеряется оптическая мощность. Далее вокруг начальной точки задается область поиска, где находится точка с максимальным значением оптической мощности $P_{макс}$. Если $P_{макс}$ превосходит $P_{нач}$ на некоторое значение ε, то вокруг точки ($y_{макс}$; $z_{макс}$; $P_{макс}$) выбирается новая область поиска и выполняется новая итерация. Если $P_{макс}$ меньше $P_{нач}$ на некоторое значение ε, то точка ($y_{макс}$; $z_{макс}$; $P_{макс}$) является искомым максимумом целевой функции.

Оборудование и эксперимент

Схема оборудования, на котором была реализована юстировка МПВВ, показана на рис. 2. Основными компонентами являлись: 1 – позиционер с шестью степенями свободы; 2 – измеритель оптической мощности, 3 – источник оптического излучения. Все эксперименты проводились с длиной волны 1.55 мкм при нормальных условиях. Были рассмотрены следующие ситуации:

юстировка двух ВС SMF 28e+ с диаметром поля моды (ДПМ) 10.4 мкм; юстировка ВС SMF 28e+ с диаметром поля моды (ДПМ) 10.4 мкм и канального волновода интегрально оптической схемы с ДПМ ~ 7 мкм; юстировка волоконной линзы с ДПМ ~3 мкм и канального волновода ФИС с ДПМ ~ 1×3 мкм. В роли перемещаемого объекта во всех ситуациях выступал ВС. Начальные положения ВС (y; z) располагались на окружности с радиусом 5 мкм с центром на оси волновода.



1 – позиционер с шестью степенями свободы, 2 – измеритель оптической мощности, 3 – источник оптического излучения с длиной волны 1.55 мкм, 4 – зона юстировки волоконного световода и волновода.

Рис. 2. Схема оборудования, на котором реализован метод поиска с восхождением к вершине

Результаты

Результаты представлены в Таблице 1. В ходе экспериментов для каждой ситуации юстировки были подобраны такие интервалы длины и ширины области поиска МПВВ, при которых ВС за минимальное количество итераций перемещался к центру волновода.

Таблица 1. Экспериментальные результаты

Ситуация юстировки	Кол-во итераций	Длина и ширина области поиска, мкм
ВС и ВС	от 2 до 5	от 1 до 2; от 1 до 2
ВС и волновод	от 3 до 6	от 0.7 до 1.5; от 0.7 до 1.5
Волоконная линза и волновод	от 4 до 7	от 0.2 до 0.7; от 0.2 до 0.5

Результаты показывают, что оптимальные размеры области поиска в 3–20 раз меньше, чем размеры ДПМ юстируемых объектов. Также несмотря на сокращение длины и ширины области поиска в ситуации с волоконной линзой и волноводом, среднее количество итераций возрастает. Такой эффект возникает из-за того, что погрешность перемещений позиционера в данном случае оказывает большее влияние, чем во время юстировки объектов с более высокими ДПМ.

Заключение

В работе представлен вариант МПВВ с максимизацией целевой функции одновременно вдоль двух координат. Экспериментально показано, что используемый метод позволяет за небольшое количество итераций проводить автоматическую юстировку волновода ФИС и ВС как с большими, так и с малыми ДПМ. Отмечено, что размеры оптимальной области поиска МПВВ составляют 5–30 % от ДПМ юстируемых объектов.

Литература

1. *Pham D.T., Castellani M. Proc. Instn. Mech. Engrs. 215, 1177-1189 (2001)*
2. *Mizukami M., Hirano M., Shinjo K. Opt. Eng. 40, 448-454 (2001)*
3. *Tang Z., Zhang R., Shi F.G. Optics Communications. 196, 173-180 (2001)*

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОТКРЫТЫХ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ ПЛАТФОРМ

Коган С.С.

Nokia Solutions and Networks (NSN)
E-mail: semen.kogan@nokia.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16046

К основным тенденциям в развитии систем телекоммуникаций относятся:

Сетевая оптимизация: конвергенция

- создание единой конвергентной транспортной сети для всех видов услуг и обеспечение программируемости операций и функций сквозь все уровни и домены транспортной сети.

Повышение эффективности: виртуализация

- абстрактное представление физических сетей с превращением их в многочисленные логические сетевые структуры, удобные как для разделения сети на слои (slicing) и домены, так и для масштабирования услуг и реализации ориентированных на нужды бизнеса операций.

Ускорение предоставления услуг: открытость

- открытость (open source code) и дезагрегация (disaggregation) транспортной сети, а также использование целевого программного обеспечения (purpose-built software) для упрощения модульного построение мультивендорной конвергентной сети и ускорения предоставления услуг.

Понятие открытость («openness») возникло вместе с возможностью оперативного создания оптических каналов на программно-определяемой волоконно-оптической транспортной сети. По мнению руководителя исследовательского отдела компании Nokia Bell Labs, занимающегося автоматизацией предоставления сетевых услуг конечным пользователям и программным приложениям, г-на Marina Thottan, - «Рост объемов взаимодействий поверх оптических сетей, представляемых как открытые логические структуры, ускорит развитие автоматизированного сквозного управления сетью. В результате, благодаря большей гибкости на программно-определяемом транспортном уровне, операторы смогут более эффективно развертывать новые сервисы поверх сетевой инфраструктуры и, как следствие, получать большую отдачу от своих капиталовложений».

Исторически сложилось так, что DWDM волоконно-оптические системы передачи имели определенные технологические ограничения из-за аналоговой природы используемой ими оптической среды. Эта особенность ВОСП была основным обоснованием необходимости использования для них вертикально интегрированных решений.

Традиционные вертикально интегрированные системы DWDM имеют следующие особенности:

- поставляется одним производителем оборудования и управляется системой управления сетью (NMS), предназначенной для оборудования данного производителя,
- включает в свой состав транспондеры / мукспондеры и групповой DWDM линейный тракт,
- групповой DWDM линейный тракт включает в свой состав фиксированные фильтры для мультиплексирования и демультиплексирования каналов WDM и/или селективные переключатели каналов по длинам волн оптического излучениях (WSS) для узлов с реконфигурируемыми оптическими мультиплексорами ввода/вывода каналов, оптические усилители, а также блоки с другой функциональностью, исполняющие, например, функцию оптического сервисного канала (OSC), оперативного контроля уровня оптической мощности в оптических каналах, контроля целостности оптического волокна на примыкающих к данному узлу оптических участках (оптический рефлектометр OTDR) и т.п.,
- IP Маршрутизация (уровень L3) не является частью транспортного уровня, а обеспечивается выделенными платформами, каждая из которых имеет свою собственную NMS,
- современные вертикально интегрированные пакетно-ориентированные DWDM ВОСП как правило имеют в своем составе кроме фотонного уровня также OTN (уровень L1) и/или пакетную коммутацию (уровень L2), реализуемую в соответствующих транспондерах / мукспондерах или на централизованных матрицах кросс-коммутации.

Традиционные вертикально интегрированные транспортные сети с фиксированной конфигурацией отличаются тем, что

- конфигурации оптических каналов не изменяются или изменяются достаточно редко,
- реализуются гарантированные установки с большими технологическими запасами,
- сроки предоставления сервиса исчисляются неделями или даже месяцами,
- вся оптическая транспортная система построена на оборудовании одного производителя.

В открытых DWDM ВОСП с дезагрегацией, интегрированные системы разделены на отдельные функциональные блоки, что стимулирует оператора к выбору лучших в своем классе решений для этих функциональных блоков.

Открытые дезагрегированные системы DWDM имеют следующие особенности:

- традиционная интегрированная система WDM разделяется на отдельные открытые платформы линейного тракта (Optical Line System, OLS) и транспондеров / мукспондеров,
- группирование функциональных блоков производится на уровнях оконечных устройств (транспондеров /мукспондеров) с оптическими DWDM интерфейсами, транспортной коммутации (OTN и/или пакетной) с оптическими DWDM интерфейсами, а также на уровне открытого оптического линейного тракта (OLS),
- группирование функциональных блоков зависит от уровня инноваций, циклов амортизации и обновления оборудование и ПО, а также от требований к пропускной способности и масштабируемости сети.

Открытые дезагрегированные транспортные сети с гибкой, программируемой, конфигурацией отличаются тем, что возможны

- непрерывные изменения и подстройки (адаптация) ее конфигурации, включая маршруты организуемых оптических каналов и т.п.,
- установка характеристик системы, требуемые в данный момент,
- быстрое предоставление соединений (каналов) на фотонном (оптические каналы) или электрическом (OTN и/или пакетный) уровнях по запросу пользователей или прикладных приложений,
- мультивендорные сетевые конфигурации.

Компания NOKIA совместно с рядом других производителей оборудования, активно участвует в международных тестах, проводимых в рамках проекта «Open Disaggregated Transport Network» (ODTN), реализуемого консорциумом Open Networking Foundation (ONF). Решения копании NOKIA базируются на наборе открытых оптических транспондеров / мукспондеров (Open Photonic OTs) с функционалом OpenAgent, необходимым для управления по интерфейсу Netconf в соответствии с моделями Openconfig YANG. Открытые конфигурации реализованы на различных типах оптических транспондеров / мукспондеров, устанавливаемых в полки оборудования NOKIA 1830PSS.

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Конышев В.А.[1], Наний О.Е.[1,2], Новиков А.Г.[1], Трещиков В.Н.[1,3], Убайдуллаев Р.Р.[1,*]

[1] *ООО «Т8 НТЦ», г. Москва*
[2] *МГУ им. М. В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва*
[3] *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва*
[*] *E-mail: rru@t8.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16047

Проектирование современных многоканальных волоконно-оптических линий связи с плотным волновым мультиплексированием (DWDM ВОЛС) требует расчета оптической мощности, вводимой в каждый пролет. Такая процедура называется “оптимизацией DWDM-линии”. Решение этой задачи лежит в области достаточно больших канальных мощностей, когда необходимо принимать во внимание нелинейный характер распространения излучения по волокну, проявляющийся прежде всего через эффект Керра. В инженерной практике для количественного описания нелинейности используется набор параметров нелинейности η, которые рассчитываются как экспериментально, так путем численного моделирования, когда решаются уравнения Максвелла для распространяющегося по волокну излучения, так и путем решения нелинейной системы уравнений Манакова [1]. Расчет параметров нелинейности происходит на подготовительном этапе. Этап проектирования базируется на заранее установленных значениях параметров η.

В настоящее время при проектировании применяются два метода оптимизации DWDM-линий: на основе максимума запаса по оптическому отношению сигнал-шум (OSNR) и на основе минимума BER [2]. Ранее авторами был предложен метод по оптимизации на основе гарантированного запаса OSNR [3]. Эти методы предполагают линейный характер накопления нелинейного шума от разных пролетов.

В докладе анализируется возможность применения данных методов при использовании более точной модели накопления нелинейного оптического отношения сигнал-шум ($OSNR_{NL}$), когда нелинейные OSNR разных пролетов складывается нелинейно по закону:

$$\frac{1}{OSNR_{NL}} = \left[\sum_{n=1}^{N} (\eta_n P_n^2)^{\frac{1}{1+\varepsilon}} \right]^{1+\varepsilon},$$

где η_n и P_n – коэффициент нелинейности и вводимая в пролет мощность для n-го пролета, а ε – постоянная (для линии без компенсаторов дисперсии $\varepsilon = 0.2$, в линейном приближении накопления нелинейного шума $\varepsilon = 0$).

Исследована возможность использования принципа LOGO (локальная оптимизация – глобальная оптимизация) при оптимизацией DWDM-линий разными методами при ненулевом значении ε.

Литература

1. *Agrawal G.P., Nonlinear fiber optics. Fifth edition ed. 2013: Elsevier*
2. *Pastorelli R., et al., Network planning strategies for next-generation flexible optical networks. Journal of Optical Communications and Networking, 2015. 7(3): p. A511-A525.Mansuripur, M., Field, Force, Energy and Momentum in Classical Electrodynamics (Revised Edition). 2017: Bentham Science Publishers*
3. *Konyshev V., et al., New method to obtain optimum performance for 100Gb/s multi-span fiber optic lines. Optics communications, 2015. 355: p. 279-284*

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ МУЛЬТИГИГАБИТНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО КВАРЦЕВЫМ ВОЛОКОННЫМ СВЕТОВОДАМ С ЭКСТРЕМАЛЬНО УВЕЛИЧЕННЫМ ДИАМЕТРОМ СЕРДЦЕВИНЫ

Бурдин А.В.[1,2,3*], **Бурдин В.А.**[2], **Жуков А.Е.**[2]

[1] *ПАО ЦНПО "КАСКАД", г. Москва*
[2] *Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), г. Самара*
[3] *ООО "ОптоФайбер Лаб", г. Москва, ИЦ Сколково*
[*] *E-mail: bourdine@yandex.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16048

В работе представлены результаты моделирования процесса распространения сигналов волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) стандарта IEEE 802.3ba спецификации 10GBase-LX в нерегулярных кварцевых многомодовых оптических волокнах (ММ ОВ) с экстремально увеличенным до 100 мкм диаметром сердцевины. Для этой цели использовалась ранее разработанная модель кусочно-регулярной волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП), функционирующей в маломодовом режиме [1], адаптированной на рассматриваемый случай. Модель базируется на кусочно-регулярном представлении и использует общий подход метода расщепления по физическим процессам [2].

На первом этапе рассматривались кварцевые нерегулярные ММ ОВ, градиентный профиль показателя преломления которых задавался в соответствие с протоколами измерения профилей ММ ОВ 50/125 кат. OM2+/OM3 [3], но масштабированный на искомый диаметр сердцевины 100 мкм. Нерегулярная структура ОВ была представлена в виде флуктуаций диаметра сердцевины, которые задавались непосредственно из протокола датчика контроля внешнего диаметра ОВ, измеряемого в процессе вытяжки строительной длины ММ ОВ 50/125 с разрешающей способностью Δz=8 м [4]. В свою очередь, согласно [1], микро- и макро-изгибы ОВ, а также кручение и тяжение световода, которые неизбежно возникают на практике при инсталляции оптического кабеля и являются дополнительными факторами взаимодействия и смешения модовых компонентов оптического сигнала, представлены в данной модели в виде стыков регулярных участков линии, выполненные с некоторым малым угловым рассогласованием. В данном случае использовался нормальный закон распределения случайной величины, при этом математическое ожидание было выбрано равным 3.0°, а дисперсии – 0.5°.

С помощью указанной модели кусочно-регулярной многомодовой ВОЛП, функционирующей в маломодовом режиме, был проведен расчет динамики оптического импульса гауссовой формы длительностью τ_{05}=90.91 пс ВОСП 10GBase-LX (λ=1310 нм, скорость 10 Гбит/с), распространяющегося по исследуемому ОВ общей протяженностью 2 км. Исследовался «наихудший вариант» реализации ввода сигнала с выхода лазерного диода (ЛД) передающего модуля ВОСП в торец ОВ линии – без применения каких-либо дополнительных устройств согласования или согласующих волоконных световодов, а непосредственно через типовой волоконно-оптический адаптер (проходную оптическую розетку) на корпусе трансивера / патч-панели, которая в данном случае моделируется как выполненное с угловым рассогласованием θ=4.20° [5] соединение между упомянутым одномодовым ОВ рек. ITU-T G.652, пигтелирующим ЛД, и ОВ линии. Результаты расчета динамики распространения оптического импульса ВОСП 10GBase-LX по исследуемому ОВ при указанных условиях ввода в виде 3D-диаграммы представлены на рис. 1(а). На следующем этапе рассматривались кварцевые нерегулярные многомодовые ОВ со специализированной, ранее полученной [6], формой градиентного профиля показателя преломления, оптимизированной для совместной работы с когерентными источниками оптического излучения. Данный профиль обеспечивает снижение ДМЗ до 256 пс/км на оптической несущей λ=1310 нм, при этом указанный параметр не превышает 380 пс/км во всем «O»-диапазоне длин волн. Результаты расчета динамики распространения оптического импульса ВОСП 10GBase-LX по исследуемому ОВ при указанных условиях ввода в виде 3D-диаграммы представлены на рис. 1 (г), соответственно.

Далее для оценки эффективности применения рассматриваемых 100-мкм ОВ при совместной работе с ВОСП 10GBase-LX был проведен расчет огибающей глаз-диаграммы с последующей оценкой Q-фактора/*BER*. Для этой цели использовалась простая приближенная методика, разработанная непосредственно коллективом авторов ратифицированного стандарта IEEE 802.3z, которая подробно изложена в [7]. В качестве исходных данных использовались спецификации коммерческих трансиверов Cisco SFP-10G-LR-S [8] (типовой бюджет мощности 6.2 дБ). Результаты

расчета для описанных выше исследуемых многомодовых ОВ с диаметром сердцевины 100 мкм – "опорного" и с оптимизированным профилем показателя преломления представлены на рис. 1(б), (в) и (д), (е), соответственно.

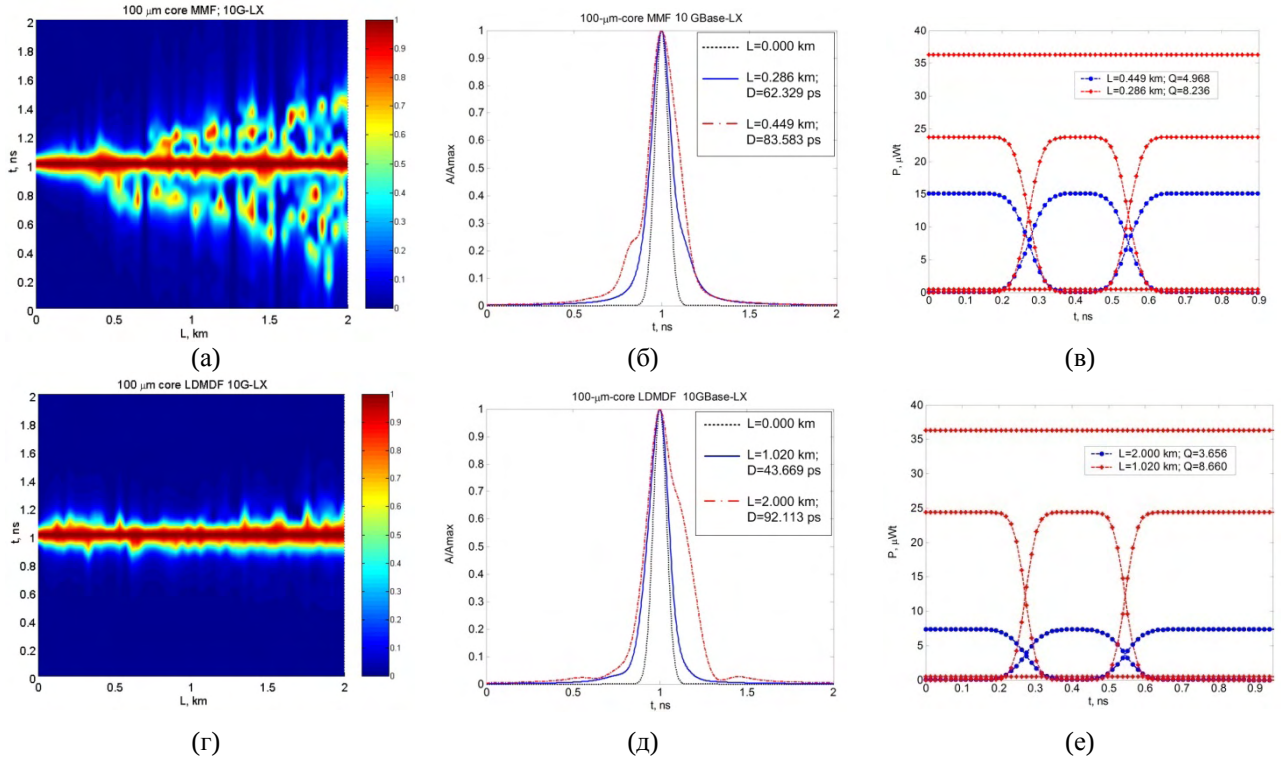


Рис. 1. Результаты моделирования распространения оптического импульса системы 10GBase-LX (B=10 Гбит/с, λ=1310 нм), распространяющегося по ОВ с диаметром сердцевины 100 мкм, типовым градиентным ((а)...(в)) и оптимизированным профилем ((г)...(е)) показателя преломления: (а), (г) – 3D-диаграмма; (б), (д) – форма импульса на заданном расстоянии; (в), (е) – огибающие глаз диаграмм

Так, на выходе 0.449 км линии с "опорным" ОВ импульс сохраняет свою огибающую, однако при этом дисперсия сигнала достигает 83.58 пс что приводит к неприемлемо низкому, с точки зрения нормы $BER=10^{-12}$ [9], значения Q-фактора Q=4.97 при искомом номинальном $Q_{ном}$ = 7.04 [7, 9]. Поэтому на следующем этапе был сделан повторный перерасчет огибающей глаз-диаграммы, Q-фактора и BER для уменьшенной протяженности ОВ 100/125 с целью подбора порогового значения этого параметра. В результате искомое значение Q-фактора для "опорного" ОВ достигается на дистанциях до 0.286 км: в этом случае дисперсия составляет 63.33 пс, а Q-фактор – 8.236. Аналогичным образом для ОВ с оптимизированным профилем показателя преломления, на выходе 2 км линии дисперсия сигнала достигает 92.11 пс что также приводит к неприемлемо низкому, с точки зрения нормы $BER=10^{-12}$ [7, 9], значения Q-фактора Q=3.66. Согласно полученным результатам, канал передачи данных со скоростью 10 Гбит/с может быть организован путем совместного использования типового активного оборудования ВОСП 10GBase-LX и исследуемого протяженностью до 1 км без специализированных устройств согласования «ЛД – ОВ», при этом обеспечивается искомое номинальное значение коэффициента ошибок $BER = 10^{-12}$: дисперсия составляет 43.67 пс, в то время как значение Q-фактора превышает искомое номинальное и достигает Q=8.66. Таким образом, эффективная модовая полоса пропускания исследуемого ОВ с оптимизированным профилем показателя преломления, несмотря на экстремально увеличенный диаметр сердцевины, в маломодовом режиме составляет, согласно результатам расчетов, не менее 10000 МГц·км.

Литература

1. *Bourdine A.V., Advances in Optical Technologies 2013, 469389-1 – 469389-18 (2013)*
2. *Агравал Г., Нелинейная волоконная оптика. М. :Мир (1996)*
3. *Бурдин А.В. и др., Инфокоммуникационные технологии, 2, 22 – 27 (2010)*
4. *Demidov V.V., et al., Proc. of SPIE 10342, 103420X-1 – 103420X (2017)*
5. *Raddatz L., et al., J. Lightwave Technology 16, 324 – 331 (1998)*
6. *Zhukov A.E., et al., Procedia Engineering 201, 105 – 106 (2017)*
7. *Cunningham D., et. al., IEEE 802.3z Task Force. Presentation materials. January 1997 meeting (1997)*
8. *Cisco GBase SFP+ Modules. Data Sheet. Cisco Public Information (2012)*
9. *ITU-T Rec.G.957 (06/99) (1999)*

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКНА НА МАКСИМАЛЬНУЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Старых Д.Д.[1,2*], Самоделкин Л.А.[1,3], Наний О.Е.[1,2,3], Шихалиев И.И.[1], Трещиков В.Н.[1]

[1] *ООО Т8 НТЦ, г. Москва*
[2] *Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный*
[3] *Московский государственный университет имени Ломоносова, г. Москва*
[*] *E-mail:* starykh@phystech.edu

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16049

Для поддержания постоянного роста скорости передачи данных в магистральных волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) требуется применение все более сложных форматов модуляции. Однако при переходе от формата модуляции DP-QPSK к более многоуровневым форматам 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM существенно возрастают требования к качеству оптического сигнала, следовательно максимальная протяженность ВОЛС сокращается. Для увеличения максимальной дальности передачи применяются распределенные усилители на эффекте вынужденного комбинационного (рамановского) рассеяния и эрбиевые усилители с удаленной накачкой (ROPA) [1,2], а также специализированные типы волокон, имеющие низкие погонные потери, высокие рамановские коэффициенты и низкую нелинейность. Однако в реальных оптических волокнах улучшение одной характеристики, как правило, приводит ухудшению других параметров: уменьшение потерь приводит к уменьшению рамановских коэффициентов, а увеличение рамановских коэффициентов к росту нелинейности.

В докладе приведены сравнительные результаты экспериментального исследования и численного моделирования влияния параметров волокон на максимальную дальность передачи оптического сигнала. Исследованы три типа волокна: стандартное одномодовое волокно (SSMF), волокно с пониженными потерями (ULL) и волокно с пониженными потерями и увеличенным диаметром основной моды (TXF). С помощью метода дополнительных потерь измерены спектры пропускания волокон в диапазоне 1300 нм – 1700 нм. По спектру усиления слабого сигнала и спектру усиленного спонтанного рамановского рассеяния рассчитаны рамановские коэффициенты. Для оптического сигнала с модуляцией DP-QPSK исследовано влияние типов волокна на нелинейные искажения сигнала, при этом нелинейные искажения рассматривались как аддитивный гауссов шум [3,4]. На основе полученных данных было проведено моделирование ВОЛС построенных на перечисленных типах волокон.

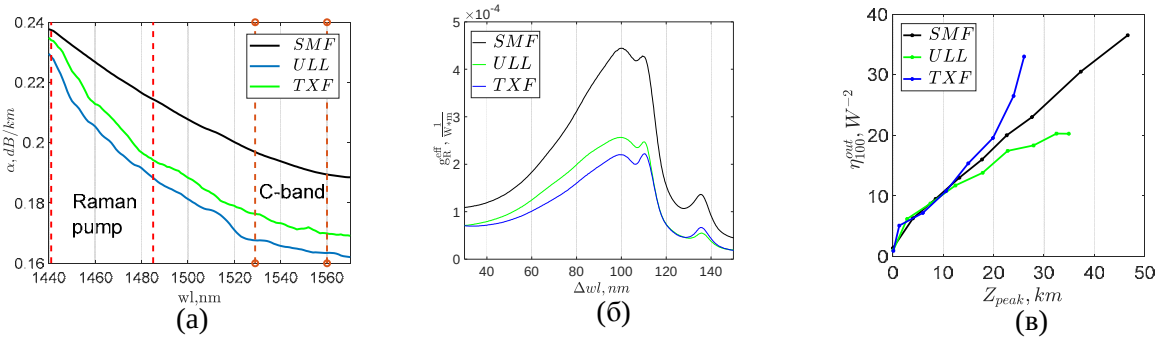


Рисунок 1 Спектр пропускания оптических волокон (а), спектр эффективных рамановских коэффициентов (б), зависимость нелинейного коэффициента от положения максимума канальной мощности в волокне (в)

Литература

1. *Gainov V. et al., Opt. Express, 22, 2238, (2014)*
2. *Chang D. et al., Asia Communications and Photonics Conference, AF4B.4, (2014)*
3. *Poggiolini P. et al., J. Light. Technol., 32, 4. 694–721 (2014)*
4. *Starykh D.D. et al., Quantum Electron,18,8,767-772, (2018)*

МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Сидельников О.С.[1*], Редюк А.А.[1,2], Стилианос С.[3], Федорук М.П.[1,2]

[1] *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*
[2] *Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск*
[3] *Институт фотонных технологий, университет Астона, г. Бирмингем, Великобритания*
[*] *E-mail:* o.s.sidelnikov@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16050

Нелинейные эффекты являются одним из основных факторов, ограничивающих пропускную способность современных волоконно-оптических линий связи. Эксплуатация современных систем связи с более плотным использованием полосы пропускания предполагает увеличение общей мощности сигнала в волокне, что приводит к растущему воздействию нелинейных эффектов передачи [1]. Работа оптических систем связи в таких нелинейных режимах сильно отличается от обычного линейного режима и требует разработки новых подходов и методов для обработки сигналов с высокой мощностью. С недавнего времени машинное обучение стало активно применяться в области волоконно-оптических линий связи [2-4]. Методы машинного обучения предлагают мощные статистические инструменты для разработки адаптивных эквалайзеров, способных компенсировать нелинейные эффекты передачи.

В данной работе схема компенсации нелинейных искажений на основе динамических нейронных сетей, предложенная в [3], расширяется на случай систем связи со спектральным уплотнением каналов (WDM). Разработанная схема, использующая символы со всех частотных каналов на входном слое нейронной сети, сравнивается с линейным компенсатором и с предыдущей реализацией схемы, использующей символы только с одного канала.

В работе рассматривается система передачи данных, схематически изображенная на Рис. 1 (а). Линия связи состоит из передатчика, 20 пролетов стандартного одномодового волокна по 100 км каждый, эрбиевых оптических усилителей после каждого пролета и приемника. На передатчике формируются 16-QAM сигналы с символьной скоростью R_s = 32 Гбод. Для придания формы импульсам используется фильтр с характеристикой типа приподнятый косинус с коэффициентом сглаживания 0.01. Исследуется система передачи данных с 3 частотными каналам с межканальным интервалом равным символьной скорости. В качестве центральной длины волны излучаемой полосы сигнала используется = 1550 нм. Шум, вызванный EDFA-усилителем с NF = 4.5 дБ, добавляется к оптическому сигналу после каждого пролёта.

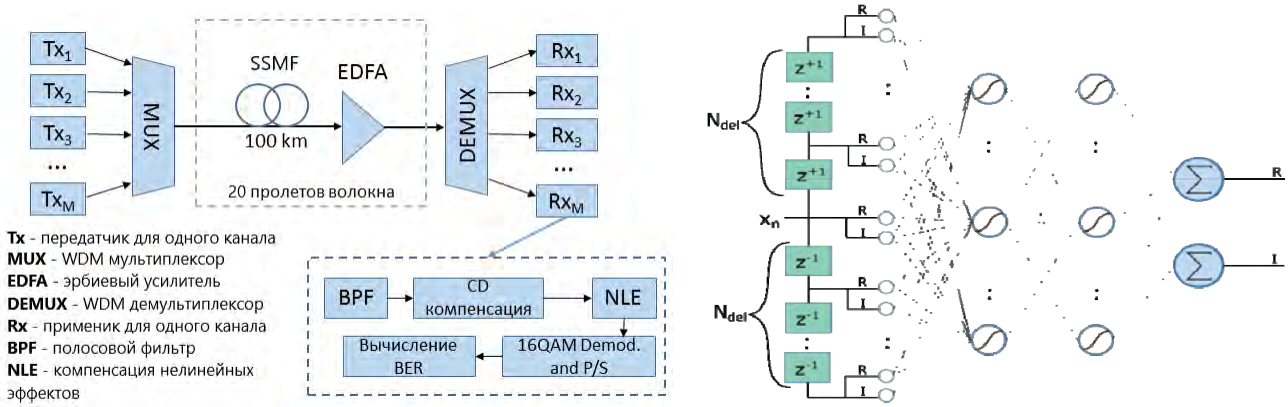


Рис. 1. (а) Схема системы передачи данных и (б) архитектура нейронной сети

В приемнике выполняются идеальная компенсация хроматической дисперсии и демультиплексирование каналов. Для компенсации нелинейных искажений используется одна из схем, описанных выше. Различные системы передачи данных сравниваются между собой на основе коэффициента битовых ошибок.

На Рис 1 (б) показана архитектура нейронной сети, используемая в работе. Число нейронов для каждого канала на входном слое равно 2 (2 N_{del} + 1), где N_{del} = 10 - количество блоков задержки, используемых в нейронной сети для учета эффекта памяти канала. Сеть также состоит из двух скрытых слоев по 64 нейрона каждый и выходного слоя с двумя нейронами, соответствующими действительной и мнимой части выходного символа. В качестве функции активации на скрытых слоях использовалась сигмоида, в то время как на выходном слое использовалась линейная передаточная функция. Для обучения использовался алгоритм обратного распространения Adam. Обученная нейронная сеть использовалась для распознавания принятого символа и предсказания символа, отправленного с передатчика.

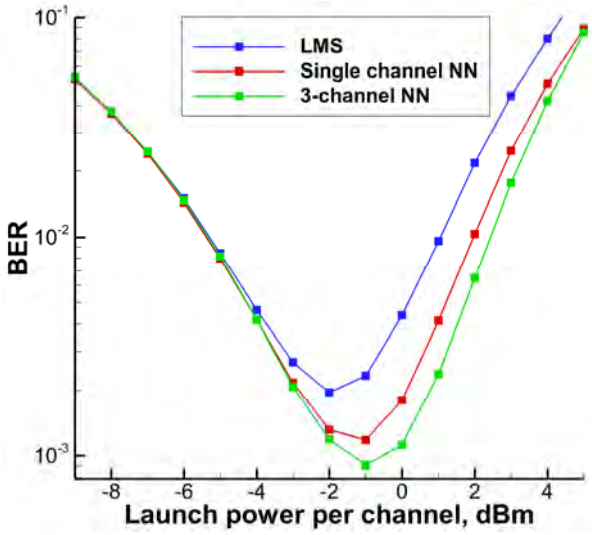


Рис. 2. Зависимость BER от начальной мощности сигнала для различных схем компенсации нелинейных искажений

В работе проведено сравнение схемы на основе динамических нейронных сетей, использующей для предсказания одного символа информацию со всех частотных каналов, с линейным компенсатором и с предыдущей версией схемы, использующей символы только с одного канала, предложенной в [3]. На Рис. 2 представлена зависимость коэффициента битовых ошибок от мощности начального сигнала для различных схем компенсации нелинейных искажений. Синим цветом обозначена линейная схема компенсации, которая восстанавливает только фазу сигнала. Красный цвет соответствует нейронной сети, в которой для предсказания символа на входе используются только символы с соответствующего ему канала. Зеленным цветом обозначен случай динамической нейронной сети, которая использует информацию со всех каналов. Как видно из данного рисунка, схемы, основанные на динамических нейронных сетях, превосходят линейный компенсатор. Кроме того, нейронная сеть, которая для предсказания переданного символа использует информацию со всех спектральных каналов, показывает лучший коэффициент битовых ошибок по сравнению с нейронной сетью, использующей на входе только символы с одного канала. Это можно объяснить тем, что символы с соседних частотных каналов позволяют такой схеме компенсировать, в том числе, фазовую кросс-модуляцию и эффекты четырехволнового смешения, что положительно сказывается на качестве восстановления сигнала.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-72-30006).

Литература

1. *Agrawal, G. P. Nonlinear Fiber Optics (Fifth Edition), Boston: Academic Press, 2013, 648 p.*
2. *Jarajeh M. et al., IEEE Phot. Lett. 27, 387-390 (2015)*
3. *Sidelnikov O., Redyuk A., Sygletos S., Opt. Express 26, 32765 – 32776 (2018)*
4. *Giacoumidis E., et al, Opt. Lett. 40, 5113-5116 (2015)*

КОМПЕНСАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА С ПОНИЖЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ

Аверьянов Е.А.[1*], **Редюк А.А.**[2,1], **Сидельников О.С.**[1], **Федорук М.П.**[1,2]

[1] *Новосибирский государственный университет*
[2] *Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск*
[*] *E-mail:* euav@ya.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16051

Нелинейные искажения сигнала создают существенные ограничения для дальнейшего развития волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), работающих на больших скоростях передачи информации. Чтобы снизить влияние этого явления, был предложен ряд методов, таких как метод обратного распространения [1] (DBP), методы, основанные на функциональных рядах Вольтерра [2], пред- и постобработка сигнала, основанная на теории возмущений [3, 4], нейронные сети [5] и др. Некоторые из них, например, DBP, являются эффективным методом для компенсации нелинейности и рассматриваются как ориентир для оценки эффективности других методов. Однако, существует обратная зависимость между улучшением показателей качества сигнала и вычислительной сложностью алгоритма. В настоящее время любая практическая реализация упомянутых методов сталкивается с рядом технических трудностей. В то же время, применение методов компенсации в режиме реального времени в перспективе может быть достигнуто с помощью методов машинного обучения (ML). Кроме того, параметры алгоритмов компенсации на основе ML могут быть легко обучены заново при необходимости, что делает их пригодными для динамических систем передачи. В работе [6] мы предложили метод на основе анализа возмущений первого порядка уравнений Манакова и машинного обучения для компенсации нелинейности в WDM системах, где вместо трудоёмкого численного интегрирования мы использовали выбросоустойчивые методы регрессии для вычисления коэффициентов возмущения. В данной работе мы пересмотрели эту концепцию и предлагаем модифицированный подход постобработки сигнала (PPE). Теоретическим обоснованием предлагаемого подхода является анализ возмущений *обратной* задачи для уравнений Манакова. Разработанный метод способен компенсировать как детерминированную нелинейность вследствие взаимодействия сигнал-сигнал, так и стохастические нелинейные взаимодействия типа сигнал-шум.

Анализ возмущений первого порядка уравнений Манакова даёт аналитические выражения зависимости принятых символов от переданных с помощью коэффициентов возмущений, для определения которых могут быть применены методы ML к обучающему набору передаваемых и принимаемых символов (этап обучения). Однако в данном случае при использовании модели на стороне приёмника для компенсации нелинейности (этап тестирования) необходимо заранее знать переданные символы или аппроксимировать их принятыми символами [3, 4, 6]. В данной работе, выполнив анализ возмущений обратной задачи, мы получили альтернативный подход, позволяющий выражать отправленные символы через принятые напрямую без использования аппроксимаций.

Для оценки эффективности предложенного метода было выполнено моделирование трёхканальной передачи 16QAM сигнала с двумя поляризациями на 2000 км. В качестве формы импульсов использовалась форма RRC (root raised cosine) с коэффициентом сглаживания 0,1 на символьной скорости 32 ГБод и межканальным расстоянием 37,5 ГГц. Число передаваемых символов для обучения и тестирования для каждой поляризации составляло 2^{16}. При моделировании использовались точечные усилители с длиной пролёта 100 км и коэффициентом шума 4,5 дБ. На приёмнике выполнялось демультиплексирование, компенсация хроматической дисперсии, взятие отсчётов с согласованным фильтром и компенсация нелинейных искажений. Предполагалось идеальное восстановление фазы несущей частоты. Численное моделирование проводилось с помощью симметричной схемы метода Фурье расщепления по физическим процессам второго порядка точности с 16 отсчётами на символ.

Для оценки эффективности предложенного метода выполнено сравнение с ранее предложенной схемой [6], методом CDC, который выполняет линейную фильтрацию принятого сигнала, и с методом DBP для одного канала с различным числом шагов на пролёт и 2 отсчётами на символ. На Рис. 1 изображён коэффициент ошибки BER центрального канала как функция канальной мощности сигнала для различных схем компенсации нелинейных искажений без каких-либо ограничений вычислительной сложности. Можно отметить, что предлагаемый метод обеспечивает

эффективность между уровнями DBP 1 (1 шаг на пролёт) и DBP 2, превосходя производительность линейного эквалайзера CDC и ранее разработанного метода на 47% и 18% соответственно.

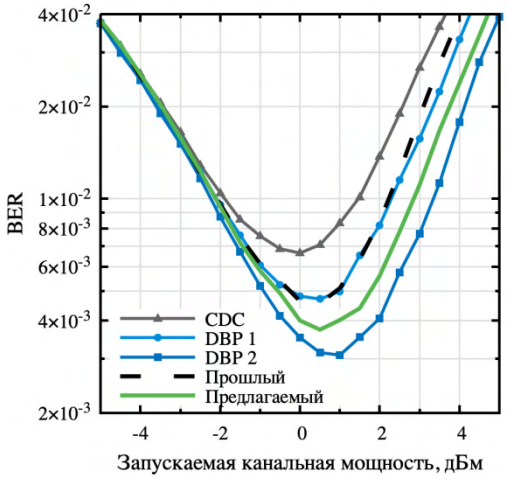


Рис. 1. Сравнение методов компенсации

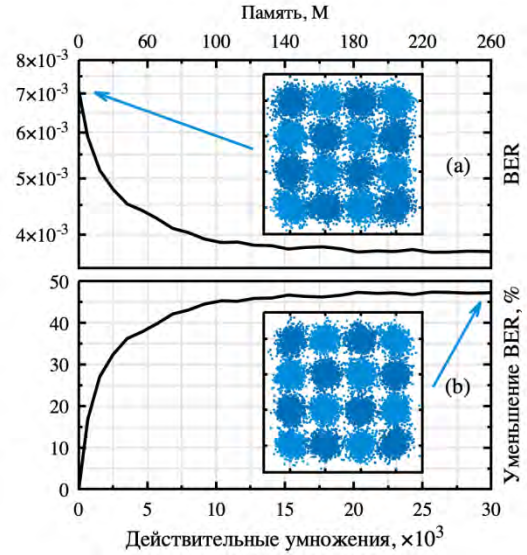


Рис. 2. (a) Минимальный достигнутый BER и (b) уменьшение BER в зависимости от затраченного числа действительных умножений (нижняя ось) и параметра памяти (верхняя ось)

Чтобы уменьшить вычислительную сложность предложенного метода, мы использовали ряд техник, направленных на уменьшение количества требуемых умножений для восстановления одного символа. Среди них были: тривиальное выделение общих множителей из выражений для возмущений, отбор ограниченного числа слагаемых по степени их важности для корректной оценки возмущений, квантизация коэффициентов возмущений алгоритмами кластеризации и применение циклического буфера для хранения промежуточных результатов вычислений для компенсации текущего символа, которые могут быть использованы для компенсации следующего. Выполняя описанные выше приёмы, мы существенно уменьшили необходимое для компенсации количество коэффициентов возмущений и необходимое количество умножений на один символ. На Рис. 2 показано максимально достигнутое улучшение BER для рассматриваемой ВОЛС с точки зрения вычислительной сложности. Можно видеть, что сложность может быть уменьшена до 2500 комплексных (или 10000 действительных) умножений на один символ без потери эффективности метода. Уменьшение BER на 30% достигается за 2000 действительных умножений.

В данной работе мы заново рассмотрели основанную на возмущениях концепцию компенсации нелинейных искажений, возникающих в оптоволокне, и предложили модифицированный алгоритм с пониженной сложностью реализации. Предложенный метод более эффективно справляется со стохастическими нелинейными взаимодействиями между сигналом и шумом. Выполнено сравнение эффективности предложенного метода с линейным восстановлением фазы и методом обратного распространения. В случае многоканальной передачи показано улучшение BER на 47% и 21% по сравнению с линейным эквалайзером CDC и идеальным одношаговым одноканальным DBP.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-72-30006).

Литература

1. *Ip E., J. Lightwave Technology 28, 939-951 (2010)*
2. *Liu L., et al, J. Lightwave Technology 30, 310-316 (2012)*
3. *Oyama T., et al, Opt. Express 24, 30433- 30443 (2016)*
4. *Sorokina M., Sygletos S., Turitsyn S., Opt. Express 24, 30433- 30443 (2016)*
5. *Sidelnikov O., Redyuk A., Sygletos S., Opt. Express 26, 32765-32776 (2018)*
6. *Averyanov E., et al., ECOC (2018)*

МАЛОМОДОВАЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ СВЯЗИ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ИСКАЖЕНИЙ НА ЛИНЕЙНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Бурдин В.А.*, Бурдин А.В., Волков К.А., Еремчук Е.Ю.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара
** E-mail:* burdin@psati.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16052

К настоящему времени стандартные одномодовые оптические волокна, на которых построены современные сети связи, уже практически приблизились к пределу своих возможностей по увеличению пропускной способности, который определяется «нелинейным пределом Шеннона» [1]. В качестве одного из вариантов решения проблемы преодоления данного предела предполагается использовать системы пространственного мультиплексирования [1,2]. Это требует применения новых типов ОВ. Рассматриваются варианты либо многосердцевинных, либо маломодовых оптических волокон. С точки зрения построения сетей связи более перспективны маломодовые решения [2,3]. Но для их практической реализации необходимо решить ряд проблем. Одним из наиболее существенных факторов, ограничивающих применение маломодовых ОВ, является совместное действие связи мод с дифференциальной модовой задержкой, хроматической дисперсией и нелинейностью.

При использовании пространственных мультиплексоров ввода/вывода линейно-поляризованных мод опять-таки из-за связей мод необходимо применение системы MIMO и, соответственно, специальных алгоритмов обработки сигналов [4]. При этом требования к вычислительным ресурсам для MIMO растут с увеличением дифференциальной модовой задержки. Но, учитывая тенденции перехода к сетям со сверхмалыми задержками и связанные с этим требования по уменьшению задержек на сети желательно сократить время обработки сигналов на приеме. С этой целью предпринимаются попытки создать оптические волокна с минимизированной дифференциальной модовой задержкой [5]. Также, известны способы, заключающиеся в том, что вдоль волоконно-оптической кабельной линии с некоторым периодом включаются устройства компенсации дифференциальной модовой задержки [6]. В частности, устройства на основе набора волоконно-оптических линий задержки. Для двумодовых линий предлагаются также схемы скрещивания (переключения) мод. Очевидно, что применение подобных схем влияет и на качество передачи волоконно-оптической линии связи. Естественно возникает интерес по определению возможностей такого подхода к повышению качества передачи информации и оцениванию степени его снижения, если это происходит.

Из опыта эксплуатации одномодовых волоконно-оптических линий связи хорошо известна эффективность управления дисперсией волоконно-оптических линий передачи на дисперсионных картах. В [7] показано, что даже при компенсации хроматической дисперсией на грубых картах при размещении модулей компенсации на линейных оптических усилителях через 100 км динамический диапазон маломодовой волоконно-оптической линии передачи протяженностью 1000 км увеличивается на 3 – 4 дБ. Можно предположить, что применение совместной компенсации хроматической дисперсии и дифференциальной модовой задержки на линейных оптических усилителях волоконно-оптической линии передачи будет еще эффективнее.

Известно, что искаженный в волоконно-оптической линии передачи сигнал может быть восстановлен цепочкой последовательно включенных звеньев, включающих линейный и нелинейный фазовые фильтры, с фазовыми характеристиками инверсными фазовым характеристикам оптического волокна, определяемыми его дисперсией и нелинейностью, соответственно [8, 9]. Это позволяет предположить, что включение на линейных оптических усилителях нелинейных фазовых фильтров с фазовой характеристикой инверсной изменениям фазы за счет нелинейности в оптических волокнах позволит улучшить характеристики волоконно-оптической линии передачи в целом. Учитывая прогресс в создании оптических метаматериалов [10, 11] можно допустить возможность создания подобных инверсных нелинейных фазовых фильтров. Тем более, что уже известны решения для управляемых нелинейностью солитонов. В частности, рассматривалось управление нелинейностью при включении волокон с отрицательной нелинейной восприимчивостью [12].

В данной работе представлены результаты моделирования для двумодовой волоконно-оптической линии связи с компенсацией искажений на линейных усилителях с применением компенсаторов дифференциальной модовой задержки, хроматической дисперсии и искажений за счет

нелинейности. Процесс распространения сигнала в маломодовом оптическом волокне с учетом линейных и нелинейных связей мод, дисперсии, дифференциальной модовой задержки и нелинейности описывали системой связанных нелинейных уравнений Шредингера, которые решали методом расщепления по физическим процессам [13]. Применяемые модель и алгоритм подробно описаны в работе [14].

Для сравнения качества работы маломодовой линии передачи использовали концепцию порога эффективности корректирующих кодов (FEC limit) [15]. По результатам моделирования строили зависимости вероятности ошибок (BER) в оптическом модовом канале на приёме от пиковой мощности на передаче, по которым оценивали динамический диапазон, полагая, что для значений BER ниже порога сигнал на приеме полностью восстанавливается. Значение порога BER полагали равным $4.7 \quad 10^{-3}$ [15].

В данной работе рассматривалась двумодовая волоконно-оптическая линия связи протяженностью 1000 км, с установленными через каждые 100 км эрбиевыми оптическими усилителями. Среднее значение строительной длины оптического кабеля принималось равным 5 км. Моделирование производилось для оптического сигнала с форматом модуляции DP-DQPSK для канальной скорости 100 Гбит/с по двумодовому оптическому волокну.

Литература

1. *Essiambre R.-J., et al, J. Lightwave Technology, 28 (4), 662-701(2010)*
2. *Li A., et al, J. Lightwave Technology, 30(24), 3953-3964(2012)*
3. *Richardson D. J., Phil. Trans. R. Soc., A 374, 20140441(2016)*
4. *Arık S.O., et al, J. Lightwave Technology, 34(11), 2867-2880(2016)*
5. *Grüner-Nielsen L., et al, J. Lightwave Technology, 30(23), 3693-3698(2012)*
6. *Ye F., et al, OSA OFC/NFOEC Technical Digest, OM3B.3.pdf (2013)*
7. *Andreev V.A., et al, IEEE Conf. Proc. Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 1- 4(2018)*
8. *Turitsyn S.K., et al, Optica, 4(3), 307-322(2017)*
9. *Бурдин В.А., и др., T-Comm. 5, 18-24(2013)*
10. *Urbas A. M., et al, Journal of Optics, 18(9), 093005(2016)*
11. *Soukoulis C. M., et al, Science, 315, 47–49(2007)*
12. *Malomed B. A. Soliton Management in Periodic Systems, Springer, 180(2006)*
13. *Ferreira F., et al, IEEE Photonics Technology Letters, 24(4), 240-242(2012)*
14. *Андреев В.А., и др., Вычислительные технологии, 22(6), 4-11(2018)*
15. *Alvarado A., et al, J. Lightwave Technology, 33(20), 4338 – 4352(2015)*

СОДЕРЖАНИЕ СОЛИТОНОВ В СТАНДАРТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ OFDM СИГНАЛАХ

Седов Е.В.[1*], **Редюк А.А.**[1,2], **Федорук М.П.**[1,2], **Турицын С.К.**[1,3]

[1] *Новосибирский Государственный Университет, г. Новосибирск*
[2] *Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск*
[3] *Астонский университет, г. Бирмингем, Великобритания*
[*] *E-mail:* e.sedov@g.nsu.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16053

Нелинейное уравнение Шредингера применяется для описания распространения лазерных импульсов в оптоволоконных линиях связи. В общем случае, данное уравнение описывает совместное существование как дисперсионных волн, так и солитонных импульсов. Поэтому, распространение сигнала в таком нелинейном канале принципиально отличается от линейных систем. В данной работе демонстрируется, что стандартные сигналы с применением мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) при уровнях мощности, используемых в современных оптических системах, могут содержать солитонные компоненты, возникшие статистически из-за случайных процессов, соответствующих информационному содержанию.

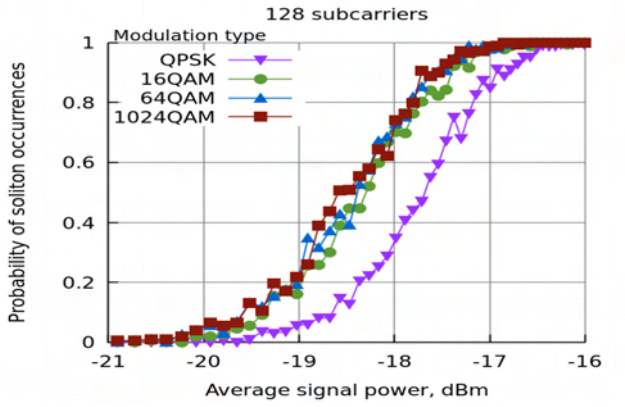


Рис.1 Зависимость вероятности существования солитонов от средней мощности сигнала в OFDM символе с длительностью 10 нс и 128 поднесущими

Применяя спектральную задачу Захарова-Шабата [1] к одиночному OFDM символу с несколькими поднесущими, мы можем количественно подсчитать эффект от статистического возникновения солитонов в таком информационном сигнале. Мы проанализировали OFDM сигналы с QPSK и 16,64,1024-QAM модуляцией, а также с количеством поднесущих, меняющимся от 16 до 1024, и обнаружили, что в стандартных OFDM сигналах возникают солитоны, которые могут влиять на распространение сигнала по оптоволокну. Также определили характеристики которых в сигналах присутствуют солитоны, а сигнала и пороговые значения мощности, при значит и дискретные собственные значения в нелинейном спектре для задачи Захарова-Шабата. Полученные результаты показали, что в сигналах с 16-, 64-, 1024-QAM солитоны начинают генерироваться при меньших значениях мощности, чем в сигналах с QPSK модуляцией, при прочих равных параметрах. Это соответствует тому, что при увеличении количества бит информации, закодированной в одном символе, средняя мощность сигнала, необходимая для существования солитонов, уменьшается. Такой эффект сохраняется при изменении числа поднесущих. При увеличении количества поднесущих, средняя мощность одного символа, необходимая для существования солитонов, пропорционально увеличивается. Было обнаружено, что удельная энергия на одну поднесущую, при которой существуют солитоны, не зависит от их количества. Полученные результаты согласуются с существующими аналитическими критериями [2]. Рисунок 1 демонстрирует, что для OFDM сигнала со 128 поднесущими уровень мощности, при котором в сигнале присутствуют солитоны, равен -15 дБм. Это соответствует максимальному значению Q2 фактора для сигнала с данными характеристиками, при распространении на 1000 и 2000 км. Полученные результаты подтверждают предположение, что нелинейные эффекты присутствуют в используемых каналах связи, и необходимо принимать во внимание влияние когерентных структур на распространение сигнала. Понимание факта наличия солитонов может повлиять на способы кодирования и модуляций сигналов в оптической коммуникации, а также может привести к улучшению эффективности оптических линий связи.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-72-30006).

Литература

1. *Zakharov V. E., Shabat A. B., Soviet Physics JETP. 34, 62 (1972)*
2. *Klaus M., Shaw J. K. J. Math. Anal. 34, 759–773 (2003)*

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ DWDM СИСТЕМ СВЯЗИ С КАНАЛЬНОЙ СКОРОСТЬЮ И ФОРМАТОМ МОДУЛЯЦИИ

Конышев В.А.[1], Наний О.Е.[1,2,*], Новиков А.Г.[1], Трещиков В.Н.[1,3], Убайдуллаев Р.Р.[1]

[1] *ООО «Т8 НТЦ», г. Москва*
[2] *МГУ им. М. В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва*
[3] *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва*
[*] *E-mail: naniy@t8.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16054

Максимальная производительность современных многоканальных волоконно-оптических линий связи (DWDM ВОЛС) достигается при оптимальной канальной оптической мощности, обеспечивающей максимальную дальность безрегенерационной передачи информации при заданной спектральной эффективности. Одна из тенденций развития современных систем дальней связи – увеличение битовой и символьной скорости.

В докладе анализируется вопрос о том, как изменяется предельная дальность передачи информации и оптимальная канальная мощность в DWDM линии связи при увеличении символьной скорости вдвое, спектральная эффективность считается постоянной. Сравнивались две конфигурации линии: 80 каналов 100G DP-QPSK с интервалом 50 ГГц и 40 каналов 200G DP-QPSK с интервалом 100 ГГц.

Оптимизация параметров проводилась с использованием GN-модели формирования нелинейного интерференционного шума в волоконно-оптических DWDM линиях связи без компенсации хроматической дисперсии на физическом уровне [1,2]. Учитывалось как воздействие канала самого на себя, так и воздействие соседних каналов. Теоретический анализ показал, что мощность сигнала, при которой достигается минимум BER и, соответственно, максимальное качество сигнала, пропорциональна символьной скорости.

Экспериментально показано, что для формата DP-QPSK увеличение канальной скорости со 100 Гбит/с до 200 Гбит/с, произведенное за счет увеличения символьной скорости, не уменьшает максимальную дальность работы и производительность системы связи. Оптимальная канальная мощность растет пропорционально скорости передачи информации.

Литература

1. *P. Poggiolini et al., The GN-model of fiber non-linear propagation and its applications. Journal of lightwave technology, 2014. 32(4): p. 694-721*
2. *R. Pastorelli et al., Network planning strategies for next-generation flexible optical networks. Journal of Optical Communications and Networking, 2015. 7(3): p. A511-A525*

АППАРАТУРА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ШКАЛ ВРЕМЕНИ ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ СВЯЗИ

Григорьев В.В., Митюрев А.К., Савкин К.Б.*, Тихомиров С.В.

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ВНИИОФИ), г. Москва
**E-mail: savkin@vniiofi.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16055

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) являются одним из самых точных инструментов для обеспечения дистанционной синхронизации шкал времени удаленных друг от друга водородных стандартов времени и частоты (СВЧ), обладающих относительной нестабильностью менее $1 \cdot 10^{-15}$ на суточном интервале усреднения и входящих в состав эталонов единиц времени и частоты, а также систем единого времени и тактовой сетевой синхронизации. Высокая точность достигается за счет малого затухания сигнала в современных типах оптического волокна, высокой помехозащищенностью, надежностью и большим сроком службы ВОЛС. Данный метод синхронизации позволяет не только осуществлять передачу высокостабильных сигналов времени и частоты с необходимым уровнем точности, но и обеспечить непрерывный, круглогодичный режим работы, что другими методами синхронизации (с использованием перевозимых квантовых часов, радиоэлектронного, открытого оптического и спутникового каналов передачи) обеспечить невозможно.

Работы по передаче высокостабильных сигналов времени и частоты по ВОЛС для обеспечения синхронизации шкал времени ведутся ведущими научными метрологическими лабораториями мира с начала 90х годов XX века (PTB (Германия), LPL и SYRTE (Франция), AGH (Польша), NIST и JPL (NASA) (США), NICT и NMIJ (Япония), NPL (Великобритания), NIM (Китай), NMI (Австралия) и др.). К настоящему времени в мире уже разработаны несколько коммерческих систем и проложены тысячи километров выделенных ВОЛС для данных целей.

В России же всесторонние исследования в данном направлении начались только с 2013 года, но за это время подведомственными Росстандарту государственными научными метрологическими институтами были проведены теоретические и экспериментальные исследования методов и средств ослабления влияния различных факторов на процессы передачи высокостабильных сигналов времени и частоты по оптическому волокну, а также разработаны образцы аппаратуры для дистанционной синхронизации шкал времени по ВОЛС, не уступающие по точности мировым аналогам.

В текущей работе рассматривается аппаратура, разработанная во ВНИИОФИ.

Упрощенная схема передачи высокостабильных сигналов времени и частоты по ВОЛС аппаратурой для дистанционной синхронизации шкал времени по ВОЛС представлена на рис. 1.

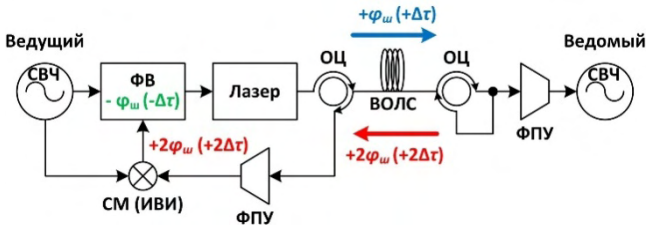


Рис. 1. Схема передачи высокостабильных сигналов времени и частоты по ВОЛС:

ФВ – фазовращатель; ОЦ – оптический циркулятор; ФПУ – фотоприемное устройство; СМ – смеситель; ИВИ – измеритель временных интервалов

Принцип действия аппаратуры основан на модуляции оптического излучения сигналом частоты (времени) (обозначения в скобках на рис. 1 относятся к сигналам времени) ведущего СВЧ, передаче модулированного оптического излучения по ВОЛС в направлении ведомого СВЧ и выделении с помощью ФПУ сигнала частоты (времени) на стороне ведомого генератора. Часть излучения со стороны ведомого СВЧ отражается в направлении ведущего СВЧ для определения величины сигнала ошибки и выработки соответствующего воздействия на фазовращатель [1-5].

Для наглядности на рис. 1 обозначены величины, влияющие на параметры передаваемых по ВОЛС сигналов времени и частоты, которые необходимо компенсировать в процессе дистанционной синхронизации СВЧ: $\varphi_ш$ – фазовый шум сигнала частоты, $\Delta\tau$ – время задержки сигнала времени при их передаче по ВОЛС.

Внешний вид аппаратуры представлен на рис. 2.

По результатам испытаний установлено, что разработанная аппаратура позволяет:

– передавать высокостабильный сигнал частоты по ВОЛС длиной до 150 км с относительной

нестабильностью от $4{,}1\cdot10^{-17}$ до $2{,}0\cdot10^{-16}$ на суточном интервале усреднения;

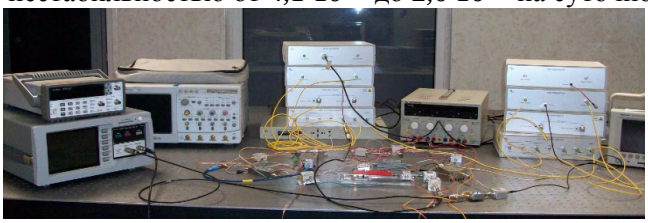


Рис. 2. Внешний вид аппаратуры дистанционной синхронизации шкал времени по ВОЛС

– передавать высокостабильный сигнал времени с абсолютной погрешностью от 61 до 80 пс на суточном интервале усреднения,

что достаточно для обеспечения синхронизации водородных стандартов времени и частоты с относительной нестабильностью менее $1\cdot10^{-15}$ на суточном интервале усреднения.

Потенциальными потребителями подобных коммерческих систем на территории России могут являться:

1) предприятия и организации Роскосмоса, Росстандарта, Минобороны России – для частотно-временного обеспечения наземных систем;

2) метрологические лаборатории – для обеспечения дистанционных сличений первичного, вторичных и рабочих эталонов единиц времени и частоты;

3) операторы связи – для обеспечения тактовой сетевой синхронизации систем связи и передачи информации;

4) испытательные полигоны – для обеспечения синхронизации измерительных систем и комплексов;

5) научные организации и учебные заведения – для поддержки научных исследований и учебного процесса, в которых требуются высокоточные сигналы времени и частоты

и др.

Синхронизация удаленных СВЧ может происходить по различным топологиям. Например, по топологиям «точка-точка» или «кольцо» могут быть синхронизированы эталоны времени и частоты метрологических лабораторий, расположенных в одном регионе, а по топологии «звезда» может быть обеспечена синхронизация измерительных средств космодромов или испытательных полигонов, нескольких подразделений или кафедр в научном или учебном заведениях и проч.

Внедрение аппаратуры дистанционной синхронизации шкал времени по ВОЛС также позволяет удаленным абонентам получать сигналы времени и частоты эталонной точности для своих нужд без существенных экономических затрат на закупку и обслуживание водородных СВЧ; а пользователям водородных СЧВ – снизить затраты на организацию синхронизации с использованием других дорогостоящих методов: с использованием перевозимых квантовых часов, радиоэлектронного, открытого оптического или спутникового каналов передачи.

Таким образом, представлена отечественная аппаратура для дистанционной синхронизации шкал времени по ВОЛС, не уступающая по точности мировым аналогам, и обозначены перспективы ее применения в различных отраслях народного хозяйства.

Литература

1. *Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрев А.К., Савкин К.Б., Тихомиров С.В. Применение волоконно-оптических линий для сличения эталонов единиц времени и частоты // Фотон-экспресс. – 2018. – №5(149). – С.14-18*
2. *Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрев А.К., Савкин К.Б., Тихомиров С.В. Передача высокоточных сигналов частоты по волоконно-оптической линии связи на расстояние 150 км // Измерительная техника. – 2018. – №7. – С.37-40*
3. *Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрев А.К., Савкин К.Б., Тихомиров С.В. Передача высокостабильного сигнала времени по волоконно-оптической линии связи // Измерительная техника. – 2018. – №10. – С.47-49*
4. *Grigor'ev V.V., Kravtsov V.E., Mityurev A.K., Savkin K.B., Tikhomirov S.V. Transfer of highly stable frequency signals on a 150 km fiber-optic communications line // Measurement Techniques. – 2018. – Vol.61. – No.7. – P.699-703. – DOI 10.1007/s11018-018-1487-1*
5. *Grigor'ev V.V., Kravtsov V.E., Mityurev A.K., Savkin K.B., Tikhomirov S.V. Transmission of Highly Stable Time Signals Over Optical Fiber Communication Lines // Measurement Techniques. 2019. – Vol.61. – No.10. – P.1018-1021. – DOI 10.1007/s11018-019-01542-z*

ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА КАЧЕСТВО РАБОТЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Дорожкин А.Н.[1,2*], Старых Д.Д.[1,3], Наний О.Е.[1,2], Трещиков В.Н.[1]

[1] *ООО «Т8 НТЦ», г. Москва*
[2] *МГУ им М.В.Ломоносова, г. Москва*
[3] *Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный*
[*] *E-mail:* dorozkin@t8.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16056

Современные волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), работающие на скоростях до 10 Гб/с, используют для передачи трафика амплитудный формат модуляции OOK NRZ. Модуляция оптической несущей осуществляется с помощью внешнего модулятора, или напрямую током лазерного диода. Последовательность импульсов такого сигнала характеризуется достаточно большим числом физических параметров, которые могут оказывать влияние на производительность ВОЛС [1].

Параметры, описывающие форму оптического импульса и его статистические характеристики, измеряются с помощью построения глаз-диаграммы - результата наложения большого количества «нулей» и «единиц». Из глаз - диаграммы можно найти такие параметры оптических импульсов, как средний уровень мощности логических «1» и «0», Q-фактор, джиттер, длины логических «1» и «0», а также статистические параметры этих величин. Ещё одним важным параметром является чирп [2 - 3], который характеризует частотную модуляцию оптической несущей. Изменять перечисленные параметры оптического сигнала можно настройкой передатчика. Распространение оптических импульсов по волокну можно описать уравнением ниже [1].

$$i\frac{\partial A}{\partial z}+\frac{i\alpha}{2}A-\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial T^2}+\gamma\left|A\right|^2 A=0 \qquad (1.1)$$

Влияние параметров оптического сигнала производительности ВОЛС было исследовано с помощью моделирования в пакете программ OptiSystem, в основе которого лежало решение уравнения (1.1). При моделировании использовались параметры подобранных близкими к реально измеренным параметрам DWDM SFP+. В результате численного эксперимента были получены зависимости минимального OSNR, требуемого для безошибочной демодуляции, от не скомпенсированной дисперсии на приёмнике (дисперсионные кривые) при разных параметрах чирпа, и различных входных мощностях в линию. Часть полученных дисперсионных кривых приведена на (Рис. 1).

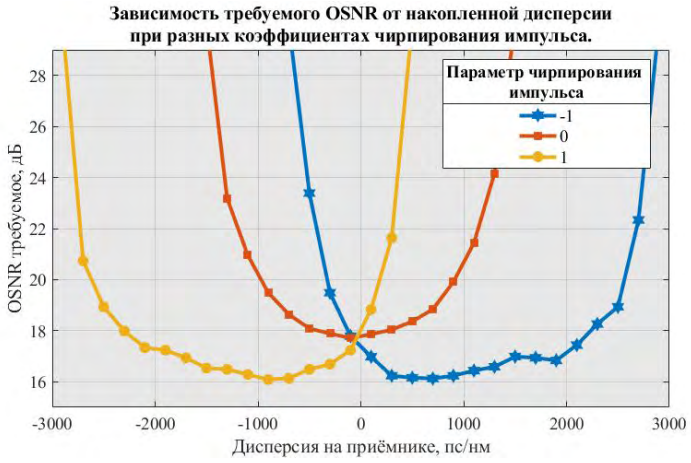
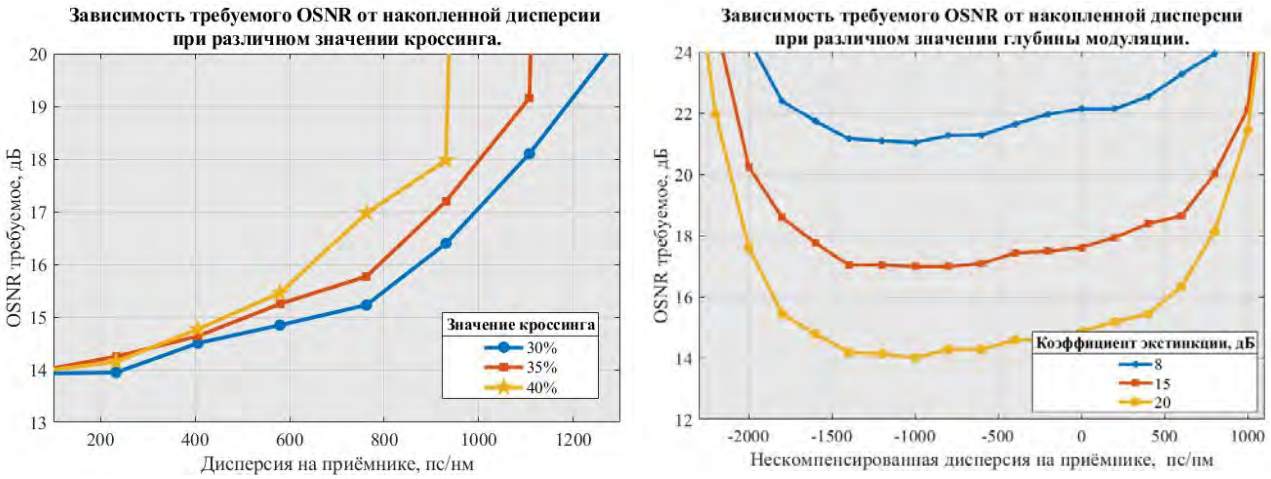


Рис. 1. График зависимости требуемого OSNR от дисперсии на приёмнике. Входная мощность в линию составляла 5 дБм

Из представленных зависимостей следует, что существует оптимальный диапазон значений чирпирования оптического импульса, при которых, достигается наибольшее значение

некомпенсированной дисперсии, не приводящее к увеличению оптического отношения сигнал/шум на приемнике требуемого для корректной демодуляции. Оптимальное значение составляет -1.6.

Также экспериментально было изучено влияние отношение длительностей логических «0» и «1» (кроссинг) на параметры дисперсионных кривых. Разница в длительности этих величин приводит к отклонению точки пересечения импульсов на глаз – диаграмме относительно уровня 50%. Дисперсионные кривые, измеренные при разных значениях кроссинга приведены на рисунке 2 (а).



(а) ***(б)***

Рис. 2. График зависимости требуемого OSNR от дисперсии на приёмнике. Входная мощность в линию составляла 5 дБм

Как видно из полученных результатов, чем меньше значение этого параметра, тем большее значение нескомпенсированной дисперсии достижимо без увеличения оптического отношения сигнал/шум на приемнике для безошибочной демодуляции. Таким образом, этот параметр необходимо оптимизировать для более качественной работы передатчика.

Также были исследованы влияния глубины модуляции (отношение средней мощности уровня «единицы» к средней мощности уровня «нуля») и относительных колебаний мощности лазера. Такие колебания оптической мощности характеризуются относительной плотностью мощности шума (Relative Intensity Noise, RIN). Вариация данных параметров приводит к изменению значения требуемого OSNR. Пример зависимости дисперсионных кривых при разных значениях глубины модуляции приведён на рисунке 2 (б).

Таким образом, для оптимизации волоконно - оптической линии связи было экспериментально и теоретически изучено влияние формы оптического импульса, отношение длительности «единицы» к длительности «нуля», отношение средней мощности уровня «единицы» к средней мощности уровня «нуля», относительной плотности мощности шума передатчика и коэффициента чирпирования импульса на дисперсионные характеристики приёмопередатчика. На основании проведенного исследования была проведена оптимизация DWDM SFP+ модуля с целью увеличения области его применимости.

Литература

1. *Наний О.Е., Lightwave Russian Edition-1,48-52 (2003)*
2. *Kambiz Abedi, Journal of Semiconductors-33, Number 6 (2012)*
3. *M.Y. Jamro∗, J.M. Senior, Photonic Network Communications-10, 267–278 (205)*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕШАЮЩИХ ДЕРЕВЬЕВ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

Ракитский А.А.[1,2,3*], **Редюк А.А.**[2,1]

[1] *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*
[2] *Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск*
[3] *Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск*
[*] *E-mail:* rakitsky.anton@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16057

В настоящее время методы машинного обучения получили широкое распространение и применение практически во всех областях науки. Целесообразность применения таких методов в исследованиях, связанных с волоконно-оптическими линиями связи, была показана, например, в работах [1,2]. Тем не менее, существуют перспективные методы машинного обучения, возможность применения которых для решения задачи компенсации нелинейных искажений ранее не исследовалась. К таким методам относятся, в том числе, ансамбли классификаторов, базирующиеся на решающих деревьях, такие как Random Forest [3], Extra Trees и Gradient Boosting. Важными плюсами таких методов, благодаря которым на них пал выбор в данной работе, являются легкая интерпретируемость получаемых результатов и относительно низкая потребность в вычислительных ресурсах. Например, для классификации объекта при помощи «случайного леса», состоящего из 100 деревьев глубиной не более 10, потребуется не более 1000 операций сравнения без использования операций умножения.

При выполнении данной работы было проведено исследование возможности применения описанных выше алгоритмов для компенсации нелинейных искажений в волоконно-оптических линиях связи. Результаты экспериментов показали, что, даже при ограничении на конфигурацию классификатора в 1000 операций сравнения, можно подобрать такие параметры, при которых сформированный классификатор позволяет улучшить результат базовых методов определения значений сигнала.

Краткая теория

Решающее дерево – простой классификатор, представляющий из себя двоичное дерево, в котором каждый внутренний узел имеет двух потомков и содержит в себе некоторое логическое условие, а листовой узел относится к тому или иному классу.

Случайный лес – набор решающих деревьев, каждое из которых построено на основе случайной подвыборки обучающих данных. Исследуемый объект классифицируется каждым из деревьев, а итоговый результат классификации определяется при помощи голосования.

Экспериментальная часть исследования

При проведении исследования использовались данные, смоделированные ранее в рамках работы [4]. Рассматривалась трёхканальная передача импульсов с использованием двух поляризаций в каждом канале с форматом модуляции 16-QAM (quadature amplitude modulation) на 2000 км. В качестве формы импульсов использовалась форма RRC (root raised cosine) с коэффициентом сглаживания 0,1 на символьной скорости 32 ГБод и межканальным расстоянием 37,5 ГГц. Число передаваемых символов для обучения и тестового запуска для каждой поляризации составляло 2^{16}. В данной работе рассматриваются только внутриканальные нелинейные искажения, без учёта влияния второй поляризации или соседних каналов. В контексте задачи классификации, 16-QAM модуляция будет означать, что каждый импульс можно отнести к одному из 16 классов. Основной задачей является выявление возможности подбора параметров классификатора, которые позволяют улучшить результаты простейших методов определения значений импульсов. Сравнение результатов работы классификатора будет производиться с простейшим методом, когда импульс относится к тому узлу сетки, к которому он находится ближе всего.

Прежде всего необходимо описать ход самого исследования. Имеются 25 наборов данных с разной передаваемой мощностью (от -6 до 6 дБ с шагом 0.5). Каждый из этих наборов содержит обучающую и тестовую последовательности импульсов длинами по 65536 значений. В исследовании мы рассматривали только средний канал и одну поляризацию, не учитывая влияние остальных.

Так как мы не ставили перед собой целью разработку новых алгоритмов построения решающих деревьев или их ансамблей, то для исследования воспользовались готовыми решениями на языке python при помощи библиотеки scikit-learn. Рассматривались такие классификаторы, как RandomForest, ExtraTrees и GradientBoosting, все они используют в своей основе решающие деревья. К сожалению, классификаторы ExtraTrees и GradientBoosting показали слабые результаты ещё на начальных этапах исследовании, поэтому были исключены из дальнейшего рассмотрения.

Отдельно рассмотрим, каким образом строятся классификаторы и что используется в качестве признаков объекта, а кроме того, как именно учитываются межимпульсные взаимодействия внутри канала. Во-первых, несмотря на то, что каждый символ представляется комплексным числом, для работы с классификатором мы будем рассматривать вещественную и мнимую части как два независимых числа. Таким образом, импульс задаётся двумя вещественными числами. Объектом классификации назовём полученный символ, значение которого необходимо определить. Для того, чтобы учесть межимпульсное влияние, мы добавим в объект в качестве дополнительных характеристик значения нескольких соседних импульсов, как уже полученных, так и тех, которые будут получены после рассматриваемого. Одним из параметров конфигурации нашего классификатора будет именно это число соседей. Очевидно, что чем больше соседей попадают в рассмотрение, тем более перегруженным становится каждый объект и тем больше времени требуется для обучения такого классификатора. В рамках исследования мы рассматривали не более 10 соседей с каждой из сторон. В качестве ответа для обучающей последовательности использовалось истинное значение импульса, которое было передано изначально.

Другими параметрами «случайного леса» являются количество решающих деревьев и их максимальная высота. Так как рассматриваемый метод интересен в первую очередь его низкими трудозатратами, мы рассматривали только те конфигурации, в которых произведение числа деревьев и их максимальной глубины не превосходит 1000.

Результаты

На Рис.1 приведены краткие результаты исследования. Для каждой мощности конфигурация классификатора подбиралась индивидуально, и было отмечено, что число соседей больше одного перестало иметь значение, начиная с мощности 2 дБ. При этом RandomForest улучшает результат простейшего метода на 2-3% начиная с мощности 0 дБ, при достаточно малых вычислительных затратах. Так, чтобы классифицировать объект случайным лесом с конфигурацией 50 деревьев, глубина 12, 1 сосед, а именно такая конфигурация является наиболее популярной среди всех рассматриваемых наборов данных, потребуется не более 600 операций сравнения вещественных чисел.

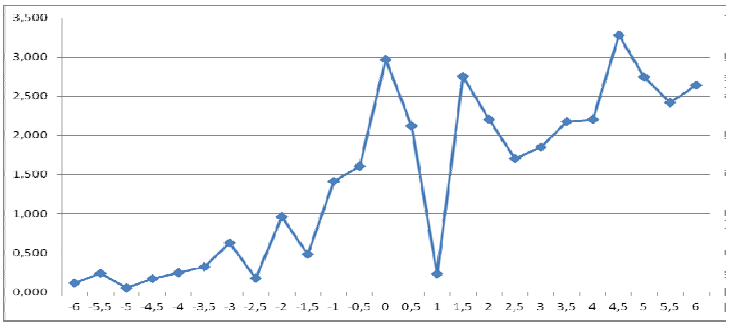


Рисунок 1. Улучшение качества классификации RandomForest в процентах относительно простейшего метода

Полученные результаты позволяют говорить о том, что данный метод имеет потенциал применения на практике и может быть использован, например, в качестве дополнения к другим методам компенсации нелинейных искажений [1].

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-72-30006).

Литература

1. *Averyanov, Evgeny, et al. "Perturbative Machine Learning Technique for Nonlinear Impairments Compensation in WDM Systems." 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC). IEEE, 2018*
2. *Shen, Thomas Shun Rong, and Alan Pak Tao Lau. "Fiber nonlinearity compensation using extreme learning machine for DSP-based coherent communication systems." 16th Opto-Electronics and Communications Conference. IEEE, 2011*
3. *Liaw, Andy, and Matthew Wiener. "Classification and regression by randomForest." R news 2.3 (2002): pp. 18-22.*
4. *Редюк, А. А., et al. "Метод компенсации нелинейных искажений сигнала в волоконных системах связи на основе теории возмущений и машинного обучения." Прикладная фотоника 5.3 (2018): 265-276*

ПОТЕНЦИАЛЬНО-ВОЗМОЖНЫЕ ТОЧКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАБЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ С ОПЕРАТОРАМИ СВЯЗИ

Павлов Д.В.
ПАО «Ростелеком», г. Москва
E-mail: Dmitriy.Pavlov@rt.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16058

Основная задача операторов связи – это предоставление пользователям сервисов и услуг широчайшего спектра, высочайшего уровня, обеспечивая надёжность и качество требуемых услуг. Приступая к выполнению задач по организации новых линий связи, оператор магистральной связи лишь теоретически представляет то, какой кабель ему понадобится, где и как он будет прокладываться. Операторы местной сети и мобильной связи часто сталкиваются с проблемами забитой канализации, отсутствии вводов и проблемами прокладки кабелей внутри зданий. Выполнение поставленных задач возможно только при постоянном взаимодействии с предприятиями кабельной промышленности. Главная задача оптических кабелей – надежная защита и недопущение ухудшения характеристик элемента передающего информацию, в нашем случае – это оптическое волокно (ОВ). Любой потребитель мечтает об идеальном продукте, который будет удовлетворять всем его потребностям. Связь не исключение. Идеальный кабель имеет много ОВ, малый диаметр, лёгкий и при этом его можно прокладывать везде: в грунтах всех категорий, подвешивать на опорах ЛЭП, прокладывать по дну рек, озёр, морей и океанов, при этом, он должен быть негорючим или огнестойким.

Достижения в химической промышленности, развитие тяжёлого машиностроения и внедрение новых типов ОВ, позволяют разработать новые конструкций кабелей, значительно расширить сферу применения, территорию прокладки, монтажа и обслуживания оптических кабелей (ОК), а так же значительно увеличить их срок службы. Созданные полимерные материалы позволяют изготавливать оболочки, выдерживающие более широкий диапазоном рабочих температур и позволить производить монтаж при температурах до -30°С. Появились огнестойкие кабели, содержащие не только огнестойкую оболочку, но и огнестойкие оптические модули, выполненные из термостойкого полимерного материала. С появлением ОВ категорий B-652.D / B-657.A1, B-657.B2 и B-657.B3 согласно стандарту Международной электротехнической комиссии (МЭК / IEC) [1], а так же внедрение ОВ с диаметром по УФ-отверждаемому акриловому двухслойному первичному защитному покрытию, равному 200 мкм, появляется возможность уменьшить габаритные размеры ОК стандартных конструкций, при сохранении механических характеристик на требуемом уровне. Эта проблема особенно актуальна для больших городов, где канализация забита, и прокладка новых кабелей приводит к большим сложностям. Действующая программа «Чистое небо», стартовавшая во многих городах России также увеличивает нагрузку на кабельную канализацию и коллекторы. Продолжение сотрудничества в области применения новых технологий будет постоянным, так как расширение географии проникновения услуг, растущие скорости передачи сигналов, появление новых видов услуг для клиентов будут требовать улучшения материалов и совершенствования конструкций кабелей.

Нельзя обойти вниманием уже проложенные линии связи. Существуют кабели, чей срок эксплуатации приближается или достиг 25 лет. Согласно [2] операторы связи производят периодические измерения коэффициента затухания, оптических потерь в ОВ и сопротивления изоляции, к которым добавляется внешний осмотр трасс. Данные мероприятия не обеспечивают возможности оценки состояния оболочки кабеля, гидрофобных заполнителей и других элементов, обеспечивающих сохранность световода. Для решения этих задач необходимы специальные аккредитованные лаборатории, которые могут выдать официальное заключение о возможности дальнейшего использования ОК или необходимости его замены по определённым причинам. Существуют разовые взаимодействия компаний, результатами которых становятся замены участков волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) или получение заключения о годности кабеля и ОВ к дальнейшей роботе. Выполнение таких работ на постоянной договорной основе позволит Операторам связи проводить плановые замены участков ВОЛС или ВОЛС целиком, не доводя ситуации до аварий, а производителям кабелей и НИИ получить данные о состоянии и характере изменений материалов, конструкции и надёжности кабелей и ОВ. Полученная информация поможет прогнозировать возможные виды повреждений для каждого конкретного вида ОК, совершенствовать выпускаемую продукцию путём применения новых материалов и изменений конструкций кабелей.

Внедрение новых продуктов на рынок невозможно без участия предприятий кабельной промышленности. До сих пор в России остаётся без должного внимания применение ОВ с диаметром

по первичному защитному покрытию, равному 200 мкм. ОК с применением ленточных ОВ, склеенных по системе Spyder (SWR и SWF) японской компании Fujikura (и аналогичных ОВ других производителей) имеют значительные преимущества перед стандартными ленточными кабелями. Оба решения приводят к уменьшению габаритов кабелей. Ещё одним преимуществом волокон SWR и SWF является тот факт, что при производстве ОК образуется круглый пучок волокон, при котором конструкция кабеля имеет малый диаметр (23,3 мм для кабеля ёмкостью 1008 ОВ). А сухая конструкция (без применения гидрофобных заполнителей) и простота разделки и монтажа кабеля позволяют существенно сократить время развёртывания сети. Это очень перспективная конструкция, которая имеет несколько направлений для применения. Основной проблемой внедрения перспективных продуктов является отсутствие возможности продвижения решений «под ключ» среди операторов связи. По факту предприятия кабельной промышленности ограничиваются презентацией технических характеристик новых конструкций и демонстрацией образца ОК. Но современные реалии требуют иного подхода к продвижению нового товара или услуги. Оператору связи необходимо видеть комплексное решение: кабель, муфта, кросс, причём предложенное решение должно иметь не только описание и характеристики, но и расчёты затрат нового предложения в сравнении с уже используемой технологией. Только показав техническую и финансовую выгоду заказчику, продукция получит широкое распространение на сетях операторов связи.

Не менее важным делом является борьба с некачественными и контрафактными кабелями связи. И в этом вопросе предприятия кабельной промышленности должны выступать единым фронтом с операторами связи. Недобросовестный подрядчик, желая снизить затраты, закупает кабель не имеющие деклараций соответствия [3] и не соответствующие [4]. Операторы не в состоянии самостоятельно определить качество кабеля и проследить его происхождение. Зачастую проблема некачественной продукции проявляются спустя некоторое время, когда гарантийный срок на сданную трассу уже истёк. И в данном случае операторы несут дополнительные расходы на замену уже проложенной ВОЛС. И тут снова нужно обращаться к лабораториям и испытательным центрам. Для борьбы с контрафактом операторам и предприятиям кабельной промышленности необходимо выступать единым фронтом координируя свои действия и работая исключительно напрямую или через официальные торговые дома при заводах-производителях. В данном направлении начинается работа, уже существует ряд предложений, как от производителей кабелей, так и от операторов. К сожалению, единого подхода к решению данной проблемы нет. Здесь нельзя будет ограничиться работой только двух участников, т.к. борьба с контрафактом должна вестись на государственном уровне.

Нельзя не отметить ещё одну задачу, которую необходимо решать сообща – это современная нормативная документация. Никакие технические и технологические достижения не могут обеспечить выполнения поставленных задач без наличия современной законодательной и нормативной базы. Положительным моментом работы в данном направлении является работа по созданию нового ГОСТ для оптических кабелей, которую ведёт ВНИИКП совместно с кабельными заводами и операторами связи. Новый ГОСТ будет отражать необходимые требования к ОК с учётом предложений кабельных заводов, основанных на новейших разработках и достижениях в кабельной промышленности, а также пожелания операторов связи, которые основываются на опыте монтажа и эксплуатации линий связи. Многие отмечают, что и остальные нормативные документы пора пересматривать. К ним относятся [5, 6]. Да и в сам Приказ № 47 Минсвязи РФ [3] необходимо внести изменения, которые выведут документ на современный уровень.

Литература

1. *IEC 60793-2-50 ed.6.0 Optical fibres – Part 2-50: Product specifications for class B single-mode fibres*
2. *Приказ № 187 Госкомсвязи России от 19 октября 1998 г. Правила технической эксплуатации первичных сетей взаимоувязанной сети связи Российской Федерации, книга 3*
3. *Приказ № 47 Министерства информационных технологий и связи РФ от 19 апреля 2006 г. «Об утверждении Правил применения оптических кабелей связи, пассивных оптических устройств и устройств для сварки оптических волокон»*
4. *ГОСТ Р 52266-2004 Кабельные изделия. Кабели оптические. Общие технические условия*
5. *Руководство по строительству линейных сооружений местных сетей связи, утверждены Министерством связи РФ 21 декабря 1995 г.*
6. *Приказ № 424 Министерства связи СССР от 30 ноября 1984г Руководство по строительству линейных сооружений магистральных и внутризоновых кабельных линий связи*

ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИЧЕСКИМ КАБЕЛЯМ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Овчинникова И.А.*, Воронцов А.С.*, Тарасов Д.А.

ОАО «ВНИИКП», г. Москва
* *E-mail:* telecom.cables@vniikpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16059

Оптические кабели (ОК) – самая молодая отрасль кабельной промышленности, но стремительно развивающаяся. Это объясняется, в первую очередь, возможностями оптических волокон (ОВ), по которым можно передавать информацию на большие расстояния с высокими скоростями, а также безопасностью и помехозащищённостью ОК.

С сожалением следует отметить, что в тот момент когда, ОК только зародились и начали развиваться, в нашей стране наступила пора перестройки. Стандарт типа «Кабели оптические. Общие технические условия» к этому моменту не был создан, а поскольку в дальнейшем соблюдение требований государственных стандартов не стало обязательным, заводы стали выпускать ОК по своим техническим условиям (ТУ), без соблюдения какой-либо единой системы. Но до тех пор, пока в области оптических кабелей не применяется единая система условных обозначений, и нет стандартизованных требований и методов контроля, потребителям сложно ориентироваться на рынке и осуществлять закупки качественной и максимально удовлетворяющей их требованиям кабельной продукции.

Поэтому, одной из важнейших задач, которую требуется решать в оптической кабельной отрасли, является систематизация и стандартизация требований, предъявляемых к ОК, для чего необходимо выработать стандартизованный подход к классификации ОК и системе условных обозначений.

Несмотря на кажущееся огромным разнообразие марок, представленных на рынке, можно выделить 6 способов классификации телекоммуникационных ОК. С учётом жёсткости воздействующих нагрузок, конструктивных особенностей или некоторых дополнительных требований, некоторые группы ОК подразделяются на подгруппы. Таким образом, можно классифицировать ОК следующим образом:

1. По области применения и условиям прокладки:

З – подземные ОК, которые подразделяются на подгруппы:
- для прокладки в туннелях и коллекторах;
- для прокладки в кабельной канализации;
- для прокладки в пластмассовых трубах;
- для прокладки по мостам и эстакадам;
- для прокладки в легких песчаных и глинистых грунтах;
- для прокладки в тяжелых глинистых, гравийных и щебинистых грунтах и болотах глубиной до 2 м;
- для прокладки в скальных грунтах и грунтах, подверженных мерзлотным деформациям;
- для прокладки через водные преграды и в болотах глубиной более 2 м;

В – подвесные ОК, которые подразделяются на подгруппы:
- самонесущие с металлическими элементами конструкции;
- самонесущие диэлектрические;
- абонентские;
- навивные, присоединяемые и прикрепляемые к несущему проводу;
- с выносными силовыми элементами;
- встроенные в грозозащитный трос ЛЭП;
- встроенные в фазный провод ЛЭП;

П – подводные ОК, которые подразделяются на подгруппы:
- для прокладки на морских участках глубиной до 8000 м (без брони);
- для прокладки на морских участках глубиной до 5000 м (с однослойной броней, либо с дополнительной защитой от морских обитателей);
- для прокладки с заглублением или без заглубления в дно на морских участках глубиной до 3000 м (с двухслойной броней);

- для прокладки с заглублением или без заглубления в дно на морских участках глубиной до 500 м, в том числе на прибрежных участках и на морском шельфе (с трёх-, либо с двухслойной броней).

С – ОК для внутренней и наружной прокладки на стационарных объектах и сооружениях;

Р – ОК распределительные;

А – ОК абонентские;

М – ОК монтажные;

2. По наличию в конструкции ОК металлических элементов:
   - содержащие металлические элементы;
   - не содержащие металлические элементы (диэлектрические);
3. По климатическому району прокладки на типы исполнения:
   - в умеренном климате, в частности средней полосе России
   - в холодном климате, в том числе в условиях Арктики;
   - в жарком климате, в том числе в субтропиках и тропиках;
4. По назначению:
   - для протяженных линий связи;
   - для других применений;
5. По показателям пожарной опасности в соответствии с [1] на типы исполнения:

- ОК, не распространяющие горение при одиночной прокладке (Н);
- ОК, не распространяющие горение при групповой прокладке (нг);
- ОК, не распространяющие горение при групповой прокладке, с пониженным дымо- и газовыделением (нг-LS);
- ОК, не распространяющие горение при групповой прокладке, с пониженным дымо- и газовыделением, не выделяющие коррозионно-активных газообразных продуктов при горении и тлении (нг-HF);
- ОК огнестойкие, не распространяющие горение при групповой прокладке, с пониженным дымо- и газовыделением (нг-FRLS);
- ОК огнестойкие, с пониженным дымо- и газовыделением, не распространяющие горение при групповой прокладке и не выделяющие коррозионно-активных газообразных продуктов при горении и тлении (нг-FRHF);
- ОК, не распространяющие горение при групповой прокладке, с пониженным дымо- и газовыделением и с низкой токсичностью продуктов горения (нг-LSLTx);

6. По конструктивным особенностям, определяемым типом основного элемента сердечника:

- оптические модули, скрученные вокруг центрального элемента;
- центральная трубка;
- миниатюрный кабель, содержащий ОВ в плотном буферном покрытии, упрочненном нитями и оболочкой.

На сегодняшний момент требования к ОК содержат стандарты и нормативные документы [2-3]. С момента их внедрения прошло довольно много времени – разработаны новые материалы и конструкции ОК, что привело к потере их актуальности.

Разработка нового стандарта «Кабели оптические. Общие технические условия» призвана решить вышеозначенные проблемы путём установления порядка маркировки ОК, а также установки требований, предъявляемых к ОК, отвечающих современному уровню развития отрасли промышленности.

Литература

1. *ГОСТ 31565-2012 Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности*
2. *ГОСТ Р 52266-2004 Кабельные изделия. Кабели оптические. Общие технические условия*
3. *Правила применения оптических кабелей связи, пассивных оптических устройств и устройств для сварки оптических волокон, утверждены приказом № 47 Министерства информационных технологий и связи РФ от 19.04.2006*

ОПТИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ С ПОВЫШЕННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ И МЕТОДЫ ИХ КОНТРОЛЯ

Степанов К.В.[1*], Кошелев К.И.[1], Жирнов А.А.[1], Шелестов Д.А.[1], Пнев А.Б.[1], Сазонкин С.Г.[1], Овчинникова И.А.[2], Игнатиков И.С.[2], Тарасов Д.А.[2]

[1] Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва
[2] ОАО «ВНИИКП», г. Москва
[*] E-mail: thefrost@list.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16060

Мировой спрос на энергию постоянно растет. Несмотря на чрезвычайно сложные условия окружающей среды, энергетические транспортные структуры должны продемонстрировать надежность и эффективность. Аналогично, гражданское строительство также сталкивается с проблемами контроля, при исследовании эволюции и гарантии безопасности старения существующих структур за пределами их срока службы или внимательно следить за долговременной стабильностью прилегающих к нему территорий при строительстве новых объектов. Особо ответственные протяженные объекты требуют сенсорных систем, позволяющих эффективно и надежно обнаруживать факт попытки несанкционированного доступа. В настоящее время волоконно-оптические распределенные датчики, чувствительным элементом которых выступает сам оптический кабель, рассматриваются в качестве эффективного, жизнеспособного и надежного решения для мониторинга целостности инфраструктуры, а также активно применяется в системах контроля доступа и охраны периметра.

Традиционная конструкция оптического кабеля направлена на наилучшую защиту самого оптического волокна от любых внешних воздействий (влаги, радиальных и продольных нагрузок, воздействующих на кабель). Эти конструкции оказались очень эффективными в обеспечении долговечности оптических волокон, используемых для связи, и могут использоваться в качестве чувствительных элементов для контроля температур и акустических воздействий в диапазоне от -60°C до +85°C в сочетании с бриллюэновской или рамановской системами мониторинга.

Возможности применения волоконной оптики для измерения акустических воздействий были обнаружены в 80-х годах 20-го века [1], однако в [1] рассматривались и сравнивались только свойства волокна без оболочки и волокна с оболочкой. Систематического и подробного анализа конструкций оптических кабелей, на сколько известно авторам, не производилось. В работе было проведено математическое моделирование процесса акустического воздействия на оптический кабель и показано влияние определенных конструкционных характеристик, таких как диаметр проволоки и шаг ее намотки при формировании броневого слоя кабеля. По результатам предварительных исследований была разработана оптимальная с точки зрения акустической чувствительности конструкция. В отличии от проведенных ранее измерений чувствительности кабелей к акустике [2], авторами были проанализированы различные длины и геометрические формы измерительных образцов.

Анализ волоконных интерферометрических схем измерения акустической чувствительности показал, что наиболее оптимальной является схема, построенная на основе интерферометра Маха-Цендера с разветвителем 3x3 [3] (Рисунок 1). Такая схема позволяет проводить сравнительное измерение акустической чувствительности анализируемого кабеля с некоторым эталонным кабелем с известной акустической чувствительностью. Такой способ позволяет добиться постоянства и метрологической точности измерений. Сравнительный метод удобно использовать на производстве для оперативного контроля кабельной продукции. Диапазоны контроля акустической чувствительности кабеля для эксплуатации - в воде: от 500 до 20000 Гц, - в грунте: от 20 до 500 Гц.

Демодуляция интерферометрических данных производилась пассивным методом преобразования сигналов с двух фотоприемников, расположенных после разветвителя 3x3 в квадратурный и синфазный сигнал с последующим перекрестным перемножением. Таким образом удалось добиться линеаризации передаточной характеристики интерферометра в большом динамическом диапазоне интерференционных сигналов.

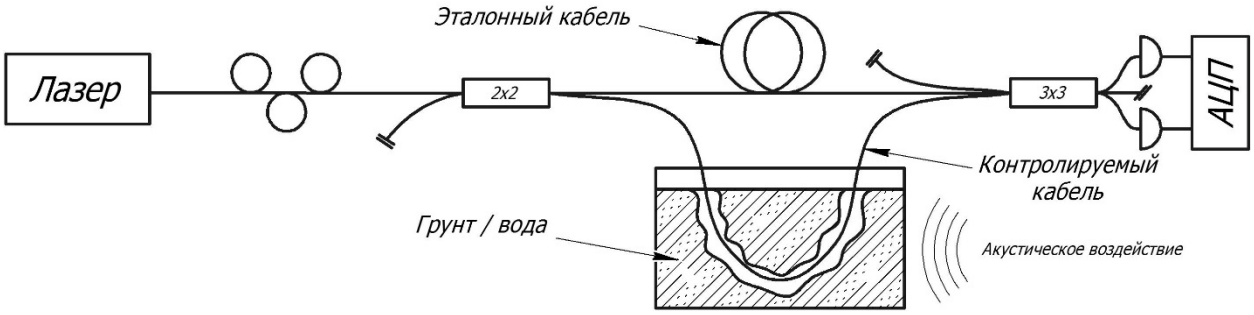


Рис. 1. Схема контроля акустической чувствительности волоконного оптического кабеля

Уровень шумов установки определяется тремя основными параметрами: нестабильностью длины волны источника и механическими колебаниями волокон интерферометра, не связанными с эталонным воздействием, а также шумом регистрирующей линии (приёмник излучения и АЦП). Для оценки шумов сигнала, генерируемых флуктуациями длины волны источника, необходимо измерить их с высокой точностью и частотой дискретизации, после чего можно определить их вклад в итоговый уровень шумов системы, зная параметры интерферометра, в частности – разность плеч.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00688.

Литература

1. *Lagakos N., et al, Applied optics 20, 2716-2720 (1981)*
2. *Hofmann J., et al, SPIE 9491 (2015)*
3. *Koo K., et al, Applied Physics Letters 41, 616-618 (1982)*

ПРОГНОЗ СРОКА СЛУЖБЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ С УЧЕТОМ НАГРУЗОК НА ВОЛОКНО В ПРОЦЕССЕ ЕГО ПРОИЗВОДСТВА

Бурдин В.А.[*], **Нижгородов А.О.**

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара
[*] *E-mail:* burdin@psati.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16061

Оценки срока службы оптического кабеля востребованы на всех стадиях его жизни – от производства кабеля до эксплуатации кабельной линии. В [1] на основе анализа двух основных подходов к прогнозу надежности оптических кабелей дается обоснование в качестве более предпочтительной оценки его срок службы. На оценках срока службы оптического кабеля, введенного в эксплуатацию, базируются прогнозирующие стратегии технического обслуживания кабельных линий [2]. В [3] для определения оценок срока службы оптического кабеля в процессе эксплуатации предлагается комплексный подход, включающий анализ статистики повреждений кабеля на линии, данных мониторинга и результатов специальных измерений параметров кабеля, выполненных, в частности, импульсным рефлектометром обратного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. Вместе с тем, в отличие от оптического волокна, для которого достаточно глубоко проработана теория прогноза срока службы, методики прогноза, рекомендации разработаны и регламентированы [4], для оптических кабелей утвержденных рекомендаций по расчету оценок срока службы нет.

Одно из направлений разработки методов прогноза срока службы оптических кабелей базируется на положении о том, что срок службы оптического кабеля определяется сроком службы оптического волокна в оптическом кабеле. На этом основании в [5] было предложено осуществлять прогноз срока службы оптического кабеля в соответствие с рекомендациями для оптического волокна, заменив значение нагрузки на волокно во время испытаний некоторым эквивалентным значением, учитывающим время воздействия и значения нагрузок, воздействующих на оптическое волокно за время срока службы оптического кабеля до момента времени, в который собственно и осуществляют прогноз. Были предложены методики расчета эквивалентного значения нагрузки на оптическое волокно и прогноза срока службы оптического кабеля в зависимости от заданной надежности оценки. Приведены оценки нагрузок на оптическое волокно во время выполнения основных технологических процессов производства оптического кабеля модульной конструкции. Также, была предпринята попытка получить оценки нагрузок на волокно в процессе строительства кабельной линии. Приведен пример расчета прогнозируемого срока службы оптического кабеля.

Основная проблема применения предложенной методики связана с тем, что время и нагрузки воздействий на оптическое волокно при изготовлении оптического кабеля и в течение его срока службы полагаются детерминированными, И если для отдельных технологических процессов производства оптического кабеля, для которых предусмотрен контроль и регулирование нагрузок на оптическое волокно, это можно принять допустимым, то для остальных процессов производства кабеля, а тем более процессов строительства и эксплуатации кабельных линий это некорректно. Необходимо учитывать случайных характер процессов.

Модель для прогноза срока службы оптического кабеля с учетом случайного характера воздействий на оптическое волокно в кабеле в течение его срока службы представлена в данной работе. Модель базируется на предложенном в [5] подходе. Из-за отсутствия данных ограничились прогнозом срока службы выпущенной производителем строительной длины оптического кабеля при хранении на складе. Здесь учитывали только историю нагрузок в процессе изготовления строительной длины кабеля и полагали, что приложенная к оптическому волокну нагрузка в процессе хранения строительной длины постоянна и определяется избыточной длиной оптического волокна в кабеле. Все технологические процессы производства оптического кабеля разбили на две группы. К первой группе отнесли процессы, при выполнении которых контролируются и регулируются нагрузки на оптическое волокно. Вероятностный закон распределения для нагрузок и времени их приложения к волокну для процессов этой группы полагали нормальным. Ко второй группе отнесли процессы, при выполнении которых контроль нагрузок на оптическое волокно не предусмотрен. Для этой группы предполагали, что на фоне процесса, параметры которого описываются нормальным законом распределения, имеют место воздействия на оптическое волокно, число которых, время воздействия и интенсивность

подчиняются законам распределения Вейбулла или Парето. Для прогноза в соответствие с рекомендациями [4] использовали полученную в [6] формулу для расчета срока службы оптического волокна в зависимости от заданной надежности оценки и прогнозируемой нагрузки на оптическое волокно в кабеле. Искомые оценки получали в результате моделирования методом статистических испытаний. Рассмотрен пример, для которого были приведены полученные в результате моделирования оценки срока службы и их надежности.

Литература

1. *Diddams A., et al, Sc. 288, 635-639 (2000)*
2. *Hartl I., et al, Opt. Lett. 26, 608-610 (2001)*
3. *Boyraz O., et al, J. Lightwave Technology 18, 2167-2175 (2000)*
4. *Ларин Ю.Т. 315(2), 3-7(2009)*
5. *Бурдин В.А., и др. Вестник связи, 12, 45-47(2010)*
6. *Koga H., et al, ICC-91 Proceedings, 0323-0329(1991)*
7. *Optical fibres - Reliability - Power law theory// IEC/TR 62048(2014)*
8. *Da Silva A. C., et al, Proceedings of the 50th IWCS, 249-252(2001)*
9. *Mitsunaga Y., et al, Journal of Applied Physics, 53(7), 4847-4853(1982)*

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОВМЕСТИМОСТИ КОМПОНЕНТОВ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ С ГИДРОФОБНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Тарасов Д.А.[*], **Овчинникова И.А.**

ОАО «ВНИИКП», г. Москва
[*] *E-mail:* d.tarasov@vniikp.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-1600162

В конструкциях оптических кабелей (ОК) модульной конструкции для предотвращения распространения влаги внутри оптического модуля (ОМ) применяется внутримодульный гидрофобный заполнитель. Современная нормативная документация предъявляет к ОК требования по сроку службы, равному 25 годам, в ряде случаев – до 40, уже ведутся работы по ужесточению данного требования и доведения его до 60 лет. В течение всего срока службы ОВ в ОК, изготовленном с применением внутримодульного гидрофобного заполнителя, подвергается его воздействию, при этом воздействие гидрофобного заполнителя усиливается при повышенных температурах окружающей среды. Поэтому, одной из важных характеристик защитного покрытия (ЗП) оптических волокон (ОВ), применяемых в рассматриваемых ОК, является их совместимость с внутримодульными гидрофобными заполнителями. При этом ни один стандарт в РФ как не устанавливает требований к совместимости ОВ с гидрофобными заполнителями, так и не регламентирует процедуру проведения испытаний. Имеется лишь одна методика испытаний МИ 16.К00-158-2005 [1]. Согласно данной методике испытания на совместимость материалов ЗП ОВ с внутримодульным гидрофобным заполнителем необходимо проводить в составе ОК или ОМ. Область применения [1] распространяется лишь на оценку пригодности гидрофобных заполнителей к применению в конструкциях ОК, но ведь бывает и обратная ситуация – производитель применяет уже проверенный совместимый гидрофобный заполнитель, а в конструкции ОК применяется новое ОВ (или другой элемент конструкции ОК, находящийся в непосредственном контакте с заполнителем), т.е. ЗП ОВ ещё не проходило проверку на совместимость с используемым гидрофобным заполнителем. В данном случае, при получении отрицательных результатов испытаний, необходимо говорить не о непригодности гидрофобного заполнителя, а о необходимости замены нового конструктивного элемента.

Схожая картина наблюдается и с рекомендациями Международного союза электросвязи в части телекоммуникаций – МСЭ-Т (ITU-T). Требования к ЗП в части совместимости с гидрофобными заполнителями не прописаны. В рекомендации серии L [2] говорится лишь, что цвет окрашенного ОВ должен оставаться различимым в течение всего срока службы ОВ в присутствии любых кабельных материалов. Лучше дела обстоят со стандартами Международной электротехнической комиссии – МЭК (IEC). В части требований к ОВ (стандарты серии 60793) [3] наблюдается полное отсутствие требований по совместимости ЗП ОВ с гидрофобными заполнителями. Вместе с тем, стандарт IEC 60794-1-21 [4] (метод E5A) даёт описание процедуры проведения испытаний совместимости ЗП ОВ и гидрофобного заполнителя. Но в стандартах, устанавливающих требования к отдельным группам кабелей, таких как IEC 60794-3-11 [5], в разделе, определяющем требования к совместимости ЗП ОВ с гидрофобными заполнителями (пункт 7.3.3), дана ссылка лишь на стандарт [4], т.е. описана процедура испытаний без установки критериев годности.

Единственным исключением, известным авторам, как описывающим процедуру испытания на совместимость ЗП ОВ с гидрофобными заполнителями, так и критерии годности, является американский стандарт ANCI/ICEA S-87-640-2006 [6]. Образцы ОК достаточной длины подвергаются воздействию температуры 85°С в течение 30 дней без контроля относительной влажности воздуха. Концы кабеля должны быть заделаны во избежание вытекания водоблокирующих компаундов. После выдержки ОК в указанных условиях производится его разделка и проверка конструктивных элементов на совместимость с гидрофобными заполнителями. Данная процедура идентична описанной в стандартах МЭК. Но рассматриваемый стандарт [6] даёт и альтернативные способы проведения испытаний – помещение ОМ, заполненных внутремодульным гидрофобным заполнителем и содержащих ОВ, в ёмкость с межмодульным гидрофобным заполнителем, а также даёт возможность проводить испытания полимерно-металлических лент и материалов оболочки согласно ASTM D 4568 [7]. Стандарт [7] для материалов изоляции и оболочки кабелей предусматривает проведение испытаний на совместимость с гидрофобным заполнителем путём смачивания нагретым выше точки плавления гидрофобного заполнителя.

Исходя из вышесказанного, для ОВ имеется две опции проведения испытаний – в составе ОК или в составе ОМ, т.е. необходимо изготовить либо всё изделие, либо его часть, а в случае получения отрицательных результатов испытаний, придётся браковать всю изготовленную длину изделия, а не только отобранную длину для испытаний, что довольно накладно. Что касается всех элементов кабельной конструкции – имеется три метода испытания материалов на совместимость с гидрофобным заполнителем:

A. Испытание в составе ОК / ОМ;

B. Испытание выдержкой в ёмкости с гидрофобным заполнителем;

C. Испытание смачиванием в гидрофобном заполнителе (нанесение тонкого слоя гидрофобного заполнителя на поверхность материала).

Авторы данной статьи считают целесообразным применить все три метода для испытания совместимости ОВ с двухслойным акриловым ЗП и сравнить, какой из последних двух способов будет ближе (и будет ли вообще) к эталонному – первому способу (методу А) испытаний. Стоит отметить, что метод А является эталонным лишь для оценки совместимости ЗП ОВ с гидрофобным заполнителем и наоборот. Метод А не может являться эталонным для оценки совместимости ОМ с гидрофобными заполнителями, т.к. в ОК наряду с внутримодульным заполнителем может иметься и межмодульный. В случае наличия обоих типов заполнителей и отрицательных результатов испытаний затрудняется оценка совместимости применяемых кабельных элементов, т.к. не ясно, какой из гидрофобных заполнителей оказывает негативное воздействие на характеристики ОМ.

После анализа нормативной базы [1-6] в части совместимости ЗП ОВ с гидрофобными заполнителями были установлены критерии годности:

1. максимальное значение усилия снятия ЗП до и после испытаний с отрезка ОВ 30±3 мм должно лежать в интервале 1,0…8,9 Н,

2. среднее значение усилия снятия ЗП до и после испытаний должно лежать в диапазоне 1,0…5,0Н;

3. до проведения испытаний при 5-кратном увеличении ЗП ОВ не должно иметь трещин, разрывов или деламинации;

4. после проведения испытаний при 5-кратном увеличении ЗП ОВ не должно иметь трещин, разрывов или деламинации.

Критерии годности под номерами 1, 2 и 4 взяты из упомянутой выше нормативной документации [1, 6]. Критерий под номером три был добавлен авторами статьи, т.к. проверка ЗП на наличие поверхностных дефектов только после проведения испытаний не позволяет сделать однозначный вывод о том, что обнаруженные дефекты появились в ходе проведения испытаний. Для оценки воздействия гидрофобного заполнителя на ЗП при длительной выдержке при повышенной температуре, необходимо проводить осмотр ЗП с помощью увеличительной техники не только после испытаний, но и до проведения оных.

На основе выполненного анализа существующей нормативной базы ОАО «ВНИИКП», проводит сравнительные испытания по методам А, В и С, после чего будет произведено сравнение полученных результатов с целью определения метода (В или С) наиболее близкого к эталонному методу А. Поскольку для проведения испытаний методами В и С требуется лишь ОВ и внутримодульный гидрофобный заполнитель, они дают возможность экономии средств и времени, требующихся на изготовление ОК или элементов его конструкции.

Литература

1. *МИ 16.К00-158-2005 «Методика испытаний на совместимость полимерных материалов оптического модуля и оптического волокна с гидрофобным заполнителем»*
2. *ITU-T L.10 «Series L: Construction, installation and protection of cables and other elements of outside plant. Optical fibre cables for duct and tunnel application»*
3. *IEC 60792-2-50 «Optical fibres – Part 2-50: Product specifications for class B single-mode fibres»*
4. *IEC 60794-1-21 «Optical fibre cables – Part 1-21: Generic specification – Basic optical cable test procedures – Mechanical test methods»*
5. *IEC 60794-3-11 «Optical fibre cables – Part 3-11: Outdoor cables – Product specification for duct, directly buried and lashed aerial single-mode optical fibre telecommunication cables»*
6. *ANCI/ICEA S-87-640-2006 «Standard for optical fiber outside plant communications cable»*
7. *ASTM D 4568 «Standard test methods for evaluating compatibility between cable feeling and flooding compounds and polyolefin cable wire and cable materials»*

ВЫСОКОЧИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА С МАЛЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ПОТЕРЯМИ

Гурьянов А. Н.

Институт химии высокочистых веществ РАН, 603950, *г.Н.Новгород, ул. Тропинина,49*
e-mail:guryanov@ihps.nnov.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16063

Разработка волоконных световодов с низкими оптическими потерями на основе кварцевого стекла стала возможной благодаря успехам в области химии высокочистых исходных материалов и разработке новых методов получения стекол и световодов на их основе. К началу исследований по получению волоконных световодов на основе высокочистого кварцевого стекла были разработаны методы глубокой очистки летучих соединений кремния и некоторых легирующих компонентов, которые широко использовались в микроэлектронике. Такие материалы производились у нас в стране в промышленных масштабах. Содержание примесей переходных металлов в выпускаемых продуктах находилось на уровне 10^{-7} мас. %. Однако в этих материалах не лимитировалось содержание примесей водородсодержащих веществ. Поэтому встала задача разработки методов глубокой очистки и анализа от этого класса примесей, содержание которых в исходных веществах не должно превышать 10^{-6} мол. %. К сожалению, в настоящее время в нашей стране производство некоторых исходных веществ отсутствует. В настоящем сообщении будет дан анализ состояния производства исходных высокочистых веществ в нашей стране. Для получения высокочистых стекол и световодов на их основе были разработаны новые методы, основанные на химическом осаждении из газовой фазы. Разработаны волоконные световоды для передачи информации, оптические потери в которых определяются только фундаментальными механизмами.

В настоящее время активно ведутся исследования по получению световодов для волоконных лазеров, которые обладают целым рядом преимуществ и позволяют их использовать наравне с традиционными твердотельными и газовыми лазерами, а в некоторых случаях заменить их. В качестве активных добавок используются редкоземельные элементы (Er, Yb, Nd, Tm и др.). Первый волоконный лазер был создан Снитцером в 1961 году [1]. В качестве активного элемента лазера использовался стеклянный волоконный световод, содержащий ионы неодима. Однако в то время это направление не получило развития из-за отсутствия источников накачки. Кроме того волоконные световоды имели высокий уровень оптических потерь. Развитие технологии волоконных световодов на основе высокочистого кварцевого стекла с предельно низкими оптическими потерями и полупроводниковых источников накачки позволило вернуться к идее волоконных лазеров на качественно новом уровне. Начало бурного развития этого направления относится к 80-м годам прошлого столетия. К этому времени были разработаны волоконные световоды на основе высокочистого кварцевого стекла, легированного оксидом эрбия, которые нашли применение в системах связи в качестве волоконных усилителей сигнала в диапазоне длин волн 1,53-1,56 мкм [2].

Использование в качестве легирующих добавок соединений редкоземельных элементов потребовало разработки новых и модернизация существующих методов получения световодов для волоконных лазеров. Было показано, что свойства активных добавок сильно зависят от состава стекла сердцевины. Однако в области прозрачности кварцевого стекла у РЗЭ отсутствует люминесценция в области длин волн короче 900 нм и в диапазоне 1180-1500 нм. Поэтому возникла необходимость в поиске новых активных добавок. В последнее время интенсивно ведутся исследования по получению активных световодов с сердцевиной на основе высокочистого кварцевого стекла, легированного висмутом. В 2005 году впервые получена непрерывная лазерная генерация и реализован лазер на основе волоконного световода с сердцевиной из алюмосиликатного стекла, легированного висмутом, в диапазоне длин волн 1150-1300 нм [3]. Впоследствии было показано, что положение полосы висмутовых активных центров сильно зависит от состава стекла сердцевины. Это обстоятельство позволило разработать высокоэффективные лазеры с использованием световодов на основе высокочистого кварцевого стекла, легированного висмутом, генерирующие в диапазоне 1140-1500 и 1625-1775 нм.

Таким образом, разработанные технологии и подбор исходных материалов позволили создать световоды на основе высокочистого кварцевого стекла для высокоэффективных волоконных лазеров и усилителей, работающих в широком диапазоне длин волн (рис 1).

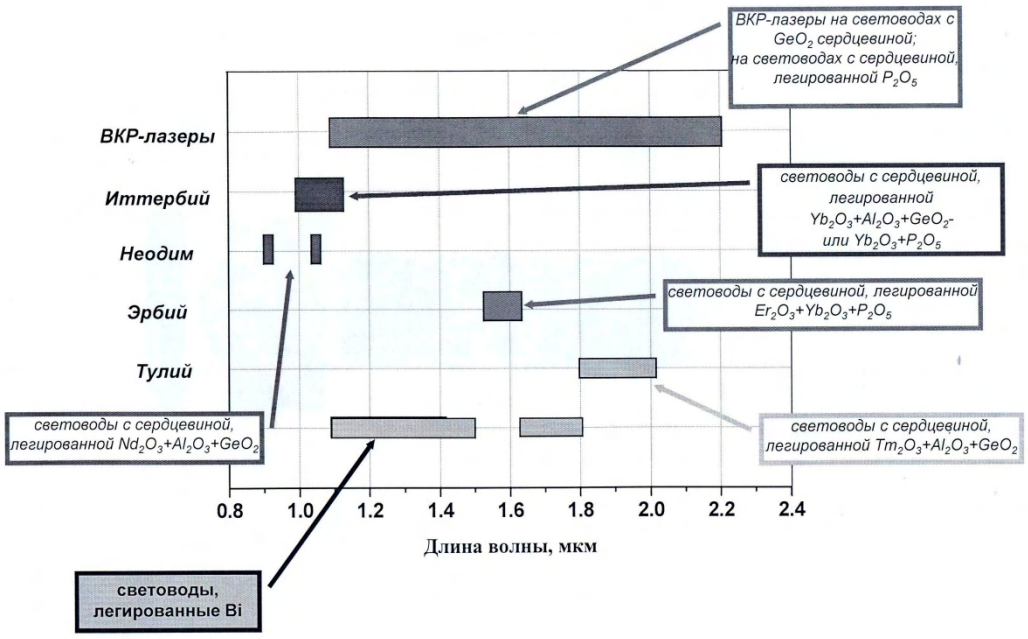


Рис 1. Области генерации волоконных лазеров на основе световодов с сердцевиной из высокочистого кварцевого стекла в ближнем ИК диапазоне

Исследования световодов, легированных РЗЭ, проводилась при поддержке гранта РНФ 17-13-01343.

Исследования световодов, легированных висмутом, проводилась по Госзаданию ИХВВ РАН.

Литература

1. *Snitzer E., Proposed fiber cavities for optical lasers, J. Appl. Phys.,1961, v.32 , pp 36-39*
2. *S.B. Pool, D.N. Payne and M.E. Fermann, Fabrication of low-loss optical fibers containing rare-earth ions, Electr. Lett., 1985, V.27, pp.737-738*
3. *Е.М. Дианов, и др., Непрерывный висмутовый волоконный лазер, Квантовая электроника, 2005, Т.35, № 12, с. 1-2*

АКТИВНЫЕ СВЕТОВОДЫ НА ОСНОВЕ ФТОРФОСФОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА

Лобанов А.С.[1*], Липатов Д.С.[1], Абрамов А.Н.[1], Гурьянов А.Н.[1], Кочергина Т.А.[2], Бобков К.К.[2], Худяков М.М.[2], Лихачев М.Е.[2]

[1] *Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН, Н. Новгород*
[2] *Научный центр волоконной оптики РАН, Москва*
[*] *E-mail: lobanov@ihps.nnov.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16064

Фосфоросиликатная матрица является лучшим материалом сердцевины Er-Yb световодов благодаря высокой эффективности передачи возбуждения от Yb к Er, исключающей обратную передачу. Максимальная эффективность преобразования излучения накачки в сигнал требует высокой концентрации РЗЭ в стекле (суммарно 6-7 мас.%), для растворения которых необходима высокая концентрация P_2O_5 (12 – 13 мол.%). Существенное увеличение показателя преломления стекла Er_2O_3-Yb_2O_3-P_2O_5-SiO_2 относительно нелегированного кварцевого стекла (dn ~ 0.017) приводит к необходимости снижения диаметра сердцевины одномодового световода. Для целого ряда применений (в первую очередь усилителей импульсного излучения с высокой пиковой мощностью) это оказывается неприемлемым вследствие уменьшения площади моды и снижения порога нелинейных эффектов. Компанией Nufern предложены лучшие на сегодняшний день световоды с Er_2O_3-Yb_2O_3-P_2O_5-SiO_2 сердцевиной, в которых dn ~ 0.005 обеспечена за счет осаждения массивной германосиликатной оболочки (пьедестала). В данной работе предложено другое решение – снизить показатель преломления сердцевины за счет дополнительного легирования F и впервые представлены Er-Yb световоды на основе фторфосфоросиликатной матрицы (FPS).

Преформы световодов изготавливались методом MCVD, на установке модифицированной системой подачи низко-летучих прекурсоров. Стекло сердцевины синтезировалось осаждением из газовой фазы с использованием в качестве прекурсоров $SiCl_4$, $POCl_3$, SiF_4, $Yb(thd)_3$ и $Er(thd)_3$. Было установлено, что стандартная MCVD методика (одновременное дозирование всех прекурсоров) не может применяться вследствие образования пузырей в осаждаемом стекле Er_2O_3-Yb_2O_3-F-P_2O_5-SiO_2 (RE-FPS), источником которых является POF_3, образующийся в большом количестве в данной схеме процесса. Кроме этого, низкое давление пара $Er(thd)_3$ и $Yb(thd)_3$ даже при 160 °C вызывает сложность введения высокой концентрации РЗЭ в стандартном процессе. В дальнейшей работе разрабатывалась методика раздельного осаждения слоя FPS матрицы и слоя оксодов RE.

Проведены исследования по синтезу FPS стекол с высоким содержанием P и F. Максимальная концентрация F во фторсиликатных стеклах достигается стеклованием аморфного слоя SiO_2 сажи при 100% атмосфере SiF_4. Были проведены эксперименты по стеклованию фосфоросиликатной сажи одинакового состава с различной долей SiF_4 в атмосфере трубы. С увеличением доли SiF_4 концентрация F в стекле возрастала, но при этом пропорционально снижалась концентрация P_2O_5 (рис. 1а) вследствие образования POF_3 в процессе сплавления сажи. Для сплавления слоя сажи в прозрачное стекло требовался нагрев до 1800 °C. Для оценки влияния температуры сплавления на потерю P_2O_5 методика была изменена. Слой FPS матрицы осаждался в направлении потока с одновременной подачей $SiCl_4$, $POCl_3$ и SiF_4. При температуре осаждения 1800°C с увеличением доли SiF_4 концентрация P_2O_5 в стекле снижалась в 2 раза быстрее (рис 1б), чем при сплавлении сажи. Это можно объяснить тем, что кроме испарения POF_3 из осаждаемого стекла, дополнительная потеря P_2O_5 происходит за счет образования POF_3 при взаимодействии $POCl_3$ и SiF_4.

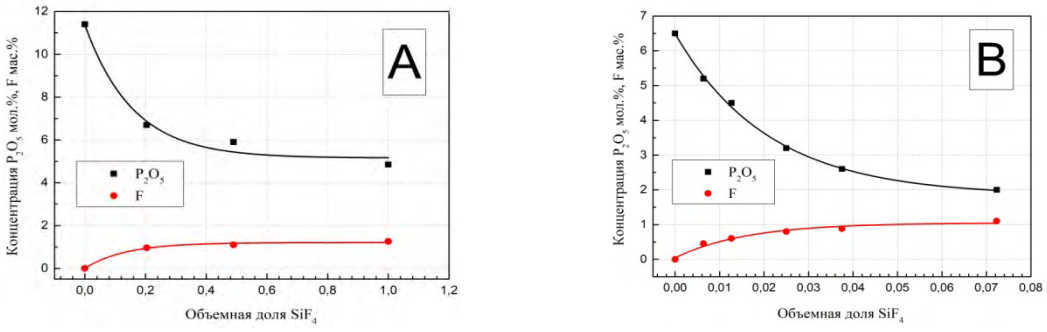


Рисунок 1. Зависимость концентрации P_2O_5 и F в стекле от объемной доли SiF_4 в атмосфере трубы: (А) – методика раздельного осаждения; (В) – стандартная методика

Проведены исследования по влиянию на состав FPS стекла температуры осаждения в диапазоне 1400-1800 °С, толщины слоя и состава парогазовой смеси. Снижением температуры осаждения до 1400 °С были получены FPS стекла, с такой же концентрацией P_2O_5 и F, как и в методике сплавления сажи. Увеличение толщины осаждаемого слоя и одновременное увеличение расхода SiF_4 и $POCl_3$ в парогазовой смеси не способствовали повышению концентрации F и P. Достигнутый уровень одновременного легирования ~ 1 мас.% F и ~ 7 мол.% P_2O_5 является рекордным для MCVD метода. Данный состав стекол использовался при изготовлении Er-Yb световодов.

Активные преформы изготавливались модифицированной методикой. Слой FPS матрицы осаждался в виде прозрачного стекла. Далее на его поверхности осаждалась смесь Er_2O_3 и Yb_2O_3, а затем снова осаждался слой матрицы. Стадия высокотемпературного сплавления двух слоев (FPS и Er_2O_3/Yb_2O_3) исключалась для сохранения P в стекле. Выравнивание состава стекла по сечению сердцевины происходило за счет диффузионных процессов во время консолидации трубы и при вытяжке световода.

Высокая эффективность передачи возбуждения требует максимально высокой концентрации Yb в стекле. Предельная концентрация Yb в FPS матрице определялась по результатам измерения оптических потерь в световодах (рис. 2) и составила ~ 2 мас.% Yb для FPS стекла содержащего 1 ат.% F и 7 мол.% P_2O_5. Проведены исследования по определению оптимальной концентрации оксидов РЗЭ в FPS стекле. Для этого была изготовлена серия преформ с сердцевиной легированной 0,15-0,34 мас.% Er и 0.9-1.9 мас.% Yb. Преформы были отполированы до квадратного сечения для повышения поглощения накачки из оболочки. Введение 1 мас.% F позволило уменьшить NA сердцевины до 0,07-0.08, что вместе с W-образным профилем показателя преломления обеспечило истинный одномодовый режим световода на 1.5 мкм, при диаметре сердцевины 20 мкм.

Обнаружено, что эффективность передачи возбуждения от Yb к Er растет с 20 до 38% при увеличении концентрации Er, но при этом эффективность усиления световода находится на одном уровне (~19%), что связано с концентрационным тушением люминесценции эрбия. В то же время доля ионов Yb^{3+} не передающих возбуждение ионам Er^{3+} и усиливающих излучение на 1030 нм снижается с 21 до 0,5%. В этой связи при одинаковой эффективности усиления предпочтительна высокая концентрация эрбия. Световод Nufern продемонстрировал немногим более высокую эффективность усиления 26.2 %.

Эффективность усиления световода RE-FPS и световода Nufern была измерена в схеме лазера и составила соответственно 34 и 37 % (рис. 3). Короткая длина световода Nufern не позволила увеличить мощность накачки свыше 25 Вт из-за недостаточного теплоотвода на короткой длине (возгорания полимерного покрытия). Для RE-FPS световода аналогичных проблем не наблюдалось, вплоть до 80 Вт накачки. Более важные результаты были получены при измерении параметра качества выходного пучка M^2. Для RE-FPS светода M^2 не превысил 1.1 во всем диапазоне выходной мощности (более 20 Вт), в то время как для световода Nufern качество пучка очень быстро ухудшалось (M^2 > 2.2 при мощности всего 7 Вт), что говорит о не одномодовом режиме.

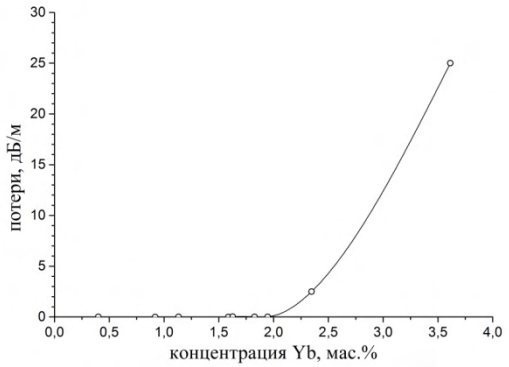


Рис. 2. Потери на длине волны 1200 нм

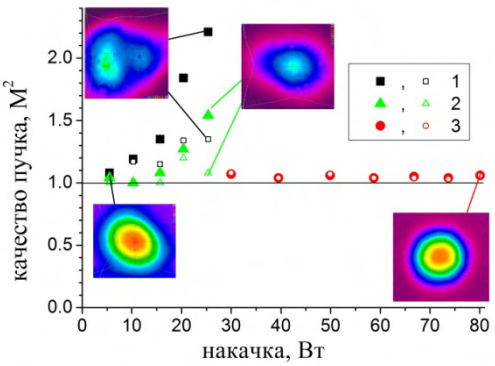


Рис. 3. Параметр M^2 : 1, 2 – световод Nufern (1 – изгиб диаметром 20 см;2 - изгиб диаметром 8 см) и 3 – разработанный световод (сплошные символы – сканирование по координате X, открытые символы – Y)

Работа выполнена при поддержке Гранта РНФ № 17-13-01343.

MCVD МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕТОВОДОВ С ОДНОРОДНОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ Yb_2O_3-Al_2O_3-P_2O_5-SiO_2

Липатов Д.С. [1*], **Гурьянов А.Н.** [1], **Бобков К.К.** [2], **Лихачев М.Е.** [2]

[1] *ИХВВ РАН, г. Нижний Новгород*
[2] *НЦВО РАН, г. Москва*
[*] *E-mail:* lidenis@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16065

Высоколегированное Yb_2O_3 алюмофосфоросиликатное стекло (Yb-APS) представляет большой интерес в качестве материала сердцевины одномодового световода. Большой диаметр сердцевины (малая Δn) и короткая длина световода (эффективное поглощение накачки) обеспечивают высокий порог нелинейных эффектов и высокую выходную мощность источников излучения. Состав и однородность стекла определяют форму профиля показателя преломления (ППП) световода, которая в свою очередь влияет на качество выходного пучка и диаметр поля моды. Световоды изготовленные методом MCVD имеют наибольшее изменение состава стекла в центре сердцевины вследствие интенсивного нагрева открытой поверхности осевого слоя при схлопывании преформы. В случае APS стекла испарение P_2O_5 приводит к существенному изменению показателя преломления. В зависимости от соотношения Al_2O_3/P_2O_5 на ППП образуется либо “пик”, что сужает диаметр поля моды и резко снижает порог нелинейных эффектов, либо “провал” – мода приобретает форму “бублик”. В работе представлены результаты исследований по изготовлению Yb-APS световодов с ровным и строго ступенчатым ППП.

Yb-APS стекло изготавливалось полностью из газовой фазы с использованием $SiCl_4$, $POCl_3$, $AlCl_3$ и $Yb(thd)_3$. Вначале осаждался пористый слой APS матрицы. Далее в трубу поступали пары $Yb(thd)_3$ и образующиеся в зоне нагрева частицы Yb_2O_3 осаждались на поверхности пористого слоя. Затем $Yb_2O_3/Al_2O_3/P_2O_5/SiO_2$ слой сплавлялся в прозрачное стекло в атмосфере CCl_4 для удаления водородсодержащих примесей. Изготовление сердцевины диаметром 2 мм происходило за счет осаждения 10 тонких слоев, каждый из которых пропитывался Yb_2O_3 в течении 2-4 проходов горелки. Для снижения испарения P_2O_5 использовалась тонкостенная опорная труба (толщина стенки 1,3 мм), которая перед осаждением сердцевины сжималась до внутреннего диаметра 5-6 мм. Это позволило снизить температуру (на 200-250 ºС) и время схлопывания (1 проход горелки), но даже в этих условиях происходило испарение P_2O_5 из центра сердцевины.

Для компенсации количества испаренного P_2O_5 последний слой изготавливался при увеличенном расходе $POCl_3$ (рис. 1). Объем слоя, из которого испаряется P_2O_5 меньше толщины осажденного слоя, в результате осевой слой имеет область с большей (H) и с меньшей (L) концентрацией фосфора относительно остальной сердцевины. Увеличение на 30 % расхода $POCl_3$ (кривая 2) компенсирует потерю P_2O_5 из области L, но повышает содержание P_2O_5 в области H и показатель преломления. Уменьшение же толщины центрального слоя до размера области L не позволяет сохранить требуемое количество P_2O_5 вследствие сложности удержания P_2O_5 в тонком слое при его сплавлении.

Следующий подход заключался в удалении Yb-APS слоя, обедненного P_2O_5. Трубчатая преформа сжималась до предельно малого внутреннего диаметра ~1.5 мм и внутренний поверхностный слой стекла стравливался в потоке $C_2F_3Cl_3$. Во время травления происходило помутнение осевого слоя сердцевины и в схлопнутой преформе центральная область становилась полностью непрозрачной. Обнаружено, что помутнение стекла обусловлено выделением Yb_2O_3 в отдельную фазу вследствие селективного травления Yb-APS стекла $C_2F_3Cl_3$:

$$3SiO_2 + 4C_2F_3Cl_3 + 5O_2\uparrow \rightarrow 3SiF_4\uparrow + 8CO_2\uparrow + 6Cl_2\uparrow \quad (1)$$

$$2Al_2O_3 + 4C_2F_3Cl_3 + 5O_2\uparrow \rightarrow 4AlF_3\uparrow + 8CO_2\uparrow + 6Cl_2\uparrow \quad (2)$$

$$2P_2O_5 + 4C_2F_3Cl_3 + 5O_2\uparrow \rightarrow 4POF_3\uparrow + 8CO_2\uparrow + 6Cl_2\uparrow \quad (3)$$

Согласно термодинамическому расчету Yb_2O_3 не взаимодействует с $C_2F_3Cl_3$. При температуре 1700-1900 ºС иттербий может удаляться из стекла в виде YbF_3 по реакции (4):

$$2Yb_2O_3 + 3SiF_4\uparrow \leftrightarrow 4YbF_3\uparrow + 3SiO_2 \quad (6)$$

Однако YbF_3 имеет низкую летучесть. В процессе травления поверхностный слой обедняется Al_2O_3 и P_2O_5, в то время как концентрация Yb_2O_3 становится выше предела растворимости в APS стекле и происходит выделение Yb_2O_3 в виде отдельной фазы.

Концентрация фосфора в стекле зависит не только от состава парогазовой смеси, толщины осаждаемого слоя и температуры его сплавления, но также определяется равновесием газ – твердая фаза. Для подавления испарения P_2O_5 из стекла процесс схлопывания был проведен в направлении потока $POCl_3$. Обнаружено, что в данном режиме схлопывания концентрация фосфора в осевом слое определяется концентрацией P_2O_5 в атмосфере трубы, которая в свою очередь зависит от количества $POCl_3$, пропускаемого через трубу до момента ее консолидации. В начале схлопывания происходит внедрение P_2O_5 из атмосферы трубы в размягченное стекло и показатель преломления осевой области увеличивается относительно остальной сердцевины (рис. 2 точка 100 мм). Центральный участок преформы длиной ~ 100 мм имеет однородное стекло сердцевины (рис. 2 точка 200 мм), а в конце преформы концентрации пара P_2O_5 в трубе становится недостаточной для подавления испарения P_2O_5 из осажденного стекла, что приводит к снижению показателя преломления в центре преформы (рис. 2, точка 300 мм).

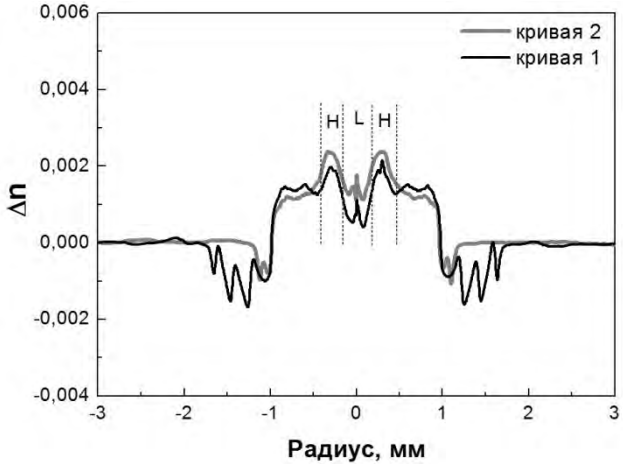


Рисунок 1. ППП в преформах, изготовленных при повышенном на 15 % (кривая 1) и 30 % (кривая 2) расходом $POCl_3$ в последнем слое

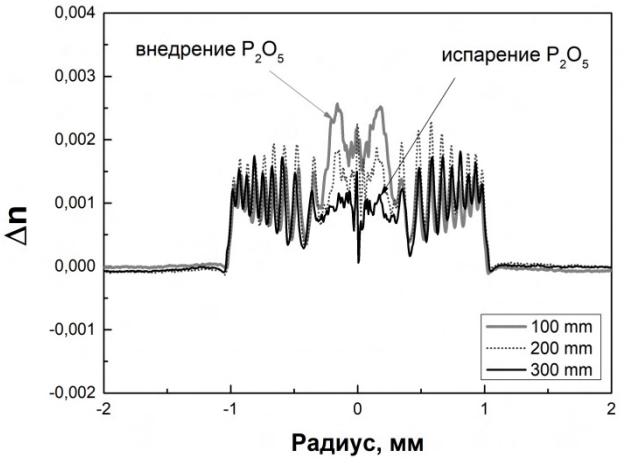


Рисунок 2. ППП в преформе с Yb-APS сердцевиной, схлопывание проводилось в направлении потока $POCl_3$

Размер центрального провала в фосфоросиликатных световодах не зависит от количества проходов сжатия трубы, поскольку основная доля P_2O_5 испаряется в течении первого прохода сжатия, когда внутренний диаметр трубы максимален и высокотемпературной обработке подвергается большая площадь поверхности стекла. С целью снижения площади поверхности осевого слоя, труба с осажденным Yb-APS стеклом сжималась до предельно малого внутреннего диаметра 1-2 мм. Чтобы исключить потерю P_2O_5 в трубу поступал $POCl_3$. Консолидация трубы проводилась при обратном проходе горелки и пониженном давлении в атмосфере кислорода для исключения внедрения P_2O_5 в осевой слой сердцевины. На рисунке 3 представлены данные преформы с Yb-APS сердцевиной, изготовленной с учетом всех особенностей разработанного метода. Одинаковая форма ППП (A), снятых по длине преформы и накладывающихся друг на друга, а также элементный анализ стекла (B) свидетельствуют об однородности Yb-APS стекла на участке преформы 270 мм.

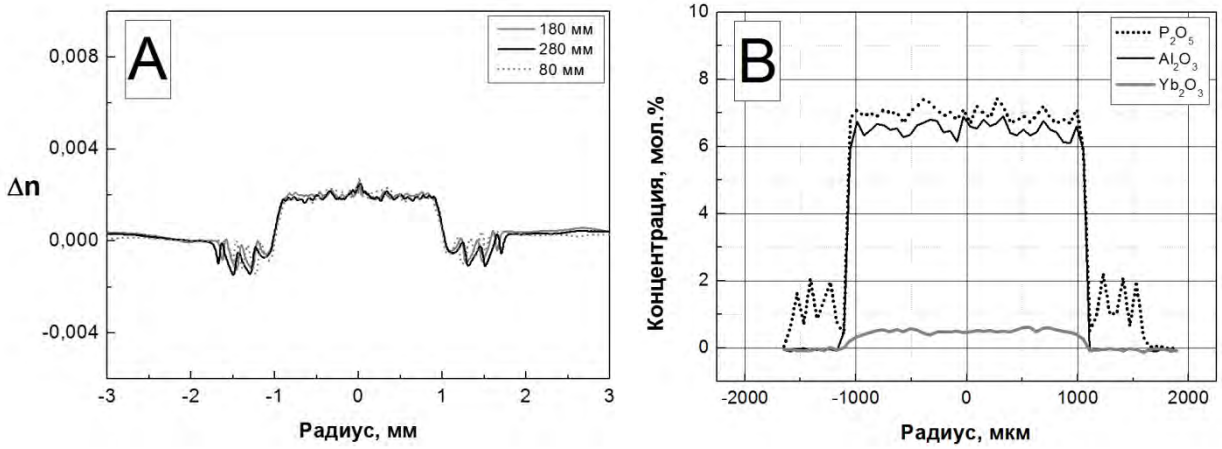


Рисунок 3. ППП (A) и анализ стекла сердцевины (B) в Yb-APS преформе

Работа выполнена в рамках госзадания ИХВВ РАН и программы президиума РАН №13

ПОДАВЛЕНИЕ НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫХ МОД ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА С ДВОЙНОЙ ОБОЛОЧКОЙ ПОСРЕДСТВОМ ВНЕСЕНИЯ ПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПЕРВУЮ ОТРАЖАЮЩУЮ ОБОЛОЧКУ

Кочергина Т.А.[1*], Алешкина С.С.[1], Липатов Д.С.[2], Салганский М.Ю.[2], Вельмискин В.В.[1], Бубнов М.М.[1], Гурьянов А.Н.[2], Лихачев М.Е.[1]

[1] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[2] Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН, г. Нижний Новгород
[*] E-mail: tatyana@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16066

Успехи проектирования и развития мощных волоконных лазерных систем были достигнуты в большей степени в результате применения активных волоконных световодов с двойной отражающей оболочкой. Однако необходимо учитывать, что понятие «одномодовости» в таких световодах теряет свой первоначальный смысл. Расположенные за длиной волны отсечки моды сердцевины световода благодаря присутствию второй отражающей оболочки продолжают распространяться в первой отражающей оболочке. В случае, когда размер первой отражающей оболочки значительно превышает размер сердцевины, большая часть мощности нежелательных мод локализована в первой отражающей оболочке, имеет малое перекрытие с активной сердцевиной и не оказывается негативного воздействия на качество выходного пучка. Но в случае необходимости применения волоконных световодов с предельно большим отношением диаметров сердцевины и оболочки, существенная доля мощности нежелательных мод может быть локализована в области сердцевины, и, усиливаясь наравне с фундаментальной модой LP_{01}, заметно ухудшать качество выходного пучка.

В настоящей работе нами предложена и реализована новая методика подавления нежелательных мод волоконного световода с большим соотношением диаметров сердцевины и оболочки посредством создания условий квазиодномодового режима распространения излучения. В конструкцию первой отражающей оболочки световода введены дополнительные поглощающие элементы таким образом, чтобы обеспечить резонансное взаимодействие между нежелательными модами, локализованными в сердцевине световода, и модами, локализованными в поглощающих элементах оболочки. Такой подход позволяет существенно увеличить потери на распространение для нежелательных мод в волоконном световоде. В рамках настоящей работы были спроектированы структуры с кольцевым поглощающим слоем и с тремя поглощающими стержнями для спектрального диапазона работы эрбиевых волоконных лазеров (λ~1.55 мкм). Моделирование конструкций волоконных световодов [1, 2] осуществлялось посредством решения скалярного волнового уравнения, а также с использованием программного пакета COMSOL.

Заготовка с поглощающим слоем была реализована при помощи техники «стержень в трубке» [3]. В данном случае методом модифицированного осаждения из газовой фазы (MCVD) была изготовлена германосиликатная заготовка сердцевины ($\Delta n_{сердцевины}$= 0.0007), внешний диаметр опорной кварцевой трубы в которой был стравлен до размера, соответствующего положению поглощающего слоя. Затем на заготовку сердцевины была нахлопнута кварцевая труба с нанесенным на внутреннюю поверхность методом MCVD алюмосиликатным слоем, легированным до высокой концентрации (2 вес %) ионами Tm^{3+} ($\Delta n_{слоя}$= 0.007). Из реализованной заготовки был вытянут волоконный световод с диаметром сердцевины равным 40 мкм, и диаметром оболочки равным 125 мкм. Профиль показателя преломления (ППП) световода показан на Рис.1а.

Так же был изготовлен волоконный световод с поглощающими стержнями. Заготовка световода была реализована методом MCVD, затем в ней были просверлены три отверстия равноудаленно от оси световода и вставлены изготовленные MCVD методом заготовки поглощающих стержней. Сердцевина поглощающих стержней была легированы ионами Tm^{3+} (1,2 вес %) [4], малая разность показателя преломления сердцевины и оболочки стержней ~ 0.003 обеспечивалась выбором фосфороалюмосиликатного стекла в качестве матрицы сердцевины. Два поглощающих стержня имели одинаковый диаметр и показатель преломления и оптимизировались для максимального искажения формы моды LP_{11}. Третий стержень добавлялся для подавления моды LP_{21}. Итоговая конструкция консолидировалась и вытягивалась в световод. Диаметр германосиликатной сердцевины равнялся 32 мкм, диаметр оболочки 120 мкм, Δn сердцевины был равен 0.0022. ППП волоконного световода с внедренными тремя дополнительными стержнями показан на Рис.1б.

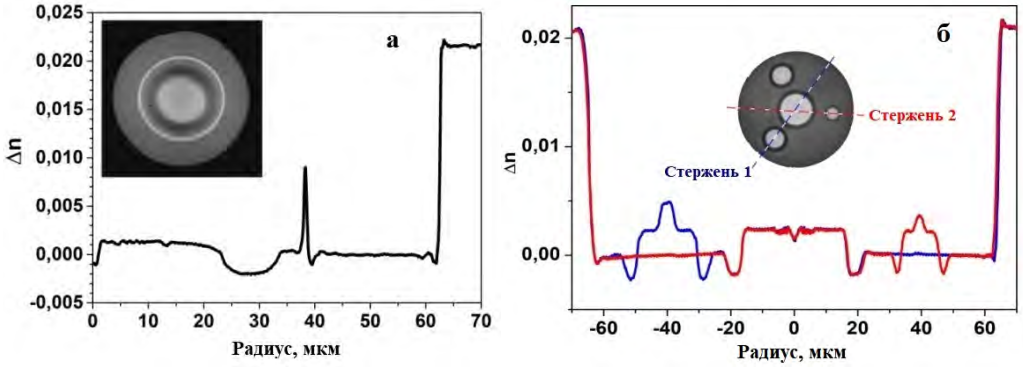


Рис. 1. Профиль показателя преломления (ППП) реализованного волоконного световода и фотография торца световода (на вставке): (а) с кольцевым поглощающим слоем; (б) с тремя поглощающими стержнями, цветными линиями показаны сечения, в которых производились измерения ППП

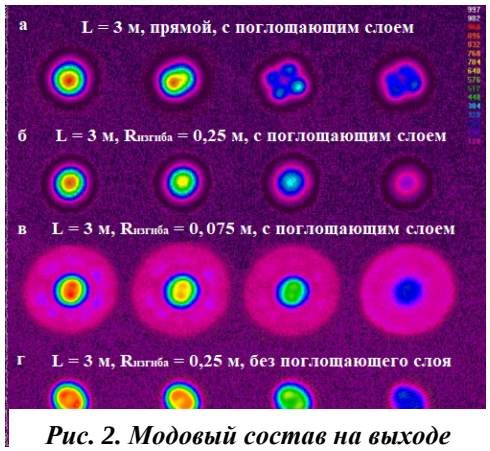


Рис. 2. Модовый состав на выходе волоконного световода с кольцевым поглощающим слоем

Исследование модового состава сердцевины обоих типов волоконных световодов осуществлялось посредством метода сканирующего пучка на длине волны 1,55 мкм.

Волоконный световод с поглощающим слоем был оптимизирован для работы в изогнутом состоянии (будучи намотанным на катушку диаметром 0,5 м). Это подтверждает Рис. 2, из которого видно, что при указанном диаметре наблюдался одномодовый режим распространения (б), тогда как при уменьшении (а) или при увеличении (в) диаметра намотки наблюдалось очевидное ухудшение качества выходного пучка. При исследовании световода без поглощающего слоя в идентичных условиях отмечалось распространение моды LP_{11} (г), а при расчете модового состава сердцевины в таком световоде наблюдалась локализация мод высшего порядка LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}. Таким образом, экспериментально подтверждается факт подавления нежелательных мод сердцевины за счет поглощения в слое.

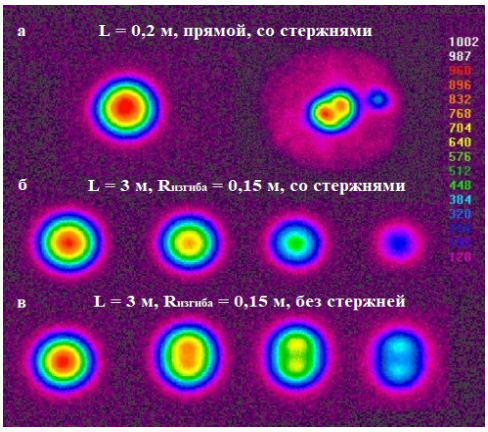


Рис. 3. Модовый состав на выходе волоконного световода с тремя поглощающими стержнями

Также был исследован волоконный световод с поглощающими стержнями (Рис. 3). Исследование модового состава сердцевины световода показало, что присутствие поглощающих стержней приводило к подавлению нежелательных мод сердцевины. На коротком отрезке длиной 0,2 м (а) было отмечено распространение LP_{01}, LP_{11}, и как видно из рисунка, часть доли мощности моды LP_{11} локализована в одном из поглощающих стержней, что способствовало ее подавлению. При длине отрезка более 3 метров и радиусе изгиба 0,15 м (б) происходило устранение моды LP_{11} за счет перекачки ее мощности в поглощающий стержень. Радиус изгиба варьировался до 0,07 м без ухудшения доли мощности фундаментальной моды в сердцевине.

При исследовании световода без поглощающих стержней в идентичных условиях было зафиксировано распространение обеих мод (в). Таким образом, экспериментально подтверждается факт устранения нежелательной моды LP_{11} сердцевины за счет поглощения в стержнях.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-12-10553).

Литература

1. *Кочергина Т.А., Алешкина С.С. и др., В кн.: Российский семинар по волоконным лазерам, 122-123 (2018)*
2. *Aleshkina S.S., Bubnov M.M., et al, in Advanced Solid State Lasers (ASSL), ATu2A.9 (2018)*
3. *Aleshkina S.S., Likhachev M.E., et al, Optics Letters 36, 3566-3568 (2011)*
4. *Кочергина Т.А., Алешкина С.С. и др., Квантовая электроника 48, 733-737 (2018)*

КВАРЦЕВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ, АКТИВИРОВАННЫЕ НАНОКРИСТАЛЛАМИ YAG:Nd^{3+}

Евстропьев С.К.[1,2], Асеев В.А.[1], Демидов В.В.[3*], Кузьменко Н.К.[1], Матросова А.С.[1,3], Комаров А.В.[3], Дукельский К.В.[1,4], Никоноров Н.В.[1], Орешкина К.В.[1]

[1] *Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург*
[2] *Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург*
[3] *Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, г. Санкт-Петербург*
[4] *Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург*
** E-mail:* demidov@goi.ru

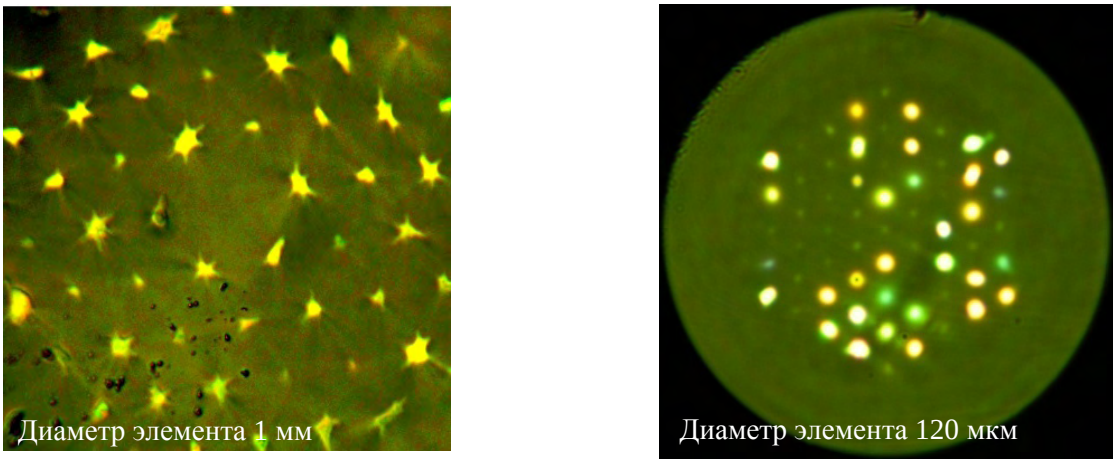
DOI 10.24411/2308-6920-2019-16067

Лазеры и усилители, в качестве активной среды которых используются легированные ионами редкоземельных металлов кварцевые волоконные световоды (КВС), находят широкое практическое применение и являются объектом интенсивных исследований [1-3]. Однако, несмотря на высокий уровень развития технологии получения кварцевого стекла, создание активных матриц с ионами редкоземельных металлов, обладающих высокими люминесцентными характеристиками, остается трудноразрешимой задачей.

Известно, что расположение ионов неодима (Nd^{3+}) в матрице алюмо-иттриевого граната (Yttrium Aluminum Garnet, YAG) обеспечивает превосходные люминесцентные свойства [2], благодаря чему этот лазерный материал получил обширное применение на практике. С другой стороны, ни одна из существующих технологий не позволяет модифицировать кварцевое стекло кристаллами YAG:Nd^{3+} с необходимой воспроизводимостью. По этой причине разработка КВС, активированных кристаллами YAG:Nd^{3+}, представляет собой актуальную проблему, решение которой имеет важное значение для развития отрасли мощных волоконных лазеров и усилителей.

Цель настоящего исследования заключалась в разработке прототипа активного КВС, в матрицу которого введены высоколюминесцентные нанокристаллы YAG:Nd^{3+}, и характеризации его свойств. Основная идея состояла в использовании преформ микроструктурированных КВС, содержащих в каналах предварительно выращенные нанокристаллы малого размера.

Технологический процесс получения оптических элементов включал набор последовательных операций: 1) приготовление однородного пленкообразующего раствора, обладающего высокой адгезионной способностью с поверхностью кварцевого стекла; 2) пропитка каналов предварительно подготовленной преформы микроструктурированного КВС; 3) сушка и прокаливание пропитанных раствором преформ при температуре 1000-1100 °С; 4) перетягивание преформ в КВС при температуре 2000-2100 °С. На Рис. 1 представлены изображения поперечного сечения вытянутых оптических элементов.

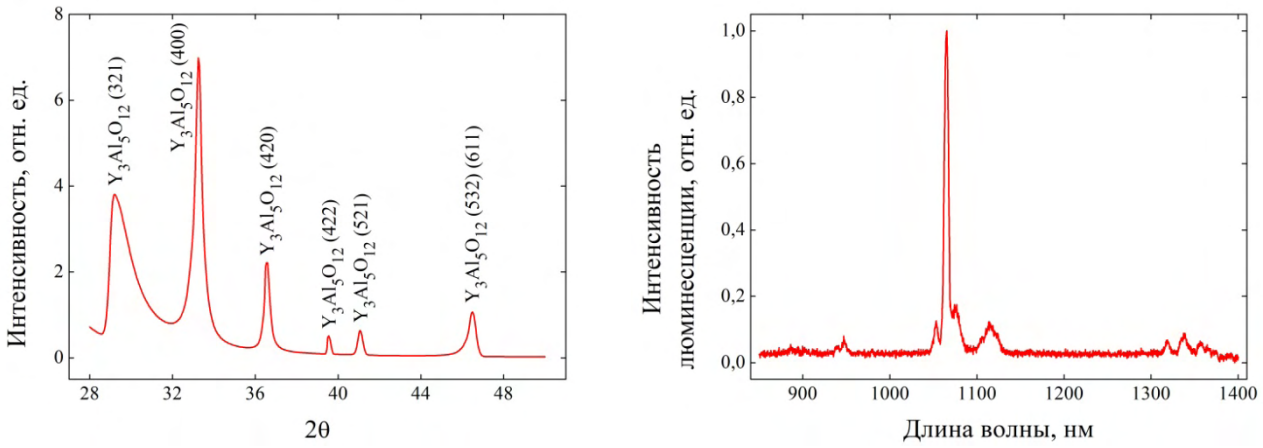


а) б)

Рис. 1. Изображение поперечного сечения КВС с нанокристаллами YAG:Nd^{3+}, полученного оттягиванием локального участка преформы в пламени кислородно-водородной горелки тепломеханического станка системы MCVD (а) и вытягиванием преформы на башне вытягивания при температуре 2000 °С (б)

Для формирования покрытий на основе нанокристаллов YAG:Nd^{3+} в каналах преформы микроструктурированного КВС применялся жидкостный полимерно-солевой метод, базирующийся на использовании растворов с содержанием термически разлагаемых солей металлов и растворимого органического полимера [4]. В качестве прекурсоров для изготовления покрытий были выбраны водные растворы $Y(NO_3)_2$, $Al(NO_3)_2$, $NdCl_3$ и поливинилпирролидон. Заданные количества этих компонентов смешивали при интенсивном перемешивании в течение 30 минут в условиях комнатной температуры до получения однородных и прозрачных пленкообразующих смесей. Каналы преформы заполнялись полученными смесями также при комнатной температуре. После сушки в естественных условиях в течение 24 часов преформу подвергали термической обработке в электрической печи при температуре 1100 °C в течение 2 часов.

Состав кристаллической фазы в вытянутом КВС определяли рентгеновским дифрактометром Rigaku Ultima IV. Для оценки размеров отдельных кристаллов использовали метод Дебая-Шеррера. Люминесцентные характеристики материала исследовали с помощью экспериментальной установки, имеющей в своем составе твердотельный лазер на кристалле YAG:Nd и фотоприемник. Результаты рентгенофазового анализа и измеренный спектр люминесценции приведены на Рис. 2.



а) б)

Рис. 2. Результаты рентгенофазового анализа (а) и спектр люминесценции (б) КВС с нанокристаллами YAG:Nd^{3+}, полученного перетягиванием преформы на башне вытягивания при температуре 2000 °C

Рис. 2а показывает наличие ориентированных нанокристаллов YAG:Nd^{3+} в составе вытянутого КВС. Это свидетельствует о том, что нанокристаллы, предварительно сформированные в каналах преформы при температуре 1100 °C, сохранились в матрице кварцевого стекла в процессе повторной термической обработки при температуре 2000 °C. Последняя из указанных температур выше температуры плавления объемного кристалла YAG, составляющей 1940 °C [5]. Отсутствие заметных изменений в структуре нанокристаллов при изготовлении КВС можно объяснить высокой скоростью процесса вытягивания и, соответственно, его малой продолжительностью. Размер нанокристаллов составил от 25 до 38 нм, что, исходя из высокой разницы показателей преломления кварцевого стекла (n = 1,46) и нанокристаллов YAG (n = 1,83), должно способствовать минимизации рассеяния света. Измеренное методом обрыва значение оптических потерь на длине волны 1064 нм оказалось равным 10 дБ/м.

Форма представленного на Рис. 2б спектра люминесценции КВС с нанокристаллами YAG:Nd^{3+} характерна для кристаллов YAG:Nd и практически идентична таковой для объемных материалов, а также для нанокристаллов, полученных различными методами [6]. Основной пик излучения на длине волны 1064 нм соответствует электронному переходу $^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$. Время затухания люминесценции составило 248 мкс, что сопоставимо с аналогичным параметром для объемного кристалла (292 мкс).

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00596).

Литература

1. *Tammela S., et al, Proceedings of SPIE 6116, 61160G (2006)*
2. *Martial I., et al, Optics Express 19, 11667-11679 (2011)*
3. *Mrazek J., et al, Applied Sciences 8, 833 (2018)*
4. *Evstropiev S.K., et al, Optical Engineering 55, 047108 (2016)*
5. *Iida Y., et al, Vibrational Spectroscopy 19, 399-405 (1999)*
6. *Hreniak D., et al, Materials Science 20, 39-45 (2002)*

ИЗГОТОВЛЕНИЕ АКТИВНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ НА ОСНОВЕ ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ МЕЗОПОРИСТЫХ СТЕКОЛ

Дианов Е.М.[1], Исхакова Л.Д.[1], Вельмискин В.В.[1*], Пластинин Е.А.[1], Милович Ф.О.[2], Машинский В.М.[1], Фирстов С.В.[1]

[1] *Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва*
[2] *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва*
[*] *E-mail:* vvv@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16068

На пути увеличения эффективности волоконных лазеров стоит ряд проблем, одной из которых является образование кластеров активных элементов при увеличении их концентрации. В случае висмутовых волоконных лазеров это приводит к тому, что высокая эффективность достигается при очень низких концентрациях Bi (<0,02 ат.%) и при рабочих длинах 50 – 100 метров.

Одним из возможных решений этой проблемы является использование пористых стекол (ПС) для создания активных лазерных сред. Как правило, ПС изготавливаются по технологии фазового разделения двухфазных щелочно-боросиликатных стекол, и материал пористой структуры имеет примерно следующий состав: $96{,}4SiO_2$-$2{,}9B_2O_3$-$0{,}2Al_2O_3$-$0{,}02Na_2O$ [1]. Недавно были получены эффективные волоконные световоды, легированные редкоземельными элементами, с использованием ПС и эффективные волоконные лазеры на их основе [2], а также опубликовано несколько статей, посвященных введению висмута в ПС и исследованию их люминесцентных характеристик [3]. Однако, публикаций, посвященных висмутовым волоконным световодам, созданным на основе пористых стекол, на данный момент нами обнаружено не было.

Изготовление таких световодов представляет сложный технологический процесс, включающий в себя несколько стадий. В данной работе в качестве исходного материала для изготовления заготовок висмутовых волоконных световодов использовались образцы пористых стекол со средним размером пор 4 – 5 нм, изготовленные методом фазового разделения щелочно-боросиликатного стекла в Национальной лаборатории оптоэлектроники, Хуачжунский университет науки и технологии, Ухань, КНР.

С использованием методики, описанной в [4] был получен ряд монолитных прозрачных стекол с концентраций висмута <0,02; 0,05; 0,127, 0,55 и 0,8 ат.%. Поскольку показатель преломления полученных стекол был близок к показателю преломления кварцевого стекла, для изготовления заготовок волоконного световода проводилось жакетирование полученных образцов с помощью трубки из кварцевого стекла, легированного фтором, с более низким показателем преломления. После этого для получения требуемого соотношения диаметров сердцевины и оболочки, необходимого для создания одномодовых волоконных световодов, проводилось еще одно жакетирование полученных образцов с использованием трубки из сверхчистого кварцевого стекла. Типичный вид профиля показателя преломления полученных заготовок показан на рис. 1. Из полученных таким путем заготовок были вытянуты одномодовые волоконные световоды и измерены их спектрально-люминесцентные характеристики.

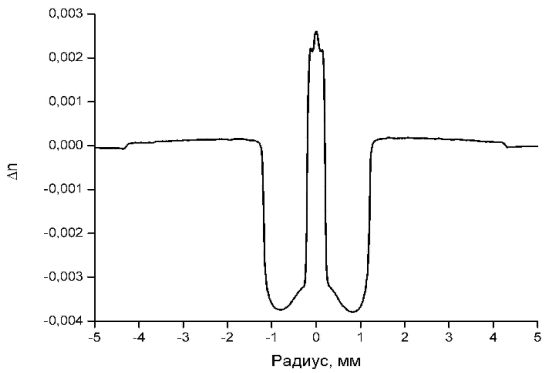


Рис. 1. Типичный профиль показателя преломления заготовки

Спектры люминесценции полученных образцов содержат две полосы с максимумами на волнах 800 и 1100 нм с временами жизни 3 – 10 мкс и 750 мкс, соответственно, что схоже с данными опубликованными для легированных висмутом алюмосиликатных MCVD световодов и преформ.

На рис. 2 показаны спектры поглощения (кривые 1 и 2) и люминесценции (кривая 4) волоконных световодов с 0,05 и 0,55 ат.% Bi и для сравнения спектр поглощения алюмосиликатного волоконного световода, изготовленного MCVD методом с <0,02 ат.% Bi (кривая 3). Видно качественное и количественное сходство между спектрами поглощения световодов, полученных различными технологиями (кривые 1 и 3)

при небольших концентрациях висмута. В обоих случаях наблюдаются полосы поглощения на длинах волн 500, 700 и 1000 нм, принадлежащие висмутовым активным центрам, ассоциированным с алюминием. При этом спектры поглощения практически совпадают в области длин волн 400 – 1200 нм в ПС-световоде с 0,05 ат. % Bi и в MCVD-световоде с концентрацией висмута намного меньше (<0,02 ат. %). Это означает, что как концентрация висмутовых активных центров, так и уровень фоновых потерь в этих световодах близки и, следовательно, технология на основе пористых стекол имеет больший потенциал с точки зрения увеличения концентрации ВАЦ без появления больших фоновых потерь. Влияние таких потерь видно на примере световода с концентрацией висмута на порядок больше (0.55 ат.%) – потери в нем существенно выше, а относительная величина полос активных центров меньше. Причиной роста оптических потерь может быть неравномерное распределение висмута и его кластеризация, но этот вопрос требует более детального исследования. В области длин волн больше 1200 нм большое поглощение в спектрах световодов на основе пористых стекол обусловлено остаточной примесью ОН-групп (полосы около 1240 и 1380 нм).

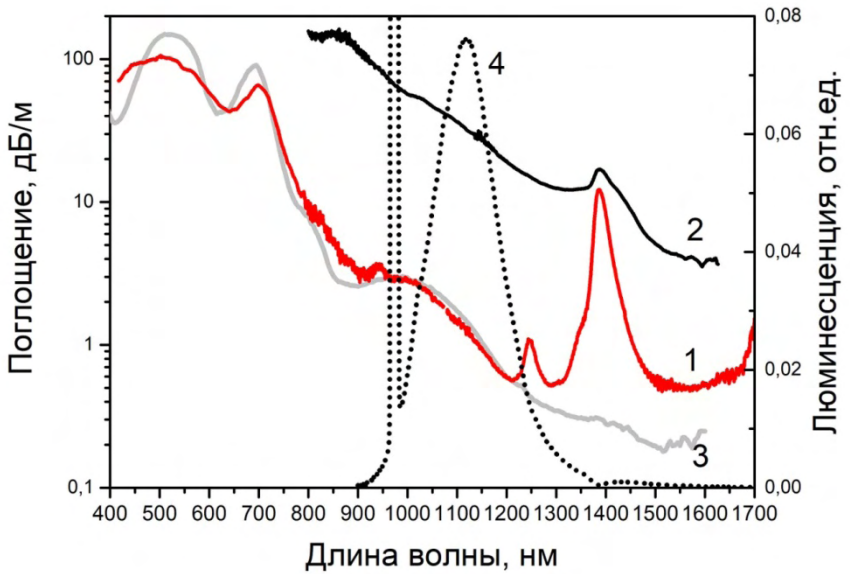


Рис. 2. Спектр поглощения световодов с концентрацией висмута 0.05 (1) и 0.55 (2) ат.%; спектр поглощения алюмосиликатного MCVD световода с 0,02 ат.% Bi (3); спектр ИК люминесценции образца с 0.05 ат.% Bi, полученный при возбуждении на 975 нм (4)

Более подробно полученные результаты будут представлены в докладе.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН №32 «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий».

Литература

1. *Elmer T. H., et al, Engineered Materials Handbook, 4, Ceramics and Glasses, 427 (1992)*
2. *Chu Y., et al, Opt. Lett., 41, 1225 (2016)*
3. *Zhou Sh., et al, Adv. Funct. Mater., 18, 1407 (2008)*
4. *Dianov E. M., et al, Quantum Electron., 48, 658-661 (2018)*

СТРУКТУРА И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ МЕЗОПОРИСТЫХ СТЕКОЛ И ПРЕФОРМ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Дианов Е.М.[1], Пластинин Е.А.[1,2*], Исхакова Л.Д.[1], Вельмискин В.В.[1], Машинский В.М.[1], Фирстов С.В.[1], Милович Ф.О.[1,3]

[1] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный
[3] Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва
[*] E-mail: plastinin.evgeny@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16069

Висмутовые волоконные световоды представляю большой интерес с точки зрения работы в широкой области ближнего ИК-диапазона, включая 1250-1500 нм и 1625-1775 нм, где отсутствуют эффективные усилители на основе редкоземельных волоконных лазеров. Впервые висмутовые волоконные световоды были разработаны в 2005 году.[1] После этого были созданы различные световоды с сердцевиной, легированной висмутом, позволяющие получить генерацию в диапазоне от 1140 нм до 1775 нм, а также были продемонстрированы висмутовые усилители для длин волн 1320, 1430 и 1700 нм.[2-7]

Несмотря на достигнутые успехи, существует ряд проблем, связанных с изготовлением висмутовых волоконных световодов. Основной технологией изготовления таких световодов является модифицированное осаждение из газовой фазы (MCVD). У неё есть ряд недостатков, одним из которых является невозможность введение более 0.02 ат.%. висмута, в противном случае наблюдается кластеризация атомов Bi, которая приводит к гашению люминесценции и росту оптических потерь. По этой причине, для создания высокоэффективных висмутовых лазеров и усилителей необходимы световоды с длиной порядка 100 метров, что недопустимо для многих практических применений.

Для решения этой проблемы мы решили использовать пористые стёкла (ПС), изготовленные методом фазового разделения двухфазных щелочных боросиликатных стёкол. Типичный состав таких стёкол имеет вид: 96.4 SiO_2-2.9 B_2O_3-0.2 Al_2O_3-0.02 Na_2O.[8] Первые работы по легированию активными элементами ПС были опубликованы в 1980-ые, но лишь недавно были продемонстрированы эффективные лазеры на их основе. [9]

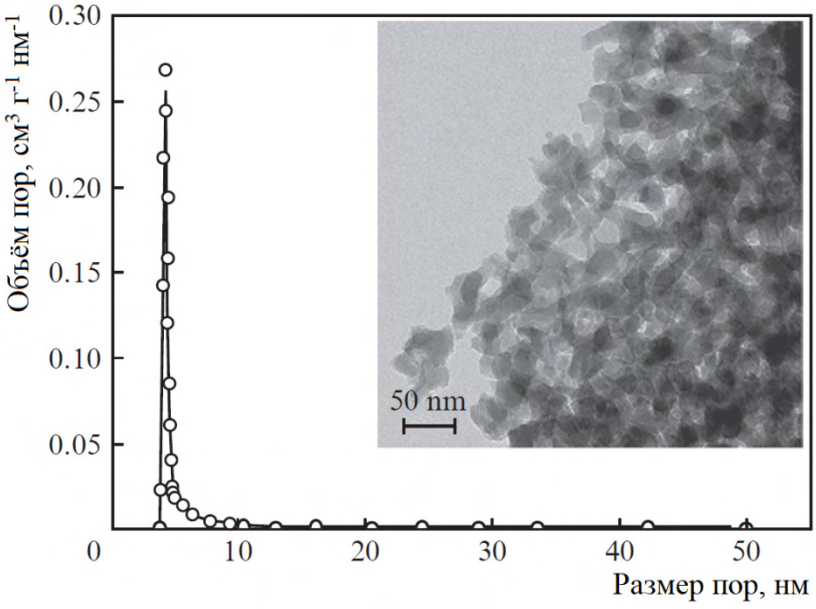


Рис.1 Распределение размера пор в ПС и фотография ПС с ПЭМ

В нашей работе для легирования ПС висмутом мы использовали метод пропитки водным раствором $Bi(NO_3)_3$. Использованные образцы ПС были изготовлены в National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan (China). Структура пористого стекла была изучена методами электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа. Средний размер пор в ПС составил 4 нм, что на 2 порядка меньше, чем размер пор MCVD-слоёв. На рисунке 1 представлено распределение пор по размерам, а также фото пористого стекла с просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ). В Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» - ИРЕА был проведён анализ химического состава стёкол с помощью метода индуктивно-связанной плазмы атомно-эмиссионной спектрометрии.

Мы разработали многостадийную методику легирования ПС висмутом из водного раствора нитрата висмута. С помощью неё мы получили образцы стекла с концентрацией висмута от 0.01 ат.%

до 1.0 ат.%. В отличие от образцов, полученных по технологии MCVD, при больших концентрациях висмута не наблюдалось окрашивание стекла. На рисунке 2 представлен образец со концентрацией висмута ~1.0 ат.%.

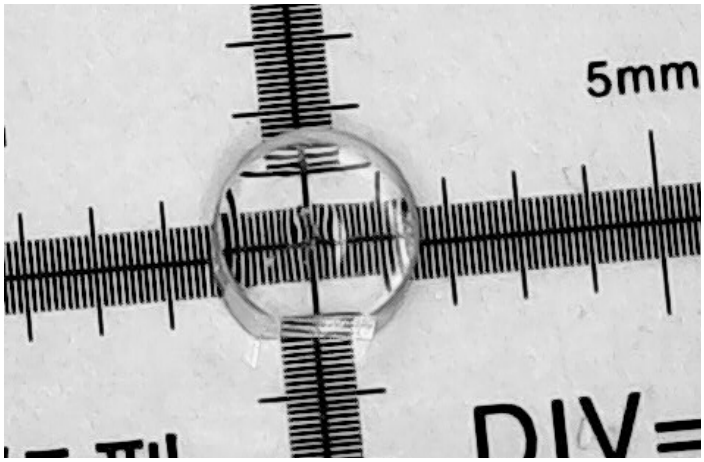


Рис.2 Микрофотография среза объёмного образца, легированного висмутом. Концентрация висмута ~1.0 ат.%

Было произведено исследование люминесцентных свойств полученных стёкол. Для этого использовали источники лазерного излучения с длиной волны 488, 676 и 988 нм, соответствующие типичным длинам волн возбуждения в стёклах, легированных висмутом: 500, 700 и 1000 нм.[10] Спектры люминесценции оказались типичными для MCVD-стёкол с висмутом. Дополнительно, с помощью флуориметра Edinburgh Instruments FLSP920 было изучено время жизни люминесценции в образцах для различных длин волн. Времена жизни люминесценции совпали с аналогичными данными по легированным висмутом MCVD-стёклам.

Анализ спектров люминесценции показал, что ионы Bi^{2+}, а также активные висмутовые центры (АВЦ) на алюминии и на кремнии вносят основной вклад. По результатам спектрометрических исследований определена оптимальная концентрация висмута, которая составляет ~0.1 ат.%.

Из полученных стёкол изготовлен ряд преформ висмутовых волоконных световодов. Измерения показали, что сердцевина преформы, изготовленная из ПС, имеет показатель преломления на 0.001-0.003 ниже, чем у кварцевого стекла, что связано с высоким остаточным содержанием бора (~2.5-3.0 ат.%). Такой показатель преломления затрудняет создание световедущей структуры, поэтому необходимо уменьшить остаточное содержание бора.

Полученные результаты говорят о перспективности использования технологии ПС для создания активных волоконных световодов с повышенным содержанием висмута.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН №32 «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий».

Литература

1. *Dianov E.M.. et al, Quantum Electron. 35, 1083 (2005)*
2. *Razdobreev I., et al, Appl. Phys. Lett., 90, 031103 (2007)*
3. *Kalita M.P., Yoo S., Sahu J., Opt. Express, 16, 21032 (2008)*
4. *Melkumov M.A. et al, Opt. Lett., 36, 2408 (2011)*
5. *Dianov E.M., J. Lightwave Technology, 31, 681 (2013)*
6. *Bufetov I.A., et al, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 20, 0903815 (2014)*
7. *Firstov S.V., et al, Opt. Lett., 39, 6927 (2014)*
8. *Zhou S., et al, J. of Mat. Chem., 19, 4603-4608 (2009)*
9. *Chu Y., et al, Opt. Lett., 41, 1225 (2016)*
10. *Fujimoto Y., Nakatsuka M., Japanese J. of Appl. Phys., 40, L279-L281 (2001)*

СОВМЕСТНЫЕ РАЗРАБОТКИ ИХВВ РАН И НЦВО РАН ПО ХАЛЬКОГЕНИДНЫМ ВОЛОКОННЫМ СВЕТОВОДАМ ДЛЯ СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА

Плотниченко В.Г.[1], Чурбанов М.Ф.[2*]

[1] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[2] Институт химии высокочистых веществ РАН, г. Нижний Новгород
[*] E-mail: churbanov@ihps.nnov.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16070

Первые публикации об изготовлении и использовании волоконных ИК – световодов на основе халькогенидных стекол относятся к 1960 гг. Активные научные и технологические разработки по волоконным световодам для среднего ИК-диапазона проводились с 80-х годов в Японии, Франции, США, Чехии. В нашей стране работы в этом направлении были начаты по инициативе Е.М. Дианова, в конце 1970-х гг., после первых успехов по волоконной оптике на основе особо чистого кварцевого стекла.

Объектом разработок были световоды из халькогенидных стекол, стекол на основе фторидов и оксидов тяжелых металлов. Наибольшее развитие получили исследования по световодам из халькогенидных стекол, выполнявшиеся в Институте общей физики РАН и в Институте химии АН СССР.

Работы велись по широкому спектру задач, основными из которых были:

Развитие способов получения и анализа веществ, исходных для изготовления особо чистых стекол;

Разработка физико-химических основ и методов получения стекол с высокой химической и фазовой чистотой;

Разработка методов надежного и высокоточного измерения оптических свойств стекол и световодов в среднем ИК-диапазоне;

Изучение факторов, определяющих оптическую прозрачность, механическую прочность стекол и световодов;

Разработка технологии, изготовление волоконных световодов, исследование их технических и эксплуатационных характеристик;

Изготовление функциональных устройств на основе ИК-световодов.

Общий итог проведенных исследований состоит в развитии новых разделов оптического материаловедения и волоконной оптики, в получении новых знаний о свойствах неоксидных стекол, в изготовлении функциональных волоконно-оптических устройств с рекордными техническими характеристиками.

Результаты исследований отражены примерно в двухстах публикациях и ряде обзоров в отечественных и зарубежных журналах, отмечены Государственной премией РФ в области науки за 1998 г.

В докладе приведены сведения о свойствах и технических характеристиках полученных стекол и световодов, рассмотрены новые направления разработок по обсуждаемой проблеме.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ И ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ И ДИФРАКЦИИ

Исхакова Л.Д.[1*], Лаврищев С.В.[1], Милович Ф.О.[1,2], Черноок С.Г.[1]

[1] *Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва*

[2] *Национальный исследовательский технологический университет (МИСИС), г. Москва*

[*] *E-mail: Ldisk@fo.gpi.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16071

Производство волоконных световодов (ВС) с высокими оптическими характеристиками и разработка инновационных технологий для ВС требует контроля состава и распределения элементов в сердцевинах преформ и ВС на разных стадиях процесса. Для микроструктурированных ВС необходимы характеристика их дизайна и геометрических параметров. Природа этих объектов с фрагментами структур в микро- и наноразмерных шкалах делает выбор совокупности методов электронной микроскопии (ЭМ) оптимальным решением поставленных задач. Так, аналитическая ЭМ отличается многоэлементностью (анализ элементов от B до U), широким интервалом определяемых концентраций (от долей процента до макроконцентраций), высокой локальностью (1μm), экспрессностью и недеструктивностью анализа.

Использование методов ЭМ в НЦВО РАН начато в 2001 году с приобретением сканирующего электронного микроскопа (СЭМ, JSM-5910LV, JEOL) с целью анализа разрабатываемых в НЦВО активных ВС для волоконных лазеров, усилителей и датчиков, активированных ионами редкоземельных (РЗЭ) или p-элементов. Контроль в преформах и ВС таких параметров как профиль показателя преломления (ППП), числовой апертуры и оптических потерь не позволял выбрать оптимальный состав стекла сердцевины. Это обусловлено рядом причин: зависимость показателя преломления **(**ПП**)** от концентрации легирующего компонента в преформах и ВС разная вследствие различия возникающих в них напряжениях, ПП изменяются из-за потерь компонентов на разных стадиях процесса, взаимное влияние компонентов на ПП в сложных системах не изучено.

Определение элементного состава, проведенное с использованием энергодисперсионного микроанализа (ЭДМА, аналитические системы INCA ENERGY AZtec ENERGY, Oxford Instruments), в основном относилось к исследованию ВС на силикатной основе. Образцы изготавливались с использованием технологий MCVD, FCVD, “powder-in-tube”, спеканием порошков с вибрационным перемешиванием расплава; составы стекла сердцевин соответствовали системам Al_2O_3-SiO_2 (I), GeO_2-SiO_2 (II), Al_2O_3-GeO_2-SiO_2 (III), GeO_2-P_2O_5-SiO_2 (IV), P_2O_5-SiO_2 (V), Al_2O_3 - P_2O_5-SiO_2 (VI), а также системам с добавлением понижающих показатель преломления фтора и бора. Ионами-активаторами были Ce, Nd, Pr, Sm, Er, Ho, Yb, Bi, Pb, Ni и Cr. Анализ микроструктуры и карт распределения элементов в сердцевинах преформ в режиме Z-контраста позволяет выделить четыре основных типа распределений компонентов: куполообразное близкое к ступенчатому ППП; с «провалом» концентрации в середине сердцевины, с выраженным слоистым распределением компонентов в виде концентрических колец и «пористое» строение. Анализ различия в этих микроструктурах проводился как с точки зрения особенностей технологических процессов, так и различия в физико-химических свойствах компонентов (температура плавления, летучесть, вязкость и др.). Разработана программа HISTO, позволяющая оценить концентрацию по заданному контуру с повышенной локальностью определения. Методика основана на анализе яркости выбранных участков изображения в Z-контрасте, снятых с повышенной экспозицией, и калибровке шкалы яркости по данным ЭДМА. Применение HISTO позволяет получить более точный профиль изменения концентрации элемента вдоль сердцевины с очень малыми, порядка 3-5μm диаметрами сердцевин, в частности в ВС с высокой концентрацией GeO_2 в сердцевине. Анализ содержания ионов-активаторов в ряде случаев требует обращения к волнодисперсионному микроанализу (ВДМА). Так, содержание висмута в ВС с лазерной генерацией ниже предела чувствительности ЭДМА. Методом ВДМА было установлено, что эта величина составляет 0.003(1) ат.% [1]. Совокупность полученных результатов систематически используется как для контроля процесса получения ВС разными методами, так и при разработке новых технологий.

Определение геометрических характеристик микроструктурированных ВС используется для характеристики различных типов ВС, в том числе в разработанных в НЦВО ВС с полой сердцевиной и отрицательной кривизной границы сердцевина – оболочка, фотонно – кристаллических ВС, ВС с большим двулучепреломлением и многих других. Кроме того эти измерения являются

экспрессным методом контроля соответствия всех размеров ВС заданным геометрическим параметрам в процессе
вытяжки ВС. Дальнейшие работы по этой тематике требуют применения ЭМ с высоким разрешением, позволяющим характеризовать не только размеры, но и детали поверхностей фрагментов световодов на наноуровне.

Исследование микро- и нанокристаллических включений в ВС обусловлено определением влияния включений на оптические потери. Решение этой проблемы стало возможным с привлечением просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМ, JEM 2010, JEOL) с возможностью получения данных по дифракции электронов и ЭДМА с заданной нано-области. Так, например, в качестве нановключений в Bi-активированных образцах, состав стекла сердцевины которых соответствует системам I-IV, были идентифицированы нанокристаллы металлического Bi, α-SiO_2, α-Bi_2O_3, гексагонального GeO_2 и $Bi_4(GeO_4)_3$. Природа нановключений зависит от концентрации Bi, состава легирующих компонентов и соотношения концентраций ион-активатор/легирующий компонент. При создании Yb-активированных ВС с сердцевиной из фосфато-алюмосиликатного стекла требуется достичь высокой гомогенности распределения активатора без кластеризации и образования нанокристаллических включений при достаточно высокой концентрации иона-активатора. Исследование преформ для данных ВС [2], полученных различными методами, показало, что одной из причин оптических потерь является негомогенность микроструктуры стекла на наноуровне и образование нанокристаллических включений, которыми являются SiO_2, YbP_3O_9 и $YbPO_4$.. В префоромах, изготовленных внесением в реакционную зону нанопорошка фосфата иттербия, обнаружено фазовое расслоению стекла с образованием микронных размеров «капель» с повышенной концентрацией ионов-модификаторов сетки стекла (droplet phase separation [3]). Образование нанокристаллов $YbPO_4$ происходит из обогащённых фосфором и иттербием «капель» стекла. Явление «капельного» фазового расслоения было зафиксировано также в преформе гибридного волоконного световода с аномальной дисперсией в специально созданном кольцевом слое, обогащённом фосфатом другого редкоземельного элемента - самария [4].

Идентификация атомов (ионов) Bi и Bi – кластеров стала возможной лишь при исследовании образцов с помощью сканирующей микроскопии с коррекцией аберрации с высокоугловым кольцевым детектором HAADF-STEM ([5], работа выполнена в сотрудничестве с НИЦ «Курчатовский институт»). В этом методе интенсивность участков изображения приближённо пропорциональна Z^2 (Z – атомный номер элемента). Объектами исследования являлись активированные висмутом стекла системы $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ с ИК-люминесценцией в области 1050-1600 нм. В образцах стёкол идентифицированы индивидуальные ионы Bi, встроенные в сетку стекла, субвалентные ионы висмута, Bi-димеры и Bi-кластеры. Соотношение этих форм зависит от концентрации висмута, температуры и атмосферы синтеза. Bi-кластеры с размерами порядка 12Å, найденные в образцах с содержанием висмута >0.2 ат.%, являются вероятнее всего нейтральными кластерами $(Bi_n)^o$ с числом атомов n до 18 и являются зародышами для появления нановключений металлического висмута.

Применение **новых материалов** в качестве матрицы для сердцевины ВС основываются на гипотезе, что их микроструктура будет препятствовать процессу кластеризации и способствовать максимально гомогенному распределению ионов-активаторов при одновременном повышении концентрации ионов-активаторов. Таким материалом для изготовления активированных висмутом ВС были выбраны мезопористые стёкла. С использованием микроскопов с FIB-SEM системой (TESCAN LYRA3) и иммерсионной электронной оптикой (TESCAN GAIA3) было показано, что при среднем размере пор 4 нм в объёме пористые стекла имеют поверхностный слой толщиной порядка 200 нм с каналами до 40 нм. Пропиткой стёкол раствором нитрата висмута с последующей термообработкой получены прозрачные консолидированные образцы с содержанием висмута в интервале ≤0.01- 0.8 ат.%, использованные как сердцевины для изготовления ВС. Методом ПЭМ подтверждена гомогенность образцов [6].

Для решения задач по исследованию ВС требуется применение комплекса ЭМ нового поколения.

Литература

1. *Iskhakova L., Microscopy&Microanalysis. 22, 987-996 (2016)*
2. *Исхакова Л.,и др. Физика и химия стекла. 44, 137-144 (2018)*
3. *Russel C.,et al. J. Chem. Techn.&Met.50, .357-366 (2015)*
4. *Алёшкина С., Квантовая электроника. 46. 738-742 (2016)*
5. *Milovich F., et al. J. Non-Cryst.Solids. 510, 166-171 (2019)*
6. *D. Iskhakova L., et al. J. Non-Cryst.Solids.503-504, 28-35 (2019)*

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СТЕКЛА СИСТЕМ GA-GE-AS-SE И GA-GE-SB-SE ДЛЯ АКТИВНОЙ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА

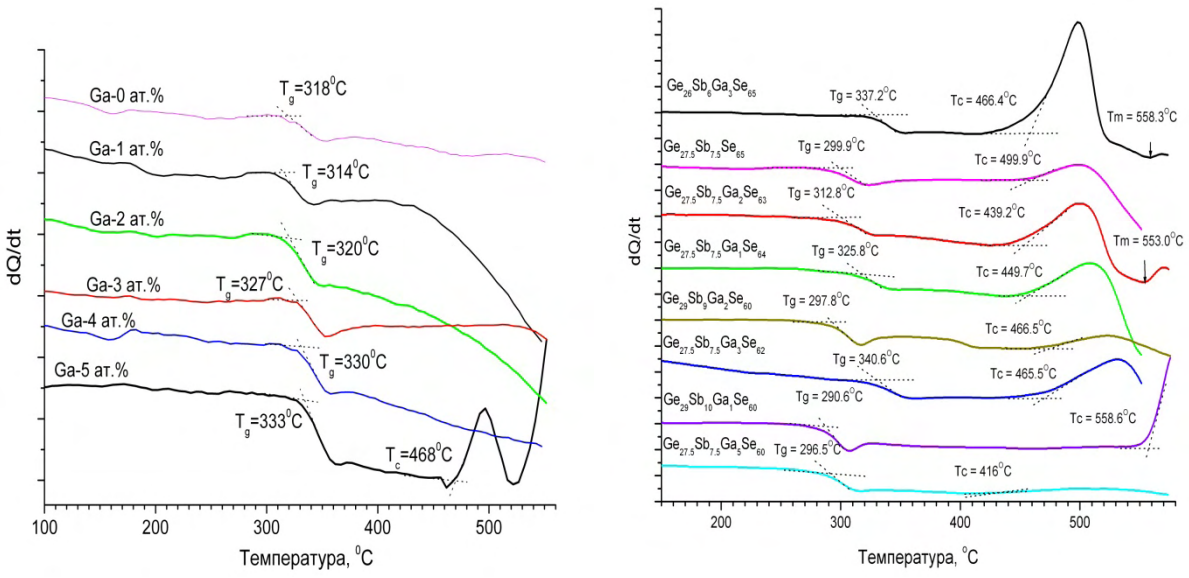
Ширяев В.С., Караксина Э.В., Котерева Т.В., Филатов А.И., Плехович А.Д.

Институт химии высокочистых веществ им Г.Г. Девятых РАН, г. Нижний Новгород
**E-mail: shiryaev@ihps.nnov.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16072

Многокомпонентные халькогенидные стекла систем Ga-Ge-As-Se и Ga-Ge-Sb-Se представляют большой интерес как материалы для различных современных задач волоконной оптики, включающих разработку сенсоров, лазеров, усилителей, генераторов суперконтинуума, коннекторов и других оптических элементов среднего ИК диапазона. Возможность изготовления из таких материалов световодов, прозрачных для излучения в среднем и дальнем ИК диапазоне, делает эти материалы незаменимыми ввиду отсутствия альтернативных стеклообразных материалов для области дальше 4 мкм. Для стекол данных систем, предназначенных для задач силовой оптики, таких как волоконные лазеры и генераторы суперконтинуума, а также для исследований, предполагающих тепловое воздействие источниками накачки, требуются стекла с высокими теплофизическими характеристиками. Кроме того, введение в состав элемента Sb вместо As делает данные стекла соответствующими требованиям экологической безопасности при анализе различных биологических объектов [1]. Задача повышения теплофизических характеристик стекол в данном исследовании решается за счет поиска Ge-обогащенных составов, которые характеризуются достаточно высокими значениями температуры стеклования (T_g), лежащими в области 280-350 ^oC [2].

Представлены результаты исследований стекол системы Ga - Ge - As - Se с содержанием 25-31 ат% Ge и 1-5 ат% Ga, 17-18 ат% As. Разработана методика синтеза стекол с низким содержанием лимитируемых примесей [3], получены объемные образца стекол, проведен сравнительный анализ свойств образцов методами ДСК, РФА и ИК-спектроскопии. Определены оптимальные составы, соответствующие требованиям волоконной оптики, и характеризующихся высокими значениями температур стеклования (300-356 ^oC) [4,5]. ДСК термограммы образцов стекол приведены на Рис.1(а). Из стекла $Ga_3Ge_{31}As_{18}Se_{48}$ методом вытяжки из одиночного тигля был изготовлен бесструктурный световод с минимальными оптическими потерями 0,6 дБ/м на длине волны 5,8 мкм (Рис.2).



а б

Рис. 1. ДСК термограммы образцов стекол: а - $Ga_xGe_{25}As_{15}Se_{60-x}$ (x=0; 1; 2; 3; 4; 5); б – Ga-Ge-Sb-Se

На основе базовых стекол получены образцы, легированные ионами Pr(3+). Показано, что для состава 1300 ppm Pr(3+)-$Ga_3Ge_{31}As_{18}Se_{48}$ наблюдается соответствие свойств полученных стекол

требованиям волоконной оптики: высокое пропускание в спектральной области 1-10 мкм, максимальные значения T_g (356 ^oC), отсутствие кристаллических фаз, широкополосная эмиссия в интервале 3,5-6 мкм. Образцы данного состава демонстрировали высокие эмиссионные характеристики: время жизни излучения в максимуме полосы люминесценции (4.7 мкм) составило 12 мс, что является максимальным значением для известных составов-аналогов. Дополнительная полоса эмиссии с максимумом на 2.8 мкм (Рис.3) отличает данный состав от ранее исследованных [6] и свидетельствует о влиянии содержания Ge на спектральный состав эмиссии.

Для стекол системы Ga-Ge-Sb-Se, обогащенных германием, проведены исследования влияния макросостава на температурные характеристики материалов в интервалах следующих концентраций компонентов: Ga- 1-5 ат.%, Sb – 6-11 ат.%, Ge – 25-29 ат.%, Se- 60-65 ат.%. Проведены исследования структуры, оптических, термических, кристаллизационных свойств, измерение плотности образцов. Установлено, что стекло $Ge_{27,5}Sb_{7,5}Ga_5Se_{60}$ характеризуется высокими значениями T_g (337°C) и ΔT ($T_{кр}$ - T_g) = 123°C, что свидетельствует об удовлетворительной устойчивости стекла к кристаллизации (Рис.1(б)). Стекло состава $Ge_{29}Sb_{10}Ga_1Se_{60}$ не кристаллизуется вплоть до точки термораспада. Плотность образцов изменяется в интервале 1.205-1.265 г/см^3. Образцы легированных празеодимом стекол на основе $Ga_4Ge_{26}Sb_6Se_{64}$ продемонстрировали высокое значение T_g (320°C) и широкополосную люминесценцию в области 3.5-5.5 мкм. Содержание лимитируемых примесей в образцах стекол, а именно, кислорода, водорода в виде различных химических форм, было оценено по данным ИК-спектроскопии на уровне единиц ppm.

Проведенные исследования образцов стекол систем Ga-Ge-As(Sb)-Se являются существенным вкладом в развитие задачи создания новых оптических сред, соответствующих требованиям волоконной оптики среднего ИК диапазона.

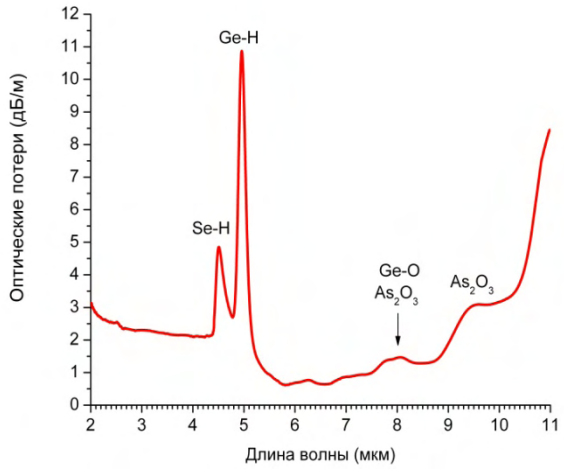


Рис. 2. Спектр оптических потерь бесструктурного световода из стекла $Ga_3Ge_{31}As_{18}Se_{48}$

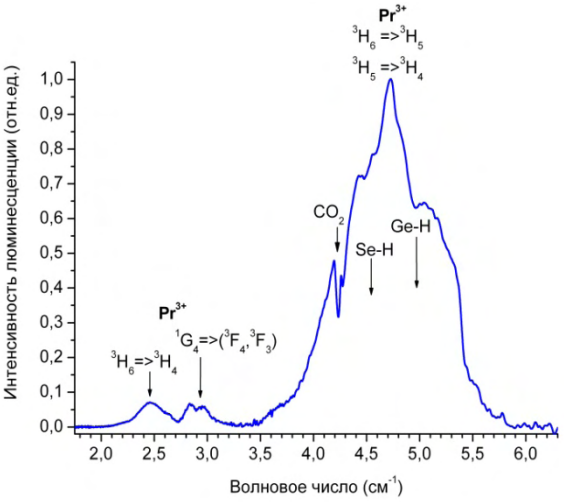


Рис.3. Спектр люминесценции стекла 1300 ppm Pr(3+)-$Ga_3Ge_{31}As_{18}Se_{48}$

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (тема 0095-2019-0007).

Литература

1. *Ari J., et al, Opt. Lett. 43, 2893- 2896 (2018)*
2. *Karaksina E.V., et al, J. Lumin. 170, 37-41 (2016)*
3. *Shiryaev V.S., et al, J. Lumin. 209, 225-231 (2019)*
4. *Shiryaev V.S., et al, Opt. Mater. 37, 18-23 (2014)*
5. *Shiryaev V.S., et al, Opt. Mater. 67, 38-43 (2017)*
6. *Karaksina E.V., et al, J. Lumin. 204, 154-156 (2018)*

КРИСТАЛЛЫ СИСТЕМЫ AgBr – $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНФРАКРАСНЫХ СВЕТОВОДОВ

Салимгареев Д.Д., **Львов А.Е.**, **Лашова А.А.**, **Жукова Л.В.***

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

* *E-mail:* l.v.zhukova@urfu.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16073

В настоящее время ведется поиск и разработка нового поколения материалов для волоконной оптики, позволяющих передавать излучение в более длинноволновой инфракрасной области спектра (до 50,0 мкм и более). В последние десятилетия бурное развитие волоконной оптики в основном связано с кварцевыми волокнами, однако недостатком кварца как материала является его малый диапазон пропускания – от 0,2 до 2,0 мкм, который захватывает ближнюю инфракрасную (ИК) область спектра, тогда как в настоящее время большую информационную емкость имеет излучение с большей длиной волны, например, излучение углекислотного (CO_2) лазера (10,6 мкм). Поэтому разработка фото- и радиационно-стойких, негигроскопичных и пластичных кристаллов, не обладающих эффектом спайности, из которых можно изготавливать методом горячего прессования оптические изделия (окна, линзы), а методом экструзии световоды для среднего ИК диапазона, является решением важной научной и прикладной задачи. Всеми вышеупомянутыми свойствами обладают кристаллы твердых растворов системы AgBr – $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ [1].

Используя дифференциально-термический и рентгенофазовый анализы, была изучена и построена фазовая диаграмма системы AgBr – $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ (Рис. 1). Диаграмма построена от 0 до 100 мол. % $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ в AgBr, в температурном интервале от 25 до 450 °C (от 298 до 723 К), при давлении 1 атм.

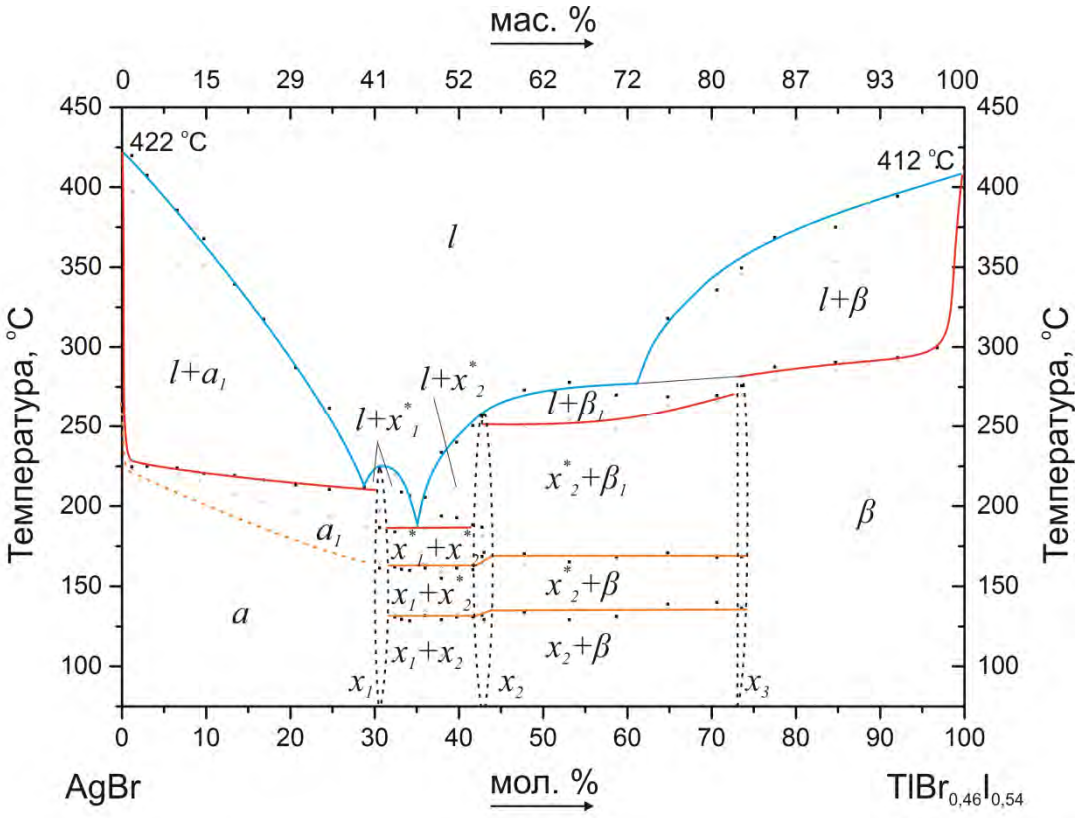


Рис. 1. Квазибинарный разрез диаграммы состояния системы AgBr – $TlBr_{0,46}I_{0,54}$: l – расплав системы; a_1 – высокотемпературная ромбическая фаза AgBr; α – твердый раствор системы AgBr – $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ на основе низкотемпературной кубической гранецентрированной модификации AgBr; β – твердый раствор системы AgBr – $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ на основе кубической модификации $TlBr_{0,46}I_{0,54}$; X_1, X_2, X_3 – химические соединения; X_1^*, X_2^*, X_3^* – высокотемпературные фазы химических соединений X_1, X_2 и X_3

Согласно рис. 1, на изученной фазовой диаграмме присутствуют две области гомогенности. Предложены механизмы их образования: в области от 0 до 31 мол. % формируются твердые растворы на основе бромида серебра легированные $TlBr_{0,46}I_{0,54}$, а в области от 73 до 100 мол. % происходит внедрение бромида серебра в кристаллическую решетку твердого раствора $TlBr_{0,46}I_{0,54}$. Существование твердых растворов замещения подтверждено рентгенофазовым анализом, из которого следует, что в области от 0 до 31 мол. % $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ в AgBr при температуре 25 ^{o}C присутствует одна низкотемпературная кубическая фаза структурного типа NaCl (характерная для AgBr), а в области от 73 до 100 мол. % AgBr в $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ – одна кубическая фаза структурного типа CsCl, соответствующая модификации $TlBr_{0,46}I_{0,54}$. В центральной части исследуемой диаграммы от 31 до 73 мол. % $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ в бромиде серебра (при 25 ^{o}C) присутствует, по всей видимости, три химических соединения X_1, X_2, X_3 с содержанием 31, 42 и 73 мол. % $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ в AgBr. Предположительно, данные химические соединения имеют составы $TlAgI_2$, Tl_2AgI_3 и Tl_2AgBr_3. Однако не следует исключать и то, что возможно происходит образование совершенно нового химического соединения, о котором в настоящее время неизвестно, т. к. фазовая диаграмма новая. Кроме того, в данной области диаграммы зафиксированы два полиморфных перехода при температурах 130 и 165 ^{o}C. Поэтому, при повышении температуры в центральной области диаграммы происходит перекристаллизация химических соединений в их высокотемпературные фазы X_1^*, X_2^*, X_3^*.

Опираясь на исследованную диаграмму системы $AgBr – TlBr_{0,46}I_{0,54}$ были подобраны режимы для получения гидрохимическим методом гомогенной по химическому составу высокочистой шихты и выращивание кристаллов методом Бриджмена. В результате проведенной работы были выращены монокристаллы различных составов и исследованы их основные функциональные свойства. Установлено, что кристаллы системы $AgBr – TlBr_{0,46}I_{0,54}$ негигроскопичные, пластичные, не обладают эффектом спайности в зависимости от состава прозрачны от 0,46 до 50,0 мкм без окон поглощения [2], их показатель преломления изменяется от 2,165 до 2,389 на длинах волн от 3,0 до 14,0 мкм [2], а также они обладают высокой фотостойкостью [3] и радиационной стойкостью [1]. Из данных кристаллов применяя метод горячего прессования можно изготавливать оптические изделия – линзы, окна, оптические слои, пленки и получать методом экструзии однослойные, двухслойные и фотонно-кристаллические световоды для среднего ИК диапазона. Такие оптические изделия и ИК световоды необходимы для создания волоконных лазеров и усилителей, волоконно-оптических систем для ИК спектроскопии, в том числе в условиях повышенного радиационного фона, низкотемпературной ИК пирометрии, для передачи CO (5,3 – 6,2 мкм) и CO_2 лазеров (9,2 – 10,6 мкм). С помощью ИК-Фурье спектрометра с применением разработанных зондов на основе кристаллов системы $AgBr – TlBr_{0,46}I_{0,54}$ можно проводить измерения химического состава веществ в режиме реального времени в хранилищах радиоактивных отходов, горячих камерах, и других объектов при ионизирующем (гамма) излучении дозой до 1000 кГр и более. Еще одним видом применения является изготовление инфракрасных телескопов, помещенные в космические корабли и оснащенные фотонно-кристаллическими ИК световодами с большим диаметром поля моды, позволяющие выделить частоту отдельного космического объекта из диапазона принимаемых длин волн и обеспечить быструю идентификацию экзопланет на длине волны 10,0 мкм. Кроме того, новые кристаллы системы $AgBr – TlBr_{0,46}I_{0,54}$ являются уникальным материалом для изготовления планарных волноводов для среднего инфракрасного диапазона (2,0 – 50,0 мкм).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-73-10063).

Литература

1. *Zhukova L., et al, Optics and Spectroscopy 125, 933-941 (2018)*
2. *Korsakov A., et al, Optics and Laser Technology 93, 18-23 (2017)*
3. *Korsakov A., et al, Optical Materials 62, 534-537 (2016)*

ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ СВЕТОВОД С УВЕЛИЧЕННЫМ ДИАМЕТРОМ ПОЛЯ МОДЫ ДЛЯ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

Лашова А.А., Львов А.Е., Салимгареев Д.Д., Корсаков А.С., Жукова Л.В.*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

** E-mail:* l.v.zhukova@urfu.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16074

Фотонно-кристаллические световоды (Photonic crystal fiber – PCF) являются уникальными компонентами нелинейной оптики и фотоники благодаря устойчивости к изгибам, возможности управления проходящим излучением и передаче в одномодовом режиме. На сегодняшний день разработано большое количество PCF для видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазона (от 0,2 до 2,0 мкм) на основе кварцевых материалов, а также для среднего ИК (до 14 мкм) на основе халькогенидных стекол, которые обладают малыми оптическими потерями, способны генерировать суперконтинуум или выделять требуемую длину волны, управлять поляризационными свойствами и т.д., однако применение таких фотонно-кристаллических световодов ограничено их хрупкостью, сложными конфигурациями осевых вставок и трудностями в производстве [1,2].

На основе галогенидов серебра и одновалентного таллия также могут быть разработаны фотонно-кристаллические световоды с диапазоном пропускания от 2,0 до 25,0 мкм и более, обладающие высокой устойчивостью к изгибам, фото- и радиационной стойкостью, малыми оптическими потерями (0,5 дБ/м) позволяющие управлять передаваемым ИК излучением. Такие PCF изготавливаются методом семистадийной экструзии [3], реализация которого является длительным и ресурсоемким процессом, в связи с чем в производственный цикл галогенидсеребряных волокон был введен этап компьютерного моделирования, предназначенный для проектирования структуры фотонного световода, а также прогнозирования его оптических свойств.

В данной работе было выполнено моделирование фотонно-кристаллических световодов на основе кристаллов системы $AgBr - TlBr_{0,46}I_{0,54}$ в среде Comsol Multiphysics с целью получения одномодового световода с увеличенным диаметром поля моды для передачи ИК излучения в диапазоне от 3,0 до 13,0 мкм. Выбор кристаллов системы $AgBr - TlBr_{0,46}I_{0,54}$ обусловлен возможностью создания на их основе каналов передачи, прозрачных до 25,0 мкм, а также их устойчивостью к радиации (до 500 кГр), что является важным для космических и технических приложений. Для симуляции был выбран световод с центральной вставкой из оптически более плотного материала, чем основной материал PCF. Сама конструкция фотонно-кристаллического световода содержит 7 осевых вставок одинакового диаметра: центральное включение требуется для поддержания полного внутреннего отражения и удержания излучения высокой мощности, шесть вставок образуют гексагональное кольцо, ограничивающее сердцевину PCF, которое передает излучение за счет механизма фотонных запрещенных зон. Материал кольцевых вставок выбран как оптически менее плотный в сравнении с основным материалом PCF. Таким образом для данной структуры наибольший показатель преломления имеет центральное включение (n_{ci}), а наименьший – гексагонально-расположенные вставки (n_i): $n_{ci} > n_m > n_i$, где n_m – показатель преломления основного материала – матрицы.

Кристаллы системы $AgBr - TlBr_{0,46}I_{0,54}$ имеют две области гомогенности [4], из которых для моделирования был выбран один состав с содержанием $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ в AgBr до 29 мол.%. При таких содержаниях $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ в AgBr световоды обладают достаточной гибкостью и прочностью для практических применений. Химические составы элементов PCF представлены в таблице 1. Для состава каждого элемента PCF были определены показатели преломления в зависимости от длины волны (табл. 1).

Таблица 1. Химические составы элементов фотонно-кристаллического световода в мол. % $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ в AgBr : ЦВ – центральная вставка, М – матрица, КВ – кольцевые вставки, n_{ci}, n_m, n_i – их показатели преломления, соответственно

Состав, в мол. %		Показатель преломления n на длине волны λ				
		3 мкм	5 мкм	8 мкм	10,6 мкм	13 мкм
ЦВ	29	2,2469	2,2450	2,2400	2,2346	2,2283
М	25	2,2391	2,2349	2,2311	2,2274	2,2231
КВ	21	2,2282	2,2244	2,2243	2,2186	2,2155

Симуляция выполнялась при равных диаметрах вставок d = 20 мкм, межвставочных расстояниях Λ = 100 мкм, внешнем диаметре световода D = 240 мкм. В процессе моделирования задавались диэлектрические и магнитные проницаемости сред, длина волны проходящего излучения и соответствующие ей показатели преломления. По результатам симуляции были получены двумерные и трехмерные картины распределения излучения в поперечном сечении PCF, эффективные показатели преломления, а также значения напряженности электрического поля. Результаты моделирования для каждой длины волны приведены на рисунке 1.

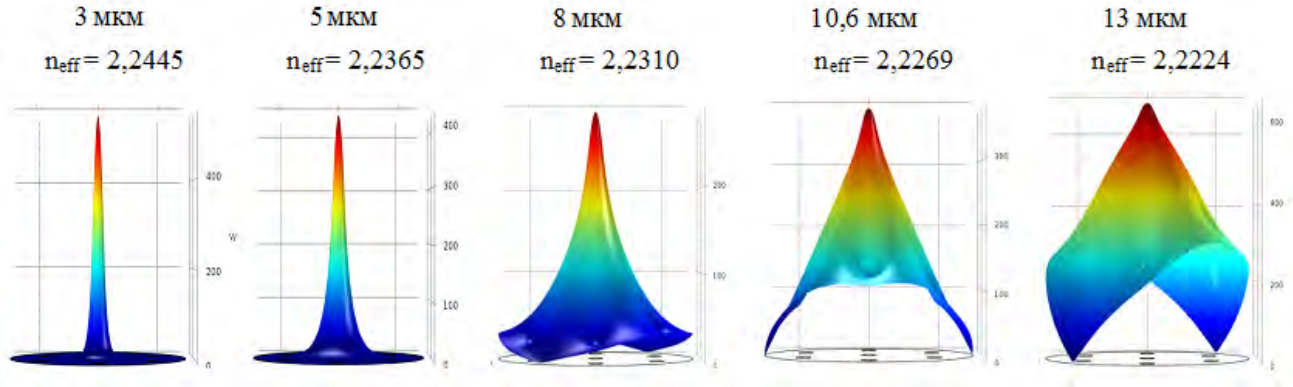


Рис. 1. Результаты моделирования PCF при передаче излучения с различной длиной волны

Для каждой смоделированной структуры были получены одномодовые режимы передачи с увеличенным диаметром поля моды от 30 мкм (при λ = 3 мкм) до 240 мкм (при λ > 10,6 мкм) при диаметре вставок 20 мкм, как можно видеть на рис. 1. Данные значения были достигнуты за счет малой разности показателей преломления между элементами структуры фотонно-кристаллического волокна (среднее значение разности составляет Δn = 0,008). Данные значения разностей показателей преломления позволяют изготовить PCF с четкой границей раздела между элементами структуры. Кроме того, по мере увеличения длины волны наблюдается увеличение диаметра поля моды, таким образом PCF данного состава и конфигурации являются перспективными для приема и передачи среднего ИК излучения с λ > 10 мкм.

Таким образом в данной работе были смоделированы фотонно-кристаллические световоды на основе системы монокристаллов AgBr – $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ с увеличенным диаметром поля моды, передающий ИК излучения в диапазоне длин волн от 3,0 до 13,0 мкм в одномодовом режиме. Химические составы элементов PCF были выбраны из одной области гомогенности фазовой диаграммы системы AgBr – $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ при близком содержании второго компонента в первом, что требуется для достижения малой разности показателей преломления между матрицей и вставками. Разности Δn ≈ 0,008 позволяют передавать излучение с малыми потерями на удержание и высокой интенсивностью. Дальнейшие работы в области исследования PCF на основе галогенидов серебра и одновалентного таллия требуют изучения нелинейных характеристик световодов, а также разработки фотонных волокон для специальных применений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-73-10063).

Литература

1. *Kanungo V., et al, Opt. Comm. 297, 147-153 (2013)*
2. *Ahmad H., et al, Opt. and Quantum Electronics 50, 405 (2018)*
3. *Korsakov A., Opt. and Spectroscopy 117 (5), 960-963 (2014)*
4. *Salimgareev D, Diss. on PhD, 155 (2018)*

ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ НА ОСНОВЕ СТЕКОЛ СИСТЕМЫ GE-SE ДЛЯ НПВО АНАЛИЗА

Зернова Н.С.*, Вельмужов А.П., Суханов. М.В., Котерева Т.В.

Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых Российской академии наук, г. Нижний Новгород, ул. Тропинина 49, 603950
** E-mail: zernova@ihps.nnov.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16075

Волоконная спектроскопия нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) является активно развивающимся спектральным методом анализа. Этот метод заключается в регистрации ИК-спектра поглощения анализируемой пробы с помощью погруженного в нее волоконного световода. НПВО спектроскопия применяется для определения химического состава различных органических жидкостей, газов, продуктов питания, биологических объектов и т.д. Перспективными материалами для изготовления волоконно-оптических сенсоров являются халькогенидные стекла на основе селенидов германия. Эти стекла прозрачны в ближнем и среднем ИК-диапазоне (2–18 мкм) и обладают достаточно высокой устойчивостью к действию органических растворителей, воды, минеральных кислот.

Целью исследования была разработка способа получения особо чистых стекол состава $Ge_{20}Se_{80}$ и вытяжка волоконных световодов на основе этих для изготовления волоконно-оптического сенсора, обладающего высокой чувствительностью в спектральном диапазоне 2–10 мкм. Предложен новый способ получения стекол системы Ge – Se с низким содержанием поглощающих примесей, включающий синтез, очистку и вакуумную загрузку в реактор моноселенида германия. Из полученных образцов стекол изготовлены бесструктурные волоконные световоды диаметром 125–250 мкм. Содержание водорода в форме SeH-групп в световодах составило 1.77±0.12 ppm at., кислорода, химически связанного с германием, – 0.013±0.002 ppm wt. Полные оптические потери в световодах не превышали 1 дБ/м в спектральных диапазонах 2.0–4.3 мкм и 4.8–7.8 мкм; минимальные оптические потери составили 0.77 дБ/м на длине волны 5.6 мкм. С использованием этих световодов изготовлены волоконные сенсоры в защитном корпусе из PEEK, оснащенные SMA 905 коннекторами для подключения к зондовой приставке. Разработана НПВО методика определения содержания присадки в дизельном топливе в интервале концентраций 0.1–1.0 об.% с пределом обнаружения 0.02 об. %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-13-1025).

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА ИНФРАКРАСНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА РЕГИСТИРИРУЕМЫЙ СИГНАЛ В ДИАПАЗОНЕ 7-9 МКМ

Львов А. Е., Салимгареев Д. Д., Лашова А. А., Корсаков А.С., Жукова Л. В.*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург
** E-mail:* l.v.zhukova@urfu.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16076

Монокристаллы галогенидов серебра и одновалентного таллия предназначены для изготовления из них методом горячего прессования оптических изделий – линз, окон, оптических слоев, пленок, а методом экструзии однослойных и двухслойных световодов. Такие оптические изделия применяются для передачи CO (5,3 – 6,2 мкм) и CO_2 лазеров (9,2 – 10,6 мкм), создания волоконных лазеров, усилителей, волоконно-оптических систем для ИК спектроскопии и многих других применений.

Перспективным направлением применения этих материалов является измерение температуры и получения инфракрасных (термических) изображений поверхностей нагретых тел в диапазоне 7,0 – 9,5 мкм, в том числе в труднодоступных местах. Особый интерес к этой области спектра вызван тем, что излучение с такой длиной волны испускают тела, нагретые до температур 30 – 120 °C. Данный температурный диапазон является рабочим для многих теплоэнергетических агрегатов [1].

Поскольку в процессе эксплуатации, например, исследовании температурного состояния технологического оборудования от него возможен нагрев и, как следствие, искажение получаемого сигнала из-за собственного излучения оптических элементов. Например, когда материал световодов нагревается, то они начинают вести себя как массив точечных источников излучения, т.е. происходит излучение во всех направлениях. Если это собственное излучение имеет угол падения на границу раздела «световод-воздух», большей или равный критическому углу (больше чем 30 градусов для многомодового галогенидосеребряного световода), излучение суммируется с излучением от объекта исследования, что вызывает дополнительное увеличение измеряемой температуры. О вкладе такого дополнительного собственного излучения к измеренной температуре сообщалось ранее [2]. Определение влияние собственного излучения различных оптических элементов системы в результате нагрева на регистрируемый сигнал, позволит точнее определять температуру исследуемых объектов.

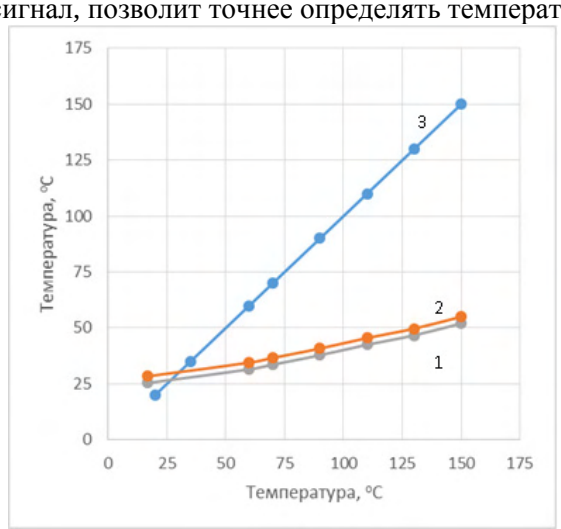


Рис. 1. 1 – регистрируемый сигнал без нагрева световода (25 °C); 2 – регистрируемый сигнал при нагреве 10 см участка световода до 150°C; 3 – температура наблюдаемого объекта

С этой целью мы исследовали несколько различных объектов различной геометрии: окно (Ø 40 мм, длина 7 мм), монокристаллический цилиндр (Ø 12 мм, длина 22 мм), волокно (Ø 0,5 мм, длина 300 мм). Между телевизором и наблюдаемым объектом (пластина с температурой в диапазоне 10-150 °C) в держателе с термопарой помещался исследуемый объект. Измерения проводили в двух режимах: в первом происходил нагрев и охлаждение наблюдаемого объекта при постоянной температуре исследуемого образца, температура которого изменяли (повышали или понижали) при каждой итерации, но поддерживали постоянно в процессе измерения; во втором происходил нагрев и охлаждение исследуемого образца при постоянной температуре

наблюдаемого объекта, температура которого объекта изменяли (повышали или понижали) при каждой итерации, но поддерживали постоянно в процессе измерения (Рис. 1).

Наши эксперименты показывают отсутствие существенного влияния на регистрируемую температур при нагреве объектов малой длины или небольшого локального нагрева. Эксперимент со световодом показал, что при сильном нагреве ($\Delta T_{световода}$ = 120 °C) участка 10 см разница регистрируемой и реальной температуры составила $\Delta T_{регистрируемая}$ = 3 °C. При этом также следует учитывать, что пропускание используемого волокна составляло всего ~48% при длине 30 см (при эталонных значениях 70-75% для волокна длиной 1 м), т.е. волокно имеет сильные потери.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-73-10063).

Литература

1. *Шмыгалев А.С., и др. Письма в ЖТФ, 42-17, 1-8 (2016)*
2. *Авдиенко К. И., и др. Кристаллы галогенидов таллия. Получение, свойства и применение. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние,151 (1989)*

СТЕРИЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МЕДИЦИНЕ

Столов А.А.[1*], Микилев А.И.[2]

[1] *OFS, Avon, CT USA*
[2] *OFS Россия, г.Москва*
[*] *E-mail:* stolov@ofsoptics.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16077

Оптические волокна широко применяются в медицине, в частности, в лазерной хирургии, в эндоскопии и в качестве различного рода зондов [1]. Если известно, что данный вид оптического волокна будет использоваться внутри человеческого тела, то это волокно должно пройти стерилизацию, дабы гарантировать, что оно не содержит микроорганизмов, таких как грибки, бактерии, вирусы или споры. При этом важно, чтобы процесс стерилизации не сказался негативно на оптических и механических свойствах волоконного световода.

Стерилизация – это любой процесс, который эффективно уничтожает все микроорганизмы с поверхности обрабатываемого объекта. Методы стерилизации можно условно подразделить на три группы. Первая группа методов использует высокие температуры и включает в себя кипячение в воде, автоклавирование, термическую обработку и обработку пламенем. Методы из второй группы используют ядовитые химические соединения, которые убивают микроорганизмы. Среди наиболее применяемых химических соединений – окись этилена, надуксусная кислота, озон, формальдегид и перекись водорода. Третья группа методов использует воздействие различными видами излучения: ультрафиолетовым, рентгеновским, гамма или бета излучением. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки и, теоретически, может приводить к изменению свойств оптического волокна.

Поскольку в медицине могут применяться световоды с различными полимерными покрытиями, важно знать, насколько тип полимера влияет на поведение волокон в тех или иных условиях стерилизации. Поэтому для исследований нами были выбраны волокна как с классическим двуслойным акрилатным покрытием, так и с полиимидным, силиконовым и фторакрилатным. В последних двух случаях, полимерные покрытия были защищены буфером из полиэфирэфиркетона (PEEK) и сополимера этилена и тетрафторэтилена (ETFE). Изучались как многомодовые, так и одномодовые световоды. В качестве легирующих элементов выступали германий, фосфор, фтор и алюминий. Кроме этого, некоторые световоды имели сердцевину из чистого диоксида кремния. Все изучаемые волокна являлись продуктами фирмы OFS.

Были изучены воздействия следующих методов стерилизации: автоклавирование, обработка надуксусной кислотой ($CH_3C(O)OOH$), окисью этилена (C_2H_4O), УФ, гама и бета излучением [2-4]. Все стерилизационные процедуры проводились по нашей просьбе фирмами, профессионально занимающимися стерилизацией медицинского оборудования: MicoScience, Geotec, Steris, Medivators и Nutec. Основные выводы работы можно свести к следующему.

Обработка окисью этилена и надуксусной кислотой проводится при умеренных температурах (60 и 24°C, соответственно) и не приводит к каким-либо заметным изменениям оптических и механических свойств волоконных световодов, что иллюстрируется диаграммой на Рис. 1.

Стерилизация ультрафиолетовым облучением, проводимом на «бактерицидной» длине волны 253.7 нм и мощности 125 $\mu V/cm^2$ в течение 48 часов также не влияет на основные свойства оптических волокон.

Наибольшие проблемы для механических свойств световодов может вызвать автоклавирование, которое проводилось при 132°C и давлении 2 бар. Каждый цикл автоклавирования включал в себя повышение температуры до 132°C, нахождение на максимальной температуре 8 минут и последующее снижение температуры до комнатной. Поскольку некоторые виды медицинского оборудования применяются многократно, каждый образец подвергался автоклавированию 20 раз, и после каждых пяти циклов механическая прочность волокон измерялась методом двухточечного изгиба. Как выяснилось, двадцать циклов автоклавирования не привели к уменьшению механической прочности волокон (Рис. 1). Кроме средней механической прочности мы определяли также параметры коррозийной стойкости к механическому напряжению (n_d), которые лишь для волокна с акрилатным покрытием немного снизились после 20 циклов автоклавирования.

Наиболее серьезные изменения наблюдались под воздействием гамма и бета излучений, применяемые дозы которых составляли 30 – 50 kGy. Прежде всего, было обнаружено, что оптические

волокна, имеющие фторакрилатные покрытия, теряют механическую прочность после обработки этими видами излучения (Рис. 1). Это было объяснено генерацией молекул фтороводорода (HF), которые диффундируют на поверхность стеклянной оболочки, реагируют с ней и вызывают коррозию. Интересно, что анализ ИК-спектров не показывает каких-либо заметных изменений в химической структуре полимерного покрытия (фторакрилата) и буфера (ETFE), и, тем не менее, ионизирующее излучение производит фатальный эффект на волокна с перфторированными полимерными оболочками. В то же время, для трех других видов полимерных покрытий подобное механическое ослабление не наблюдается.

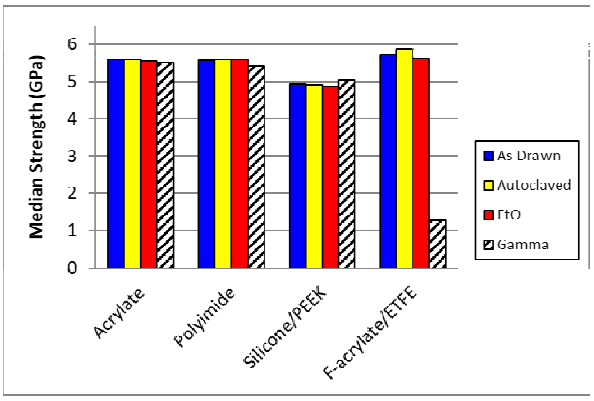


Рис. 1. Механическая прочность оптических волокон до и после ряда стерилизационных процедур

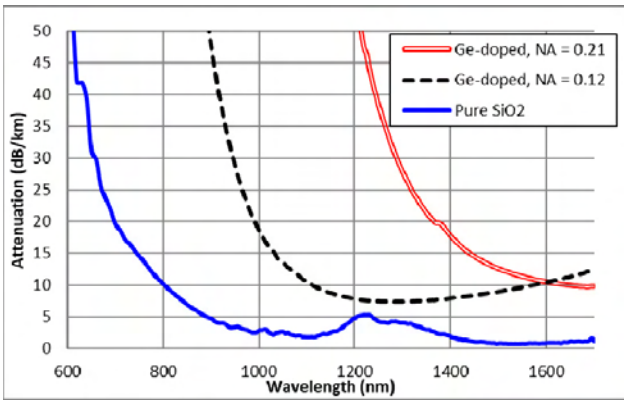


Рис. 2. Оптическое погашение для трех одномодовых световодов после дозы бета облучения (32 KGy за 15 минут)

Обработка световодов бета и гамма-излучениями приводит к дополнительным оптическим потерям. Влияние ионизирующего (прежде всего, гамма) излучения на оптические свойства волоконных световодов хорошо известно [5-7], однако не всегда можно количественно предсказать эффект их воздействия, поскольку это зависит и от химического состава сердцевины, и от метода изготовления оптического волокна. В качестве иллюстрации, на Рис. 2 приведены спектры погашения оптических волокон, легированных германием. Волокно с числовой апертурой NA = 0.21 содержит значительно больше германия, чем волокно с NA =0.12 и, поэтому ожидалось, что первый из световодов будет пропорционально более чувствителен к ионизирующим излучениям. Однако, в области длин волн >1600 nm волокно с NA = 0.21, как оказалось, имеет меньшие коэффициенты погашения.

В целом, как и ожидалось, под влиянием бета и гамма облучения погашение света зависит, прежде всего, от типа легирующего элемента и расположено в порядке: $SiO_2 \approx F < Ge << P << Al$. Для световодов, легированных фосфором и алюминием при дозе облучения в 32 kGy, минимальные коэффициенты погашения в области 600 – 1700 нм составили порядка 10^3 и 10^4 dB/km, соответственно. Одинаковая доза гамма и бета облучения приводит приблизительно к одинаковым изменениям в спектрах погашения оптических волокон. Последующая термическая обработка (в нашем случае 100°C в течение 24 часов) приводит примерно к 30% падению коэффициентов затухания.

Хотя для большинства волоконных световодов погашение света существенно возрастает после стерилизации ионизирующим излучением, важно помнить, что для практических применений в медицине используются достаточно короткие участки волокон – порядка трех метров и менее. С учетом этого, для большинства волокон с сердцевиной из чистого SiO_2 или легированного фосфором или германием, стерилизационные дозы облучения не являются фатальными. В то же время, для стерилизации волоконных световодов легированных фосфором или алюминием нельзя применять ионизирующее излучение.

Литература

1. *Mendez, A., 3rd Workshop on Specialty Optical Fibers and their Applications, T3.1 (2013)*
2. *Stolov, A. A. et al, Proc. SPIE 8576, 857606 (2013)*
3. *Stolov, A.A., et al, Proc. SPIE 8938, 893806 (2014)*
4. *Stolov A. A. et al, Proc. SPIE, 10872, 08720B (2019)*
5. *Girard, S. et al, IEEE Trans. Nucl. Sci. 60, 2015-2036 (2013)*
6. *Tomashuk, A. L. et al, IEEE Trans. Nucl. Sci., 45, 1566-1569 (1998)*
7. *Tomashuk, A. L. and Zabezhailov, M. O., J. Appl. Phys. 109, 083103 (2011)*

АО «ОПТИКОВОЛОКОНОННЫЕ СИСТЕМЫ»: ЭТАПЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА. АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ РЫНКА ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Буралкин М.В.*, Долгов Ю.В., Танякин Д.А., Чернов А., Гусев В.О.

АО «Оптиковолоконные Системы», г. Саранск
**E-mail: buralkin@rusfiber.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16078

АО «Оптиковолоконные Системы» - российский завод по производству оптического волокна. Проектная мощность предприятия составляет около 4 млн км оптического волокна в год, что удовлетворяет ~80% потребности российского рынка в оптическом волокне.

На рис. 1 показан спрос на оптическое волокно в мире. Интересной особенностью является то, что с 1999 г. по 2018г. в мире проложено 4 млрд км оптического волокна. Около 60% объема мирового рынка оптоволокна приходится на Китай. Доля России – 0,9%.

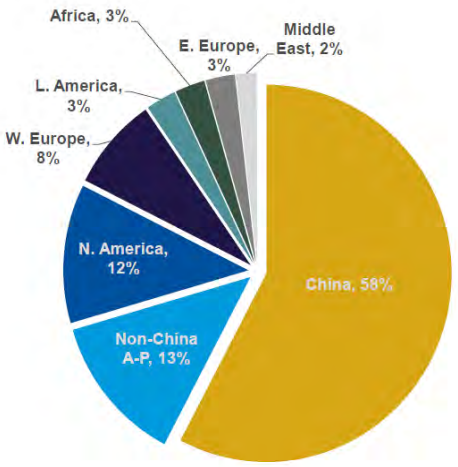


Рис. 1 Потребление оптического волокна в мире в 2018 г [1]

Российский рынок характеризуется низкой степенью развития сетей связи: объем проложенного оптического кабеля в России составляет всего 11% от соответствующего показателя США. По количеству проложенного волокна на душу населения Россия отстает от развитых стран в 3-4 раза.

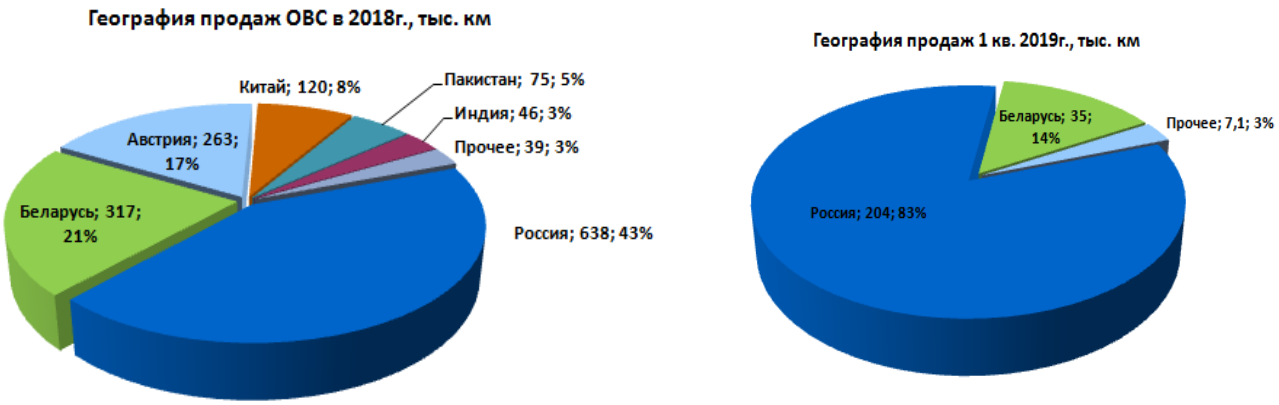


Рис. 2 География поставок АО «Оптиковолоконные Системы» в 2018 г и 1кв. 2019 г.

Реализация программ развития цифровой экономики в целях развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 - 2030 годы, может определить темп роста российского рынка оптического волокна в ближайшей и среднесрочной перспективе.

Оптическое волокно ОВС - единственное сертифицированное волокно в России. Сертифицированы оптические волокна марок Е3 (G652d), Е3 (G657A1/G652d).

По результатам тестирования оптическое волокно ОВС допущено для использования на сетях ПАО «Мегафон», ПАО«Ростелеком», ПАО «МТС», наряду с волокнами ведущих мировых производителей – Corning, OFS и Fujikura.

В 2018г. мировой рынок оптического волокна достиг своего пика. Введенные производственные мощности превысили спрос. Дефицит волокна завершился. Дальнейший рост рынка связывают с развитием сетей 5G и IoT-технологий.

В декабре 2017 г. АО «ОВС» получило займ от Фонда Развития Промышленности на проведение модернизации производства, которая закончилась в мае 2019г. Общая стоимость модернизации составила свыше 950 млн рублей.

Основные результаты модернизации:

- Производственные мощности завода увеличены до 4 млн км ОВ/год
- Себестоимость продукции сократилась на 15%

За 2018-2019 достигнуты следующие результаты:

- Проведена модернизация производства
- Освоена технология покраски оптического волокна в том числе «Ring marking»
- Производство оптического волокна с 2% растяжением
- Запущен участок производства преформ для отрабатывания технологии изготовления преформ методом FCVD.

Что такое АО «Оптиковолоконные Системы» сейчас?

- Экспорт в 14 стран мира
- Качество продукции на уровне лучших мировых аналогов
- Уникальный для России опыт производства телекоммуникационного ОВ в промышленных масштабах.

Планы на будущее

В зависимости от потребностей мирового рынка ОВ, возможно производство новых типов волокон:

- 200 мкм ОВ
- волокна с малыми изгибными потерями стандарта G.657.A2
- многомодового волокна стандарта G.651.

Литература

1. Yuya Pan, CRU International, 4th World Optical Fibre & Cable Conference, 5-7 November 2018

ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЗАПИСЬ МАССИВОВ ВБР В 7-СЕРДЦЕВИННЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ ДЛЯ СЕНСОРНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Вольф А.А.[1,2], **Бронников К.А.**[1,2], **Якушин С.С.**[2], **Достовалов А.В.**[1,2], **Журавлев С.Г.**[3], **Салганский М.Ю.**[4], **Егорова О.Н.**[5], **Семёнов С.Л.**[3], **Бабин С.А.**[1,2]

[1] *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*
[2] *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*
[3] *Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва*
[4] *Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девятых РАН, г. Нижний Новгород*
[5] *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва*
[*] *E-mail:* alexey.a.wolf@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16079

Селекция сердцевины при записи волоконных брэгговских решеток (ВБР) в многосердцевинных волоконных световодах (МВС) имеет актуальность для таких прикладных задач как: устройства раодифотоники [1], волоконные лазеры [2], датчики измерения физического воздействия [3]. Наиболее ярко преимущества записи ВБР в МВС проявляются при создании векторных изгибных датчиков, которые делают возможным восстановление формы волоконного световода в 3-мерном пространстве [4]. Такие датчики находят применение в диагностике конструкций, робототехнике и малоинвазивной хирургии [5].

При использовании стандартных интерференционных схем записи ВБР область модификации показателя преломления не может быть локализована в выбранной сердцевине, либо процедура селекции сердцевины связана со значительным усложнением схемы эксперимента [1]. Данное ограничение может быть преодолено при использовании метода прямой поточечной записи ВБР с помощью фемтосекундных лазерных импульсов ИК диапазона [6]. В данном случае механизм поглощения лазерного излучения носит нелинейный характер, вследствие чего взаимодействие излучения с материалом происходит исключительно вблизи фокальной области пучка, что позволяет локальность область модификации показателя преломления. Точное позиционирование области модификации показателя преломления в продольном и поперечном сечении МВС дает возможность записывать ВБР с требуемыми параметрами (продольное и поперечное расположение, длина структуры, резонансная длина волны, коэффициент отражения) в выбранных сердцевинах.

В данной работе приводятся результаты по созданию массивов, состоящих из 24 однородных ВБР записанных в 7-сердцевинном ВС с полиимидным защитным покрытием, изготовленным в НЦВО РАН (г. Москва). Запись массивов осуществлялась с помощью фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 1026 нм и длительностью 230 фс. Импульсы фокусировались в выбранную сердцевину МВС с помощью высокоапертурного микрообъектива. Геометрия созданного массива приведена на Рис. 1а, геометрия МВС на Рис. 1б. В каждой из задействованных сердцевин ВБР имели длину 2 мм и были разделены в продольном направлении на $\Delta L_1 = 5$ мм или $\Delta L_2 = 14$ мм. Выбор резонансной длины волны для каждой отдельной ВБР в сердцевине делал возможным их спектральное разделение при опросе. Мониторинг спектральных характеристик массива производился с помощью многоканального интеррогатора и специализированного устройства ввода-вывода. Для измерения радиуса кривизны при изгибной деформации использовался подход, предложенный в работе [4]. Примеры восстановленных форм изгиба МВС представлены на Рис. 1в-г.

Полиамидное защитное покрытие делает возможным использование массива ВБР при высоких температурах (до 300 °C) и прямом механическом воздействии, поскольку полиимид имеет более высокую твердость по сравнению со стандартным акрилатом, а также высокую адгезию со стеклянной поверхностью оболочки волоконного световода. Данное преимущество может быть использовано при создании высокотемпературных датчиков деформации для медицинских применений, где на этапе проведения стерилизации изделие со встроенным датчиком подвергается длительному высокотемпературному воздействию. Относительно малый диаметр МВС облегчают встраивание волоконно-оптического датчика на основе МВС в различные конструкции, например, «умный» композитный материал. Всё это расширяет область применения волоконно-оптических датчиков на основе МВС, а также открывает перспективы для создания нового поколения многопараметрических датчиков.

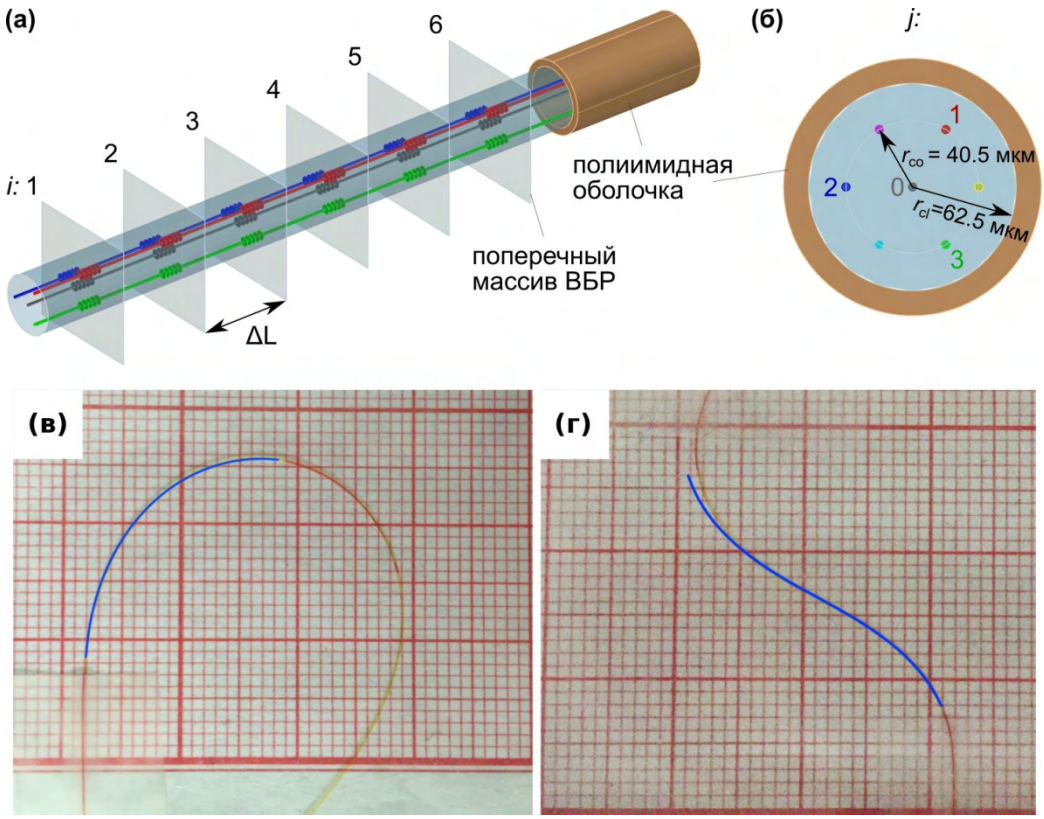


Рис. 1. (а) Схема расположения ВБР в 7-сердцевинном ВС с полиимидным защитным покрытием, (б) геометрия 7-сердцевинного ВС, (в)-(г) результат восстановления формы изгиба МВС (синий) в сравнении с реальной

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (грант 14.Y26.31.0017). Авторы выражают благодарность Пермской научно-производственной приборостроительной компании (ПНППК) за вытяжку многосердцевинного волоконного световода с полиимидным покрытием.

Литература

1. *Gasulla I., et al, Sci. Rep. 7, 41727 (2017)*
2. *Skvortsov M. I., et al., Opt. Lett. 44, 295 (2019)*
3. *Van Newkirk A., et al, IEEE Photonics Technol. Lett. 27, 1523–1526 (2015)*
4. *Moore J. P. and Rogge M. D., Opt. Express 20, 2967 (2012)*
5. *Burgner-Kahrs J., et al, IEEE Trans. Robot. 31, 1261–1280 (2015)*
6. *Martinez A., et al, Electron. Lett. 40, 1170 (2004)*

ВОЛОКОННЫЕ РЕШЕТКИ В АКТИВНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ФОСФОСИЛИКАТНЫХ СВЕТОВОДАХ

Рыбалтовский А.А.[1,2*], **Егорова О.Н.**[3], **Васильев С.А.**[1], **Журавлев С.Г.**[2], **Бутов О.В.**[2], **Семенов С.Л.**[1], **Галаган Б.И.**[3], **Сверчков С.Е.**[3], **Денкер Б.И.**[3]

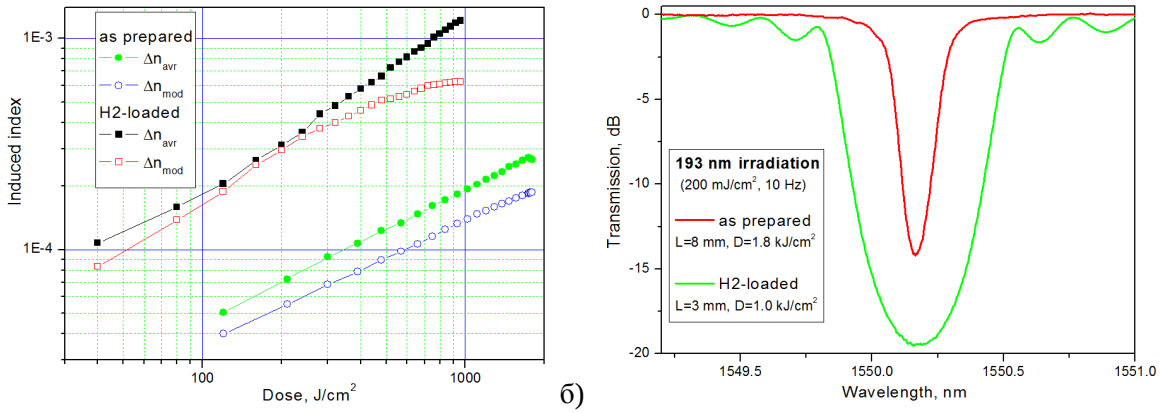
[1] – *Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва*
[2] – *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва*
[3] – *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва*
[*] *E-mail:* rybaltovsky@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16080

Одночастотные волоконные лазеры привлекательны для многих фотонных приложений. Узкополосное излучение лазеров этого типа обычно обеспечивается относительно короткой (10 – 30 мм) структурой Фабри-Перо или сдвинутой по фазе волоконной брэгговской решеткой (ВБР), записанной в сердцевине активного световода. Для создания эффективных лазеров с коротким резонатором, ключевое значение имеют два фактора: большой коэффициент усиления на единицу длины и фоточувствительность, которая необходима для записи брэгговских структур непосредственно в сердцевине активного световода. Последний фактор обеспечивает компактность и эффективность лазерного резонатора, а также отсутствие сварных соединений, вносящих дополнительные внутрирезонаторные потери.

Относительно недавно в НЦВО РАН совместно с ИОФ РАН был разработан новый композитный одномодовый фосфосиликатный световод с высокой концентрацией оксида эрбия в сердцевине. Было показано, что световод, изготовленный при помощи метода «стержень в трубке» [1], обладает хорошими генерационными характеристиками при достаточно высокой фоточувствительности к излучению ArF-лазера (193 нм), что позволило изготовить целиком на коротком отрезке (21 мм) этого световода высокодобротный резонатор Фабри-Перо, и, как следствие, получить стабильную одночастотную генерацию на длине волны 1565 нм с использованием оптической накачки с длиной волны 976 нм [2].

В настоящей работе исследовалась фоточувствительность этого композитного световода. В частности, были получены дозные зависимости амплитуды модуляции и среднего изменения показателя преломления как для исходного световода, так и для световода, подвергнутого низкотемпературной водородной обработке. Световод имел диаметр сердцевины 5 мкм, разность показателей преломления между сердцевиной и оболочкой составляла 0.025, длина волны отсечки первой высшей моды сердцевины ~ 1,43 мкм. Для записи ВБР использовался эксимерный ArF-лазер с длиной волны генерации 193 нм (Coherent COMPexPro), с длительностью импульса 20 нс и частотой повторения 10 Гц. Плотность энергии облучения в импульсе составляла 200 мДж/см^2. Водородная обработка образцов световода осуществлялась в камере при давлении H_2 - 120 атм при температуре 90°C в течение 24 часов. ВБР записывались с помощью фазовой маски длиной 10 мм, имеющей период 1064 нм.

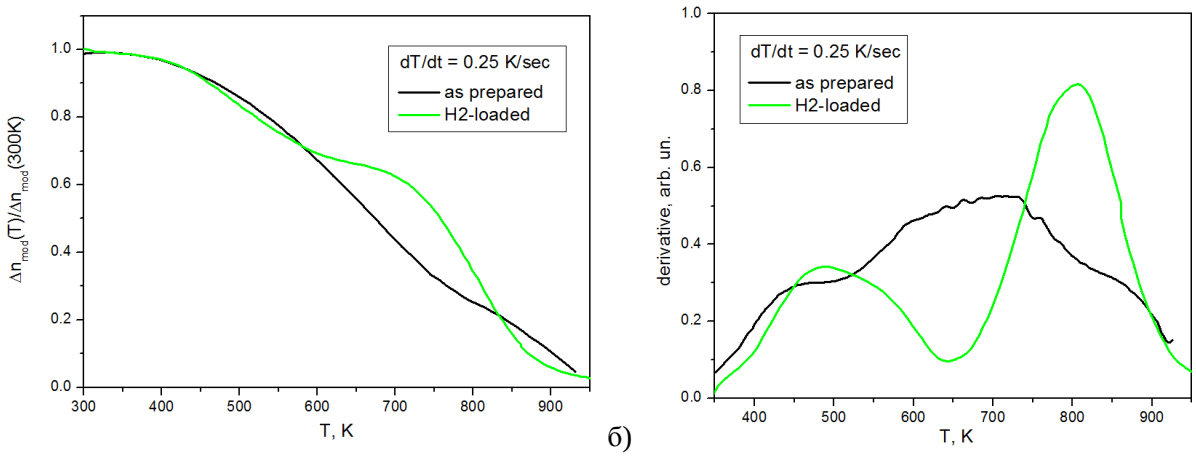


а) б)

Рис. 1. а) Дозные зависимости компонентов наведенного показателя преломления, полученные для исходного композитного световода, а также для световода, прошедшего водородную обработку; б) спектры пропускания ВБР, измеренные в конце УФ-облучения этих образцов

На основе спектров ВБР, записанных как в исходных, так и в предварительно насыщенных водородом образцах, были получены зависимости амплитуды модуляции и среднего значения наведенного показателя преломления (НПП) от дозы УФ-излучения (рис.1а). Было обнаружено, что молекулярный водород, присутствующий в сетке стекла сердцевины композитного световода, значительно (почти на порядок) увеличивает его фоточувствительность – аналогично известному эффекту в германосиликатных световодах. На рис.1б представлены спектры пропускания ВБР, измеренные сразу после облучения.

Термическая стойкость НПП исследовалась при нагреве записанных ВБР с постоянной скоростью 0.25 К/сек с использованием автоматизированной установки, описанной в работе [3]. На рис.2а приведено относительное изменение амплитуды модуляции НПП, измеренное при отжиге исследованных нами ВБР. Как видно, значение НПП монотонно уменьшается с повышением температуры, однако некоторая его часть (~ 5 % от начальной величины) сохраняется вплоть до температуры плавления материала сердцевины (900 ÷ 950К).



а) б)

Рис. 2. а) Относительное изменение амплитуды модуляции наведенного показателя преломления для исходного композитного световода, а также для световода, прошедшего водородную обработку; б) Модуль производных этих указанных зависимостей по температуре

Отметим, что скорость уменьшения НПП изменяется при отжиге, а характер изменения скорости отжига ВБР зависит от присутствия растворенного молекулярного водорода в сетке стекла при записи ВБР. Изменение скорости с увеличением температуры хорошо иллюстрируется производной зависимостей отжига НПП по температуре (рис. 2б). Согласно [4], именно этот параметр характеризует распределение энергии активации отжига фотоиндуцированных изменений в сетке стекла. Несмотря на то, что погрешность при вычислении производных достаточно велика (~ 0.1 в единицах шкалы ординат на рис. 2б), анализ приведенных зависимостей позволяет сделать важное заключение: динамики формирования и отжига НПП в световодах, насыщенных молекулярным водородом, обусловлены участием двух механизмов, характеризующихся существенно различной температурной стойкостью (различной энергией активации обратных термоиндуцированных процессов). Природа этих механизмов в настоящее время не известна и требует дополнительных исследований.

Другие результаты, полученные нами при исследовании фоточувствительности активного композитного фосфосиликатного световода будут представлены на конференции.

Литература

1. *O.N. Egorova, S.L. Semjonov, V.V. Velmiskin, Yu. P. Yatsenko, S.E. Sverchkov, B. I. Galagan, B.I. Denker, E.M. Dianov. “Phosphate-core silica-clad Er/Yb-doped optical fiber and cladding pumped laser”, Optics Express, Vol. 22, p. 7632 (2014)*
2. *A.A. Rybaltovsky, O.N. Egorova, S.G. Zhuravlev, S.L. Semjonov, B. I. Galagan, S.E. Sverchkov, B.I. Denker, to be published in Optics Letters*
3. *Божков А.С., Васильев С.А., Медведков О.И., Греков М.В., Королев И.Г. «Установка для исследования изменения наведенного преломления в волоконных световодах при высоких температурах», Приборы и техника эксперимента, №4, с.76-83 (2005)*
4. *Erdogan T, Mizrahi V, Lemaire PJ, Monroe D. “Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings”, Journal of applied physics, Vol. 76, N 1, p. 73 (1994)*

ТЕЙПЕРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА С МАССИВОМ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК

Попов С.М.[1,*], **Бутов О. В.**[2], **Колосовский А.О.**[1], **Волошин В.В.**[1], **Воробьёв И.Л.**[1], **Исаев В.А.**[1], **Вяткин М.Ю.**[1], **Фотиади А.А.**[3,4], **Чаморовский Ю.К.**[1]

[1] *Фрязинский филиал института Радиотехники и Электроники РАН г. Фрязино, Россия*
[2] *Институт Радиотехники и Электроники РАН г. Москва, Россия*
[3] *Политехнический факультет университета г. Монс, Бельгия*
[4] *Ульяновский Государственный университет ул. Льва Толстого 42, г. Ульяновск, Россия*
[*] *E-mail: sergei@popov.eu.org*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16081

Оптические волокна (ОВ) в данное время, как для линий передачи связи, так и в сенсорных системах. В последнем случае для создания распределённых сенсорных систем требуются оптические волокна, которые должны иметь обратный сигнал, значительно превышающий уровень обратного рассеяния Рэлея. Обычно для увеличения обратного сигнала применяются волоконные брэгговские решётки (ВБР). Запись таких решёток обычно выполняется поточечно, шаг за шагом, когда сначала снимается покрытие ОВ, производится запись, осуществляется перепокрытие ОВ с переходом к следующему участку ОВ с повтором всей процедуры [1]. Такая процедура приводит к значительному увеличению обратного сигнала, но также приводит к уменьшению механической прочности массива ВБР. Это значительно сокращает область применения таких массивов ВБР. Кроме того, количество ВБР в таком в массиве ограничено. Нами разработано ОВ с ВБР запись которого производится во время процесса вытяжки ОВ [2, 3]. Формирование массива ВБР в таком ОВ выполняется с помощью УФ-лазера через фазовую маску. Количество ВБР на 100 метрах такого ОВ может достигать 10000 штук. Увеличение обратного сигнала по сравнению с уровнем рассеяния Рэлея достигает примерно 50 дБ на λ=1550 нм. Типичная ширина спектра отражения массива ВБР составляет величину 0.3 нм. Используя чирпированную фазовую маску для записи массива ВБР возможно получить ширину спектра отражения массива 4 нм. Это крайне необходимо для применения массивов ВБР в системах когерентной рефлектометрии работающих в широких диапазонах температур.

Альтернативным вариантом расширения спектра отражения это запись массива ВБР в тейперном ОВ. Известно, что длина волны отражения ВБР λ определяется как $\lambda = n_{eff}\Lambda_{pm}$ [4], где Λ_{PM} - период фазовой маски, n_{eff} – эффективный показатель преломления. Изменение диаметра ОВ приводит к изменению эффективного показателя преломления и в свою очередь максимума длины волны отражения ВБР записанной в таком ОВ. При этом длина тейперного перехода определяется длиной вытягиваемого ОВ, т.е. может достигать нескольких километров, а коэффициент тейперирования ОВ может достигать 18 [5].

На рис. 1. представлены пространственные профили изменения диаметра и длины волны отражения образца №1 тейперного оптического волокна с массивом волоконных брэгговских решёток (ТОВМВБР) (а) и его интегральный спектр отражения (б).

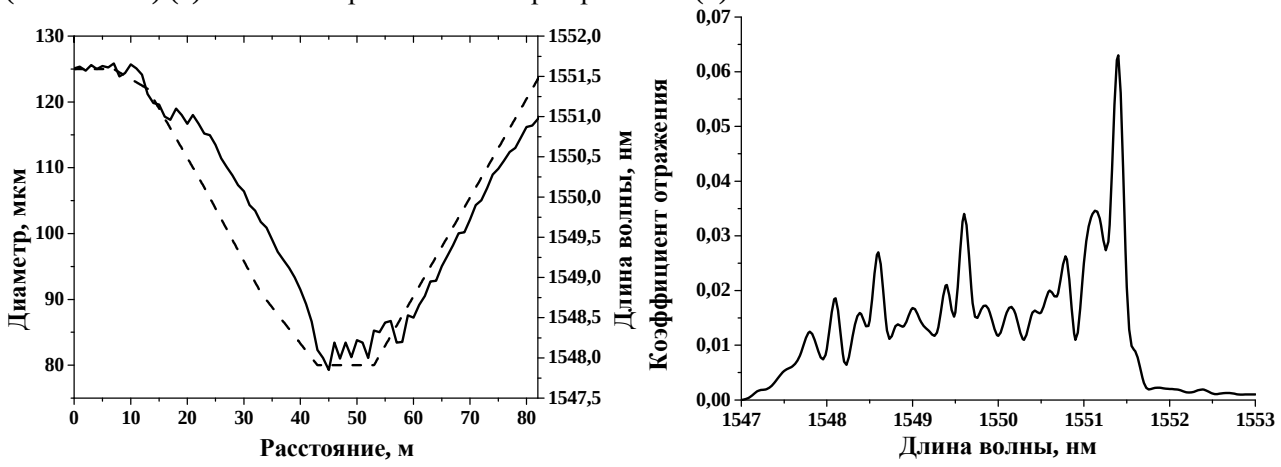


Рис. 1. Пространственный профиль ТОВМВБР №1 (а) и интегральный спектр отражения (б) измеренный спектральным методом. Пунктирная кривая соответствует изменению диаметра ОВ

Для записи ВБР использовалась фоточувствительная заготовка легированная бором с разницей п.п. сердцевина – оболочка 0.025. Диаметр ОВ менялся в диапазоне 80…125 мкм. Ширина спектра отражения достигал величины 4 нм. Коэффициент отражения на отдельных длинах волн достигает величины 6%. Длина волны отсечки - 1350 нм для диаметра ОВ 125 мкм. Пространственный профиль длины волны отражения ТОВМВБР измерен методом частотной рефлектометрии [6].

Данное ТОВМВБР было исследовано в работах [7, 8] в качестве резонатора случайного лазера с различной длиной волны накачки. Установлено, что длины обратной связи, рассчитанные из частот продольных мод лазерной генерации, в зависимости от длины волны накачки хорошо совпадают с пространственным профилем ТОВМВБР.

На рис. 2. представлены пространственные профили изменения диаметра и длины волны отражения образца №2 ТОВМВБР (а) и его интегральный спектр отражения (б). Для записи ВБР также использовалась фоточувствительная заготовка легированная бором с разницей п.п. сердцевина – оболочка 0.025. Длина волны отсечки - 1350 нм для диаметра ОВ 125 мкм. Диаметр ОВ менялся в диапазоне 125…225 мкм. Ширина спектра отражения достигает величины 4 нм. Коэффициент отражения на отдельных длинах волн достигает величины 5%.

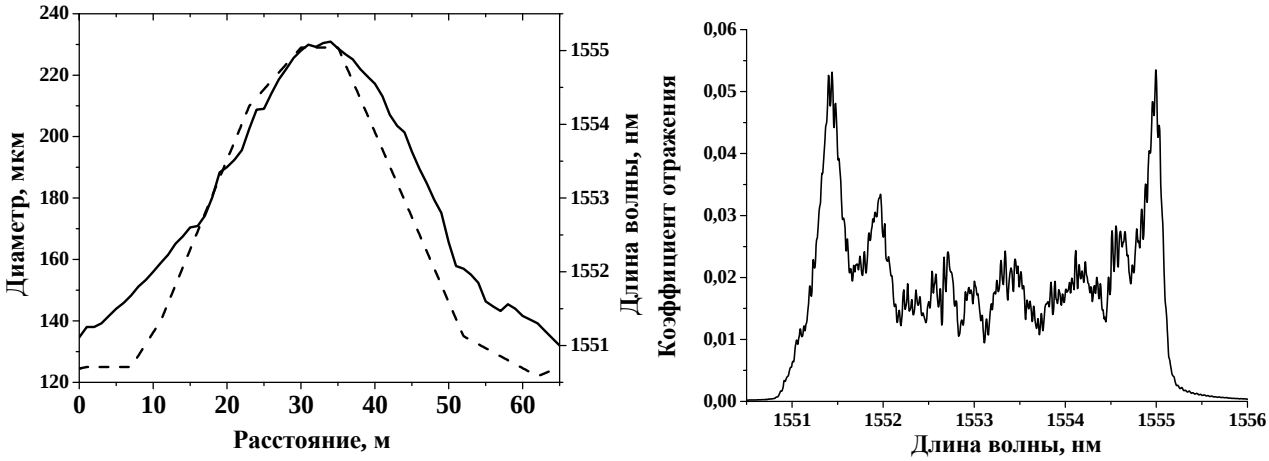


Рис. 2. Пространственный профиль ТОВМВБР №2 (а) и интегральный спектр отражения (б) измеренный спектральным методом. Пунктирная кривая соответствует изменению диаметра ОВ

Данное ТОВМВБР было исследовано в работе [9]. Показано, что данное ТОВМВБР может быть использовано в качестве простого датчика температуры. Качество пучка, измеренное методом M^2 на выходе данного образца в многомодовой части, имеет величину 1.03-1.05.

Авторы надеяться, что разработанные ТОВМВБР найдут своё применение в качестве резонаторов волоконных лазеров и усилителей, сенсорных системах высокого пространственного разрешения и чувствительности, а также в оптических процессорах.

Работа выполнена в рамках государственного задания и при частичной поддержке грантов РФФИ 17-07-01388 А и РФФИ 18-42-732001 Р-МК.

Литература

1. *O. V. Butov, et al, In-Fibre Bragg Gratings For Sensor Applications At High Temperatures in Optical Fibre Communication Conference on CD-ROM, The Optical Society of America, Washington, DC (2004)*
2. *И.А. Зайцев и др. Радиотех. Эл. 61, 602-608 (2016)*
3. *Sergei M. Popov, et al, Optical Fibres with arrays of FBG: Spring (PIERS), St. Petersburg, Russia, 22-25 May 2017, IEEE Xplore, pp. 1568 – 1573 (2017)*
4. *T. Osuch, Tapered and linearly chirped fiber Bragg gratings with co-directional and counter-directional resultant chirps, Opt. Comm. 366, 194–199 (2016)*
5. *J. Kerttula, et al, Mode evolution in long tapered fibers with high tapering ratio, Opt. Exp. 20, 25461–25470 (2012)*
6. *B. Soller, et al, Opt.Exp., 13, 666-674 (2005)*
7. *S. M. Popov, et al, Brillouin lasing in single-mode tapered optical fiber with inscribed Fiber Bragg Grating Array, Results in Physics, 9, 625-627 (2018)*
8. *S.M. Popov, et al, Short cavity Tunable Brillouin Random Laser, 18th International Conference, Laser Optics (ICLO) 2018, St. Petersburg, Russia 4–8 June 2018, IEEE Xplore, pp.299 (2018)*
9. *Yu.K. Chamorovskiy, et al, Long tapered fibre with array of FBG, Optical Fiber Technology, 50, 95-98 (2019)*

ПОНИЖЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ВРМБ В ПАССИВНЫХ ОДНОМОДОВЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ С МНОГОМОДОВЫМ АКУСТИЧЕСКИМ ПРОФИЛЕМ

Цветков С.В.*, Лихачев М.Е., Худяков М.М., Бубнов М.М.

Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
**E-mail:* science@fopts.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16082

Исследуются структуры обыкновенных (со ступенчатым оптическим профилем показателя преломления (ППП)) пассивных кварцевых одномодовых световодов, обладающих пониженным коэффициентом усиления вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) за счет градиентного легирования сердцевины одновременно двумя различными добавками. Данная технология, успешно реализуемая стандартным MCVD методом, позволяет, сохраняя оптические свойства одномодового световода, без продольных вариаций его материально-геометрических параметров, потенциально добиться понижения порога ВРМБ на 10 дБ и более за счет повышения спектральной однородности многомодового акустооптического взаимодействия путем оптимизации радиально-неоднородного распределения акустического показателя преломления [1, 2].

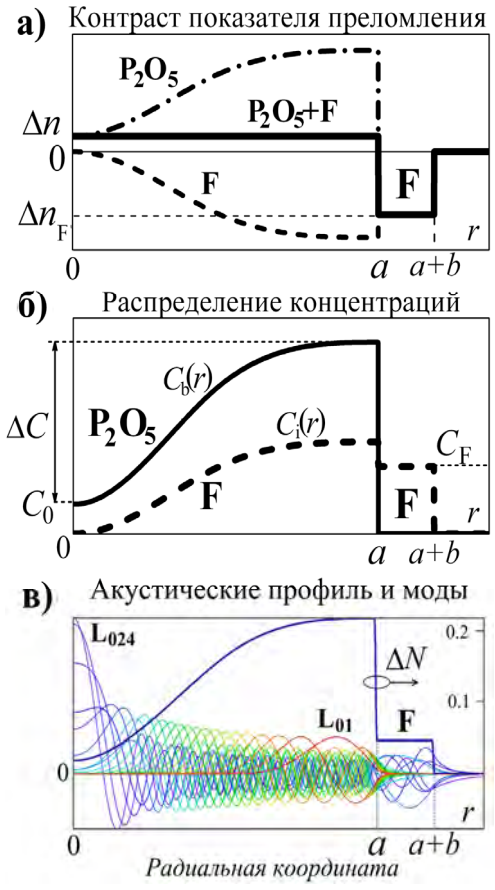


Рис. 1. Принципиальные формы структур световода с возможностью многомодового подавления ВРМБ более чем на 10дБ

Среди множества комбинаций добавок, различающихся по своему воздействию на оптический и/или акустический индексы [3], мы акцентируем внимание на сочетании оксида фосфора P_2O_5 и фтора F, имеющем хороший потенциал в получении высокого контраста акустического показателя преломления при современных технологических пределах легирования до 15мол.% P_2O_5 и до 7мол.% F [2]. Концентрация $C_b(r)$ добавки P_2O_5 градиентно повышается от начального значения C_0 в центре сердцевины световода к ее границе a на величину контраста ΔC (рис. 1б), при этом, чтобы скомпенсировать в области сердцевины прирост контраста Δn оптического показателя преломления (рис. 1а), концентрация $C_i(r)$ добавки F, имеющей отрицательную рефрактивность, соответствующим образом меняется от нуля до максимума. Для увеличения радиуса сердцевины световода и количества акустических мод с сохранением его оптической одномодовости может быть добавлено фторированное кольцо толщиной b с контрастом Δn_F показателя преломления, определяемого уровнем C_F концентрации фтора. Внешняя неограниченная среда является чисто кварцевой.

Распределения концентраций легирующих добавок определяют соответствующий профиль контраста ΔN акустического показателя преломления (рис. 1в) по формуле:

$$\Delta N(r) = \{K_b C_b(r) + K_i C_i(r)\} / \{1 - K_b C_b(r) - K_i C_i(r)\}, \quad (1)$$

где $C_b(r) = C_0 + \Delta C \cdot \chi(r)$, $C_i(r) = (\Delta n - R_b C_b(r)) / R_i$, $C_0 = \Delta n / R_b$, $\chi(r)$ — нормированная функция распределения P_2O_5; $R_{b,i}$ и $K_{b,i}$ — оптическая и акустическая рефрактивности P_2O_5 и F, соответственно.

Из рис. 1в видно, что рассматриваемая структура дает возможность максимизировать число направляемых акустических мод и равномерность их возбуждения полем оптической моды накачки, что, особенно при большом контрасте концентраций ΔC, позволяет обеспечить большое подавление коэффициента усиления ВРМБ без учета влияния эффективной площади пятна самой оптической моды. К слову,

структура данного типа лучше всего подходит, именно, для низкоапертурных световодов с большой эффективной площадью моды.

Основываясь на известных принципах моделирования спектра усиления ВРМБ в приближении продольных акустических волн [4], мы провели расчеты спектров и коэффициентов подавления ВРМБ в световодах обоих типов со фторированным кольцом (C_F = 5мол%) и без него. Спектр ВРМБ рассчитывался по формуле:

$$S(\nu)=\frac{4\pi n_{\text{eff}}^8 p_{12}^2}{c\rho\lambda^3\Delta\nu}\sum_i \frac{I_i^2}{\nu_i}\frac{(\Delta\nu/2)^2}{(\nu-\nu_i)^2+(\Delta\nu/2)^2}, \qquad (2)$$

где n_{eff}—эффективный показатель преломления оптической моды, λ и c—длина волны и скорость света в вакууме, ρ = 2210кг/м^3—плотность среды, p_{12} = 0.252—эласто-оптический коэффициент, Δν = 40МГц—ширина спектральной линии для одной акустической моды, ν_i—собственная частота i-й акустической моды, $I_i = \int_\infty E^2\xi_i rdr \,/\, \{ \int_\infty E^4 rdr \cdot \int_\infty \xi_i^2 rdr \}$—коэффициент перекрытия нормированных распределений ξ_i поля i-й акустической моды (рис. 1в) и интенсивности E^2 фундаментальной оптической моды. Исследуемый коэффициент подавления ВРМБ рассчитывался как отношение максимальных значений спектров ВРМБ для ступенчатого (легированного только добавкой P_2O_5 со значением ее концентрации в центре сердцевины $C_b(0)$=2.2мол.%) и оптимизированного акустического профиля (с изменением концентрации P_2O_5 на ΔC = 12мол.%) при одних и тех же оптических параметрах. В силу того, что при сохранении оптического одномодового режима этот коэффициент почти не зависит от длины волны λ, представлены результаты расчета только для λ = 1.55мкм; V_{SiO2} = 5944м/с.

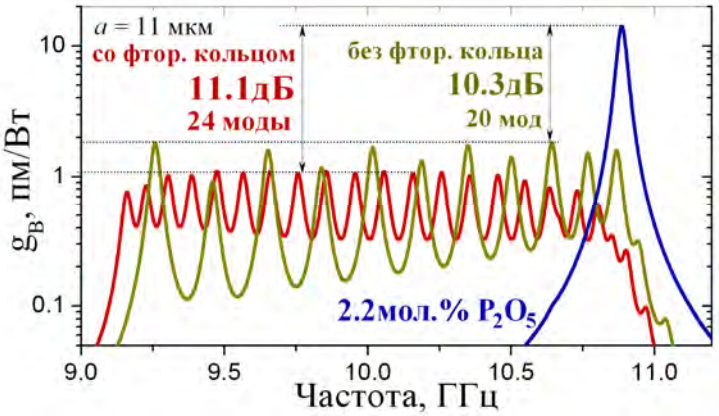


Рис. 2. Оптимизированные спектры ВРМБ для структур со фторированным кольцом и без него

На рис. 2 приведены результаты расчетов для оптимизированной структуры световода со фторированным кольцом и параметрами: Δn = 0.002, C_b = 2.2–14.2мол.% P_2O_5, C_i = 0–6.8мол% F, a = 11мкм, b = 2мкм, Δn_F = –0.008. Такой световод поддерживает 24 направляемые акустические моды L_{01}–L_{024} и имеет коэффициент усиления ВРМБ на 11.1дБ меньше (на 10.3дБ без фтор. кольца), чем соответствующий световод с сердцевиной, равномерно легированной 2.2мол.% P_2O_5, и потому имеющий квази-одномодовый спектр ВРМБ с максимумом 14.1пм/Вт. Также для сравнения приведен спектр для такого же световода, но без фторированного кольца. Видно, что при схожей ширине спектр является более разреженным, т.е. составлен меньшим числом акустических мод (20), чему соответствует меньший коэффициент подавления ВРМБ, равный 10.3дБ. С понижением ΔC коэффициент подавления ВРМБ также понижается, а ширина спектра пропорционально сужается.

В результате подтвердилось, что с ростом числа акустических мод пропорционально растет потенциальный коэффициент подавления ВРМБ, достижимый при соответствующей оптимизации радиальных распределений добавок. Также найдено, что добавление фторированного кольца позволяет увеличить коэффициент подавления ВРМБ на величину до 20% при том же радиусе сердцевины.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №18-19-00687.

Литература

1. *Лихачев М. и др., Квантовая электроника 44, 1043-1047 (2014)*
2. *Nagel J., et al, J. Lightwave Technology 34, 928-942 (2016)*
3. *Jen C-K., et al., J. Am, Ceram. Soc. 76, 712-716 (1993)*
4. *Kobyakov A., Sauer M., and Chowdhury D., Advances in Optics and Photonics 2, 1-59 (2010)*

ИЗГИБНЫЕ ПОТЕРИ В ПОЛЫХ АНТИРЕЗОНАНСНЫХ СВЕТОВОДАХ С БОЛЬШОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДЬЮ МОДОВОГО ПОЛЯ

Леонов С.О.[1], Елистратова Е.А.[1], Демидов В.В.[1,2*], Ананьев В.А.[1,2,3], Алагашев Г.К.[4], Прямиков А.Д.[5], Карасик В.Е.[1]

[1] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва
2 Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, г. Санкт-Петербург
[3] Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург
[4] Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва
[5] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
** E-mail:* demidov@goi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16083

На протяжении последнего десятилетия микроструктурированные световоды из кварцевого стекла с полой сердцевиной и антирезонансным механизмом локализации электромагнитных волн привлекают внимание разработчиков возможностью функционирования одновременно в видимой, ближней и средней ИК областях спектра [1]. Сравнительная технологическая простота изготовления таких световодов (относительно оптических элементов с полой сердцевиной, основанных на эффекте фотонной запрещенной зоны) позволяет осуществлять режим распространения фундаментальной моды в сердцевинах большого размера с эффективной площадью модового поля на уровне нескольких сотен мкм^2[2].

Одним из наиболее важных аспектов, препятствующих практическому применению полых антирезонансных световодов, является осциллирующий характер зависимости изгибных потерь от радиуса намотки [3]. Устранения нежелательных пиков затухания оптического сигнала добиваются, как правило, за счет сокращения диаметра капилляров в оболочке [4], что, в свою очередь, может приводить к нарушению одномодового режима передачи излучения.

Целью настоящей работы был сравнительный анализ изгибных потерь полых антирезонансных световодов с большой сердцевиной двух типов – на основе структуры из восьми соприкасающихся капилляров, формирующих отрицательную кривизну границы раздела сердцевина-оболочка (световод I типа), и на основе структуры из шести несоприкасающихся капилляров (световод II типа). На Рис. 1 приведены изображения поперечного сечения исследованных оптических элементов.

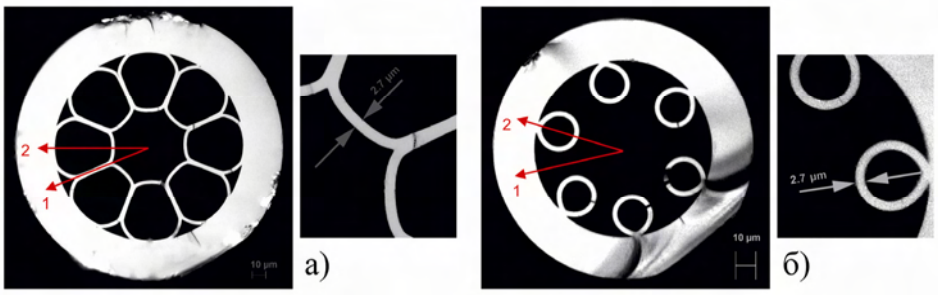


Рис. 1. Изображение поперечного сечения полого антирезонансного световода I типа (а) и II типа (б)

Световоды были получены классическим способом укладки капилляров внутри опорной трубы из кварцевого стекла и последующего перетягивания сборной конструкции при температуре около 1850 °C. Значение диаметра сердцевины для оптических элементов обоих рассматриваемых типов составило приблизительно 50 мкм (эффективная площадь поля фундаментальной моды более 1000 мкм^2), а толщины стенок капилляров – 2,7 мкм, что свидетельствовало о фактически одинаковом спектральном положении областей с максимальным пропусканием. Основное отличие световодов заключалось в диаметре капилляров, измеренном в радиальном направлении. В световоде I типа значение этого параметра составило 41 мкм (отношение диаметра капилляров (d) к диаметру сердцевины (D) d/D = 0,82), а в световоде II типа – 16 мкм (d/D = 0,32).

Для численной оценки изгибных потерь использовались возможности многофункциональной программной среды COMSOL Multiphysics, в которой были воспроизведены реальные поперечные сечения световодов. Расчет производился для двух поляризационных компонент фундаментальной моды LP_{01x} и LP_{01y}, а также для двух ориентаций плоскости изгиба – в первом случае плоскость изгиба

располагалась в промежутке между соседними капиллярами (стрелка 1 на Рис. 1), а во втором случае плоскость изгиба располагалась по центру одного из капилляров (стрелка 2 на Рис. 1). Оценка потерь осуществлялась на длине волны λ = 2,25 мкм. Результаты численного анализа представлены на Рис. 2.

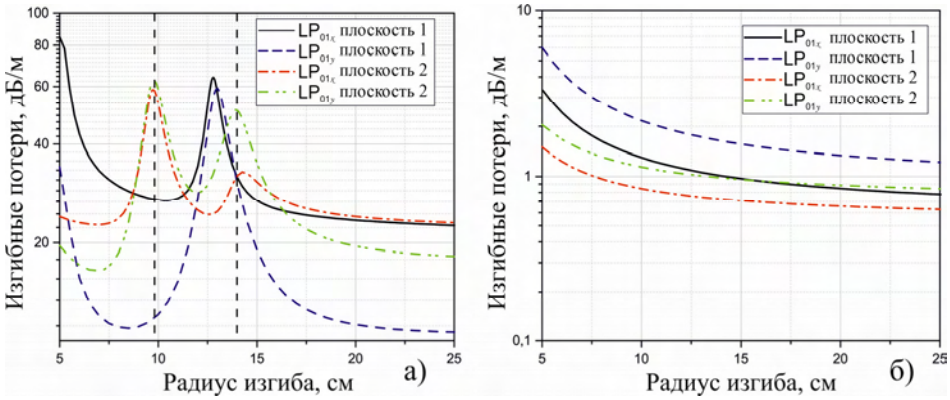


Рис. 2. Расчетные зависимости изгибных потерь от радиуса и ориентации плоскости изгиба на длине волны λ = 2,25 мкм для полого антирезонансного световода I типа (а) и II типа (б)

Для световода I типа характерно наличие выраженных пиков затухания сигнала вне зависимости от ориентации плоскости изгиба, при этом для случая плоскости 2 количество пиков увеличивается, что обусловлено усилением резонансных явлений в оболочке. За счет того, что диаметр капилляров сопоставим с диаметром сердцевины (d = 0,82·D), значения эффективного показателя преломления мод оболочки, обладающих повышенным затуханием, располагаются вблизи аналогичного параметра фундаментальной моды. Поэтому при изгибе по определенному радиусу (13 см в случае плоскости 1, ~10 и ~14 см в случае плоскости 2) происходит фазовое согласование мод и наблюдаются локальные скачки затухания. Зависимость потерь от радиуса и ориентации плоскости изгиба для световода II типа, напротив, носит монотонный характер с ростом потерь по мере расположения световода в более жестких условиях. Отсутствие осцилляций в изученном диапазоне значений радиуса изгиба связано, по-видимому, с малым относительным диаметром капилляров d = 0,32·D, способствующим увеличению разности эффективных показателей преломления фундаментальной и оболочечных мод. Экспериментальное исследование зависимости изгибных потерь рассматриваемых оптических элементов от условий намотки осуществлялось путем расположения световода I типа длиной 40 см и световода II типа длиной 30 см на четверти окружности с дискретными значениями радиуса изгиба. Результаты измерений приведены на Рис. 3.

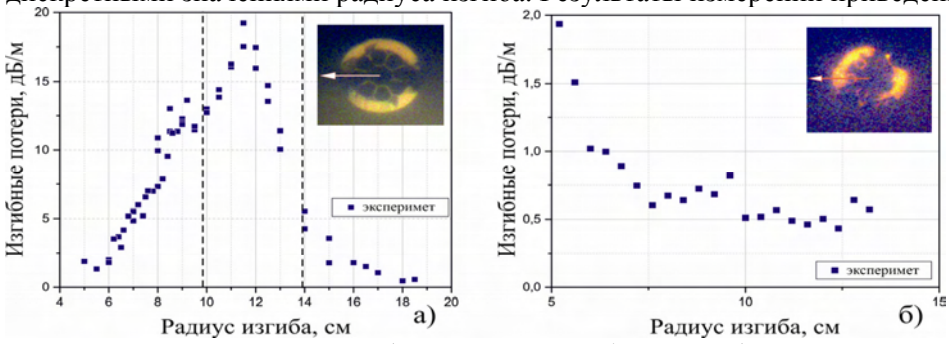


Рис. 3. Экспериментальные зависимости изгибных потерь от радиуса изгиба в плоскости 2 на длине волны λ = 2,25 мкм для полого антирезонансного световода I типа (а) и II типа (б)

Для световода II типа характер изменения изгибных потерь, полученных в эксперименте, хорошо согласуется с расчетными данными, включая величину потерь (на уровне 1 дБ/м), в то время как для световода I типа наблюдается несоответствие в положении резонансных пиков затухания сигнала (смещение приблизительно на 2 см влево). По нашему мнению, это обусловлено некоторым отличием ориентации плоскости изгиба при проведении численного анализа и реальных измерений. Устранение обнаруженных резонансных пиков является задачей будущих исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00596).

Литература

1. *Poletti F., Optics Express 22, 23807-23828 (2014)*
2. *Hasan Md.I., et al, Journal of Lightwave Technology 36, 4060-4065 (2018)*
3. *Frosz M.H., et al, Photonics Research 5, 88-91 (2017)*
4. *Carter R.M., et al, Optics Express 25, 20612-20621 (2017)*

СЕЛЕКТИВНОЕ УСИЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ МОДЫ ГИБРИДНОГО СВЕТОВОДА С АНОМАЛЬНОЙ В ОБЛАСТИ 1 МКМ ДИСПЕРСИЕЙ

Алешкина С.С.[1*], Липатов Д.С.[2], Салганский М.Ю.[2], Таусенев А.В.[3], Шепелев Д.В.[3], Бубнов М.М.[1], Гурьянов А.Н.[2], Лихачев М.Е.[1]

[1] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва, Россия

[2] Институт химии высокочистых веществ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

[3] ООО «Авеста - Проект», г.Троицк, Россия

[*] E-mail: sv_alesh@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16084

Длительность импульсов источников лазерного излучения, работающих в спектральном диапазоне около 1 мкм, в первую очередь определяется дисперсией компонентов, образующих лазерную схему. Поэтому создание полностью волоконных лазеров и усилителей, излучающих на длине волны около 1 мкм (работа иттербиевых волоконных источников), с длительностью импульсов менее 1 псек ограничено отсутствием коммерчески доступных волоконных световодов с аномальной в области 1 мкм дисперсией. Ранее для компенсации дисперсии полностью волоконных лазерных схем нами была разработана и реализована конструкция гибридного световода с аномальной в области 1 мкм дисперсией [1]. Структура световода представляла собой сердцевину с показателем преломления выше уровня кварцевого стекла, окруженную одним или двумя оптически более плотными кольцевыми слоями. Важным свойством разработанной структуры было то, что соответствующий подбор параметров световода позволял контролировать не только величину и знак дисперсии, но так же и наклон дисперсии. В то же время основной проблемой практического применения таких световодов в схемах лазеров и усилителей была неодномодовость гибридной структуры. Несмотря на то, что непосредственно в сердцевине была локализована преимущественно только одна гибридная мода, часть мощности (~20-30%) введенного излучения распространялась в модах кольцевых слоев за счет не нулевого интеграла перекрытия с возбуждающим пучком. Чтобы устранить нежелательные моды световода нами был разработан и апробирован метод селективного подавления мод, предполагающий введение в положение минимума рабочей гибридной моды сильно поглощающего кольцевого слоя [2]. Основным недостатком такого подхода были высокие потери на распространение гибридной моды, являющиеся следствием ограниченной области минимума интенсивности гибридной моды, а так же ограниченной точности технологического воспроизведения профиля показателя преломления. В настоящей работе для создания условий квазиодномодового режима распространения гибридной моды в конструкции гибридного световода применена методика селективного усиления рабочей моды, заключающаяся в частичном легировании области сердцевины, где гибридная мода имеет максимум интенсивности.

Заготовка световода была реализована методом MCVD. В качестве матрицы сердцевины была использована нечувствительная к эффекту фотопотемнения фосфороалюмосиликатная матрица, позволяющая введение 2 вес% Yb в сетку кварцевого стекла, без существенного увеличения апертуры световода [3]. Заготовка световода была сполирована до формы квадрата (чтобы обеспечить лучшее перемешивание мод излучения накачки, распространяющейся по оболочке), и световод с внешними параметрами 120 мкм х 120 мкм был вытянут в отражающем полимерном покрытии, обеспечивающем NA~0.45. На рисунке 1 приведен профиль показателя преломления реализованного световода. Штриховой линией показана область легирования световода ионами Yb^{3+}. Кроме того, на рисунке 1 показано рассчитанное по измеренному профилю показателя преломления распределение интенсивности поля гибридной моды, а так же полей нескольких мод оптически более плотных кольцевых слоев. Важно отметить, что гибридная мода LP_{03} имела наибольшее перекрытие с областью легирования (74%) по сравнению с остальными модами световода, а, следовательно, именно эта мода имела наибольший коэффициент усиления при работе световода в лазерной схеме.

Исследование модового состава световода было проведено путем детектирования распределения интенсивности поля моды на выходе реализованного гибридного световода длиной около 8 м, измеренного в ближнем поле, в режиме, когда световод работал как усилитель. При этом было рассмотрено два случае: когда на входе в световод преимущественно возбуждается гибридная мода, и случай, когда преимущественно возбуждаются моды кольцевых слоев. Установлено, что в обоих экспериментах мода на выходе из световода соответствует гибридной моде LP_{03}, что подтверждает одномодовость реализованной конструкции световода. Измерение дисперсии световода

интерференционным методом показало, что на длине волны 1030 нм дисперсия световода составляет 85 псек/(нм км). Измеренное поглощение по оболочке на длине волны 915 нм было 0.75 дБ/м.

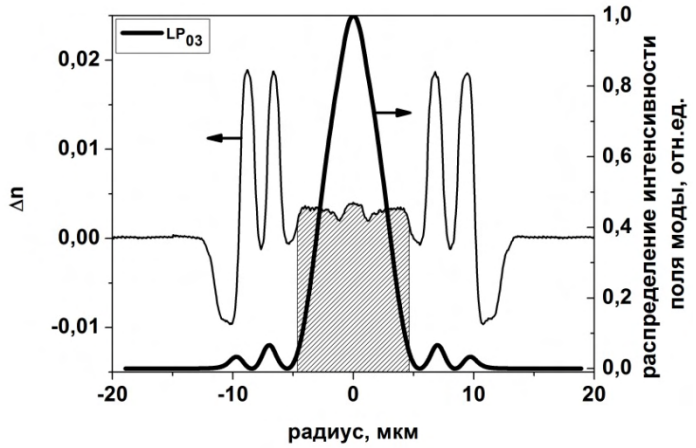


Рисунок 1. Измеренный профиль показателя преломления световода и рассчитанное распределение интенсивностей полей гибридной моды и нескольких мод кольцевых слоев

Реализованный световод был использован в схеме волоконного нелинейного усилителя. В качестве источника задающего сигнала нами был выбран коммерчески доступный источник чирпированных импульсов с центральной длиной генерации 1,03 мкм, шириной спектра 11 нм и частотой повторения импульсов 42 МГц. Длительность импульсов контролировалась посредством объемных дифракционных решеток, установленных перед каскадом усиления. Длительность импульса задающего сигнала, равная 1 псек, была выбрана для выполнения настоящего эксперимента. Гибридный световод длиной 1.7 м был подварен к волоконному объединителю мощности сигнала и накачки 2+1 в 1. В качестве источника накачки был использован стабилизированный по длине волны полупроводниковый диод, пигтелированный волоконным световодом, с центральной длиной волны генерации 976 нм. Выходной торец гибридного световода был сколот под углом, чтобы предотвратить обратное отражение. Непоглощенная мощность накачки была отведена из системы посредством дихроичного зеркала. На выходе реализованного усилителя были получены импульсы с длительностью 90 фсек и пиковой мощностью 9.9 кВт, что является рекордным значением для полностью волоконных импульсных систем фемтосекундной длительности. Результат измерений длительности импульсов и спектр на выходе гибридного световода приведены на рисунке 2. Дальнейшее увеличение мощности накачки приводило к искажению формы импульсов и деградации выходного спектра.

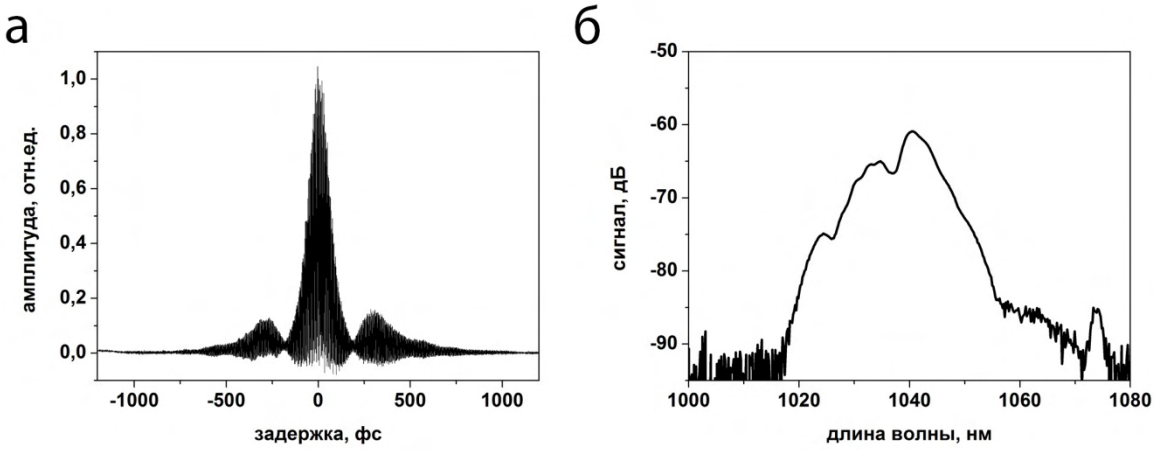


Рисунок 2. Длительность (а) и спектр (б) импульсов, измеренные на выходе гибридного световода

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 18-19-00687.

Литература

1. *Svetlana S. Aleshkina, et al, Opt. Express 21, 23838-23843 (2013)*
2. *Aleshkina, Svetlana et. al., IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electronics 24, 1-8. (2018)*
3. *Likhachev M., et al, in CLEO/Europe and EQEC 2011 Conference Digest, OSA Technical Digest (CD), paper CJ_P24 (2011)*

ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СЕРДЦЕВИНЫ ЗАГОТОВКИ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ АКТИВНЫХ ИОНОВ

Латкин К. П.[1,2*], Бурдин В.В.[1,2], Константинов Ю.А.[1], Первадчук В. П.[2]

[1] *Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь*
[2] *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь*
[*] *E-mail:* latkin.k.p@ya.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16085

Заготовка активных волоконных световодов как первоначальный продукт производства определяет качество конечного: геометрические характеристики, оптические, состав стекла. Последнее важно тем, что концентрация, в том числе и легирующих примесей, будет в волокне таким же, как в заготовке.

Таким образом, встаёт вопрос о важности промежуточного контроля, в рамках которого будет выявляться некондиция. Учитывая высокую стоимость производства активных волоконных световодов, что связано с дороговизной редкоземельных металлов как основных примесей для создания активной среды в стекле, данный вопрос становится еще более существенным.

В качестве реализации такого контроля была предложена автоматизированная система ErGO, основной задачей которой является измерение однородности концентрации активных ионов (иттербий, эрбий) вдоль длины заготовки. Измерение происходит посредством освещения заготовки с боковой стороны излучением на длине волны 980 нм (линия накачки ионов эрбия и иттербия). Измерением мощности также с боковой стороны широкополосным фотоприёмником позволяет оценить мощность люминесценции в указанном пространственном угле (определяется свойствами коллиматора или волокна как собирающего устройства). Для эрбия это диапазон длин волн 1500–1600 нм, для иттербия — 1000–1100 нм. Расчётное отношение между концентрацией и мощностью люминесценции даёт возможность оценить распределение ионов в сердцевине вдоль длины заготовки.

Сама система автоматически настраивается на максимум мощности с помощью системы управления механической частью, целью этого является достижение повторяемости результатов.

В рамках данной работы было проведено математическое моделирование процесса, где, во-первых, была рассмотрена задача прохождения пучка накачки через поверхность заготовки с использованием геометрической оптики как теоретической базы (матричная оптика), а также закона Ламберта-Бугера-Бера. Данные вычисления показали, что потери на отражениях Френеля и на сердцевине не превышают по отдельности 5%, а дифракционное уширение гауссова пучка незначительно. Главным выводом здесь можно считать то, что потери незначительны, а мощность накачки в хорошем приближении можно считать постоянной по всей сердцевине.

Более значимые расчёты касаются процесса накачки и его характеристик: процесс накачки-люминесценции в какой-то момент становится стационарным и подчиняется стохастическим законам, определяющим вероятности излучения и поглощения. Если считать, что в трехуровневой схеме скорость изменения концентрации ионов эрбия в метастабильном состоянии равна сумме скоростей двух процессов: возбуждения $1\rightarrow3$ и распада $2\rightarrow1$, решение дифференциального уравнения имеет вид:

$$n_3 = n_0 \frac{k_{12} I_{pump}}{(k'_{31} + k_{12} I_{pump})} (1 - \exp(-(k'_{31} + k_{12} I_{pump}) t))$$

где n_3 — концентрация ионов находящихся в данный момент в возбуждённом состоянии ($1/м^3$), n_0 — общая концентрация ионов в стекле, I_{pump} — интенсивность пучка накачки, k_{12}, k'_{31} — стохастические коэффициенты для электронных переходов (накачка и спонтанное излучение соответственно), t — время. Учитывая параметр, входящий в экспоненту, можно рассчитать время установления стационарного режима. Согласно расчётам, он составляет 0.0119 с, что достаточно незначительно по сравнению со временем измерения мощности. А значит, стационарный режим накачки-люминесценции в условиях прибора наступает мгновенно. Дополнительно проведены расчёты доли ионов в возбуждённом состоянии: система далека от насыщения, что значительно упрощает моделирование процесса (насыщение может быть достигнуто с использованием накачки мощностью порядка сотен ватт, реальная мощность накачки составляла 3 Вт).

Используя формулу, приведенную выше, можно оценить интенсивность люминесценции сердцевины и как конечный результат мощность, попадающую на фотоприёмник. Интенсивность люминесценции примерно в 4000 раз меньше интенсивности накачки, а для концентрации ионов эрбия $6.66 \cdot 10^{24}$ $1/м^3$ мощность, попадающая на линзу коллиматора радиусом 1.5 мм, составляет величину 450 нВт. Наличие прямой пропорциональности между концентрацией и мощностью люминесценции позволяет проводить измерения концентрации активных ионов вдоль длины заготовки. Коэффициент пропорциональности можно скорректировать эмпирическим путём (калибровка на образце с известной концентрацией).

Данные расчёты в полном объёме используются в специальном программном обеспечении для расчётов параметров измерения установки, а также в программном обеспечении, обеспечивающем управление автоматизированной системой как режим калибровки. Само моделирование позволяет значительно уменьшить погрешность измерений, обеспечить более глубокую настройку с учётом всех физических процессов, осуществить перевод из относительных единиц в абсолютные, более удобные для дальнейшего анализа в рамках производства.

Литература

1. Курков А.С., Дианов Е.М., Квантовая Электроника, 34 № 10, 881-900 (2004)
2. Латкин К.П. и др., Спецвыпуск «Фотон-экспресс-наука 2015», №6, 157-158 (2015)
3. Мелькумов М.А. и др., Неорганические материалы, 46 №3, 1–6 (2010)

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ПОЛЫХ РЕВОЛЬВЕРНЫХ СВЕТОВОДАХ

Колядин А.Н.*, Косолапов А.Ф., Буфетов И.А.

Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
**E-mail:* antonkolyadin@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16086

Распространение оптического разряда исследовано в различных волоконных световодах со стеклянной сердцевиной [1]. Но до настоящего времени в полых световодах данное явление не исследовалось. В данной работе рассмотрено распространение оптического разряда (ОР) в полом световоде револьверного типа. В световод с диаметром полой сердцевины 20 мкм вводилось излучение импульсного неодимового лазера. После инициирования наблюдалось движение ОР навстречу лазерному излучению. При этом обнаружено, что средняя скорость распространения зависит от того, покрыт ли световод полимером (~1 м/с) или зачищен (~3 м/с). Средняя мощность лазерного излучения в световоде при этом составляла 2 Вт.

Револьверные световоды представляют из себя воздушную сердцевину, окружённую одним рядом стеклянных капилляров, приваренных к внешней несущей трубе (рис. 1(г)). Излучение неодимового лазера вводилось в полую сердцевину световода с эффективностью порядка 80%. Лазер работал одновременно в режиме модуляции добротности и синхронизации мод. При этом пакеты импульсов длительностью 130 нс и частотой следования 1,2 кГц состояли из импульсов длительностью 100 пс и частотой 76 МГц (период 13 нс). Средняя мощность на выходе полого световода составляла 2 Вт, что соответствует пиковой мощности 1 МВт. ОР инициировался следующим образом: в отсутствие излучения к плоскости выходного торца световода прислонялась металлическая пластина, подавалось лазерное излучение, в результате чего инициированный таким образом ОР начинал движение от выходного торца навстречу лазерному излучению.

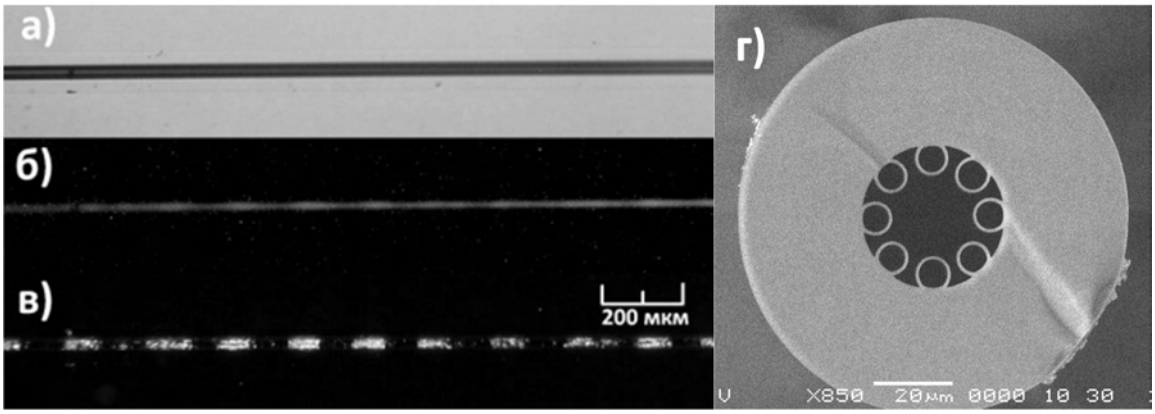


Рис.1. а-в) фотография одного и того же участка световода до (а), во время (б) и после(в) прохождения по нему ОР. Световод без полимерной оболочки находился в иммерсионной жидкости. Способы подсветки: а – подсветка снизу; б – собственное свечение ОР. Затвор фотоаппарата оставался открыт при прохождении ОР; в – подсветка сбоку. Лазерное излучение распространялось слева направо; г) фотография поперечного сечения световода

На рис. 1 (а-в) продемонстрирован один и тот же участок световода до, во время и после прохождения по нему ОР, соответственно. После прохождения по световоду ОР в сердцевине световода наблюдаются периодические белые области (рис. 1(в)). Было показано [2], что в светлых областях капилляры световода разрушены, а в темных - остаются целы. При этом опорная труба световода остаётся целой после прохождения ОР на всей длине световода. На рис. 1(б) и (в) видно, что области более интенсивного свечения плазмы соответствуют областям, где капилляры световода разрушены. Этот факт позволяет сделать вывод, что каждая светлая область на рис.1(в) является «следом» от 100 пс импульса, а плазма ОР не «затухает» между этими импульсами.

На рис. 2 показана зависимость расстояния, пройденного ОР, от времени для двух световодов. Один световод (рис.2 чёрные квадраты) покрыт полимером (акрилат) на всей длине, а у второго световода (рис.2 чёрные точки) полимер на небольшом участке снят (схематичные изображения световодов приведены в левой и правой части графика). Из графика видно, что в области, где полимер со световода удалён, скорость ОР возрастает в ≈3 раза. На фотографиях, аналогичных рис. 1 (а-в), но для участка световода без полимера и находящегося в воздухе (рис. 3(а-в)) было обнаружено, что в

этом случае между областями с периодически разрушенными капиллярами находятся области длиной ≈1мм без видимых разрушений.

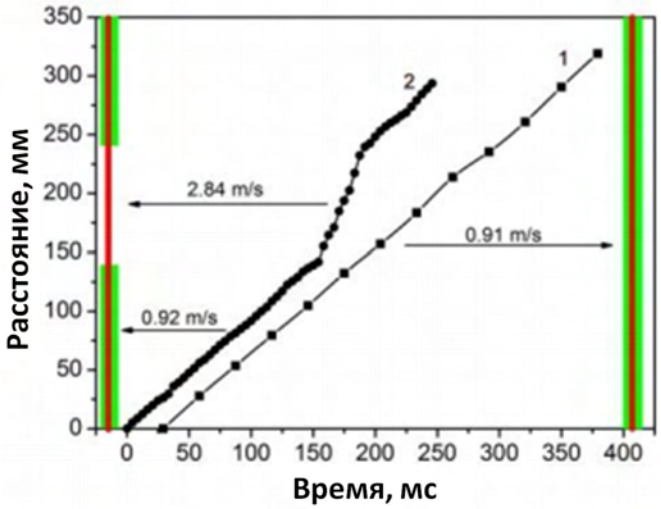


Рис.2. Зависимость координаты ОР от времени для световода покрытого полимером на всей рассматриваемой длине (черные квадраты) и для световода с зачищенным участком (чёрные точки). Слева и справа схематично изображены световоды (покрытый и с зачищенным участком). На рисунке указаны измеренные значения средней скорости движения ОР

Характер свечения плазмы на рис. 1(б) и 3(б), а также характер разрушений на снимках 1(в) и 3(в) позволяют утверждать, что ОР распространялся именно по полой сердцевине световода. Период следования областей с разрушенными капиллярами и на рис. 1(в), и на рис. 3(в) ≈ 200 мкм. Если принять, что каждая такая светлая область остаётся от 100 пс импульса, которые следуют с частотой 13 нс, то средняя скорость движения ОР во время излучения пакета импульсов 15 км/с. Подобная величина скорости говорит о детонационном режиме распространения ОР.

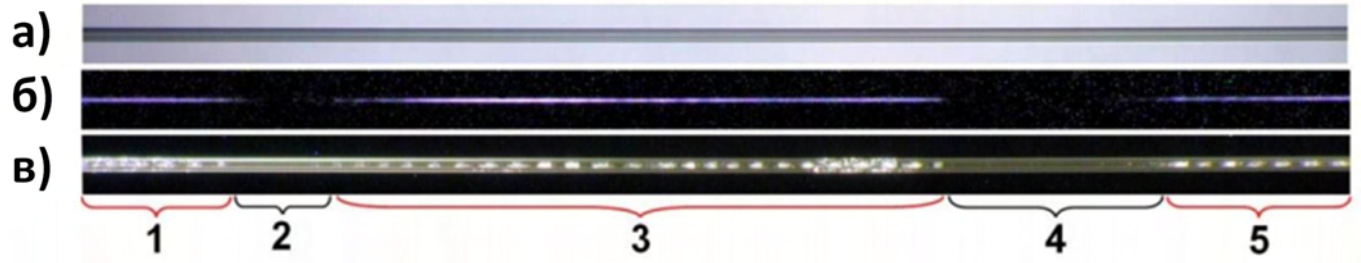


Рис.3.Один и тот же участок световода до (а), во время (б) и после (в) прохождения по нему ОР. Световод находился в воздухе без полимерного покрытия.(а)-подсветка снизу; (б)- собственное свечение плазмы. Фотоаппарат находился с открытым затвором на всем времени прохождения ОР; (в)- подсветка сбоку. Длина каждого снимка 9 мм. Лазерное излучение распространялось слева направо

Плазма ОР, как видно из рис. 3(б), затухает в конце пакета импульсов. Таким образом, в случае, если световод покрыт полимером или окружён иммерсионной жидкостью (картина разрушений в этих случаях одинакова), следующий ОР инициируется в области с разрушенными капиллярами, оставшимися от предыдущего импульса. В случае же, если полимер снят и световод находится в воздухе, то зона следующих разрушений располагается примерно в 1 мм от предыдущей (области 2 и 4 на рис. 3). Эксперименты показывают, что данное различие обусловлено свойствами среды, в которой находится световод. По нашему мнению, условия отражения упругой волны от внешней поверхности несущей трубы световода должны играть здесь существенную роль. Ударная волна, сформированная в сердцевине световода под действием пакета импульсов, частично проникает в опорную трубу, отражается от внешней её границы (в случае границы стекло-воздух коэффициент отражения близок к единице), достигает внутренней границы и отрывает лежащие на внутренней поверхности стекла мельчайшие осколки, которые смещаются по сердцевине вместе с потоком воздуха за фронтом ударной волны в течение интервалов между пакетами импульсов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00324.

Литература

1. *Kashyap R. Optics Express, 21, 6422 (2013)*
2. *Колядин А.Н., и др., Квантовая электроника, 48(12) 1138–1142 (2018)*

СИНТЕЗ ФОСФОРОСИЛИКАТНЫХ СТЁКОЛ И СВЕТОВОДОВ НА ИХ ОСНОВЕ, ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ, МЕТОДОМ MCVD

Афанасьев Ф.В.[1*], Гурьянов А.Н.[1], Лобанов А.С.[1], Хопин В.Ф.[1], Рюмкин К. Е.[2], Хегай А. М.[2], Мелькумов М. А.[2], Фирстов С. В.[2]

[1]Институт химии высокочистых веществ РАН, г. Нижний Новгород
[2] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[*] E-mail: kamerton-fis@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16087

В 2001 году группой исследователей [1] была показана ИК люминесценции в диапазоне длин волн 1000-1600 нм в алюминосиликатном стекле, легированном висмутом. С этого момента данные материалы стали привлекать к себе огромное внимание как перспективный материал для создания широкополосных оптических усилителей в системах волоконной связи. Стоит отметить, что не смотря на огромный массив работ по висмутсодержащим материалам лазерной генерации на объёмных образцах стёкол, полученных наплавом шихты в тигле получить не удалось.

Впервые лазерная генерация была продемонстрирована в 2005 году на алюминосиликатном волоконным световоде, легированным висмутом, полученным с помощью растворной технологии ("MCVD in-situ solution doping technique"), в спектральном диапазоне 1140 – 1215 нм при накачке на длине волны 1064 нм [2]. В дальнейшем, подобные результаты были получены другими исследователями с помощью золь-гель технологии [3]. Создание фосфорогерманосиликатных световодов, легированных висмутом, позволило получить на световодах такого типа лазерную генерацию в широком диапазоне от 1300 нм до 1470 нм [4] при оптической накачке на длине волны 1230 нм. Также в литературе имеются сообщения о порошковой технологии ("powder in tube") получения световодов данного типа [5].К настоящему времени публикаций, посвящённых технологии изготовления волоконных световодов на основе кварцевого стекла, легированного висмутом крайне мало.

Основной целью работы является исследование полностью газофазного процесса легирования кварцевого стекла оксидами фосфора и висмута в MCVD методе изготовления заготовок волоконных световодов. В рамках данной задачи был произведён подбор необходимых исходных реагентов и материалов для изготовления преформ, установлено влияние параметров и технологических режимов MCVD процесса на состав осаждаемого стекла, а также равномерность распределения концентрации отдельных компонентов по длине преформы.

Получение заготовок волоконных световодов на основе кварцевого стекла, легированного висмутом, проводилось на стандартной MCVD установке. Для изготовления заготовок использовались кварцевые трубы марки F-300 Heraeus размером 21×2 мм. Для синтеза стёкол сердцевины использовались следующие высокочистых компоненты: $SiCl_4$, $GeCl_4$, $POCl_3$, CCl_4, $C_2F_3Cl_3$. Концентрация вводимого в сердцевину висмута контролировалась потоком инертного газа (аргона, ОСЧ) через специальные ампулы, содержащие летучие соединения висмута. После перетяжки и жакетирования, проводимых для корректировки отсечки, из всех изготовленных преформ были вытянуты световоды с диаметром кварцевой оболочки 125 мкм. Расчётная отсечка второй моды подгонялась в область 0,95-1 мкм. Во всех изготовленных световодах проводились измерения оптических потерь, просветления и усиления. Концентрация висмута в образцах стёкол (заготовок) определялась методом АЭС-ИСП (атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой).

Получена серия одномодовых световодов с различной концентрацией висмута (0,0025-0,085 мол.%) в фосфоросиликатной сердцевине. Спектры поглощения световодов, вытянутых из соответствующих заготовок, были измерены в диапазоне длин волн 800-1700 нм (Рис.1А). Спектры имеют явное подобие и следующие отличительные особенности: пик на 1380 нм, соответствующий поглощению ОН-групп в кварцевом стекле, слабовыраженная полоса с пиком в области 1200 нм, соответствующая висмутовым активным центрам, ассоциированных с фосфором (P-ВАЦ) в силикатной матрице, слабовыраженный пик в районе 1400 нм, соответствующий поглощению ВАЦ, ассоциированных с кремнием (Si-ВАЦ). Пики в области 950-1000 нм (в некоторых световодах) соответствуют отсечке второй моды. Видно, что при росте концентрации висмута в стекле происходит рост оптических потерь и пики становятся менее выраженными.

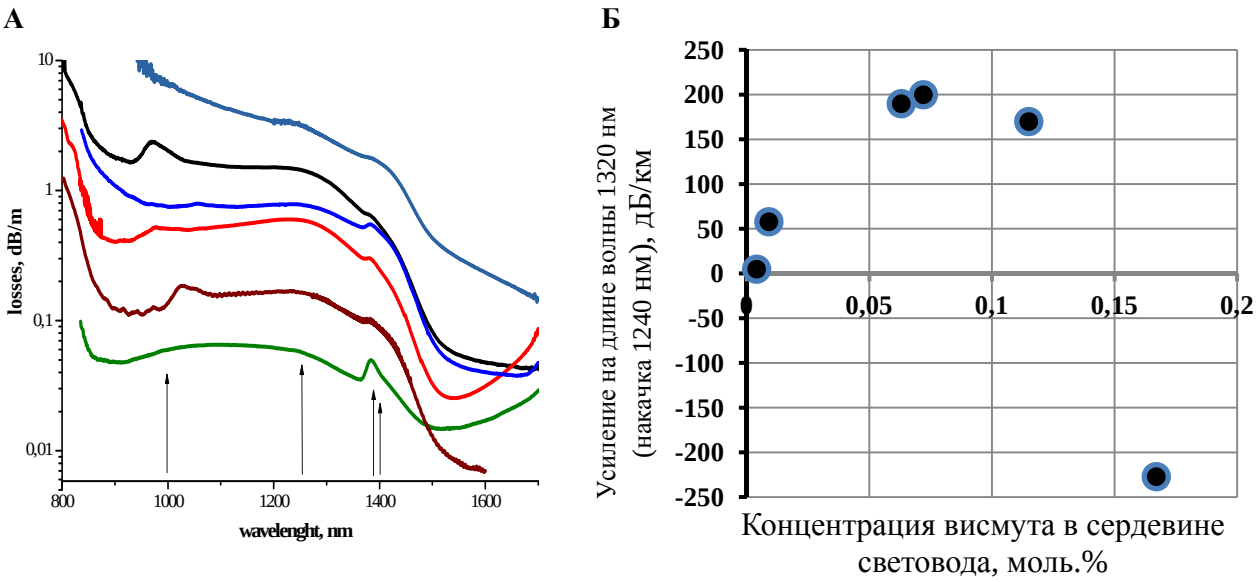


Рис. 1. Спектры оптических потерь световодов с сердцевиной из фосфоросиликатного стекла, легированного висмутом (А), Зависимость усиления на длине волны 1320 нм при накачке на 1240 нм от концентрации висмута в сердцевине световода (Б)

Максимальное усиление на уровне 0,2 дБ/м достигается в диапазоне концентраций висмута от 0,06 до 0,1 мол.%. Дальнейший рост концентрации висмута приводит к снижению усиления и в конце концов усиление переходит в поглощение (Рис.1Б).

Разработана полностью газофазная методика получения стёкол системы SiO_2-P_2O_5 и световодов на их основе, легированых висмутом, по MCVD технологии. В спектрах оптических потерь идентифицированы полосы поглощения, принадлежащие ВАЦ, ассоциированных с фосфором (1200 нм) и кремнием (1400 нм). Результаты указывают на то, что увеличение концентрации висмута в сердцевине световодов приводит к опережающему росту оптических потерь по сравнению с ростом концентрацей ВАЦ во всём исследованном диапазоне длин волн 800-1700 нм, что в свою очередь приводит к существованию оптимальной концентрации висмута в световоде ~0.07 моль%, при которой достигается максимальный уровень усиления ~ 0,2 дБ/м.

Работа выполнена по госзаданию ИХВВ РАН и программе Президиума РАН №13.

Литература

1. *Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, Jpn. J. Appl. Phys., 40, L279 (2001)*
2. *E. M. Dianov, V. V. Dvoyrin, et al, Quantum Electronics, Vol.35, No.12, 1083-1084 (2005)*
3. *Razdobreev, L. Bigot, et al, Appl. Phys. Lett, 90, 031103 (2007)*
4. *E.M. Dianov, S.V. Firstov, et al, Quantum Electronics, 38, 615 (2008)*
5. *И. А. Буфетов, С. Л. Семёнов и др., Квантовая электроника, 40, №7 (2010)*

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГАУССОВСКИХ ИМПУЛЬСОВ ПО ОДНОМОДОВЫМ ОПТИЧЕСКИМ ВОЛОКНАМ В ЛИНЕЙНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Былина М.С., Глаголев С.Ф.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург
** E-mail:* glagolevsf@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16088

В известной монографии Агравала Г. [1] рассмотрены процессы распространения оптических импульсов гауссовой формы по одномодовым оптическим волокнам (ОВ) без учета потерь. Однако авторами были обнаружены некоторые неточности, которые могут приводить к ошибкам в расчетах. Цель работы: тщательное повторение математических выкладок, сравнение их с выражениями, имеющимися в [1], при тех же упрощающих предположениях. Частично эти вопросы уже рассматривались в [2].

Рассмотрим процесс распространения по одномодовому ОВ без потерь нечирпированного гауссовского импульса с полушириной T_0, несущей частотой ω_0 и максимальной амплитудой напряженности электрического поля E_{m0}. Он может быть описан зависимостями мгновенных значений E и комплексной амплитуды E_m напряженности электрического поля от времени t [1]:

$$E(t)=E_{m0}\cdot\exp\left(-\frac{t^2}{2T_0^2}\right)\cdot\cos(\omega_0 t),\ E_m(t)=E_{m0}\cdot\exp\left(-\frac{t^2}{2T_0^2}\right) \quad (1)$$

В работе были определены зависимости амплитуд E_{mz} и фаз φ_{mz} гармонических составляющих сигнала от внутриимпульсного времени T на выходе ОВ длиной z:

$$E_{mz}(T)=\frac{E_{m0}}{\sqrt[4]{1+z^2/L_D^2}}\cdot\exp\left(-\frac{T^2}{2T_0^2\cdot\left(1+z^2/L_D^2\right)}\right), \quad (2)$$

$$\varphi_{mz}(T)=\frac{T^2\cdot\mathrm{sign}(\beta_2)}{2T_0^2\cdot\left(1+z^2/L_D^2\right)}+\frac{1}{2}\cdot\mathrm{arctg}\left(\mathrm{sign}(\beta_2)\cdot z/L_D\right), \quad (3)$$

где β_2 – дисперсия групповых скоростей, $L_D=T_0^2/|\beta_2|$ – дисперсионная длина ОВ.

Из (2) видно, что выходной импульс имеет гауссовскую форму и полуширину T_{0z}:

$$T_{0z}=T_0\cdot\sqrt{1+z^2/L_D^2}\ . \quad (4)$$

Отметим, что амплитудные спектры входного и выходного импульсов одинаковы и имеют гауссовскую форму. Это можно экспериментально проверить с помощью оптического анализатора спектра. Однако фазовый спектр выходного импульса и распределение частот внутри импульса зависит от дисперсии групповых скоростей и длины z.

Из (3) можно определить зависимость отклонения частоты $\Delta\omega$ внутри выходного импульса [2]:

$$\Delta\omega(T,z)=\frac{d\varphi_{mz}}{dT}=-\frac{\mathrm{sign}(\beta_2)\cdot z/L_D}{T_0^2\cdot\left(1+z^2/L_D^2\right)}\cdot T\ . \quad (5)$$

Из (3) и (5) следует, что выходной импульс приобрел линейную частотную модуляцию, которую принято характеризовать индексом частотной модуляции или чирпингом C_z

$$C_z=T_0^2\cdot\frac{d[\Delta\omega(z,T)]}{dT}=\frac{\mathrm{sign}(\beta_2)\cdot z/L_D}{1+(z/L_D)^2}\ . \quad (6)$$

Рассмотрим процесс распространения по одномодовому ОВ без потерь чирпированного гауссовского импульса. Комплексную амплитуду огибающей гауссовского импульса с начальным чирпингом C_0 на входе ОВ представим выражением [1]:

$$E_m(t)=E_{m0}\cdot\exp\left(-\frac{t^2\cdot(1+jC_0)}{2T_0^2}\right). \quad (7)$$

В работе были определены зависимости амплитуд E_{mz} и фаз φ_{mz} гармонических составляющих сигнала от внутриимпульсного времени T на выходе ОВ длиной z:

$$E_{mz}(T)=\frac{E_{m0}\cdot\sqrt[4]{1+\left[C_0+\mathrm{sign}(\beta_2)\cdot\left(1+\tilde{N}_0^2\right)\cdot z/L_D\right]^2}}{\sqrt[4]{1+\tilde{N}_0^2}\cdot(1+A)}\cdot\exp\left(-\frac{T^2}{2T_0^2\cdot(1+A)}\right),\qquad(8)$$

$$\varphi_{mz}(T)=\frac{1}{2}\cdot\left\{\mathrm{arctg}(B)-\left[\mathrm{arctg}(C_0)+\frac{T^2\cdot B}{2T_0^2\cdot(1+A)}\right]\right\},\qquad(9)$$

где $A=2\cdot\tilde{N}_0\cdot\mathrm{sign}(\beta_2)\cdot z/L_D+\left(1+\tilde{N}_0^2\right)\cdot z^2/L_D^2$, $B=\tilde{N}_0+\mathrm{sign}(\beta_2)\cdot\left(1+\tilde{N}_0^2\right)\cdot z/L_D$.

Из (8) видно, что выходной импульс сохранил гауссовскую форму и имеет полуширину T_{0z}:

$$T_{0z}=T_0\cdot\sqrt{1+A},\qquad(10)$$

Из (9) можно определить зависимость отклонения частоты Δω внутри импульса и чирпинг выходного импульса:

$$\Delta\omega(T,z)=\frac{d\varphi_{mz}}{dT}=\frac{T\cdot B}{T_0^2\cdot(1+A)},\qquad(11)$$

$$C_z=T_0^2\cdot\frac{d\left[\Delta\omega(z,T)\right]}{dT}=\frac{B}{1+A}.\qquad(12)$$

На рис. 1 и 2 показаны зависимости относительной полуширины импульсов и чирпинга выходного импульса от относительного расстояния и начального чирпинга, рассчитанные по (10) и (12).

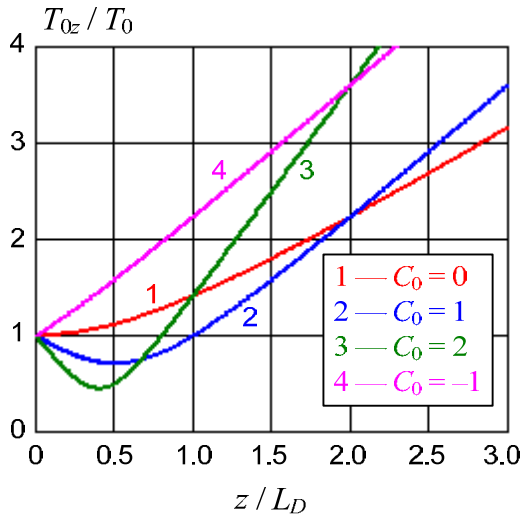


Рис. 1. Зависимости относительной полуширины выходного импульса от относительного расстояния

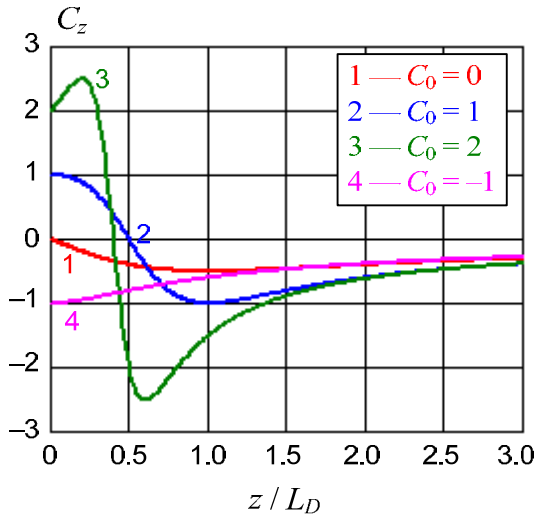


Рис. 2. Зависимости чирпинга выходного импульса от относительного расстояния

Для расчета мощности выходных оптических импульсов с учетом коэффициента затухания α из (8) получим инженерную формулу [2]:

$$P_z(T)=\frac{P_0\cdot\sqrt{1+\left[C_0+\mathrm{sign}(\beta_2)\cdot\left(1+C_0^2\right)\cdot z/L_D\right]^2}}{(1+A)^2\sqrt{1+\tilde{N}_0^2}}\cdot\exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2\cdot(1+A)}-\alpha\cdot z\right).\qquad(13)$$

Предлагаемые в работе формулы могут использоваться при расчете линейных волоконно-оптических трактов с управлением хроматической дисперсией путем чередования ОВ с разными знаками дисперсии групповых скоростей и с использованием предварительного чирпирования импульсов на входе в ОВ. Например, для реализации квазисолитонных линейных трактов.

Литература

1. *Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 323 с.*
2. *Андреева Е.И., Былина М.С., Глаголев С.Ф., Доценко С.Э., Чаймарданов П.А. Свойства временных оптических солитонов в оптических волокнах и возможность их использования в телекоммуникациях. Часть 4 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 1*

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ РАЗВЕТВИТЕЛЕЙ

Базакуца П.В.[1], Боев М.А.[2], Никитин А.И.[2*]

[1] ООО «Оптические телекоммуникации (ОПТЕЛ)», г. Москва
[2] Национальный Исследовательский Университет «МЭИ», г. Москва
[*]E-mail: Nikitin.Andrey.7@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16089

Оптические разветвители применяются при распределении мощности оптического сигнала и уплотнении каналов связи в волоконно-оптических сетях связи [1].

Для применения в активно развивающихся системах связи со спектральным уплотнением каналов (WDM, CWDM, DWDM), в том числе систем локальной связи по схеме, так называемых пассивных оптических сетей (PON), в которых также возможны решения с применением CWDM и DWDM, оптические разветвители должны соответствовать рекомендации Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т) G.671.

В настоящее время для строительства сетей PON используют разветвители, производимые по планарной интегрально-оптической технологии (PLC), которые, как правило, имеют равномерное по всем выходным плечам деление оптической мощности. Для оптимального же деления оптической мощности в древовидных сетях, каковыми и являются сети PON, целесообразно применять разветвители и с дробным делением оптической мощности. Дробное же деление мощности легче и дешевле обеспечить в разветвителях, изготовленных по сплавной технологии (FBT). FBT разветвители также обладают меньшим вносимым затуханием по сравнению с PLC разветвителями.

Важнейшими требованиями, предъявляемыми к оптическим разветвителям для систем спектрального уплотнения, являются обеспечение заданного коэффициента деления между каналами с минимальными отклонениями от заданного значения и минимальная величина вносимого затухания в пределах всего рабочего спектрального диапазона.

В настоящей работе проведено сравнительное экспериментальное исследование спектральных характеристик сплавных и планарных оптических разветвителей.

Для проведения исследования были отобраны серийно изготавливаемые в ООО “ОПТЕЛ” и поставляемые на рынок другими производителями планарные и сплавные разветвители 1x2 с процентным делением мощности 50/50, изготовленные из оптических волокон, соответствующих рекомендациям МСЭ-Т G.652.D и G.657.A1, A2.

Измерения спектральных характеристик проводились с использованием широкополосного источника непрерывного оптического излучения с длинами волн в диапазоне 800 – 1700 нм, и спектроанализатора Anritsu MS9710C с рабочим спектральным диапазоном 600 – 1750 нм.

Примеры спектральных зависимостей соотношения затухания в выходных каналах PLC и FBT разветвителей, полученных в результате исследования, приведены на рис.1.

Результаты измерений спектральных характеристик коммерчески доступных планарных оптических разветвителей, а также изготовленных в рамках данной работы по стандартной технологии на основе интегрально-оптических чипов подтверждают, что их характеристики в спектральном диапазоне 1260 – 1660 нм соответствуют рекомендациям МСЭ-Т [4-6].

Спектральные же характеристики сплавных разветвителей существенным образом зависят от технологических особенностей процесса их производства и типов оптических волокон, использованных для производства разветвителей.

В ходе проведённых измерений и экспериментов по модификации конструкции FBT разветвителей установлено, что при определённых параметрах конструкций разветвителей, подборе типа волокна и технологии изготовления, обеспечиваются однородность затухания и его абсолютная величина в каналах разветвителей во всём спектральном диапазоне 1260 – 1660 нм, соответствующие рекомендациям МСЭ-Т [4-6], а по величине вносимого затухания заметно превосходящие PLC разветвители.

Таким образом, в работе показано, что путём настройки технологии и соответствующем контроле спектральных параметров передачи возможно и целесообразно серийное производство FBT разветвителей для их применения в системах и сетях связи со спектральным уплотнением типа CWDM, DWDM и при строительстве пассивных оптических сетей PON.

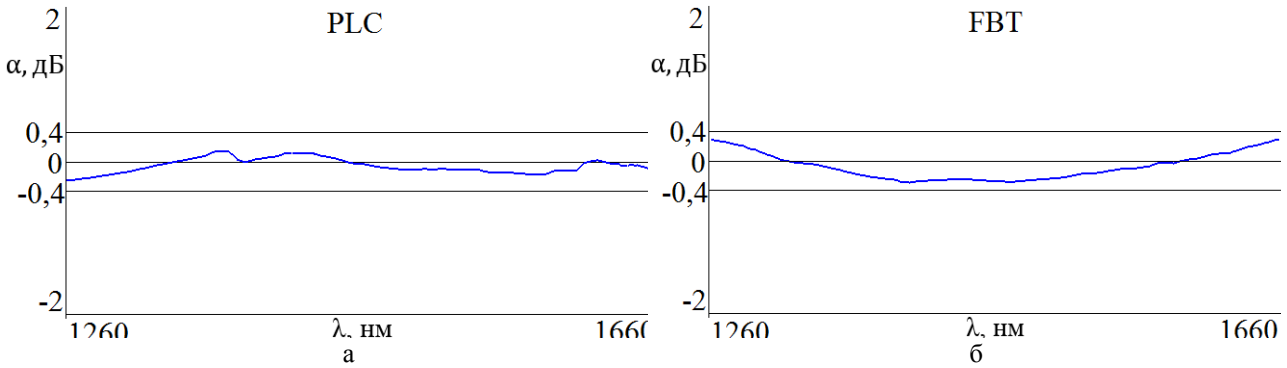


Рис.1 Спектральные зависимости соотношения затухания в выходных каналах разветвителей а – разветвитель PLC 1x2 с плечами из волокна G.657.A1, б - разветвитель FBT 1x2 с плечами из волокна G.652.D

Литература

1. *Никитин А.И., Боев М.А. Влияние температуры на затухание в сплавных оптических разветвителях для соединения оптических кабелей // XXV Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. – 2019г. – с. 342*
2. *Chinlon Lin. Broadband Optical Access Networks and Fiber-to-the-Home: Systems Technologies and Deployment Strategies. – 2006г. – с. 26*
3. *https://community.fs.com/blog/fbt-splitter-vs-plc-splitter.html (Дата обращения: 10.05.2019г.)*
4. *Рекомендация Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т) G.671. Параметры передачи оптических компонентов и подсистем*
5. *Рекомендация Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т) G.694.1. Спектральные сетки WDM систем: сетка частот DWDM*
6. *Рекомендация Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т) G.694.2 Спектральные сетки WDM систем: сетка частот CWDM*

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СПЛАВНЫХ WDM-МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ В ЖЕСТКИХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Елизаров С.Г., Ключник Н.Т., Ленин М.М.*, Иванов Д.А., Яковлев М.Я.

ЗАО «ЦНИТИ «Техномаш-ВОС», г. Москва
** E-mail:* m.lenin@tmvos.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16090

Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) со спектральным уплотнением каналов находят все более широкое применение в бортовых информационно-измерительных системах подвижных объектов [1]. Одним из важных компонентов таких систем является двухволновый WDM-демультиплексор с рабочими длинами волн 1,31 и 1.55 мкм, использующийся в частности для организации дуплексной связи по одному оптическому волокну. Для создания двухволновых WDM-мультиплексоров широко используется технология сплавления с одновременной биконической растяжкой двух одномодовых волокон (технология FBT). В настоящей работе приведены результаты исследования влияния механических и температурных воздействий на характеристики сплавных волоконно-оптических WDM-мультиплексоров. Приведены методики динамического контроля параметров сплавных WDM-мультиплексоров в процессе вибрационных воздействий [2].

Структура двухканального сплавного WDM-мультиплексора приведена на рис. 1 [3]. Такое устройство представляет собой биконический одномодовый разветвитель и включает два сплавленных боковыми поверхностями оптических волокна. На участке сплавления волокон сформирована общая суженная зона, которая является областью связи. Основными характеристиками WDM-мультиплексора являются вносимые потери A и коэффициент изоляции $K_{из}$. Необходимые характеристики достигаются путем контролируемого растяжения и формирования биконической перетяжки. Коэффициент связи, определяющий значения мощности излучения в выходных каналах WDM-мультиплексора, зависит от длины области связи L и длины волны излучения. Это позволяет при определенном значении L обеспечить спектральное разделение заданных рабочих длин волн в выходных каналах мультиплексора. После формирования биконической перетяжки с нужными свойствами оптические волокна закрепляются с помощью УФ-компаунда на подложке из кварцевого стекла.

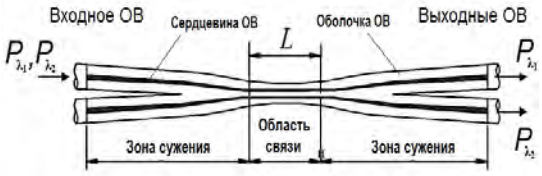


Рис. 1. Двухканальный WDM-мультиплексор на основе сплавного биконического разветвителя (схематическое изображение)

FBT мультиплексоры изготавливались на промышленной установке для изготовления разветвителей FCI-0201 фирмы NTT AT (Япония). Длина биконического участка составляла 50 мм.

Для исследования воздействия вибрации был разработан стенд [2], структурная схема которого приведена на рис. 2.

Стенд позволяет осуществлять вибрационные воздействия с возможностью свипирования частоты вибрации в диапазоне 10–5000 Гц и строить в автоматическом режиме графические зависимости оптической мощности в выходных каналах исследуемого образца от частоты вибрации. Испытания проводились при виброускорении 10 g.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости оптической мощности на изолированном выходе WDM-мультиплексора от частоты вибрации, полученные с помощью измерителей оптической мощности, различающихся частотой дискретизации и временем усреднения сигнала. Для наглядности показан участок полосы 1700-1800 Гц, соответствующий критической частоте исследуемого образца.

Показано влияние характеристик используемых измерителей оптической мощности на результаты измерений оптических параметров исследуемых образцов. При использовании измерителя EXFO PM-1600 (с частотой дискретизации 4 КГц) было зафиксировано изменение коэффициента изоляции на критической частоте на 6 дБ. Измеритель Keysight N7744A (с частотой дискретизации

1 МГц) при испытаниях того же образца показал уменьшение коэффициента изоляции канала более чем на 9,5 дБ.

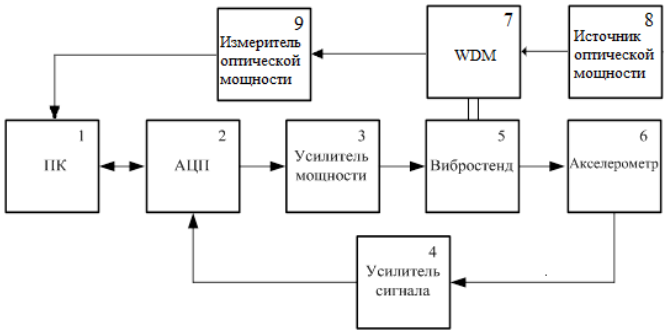
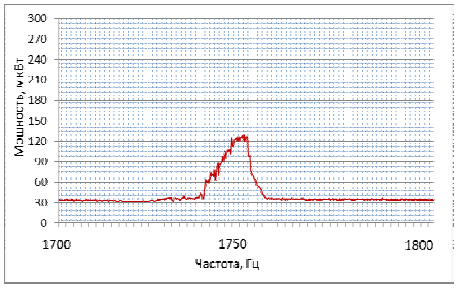


Рис. 2. Структурная схема испытательного вибростенда: 1 – персональный компьютер (ПК) с управляющей программой; 2 – аналого-цифровой преобразователь; 3 – усилитель мощности Bruel&Kjaer 2719; 4 – усилитель-формирователь сигнала Bruel&Kjaer 2626; 5 – вибростенд электродинамический Bruel&Kjaer 4808; 6 – акселерометр Bruel&Kjaer 4332; 7 – исследуемый WDM-мультиплексор; 8 – источник оптического излучения; 9 –измеритель оптической мощности

Таким образом, было выявлено значительное ухудшение коэффициента изоляции на критической частоте сплавных WDM-мультиплексоров. Это может приводить к значительному возрастанию коэффициента ошибок в ВОСП со спектральным уплотнением и, как следствие, потере работоспособности указанных систем.

а) 

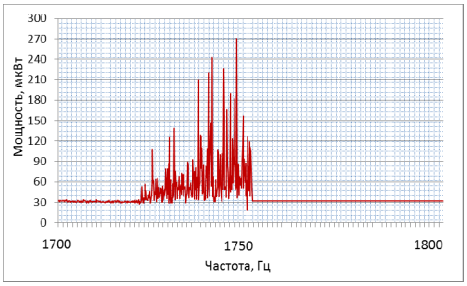
б) 

Рис. 3. Экспериментальные зависимости оптической мощности на изолированном выходе WDM-мультиплексора от частоты вибрации, полученные с использованием измерителей оптической мощности EXFO PM-1600(a) и Keysight N7744A (б)

Было исследовано влияние температуры в диапазоне от -60 до +85˚С на характеристики изготовленных образцов WDM-мультиплексоров. Показано, что в указанном диапазоне температур изменение вносимых потерь не превышало 0,5 дБ, а коэффициент изоляции составлял не менее 17 дБ.

В работе предложены методы по обеспечению стойкости сплавных WDM-мультиплексоров к жестким условиям эксплуатации.

Литература

1. *Иванов В.И., Применение технологии WDM в современных сетях передачи информации. 1, 4-6 (2010)*
2. *Елизаров С.Г. и др., Характеристики сплавных WDM-мультиплексоров в условиях механических воздействий на резонансных частотах // Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC-2017 3, 630-633 (2017)*
3. *Наний О.В., Основы технологии спектрального мультиплексирования каналов передачи (WDM) // Lightwave Russian Edition 2, 47-52 (2004)*

ПОВЫШЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ АКТИВНОГО КВАРЦЕВОГО ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА

Цибиногина М.К.[1,2*], Шарипов Я. М.[1,3], Осипчук М.К.[1,2], Джанджгава Н.Т.[1,2], Пищальников К.Д.[1], Гагарина К.И.[2], Перетрухина И.А.[1]

[1]Пермская научно-производственная приборостроительная компания, г. Пермь
[2]Пермский научно-исследовательский политехнический университет, г. Пермь
[3]Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь
[*]E-mail: marina.tsibinogina@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16091

Как известно, на уровень "серых" оптических потерь в активных кварцевых волоконных световодах (ВС) в значительной степени влияет кристаллизация материала сердцевины [1], в то же время явление кристаллизации в поверхностных слоях ВС приводит и к снижению их прочности [2]. Повышение температуры вытяжки волокна может благоприятно сказаться в части ослабления указанных процессов кристаллизации.

Мощность и ширина спектра излучения усилителя волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) определяется степенью однородности распределения ионов редкоземельных элементов (эрбия) в материале сердцевины ВС. Для снижения уровня кластеризации ионов эрбия в матрицу стекла сердцевины вводят оксид алюминия, который обладает самым низким уровнем затухания [2], позволяя тем самым повышать температуру вытяжки [3]. Увеличение температуры вытягивания ВС также целесообразно для повышения их механической изгибоустойчивости [4,5], а дополнительное легирование сердцевины GeO_2 увеличит оптическую изгибоустойчивость ВС в многовитковом контуре усилителя ВОГ.

Цель настоящей работы заключается в снижении уровня "серых" потерь и увеличении прочности активных ВС, применяемых в широкополосном источнике излучения ВОГ - усилителе спонтанной эмиссии.

Заготовки для вытягивания активных ВС изготавливали MCVD-хелатной технологией [6] на основе труб из кварцевого стекла марки Suprasil F-300. Сердцевина легирована 6 моль % Al_2O_3, 0,1 моль % Er_2O_3, 4 моль % GeO_2. Вытягивание световодов производили с одновременным нанесением двухслойного акрилатного покрытия при температуре нагревателя печи вытяжной установки 1900 и 2000 °С.

Оптические потери измеряли на анализаторе оптического спектра AQ6370D фирмы Yokogawa с точностью ±0,2 дБ/км. Прочность световодов определяли методом разрыва с помощью разрывной машины AVE2 Extensometer фирмы Instron.

При увеличении температуры вытяжки волокна "серые" оптические потери ВС снизились с 6 до 5 дБ/км на длине волны 1200 нм, и исчезла низкопрочная ветвь статистики разрушения волокна (рис. 1).

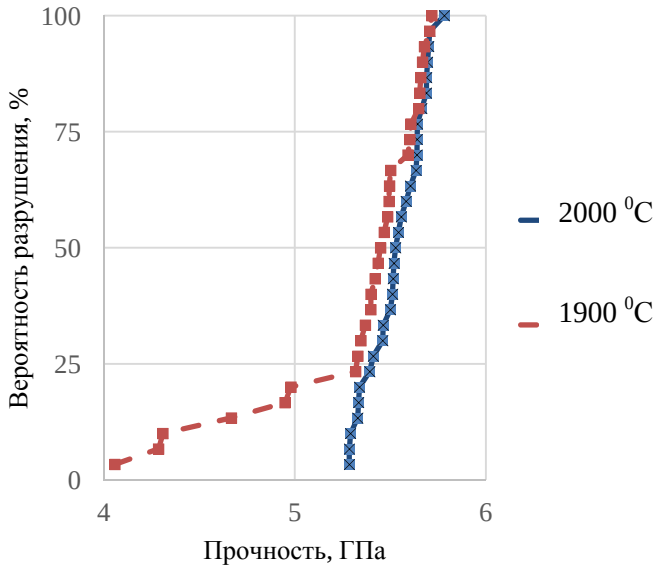


Рис. 1. Статистика прочности ВС, полученных при температурах вытяжки 1900 °С и 2000 °С

Таким образом**,** результаты исследований свидетельствуют о благотворном влиянии повышения температуры вытягивания активных эрбием ВС как на их оптические, так и на механические свойства.

Активный ВС, полученный при температуре 2000 ^{0}С, отличающийся низкими потерями и стабильной механической прочностью, испытан в составе широкополосного источника ВОГ в диапазоне температур от минус 50 до +60 ^{0}С. Ширина оптического спектра его излучения соответствовала требуемому значению - не менее 7,3 нм по уровню 0,5 выходной мощности во всем температурном диапазоне.

Авторы выражают признательность инженеру - технологу MCVD процесса М. Э. Алимбаеву и инженеру-технологу вытяжки световодов Димаковой Т. В. за проделанную работу.

Литература

1. *Kirchhof J, et al, Proc. SPIE, 5723 (2005)*
2. *БурковВ. Д., ИвановГ.А.,Учеб.пособие Физико-технологические основы волоконно-оптической техники, М. ГОУ ВПО МГУЛ,126-132 (2007)*
3. *Чампель С. и др., Фотон-экспресс-Тезисы докладов ВКВО 2015, 126,131-132(2015)*
4. *Ероньян М. А. и др., Физика и химия стекла, 32, 855-862(2006)*
5. *Цибиногина М. К. и др., Сборник трудов VII Международной конференции "Прикладная оптика-2006", 43-45 (2006)*
6. *Lenardich B., Informacije MIDEM 40, 300-306 (2010)*

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СВЕТОВОДОВ ТИПА «ПАНДА» С СЕРДЦЕВИНАМИ ИЗ ЧИСТОГО И ЛЕГИРОВАННОГО АЗОТОМ КВАРЦЕВЫХ СТЕКОЛ

Томашук А.Л.[1]*, Кашайкин П.Ф[1], Семенов С.Л.[1].Филиппов А.В.[2,1], Бычкова Е.А[2,1], ГалановаС.В.[2,1], Азанова И.С.[3,1], Вохмянина О.Л.[3,1], Поспелова Е.А.[3], Шаронова Ю.О.[3,1], Димакова Т.В.[3], Волошин В.В.[4], Воробьев И.Л.[4], Колосовский А.О.[4], Чаморовский Ю.К.[4], Голант К.М.[5]

[1]*НЦВО РАН, г. Москва*
[2] *РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров*
[3] *ПАО ПНППК, г. Пермь*
[4] *ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Московской области*
[5]*ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва*
[*] *E-mail:* tomashuk@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16092

Двулучепреломляющие световоды типа «Панда» (далее просто «панда») весьма актуальны в силу их широкого применения в оптических гироскопах. В «панде» исходное состояние поляризации света при распространении сохраняется из-за наличия двух напрягающих сетку стекла световода боросиликатных стержней, надлежащим образом размещенных в стекле оболочки световода, параллельно сердцевине. Фотография торца «панды» с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла дана на рис. 1. В ряде применений (в первую очередь, на космических аппаратах) гироскоп и «панда» будут подвергаться действию ионизирующего излучения (ИИ), которое создает точечные дефекты (радиационные центры окраски, РЦО) в сетке стекла «панды». В ряде применений гироскоп может подвергнуться и импульсному воздействию ИИ, которое тоже создает РЦО.

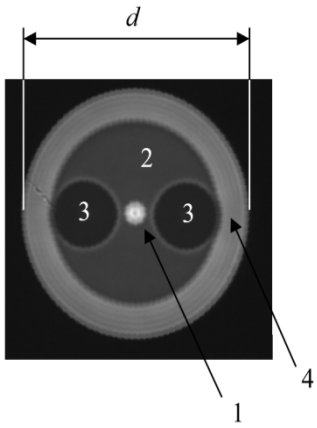


Рис. 1: Изображение торца «панды», полученное на электронном микроскопе.
1 – сердцевина из нелегированного кварцевого стекла,
2 – фторсиликатная светоотражающая оболочка,
3 – напрягающие боросиликатные стержни,
4 – внешняя оболочка из нелегированного кварцевого стекла,
d=80 мкм

РЦО, в свою очередь, поглощают световой сигнал, распространяющийся по «панде», возникает эффект радиационно наведенного поглощения света (РНП), который может снизить точность гироскопа, либо вообще вывести его из строя.

Таким образом, для применений в радиационных полях требуются радиационно стойкие гироскопы и их конструкционные элементы (в т.ч. «панды»). Последние должны обеспечивать минимальное РНП на рабочей длине волны λ=1,55 мкм.

Известны два типа радиационно стойких «панд»: 1) сердцевина из нелегированного кварцевого стекла и светоотражающая оболочка из фторсиликатного стекла (рис. 1) [1] (называемые далее «нелегированные панды») и 2) сердцевина из кварцевого стекла, легированного азотом, и светоотражающей оболочкой из нелегированного кварцевого стекла [2] (называемые далее «азотные панды»). В отличие от рис. 1, боросиликатные стержни *3* в азотной «панде» размещены в нелегированном кварцевом стекле, а сердцевина *1* выполнена из кварцевого стекла, легированного азотом. Азотная «панда» сравнительно проще технологически, т.к. изготовление преформы не требует длительного осаждения фторсиликатной оболочки, однако требует применения плазмохимии. С другой стороны, как показали несколько ранних сравнительных исследований, изотропные световоды с сердцевиной из кварцевого стекла, легированного азотом, имели несколько большее РНП при непрерывном γ-облучении и после него, чем световоды с нелегированной сердцевиной [3, 4, 5, 6].

Азотные изотропные световоды проявили меньшее РНП после импульсного воздействия рентгеновского излучения, чем нелегированные изотропные световоды [6].

Целью данной работы было сравнение радиационной стойкости (в первую очередь, на λ=1,55 мкм) нелегированной «панды» (изготовленной в ПНППК) и азотной «панды», любезно предоставленной для данного исследования ФИРЭ и ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова.

На рис. 2 дано предварительное сравнение «панд» включая стандартную германосиликатную.

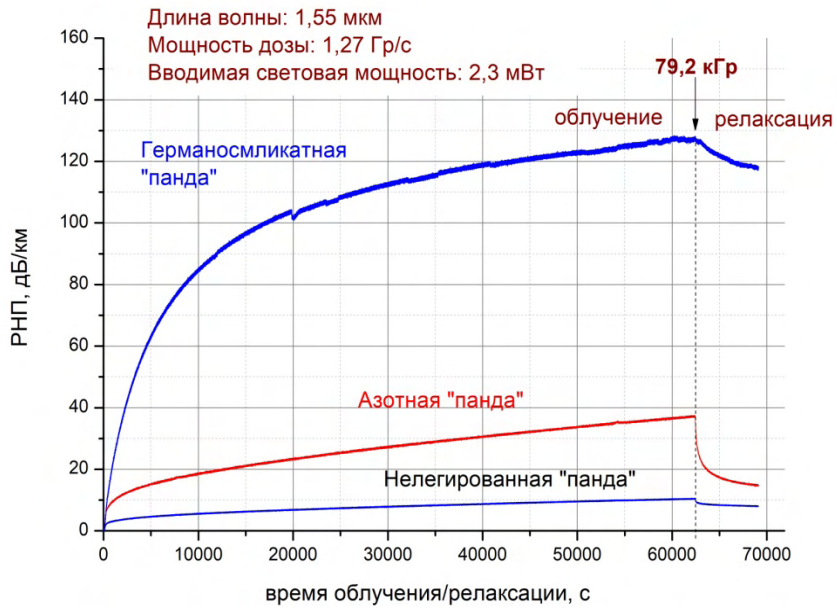


Рис. 2 Эволюция во времени РНП на λ=1,55 мкм в процессе γ-облучения при 1,27 Гр/с и релаксации после окончания облучения (всё при комнатной температуре). Световая мощность в каждом из образцов составляла 2,3 мВт. Облучение проводилось до 79,2 Гр.

Наибольшее РНП в процессе облучения в германосиликатной «панде», которая, очевидно, не подходит для радиационных применений. В разы меньше РНП у азотной «панды» и примерно еще в 2 раза меньше у нелегированной «панды». Следует отметить заметно более быстрый процесс релаксации РНП у азотной «панды», чем у нелегированной, что выгодно для космических применений, проходящих при крайне малых мощностях дозы (~10^{-6} Гр/с).

На конференции будут представлены следующие исследования: сравнение РНП «панд» на λ=1,55 мкм при наборе дозы 1 кГр, постулируемой для космической миссии, и релаксации после завершения облучения. Эксперименты будут отдельно проведены при комнатной температуре и –60 °С, возможной температуре гироскопа в космосе. При комнатной температуре спустя недели после завершения облучения РПН будет измеряться по методу OTDR. По полученному массиву точек будет сделана экстраполяция РНП на время 10-15 лет в космосе в рамках модели «кинетики n-ого порядка», предложенной в Naval Research Laboratory Фрибелем [7] и недавно испытанной нами для изотропных световодов [8]. Будут исследованы спектры РНП в обоих «пандах» с целью определения РЦО, ограничивающих радиационную стойкостью. Будет проведено сравнение РНП на субсекундных временах после импульсного воздействия тормозного излучения ускорителя электронов при комнатной температуре и –60 °С. Будет сделана оценка подавления РЦО за счет фотообесцвечивания в обоих типах «панд».

Работа поддержана Российским научным фондом (Проект № 18-12-00436).

Литература

1. *Kashaykin P.F. et al,. J, Non-Cryst. Solids 508, 26-32 (2019)*
2. *Chamorovskii Yu.K. et al., Proc SPIE 7503, 75036T1- 75036T4 (2009)*
3. *Dianov E.M. et al., Electron. Lett. 31, 1490-1491 (2000)*
4. *Tomashuk A.L. et al., IEEE Trans. Nucl Sci, 45, 1566-1569 (1998)*
5. *Tomashuk A.L. and Golant K.M., Proc SPIE 4083, 188-201 (2000)*
6. *Girard S., et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B 215, 187-195 (2004)*
7. *Friebele E.J. et al., Proc SPIE 1791, 177-188 (1992)*
8. *Кашайкин П.Ф. и др., ЖТФ 89, 752-758 (2019)*

ПРОИЗВОДСТВО И ИСПЫТАНИЕ СВЕТОВОДОВ ТИПА КВАРЦ/КВАРЦ, УСТОЙЧИВЫХ К УФ И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ

Грищенко А.Б., Сахаров Д.А.

Фирма Керамоптек, г. Ливаны, Латвия
E-mail: Andrejs.Griscenko@ceramoptec.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16093

Быстрое развитие мощных лазеров, работающих в видимом и УФ областях спектра, интенсивное исследование термоядерного синтеза и развитие космонавтики ставит многоплановые задачи по созданию световодов, обладающих достаточной прозрачностью в заданной области спектра, высокой лучевой прочностью, устойчивостью к УФ, гамма и нейтронному облучению. Наиболее подходящими для таких задач являются волокна с сердцевиной из синтетического кварца и легированной фтором отражающей оболочки – световоды кварц/кварц.

Отличительной чертой компании Керамоптек является возможность осуществлять все стадии производства световодов кварц/кварц, включая наплавление отражающих оболочек заготовок [1, 2], вытяжку волокон и дополнительную их обработку. В данной работе изучено влияние состава исходного материала стержня, и технологических операций производства световода на его стойкость к действию УФ облучения. Дополнительная операция обработки проводилась, как правило, для световодов, покрытых герметичным слоем углерода и сводилась к его выдерживанию в водороде при температуре 250ºС и давлении 40 бар, длительность выдерживания составляла около недели. Наличие водорода в световодах разного типа контролировалось по максимуму поглощения на 1,08 μм, который хорошо заметен в кварце как с высоким, так и с низким содержанием гидроксильных групп. См. Рис. 1. Концентрация водорода в обработанных световодах оценена как $5x10^{18}$ молекул/см^3 [3]. Отмечено, что контрольный световод насыщенный водородом, покрытый герметичным слоем углерода и хранящийся при комнатной температуре в течение уже более четырех лет сохраняет стабильную концентрацию водорода. Методика испытаний световодов включала изучение спектров наведенных потерь образцов непосредственно при облучении, а также после прекращения облучения эксимерным лазером при 193 нм. Также будут приведены результаты, полученные другими организациями по изучению оптических волокон Керамоптек, под воздействием гамма облучения [4].

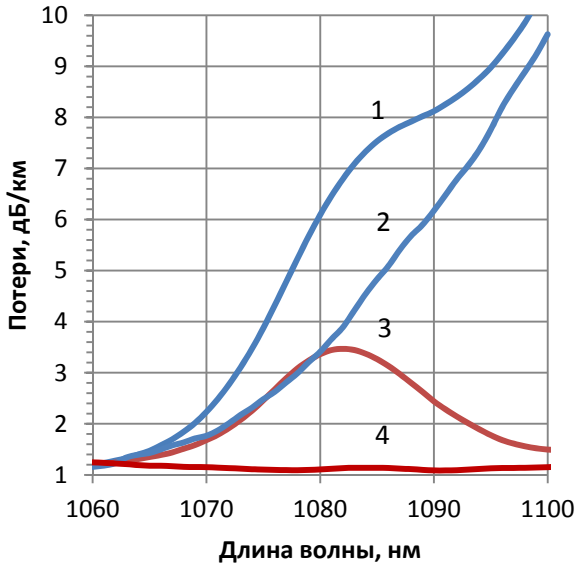


Рис. 1. Пик поглощения водорода в световоде 200/220/245P. 1 - OH=1000 ppm, с водородом; 2 - OH=1000 ppm, без водорода; 3- OH=0,5 ppm, с водородом; 4 - OH=0,5 ppm, без водорода

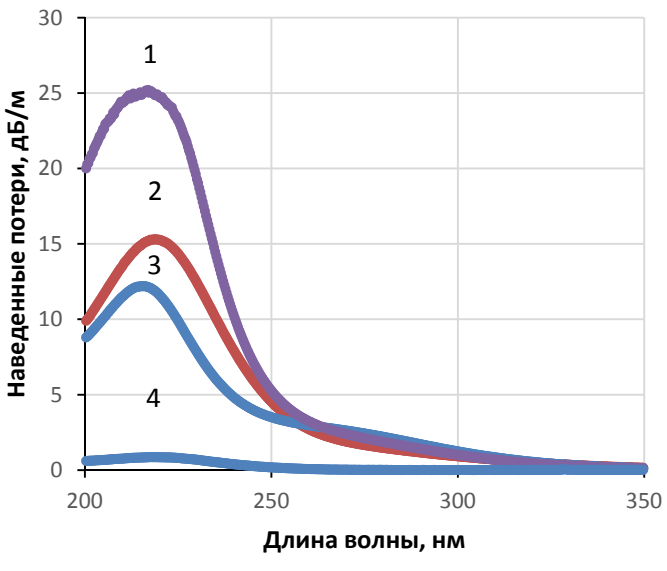


Рис. 2. Наведенные потери для 200/220/245P после облучения ArF лазером (193 нм), доза 10^3 Дж/см^2. Длина образца=1 m. Содержание OH групп в материале сердцевины волокна, ppm: 1-700; 2-0,5; 3-1000

Сравнительное изучение прозрачности световодов, не насыщенных водородом, показало, что иметь достаточную начальную прозрачность в УФ и быть стойкими к воздействию облучения могут как сорта кварца с высоким, так и с низким содержанием ОН групп, см. Рис. 1; кривые 1, 2, 3. Гораздо большее значение имеет концентрация различного рода дефектов структуры кварца поглощающих, в основном, в регионе 200-300 нм, а также Si-H групп, которые не проявляются в исследуемой области спектра, но являются прекурсором для дефекта с пиком поглощения на 214 нм. Метод наплавления отражающего слоя также оказывает значительное влияние на концентрацию дефектов и Si-H групп в сердцевине волокна [5]. Но самый значительный эффект на величину наведенных потерь оказывает насыщение световодов водородом, см. Рис 2; кривая 4.

В УФ и видимой областях спектра наиболее доступными и стабильными к воздействию внешнего облучения себя зарекомендовали световоды на основе кварца с содержанием OH=1000 ppm и насыщенные водородом, для ИК области спектра, наиболее перспективен не содержащий хлора кварц с концентрацией ОН ниже 1 ppm.

Подбор исходного синтетического кварца, технологии наплавления легированных кварцевых слоев, а также обработка световодов водородом позволяют производить оптически стойкие волокна, годные для применения в различных областях спектра.

Литература

1. *Gouskov, E. et al., US Patent 6253580*
2. *Neuberger W. et al., US Patent 6138478*
3. *Noguchi K., et al, J. Lightwave Technology 3, 236-243 (1985)*
4. *Vukolov K.Yu et al, Fusion Engineering and Design, article in press, available online, January 25 (2019)*
5. *Grishchenko A.B., Quantum Electronics 47, 1115 – 1119 (2017)*

РАДИАЦИОННО СТОЙКИЕ НЕЛЕГИРОВАННЫЕ СВЕТОВОДЫ ТИПА «ПАНДА» В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕПРЕРЫВНОГО И ИМПУЛЬСНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Азанова И.С.[1*], Шаронова Ю.О.[1], Поспелова Е.А.[1], Вохмянина О.Л.[1], Мальцев И.А.[1], Димакова Т.В.[1], Кашайкин П.Ф.[2], Филиппов А.В.[3], Таценко О.М.[3], Томашук А.Л.[2]

[1] ПАО "Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь
[2] Научный центр волоконной оптики Российской академии наук, г. Москва
[3] Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики («РФЯЦ-ВНИИЭФ»), г. Саров
[*] E-mail: azanova@ppk.perm.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16094

Для применения в волоконно-оптических гироскопах и других интерферометрических датчиках физических величин в условиях космического пространства, а также в условиях импульсного ионизирующего излучения (ИИ) в ПАО «ПНППК» разработаны световоды с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и фторсиликатной оболочкой, сохраняющие поляризацию излучения, типа «Панда» (далее Панда) с величиной двулучепреломления более $5{,}5\cdot10^{-4}$, и освоена технология их серийного производства [1].

Неожиданно, отрицательным свойством первого поколения наших нелегированных Панд явилось возникновение под действием ИИ полосы радиационно наведенного поглощения (РНП) света с центром на ~1 эВ [1]. Так как эта полоса покрывала рабочую длину волны λ=1,55 мкм, она, с одной стороны, отрицательно влияла на прозрачность Панды, а с другой, подавлялась за счет фотообесцвечивания при высокой мощности зондирующего сигнала 5-10 мВт (рис.1 а, кривые 1,1'). Но при этом практически исключалось использование Панды при малой оптической мощности в сочетании с большой мощностью дозы ИИ, в том числе при импульсном воздействии ИИ при малых и средних временах после импульса (менее 1 мс).

Оптимизация технологии изготовления световодов, направленная на уменьшение полосы поглощения на 1 эВ, позволила полностью подавить эту полосу и соответственно снизить РНП при непрерывном и импульсном воздействии ИИ без потери высокого двулучепреломления. РНП при воздействии непрерывного гамма-излучения от источника ^{60}Co с мощностью дозы 1,3 Гр/с при комнатной температуре практически повторяет зависимость РНП для изотропного световода того же химического состава, при этом закономерным эффектом явилась слабая зависимость РНП от входящей оптической мощности (рис. 1 а, кривые 2, 2'). Технология производства модифицированных световодов типа «Панда» отличается высокой воспроизводимостью: разброс РНП световодов различных вытяжек отличается менее чем на 1 дБ/км при дозе 1 кГр и, что немаловажно, при микроватной мощности зондирующего сигнала (рис. 1 б).

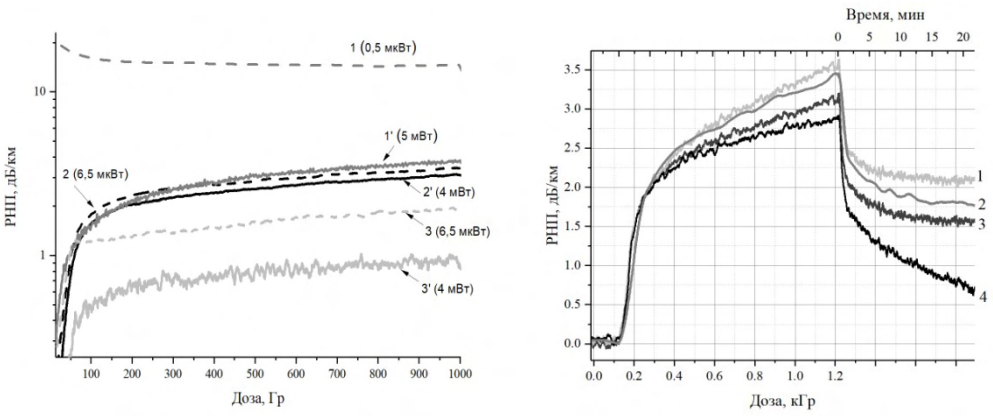


Рис. 1. Зависимость РНП в процессе облучения до дозы 1 кГр, мощность 1,31 Гр/с при комнатной температуре и релаксации, а)- 1 и 1'- образцы неоптимизированной Панды, двулучепреломление $6{,}3\cdot10^{-4}$, 2 и 2' – оптимизированной, двулучепреломление $6{,}4\cdot10^{-4}$,3 и 3'- изотропный световод того же химического

состава; в скобках указана входящая оптическая мощность б)- 1, 2, 3, 4 - различные образцы оптимизированной Панды при одинаковой входящей оптической мощности 5 мкВт

Для условий импульсного облучения тормозным излучением линейного ускорителя электронов со средней энергией тормозных фотонов 5 МэВ и длительностью импульса ~20 нс [1], [2] оптимизация технологии позволила существенно снизить РНП световодов для времен менее 1 мкс – 1 мс после импульса. На рис. 2 а зависимости РНП от времени после импульса оптимизированной Панды представлены первым образцом и вторым образцом, неоптимизированная панда – это третий и четвертый и пятый образцы, для сравнения также приведен оптимизированный по стойкости к импульсному ИИ световод с сердцевиной из нелегированного SiO_2 без напрягающих стержней (шестой образец), разработанный в ИХВВ и НЦВО РАН [2]. Для времен более 1 с после импульса РНП практически одинаковы для всех образцов - остаточные РНП для длины волны 1,55 мкм после импульса дозой до 30 Гр менее 0,1 дБ/км.

Интересно, что в отличие от условий непрерывного ИИ, фотообесцвечивание в процессе релаксации РНП для оптимизированной Панды заметно до 1 с (рис. 2 б), пока не подавлены все центры, поглощающие на 1 эВ. При дальнейшем увеличении времени РНП определяется уже другими центрами – а именно деформационными самозахваченными дырками [3], [4]. Фотообесцвечивание также заметно на рис 2 б. Увеличение входящей оптической мощности сказалось в первую очередь на увеличении скорости релаксации центров окраски на ~1 эВ, а на поглощение самозахваченных дырок вблизи 1 с не сказалось, так как их полосы поглощения достигают максимума в видимом диапазоне [3].

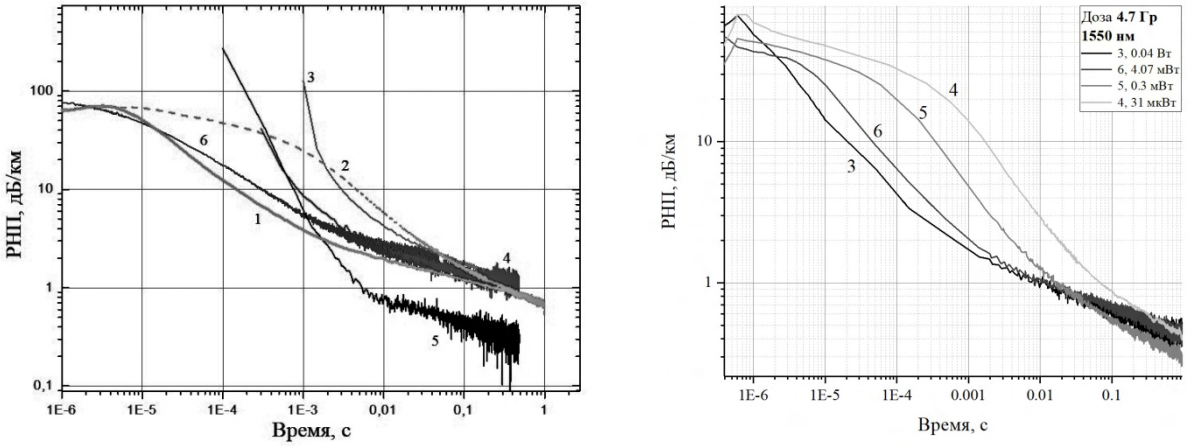


Рис. 2. Зависимость РНП от времени после воздействия импульсного ИИ а)-оптимизированная панда, доза в импульсе 22 Гр (кривые 1 (оптическая мощность 8 мВт), 2 (10 мкВт), неоптимизированная панда (кривые 3,4,5), доза в импульсе 20 Гр, оптическая мощность 2 мВт, изотропный световод ИХВВ РАН (кривая 6), доза 16 Гр, оптическая мощность 8 мВт; б)- образцы оптимизированной панды, доза в импульсе 4,7 Гр, входящая оптическая мощность: 1 – 40 мВт, 2 – 4 мВт, 3 – 300 мкВт, 4 – 31 мкВт. В опыте участвовали образцы соседних участков световода одной вытяжки, смотанные в одну бухту и облученные в одном опыте

Таким образом, модификация технологии световодов типа «Панда» с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла позволила радикально повысить их радиационную стойкость за счет полного устранения полосы РНП на ~1 эВ. Это позволяет на порядки снизить мощность зондирующего света в условиях непрерывного облучения, а в условиях импульсного воздействия возможно обеспечение прозрачности Панды на малых временах после импульса 1 мкс – 1 мс.

Работа была поддержана Российским Научным Фондом (Проект № 18-12-00436).

Авторы благодарят М.Ю. Салганского и А.Н. Гурьянова за предоставление образцов световодов для сравнения, А.В. Грунина и В.Д. Селемира, Н.К. Миронова за содействие при проведении опытов на ускорителе электронов.

Литература

1. *P.F. Kashaykin, A.L. Tomashuk, I.S. Azanova et al., J. Non-Crystalline Solids, 508, 26-32 (2019)*
2. *A. L. Tomashuk, A. V. Filippov, A. N. Moiseenko et al., J. Lightwave Technology, 35, 2143-2149 (2017)*
3. *S. Girard, D.L. Griscom, J. Baggio et al., J Non-Cryst. Solids 352, 2637-2642 (2006)*
4. *A.L. Tomashuk, A.V. Filippov, P.F. Kashaykin et al., J. Lightwave Technology, 37*

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ В МЕДНОМ ПОКРЫТИИ

Косолапов А.Ф.[*], **Семенов С.Л.**

Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[*] *E-mail:* kaf@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16095

Стойкость оптических волокон к высоким температурам определяется в первую очередь свойствами защитного покрытия, которое предохраняет поверхность стеклянного волокна от механических повреждений и прямых контактов с окружающей средой. Также, в настоящее время, весьма востребованными являются волоконные световоды, стойкие к воздействию водорода. Так, например, в нефтегазовой промышленности широко используются волоконно-оптические устройства, эксплуатируемые в водородосодержащей среде при высоких температурах. На сегодняшний день разработаны и успешно применяются различные виды полимерных покрытий, позволяющие использовать волоконные световоды до температуры 300°С [1]. Для световодов эксплуатируемых при более высоких температурах используются металлические покрытия. Наибольшее распространение получили алюминиевое и медное покрытия, причем оба этих металла можно наносить как непосредственно на стеклянную поверхность световода, так и поверх подслоя пироуглерода. Производители металлопокрытых световодов позиционируют световоды в алюминиевом покрытии как работоспособные до температур 450°С, в то время как, максимальная эксплуатационная температура для меднопокрытых световодов указывается 700°С. При этом нет достоверной открытой информации о скорости механической и оптической деградации волокна для температур свыше 450°С, лишь указывается, что оно может выдерживать до 700°С, но без указания времени и условий выдержки. В данной работе проведено исследование оптических и механических свойств волоконных световодов в медном покрытии при воздействии температуры 700°С в атмосфере водорода. Исследовались одномодовые и многомодовые световоды с сердцевиной из чистого кварцевого стекла и отражающей оболочкой из кварцевого стекла легированного фтором. Нанесение медного покрытия на образцы волоконных световодов производилось в процессе вытяжки световодов методом намораживания, который заключается в протягивании относительно холодного волокна через небольшой объем (каплю) расплавленного металла [2].

Для проведения термических испытаний образцы волоконных светводов помещались в герметичную камеру из нержавеющей стали, концы волокон выводились наружу через специальные герметичные выводы. Далее камера помещалась в печь и нагревалась до температуры 700°С, после этого камера заполнялась водородом под давлением 1.5 атм. В процессе термических испытаний записывались спектры пропускания исследуемых световодов, а также спектры собственного термического излучения см. рис. 1.

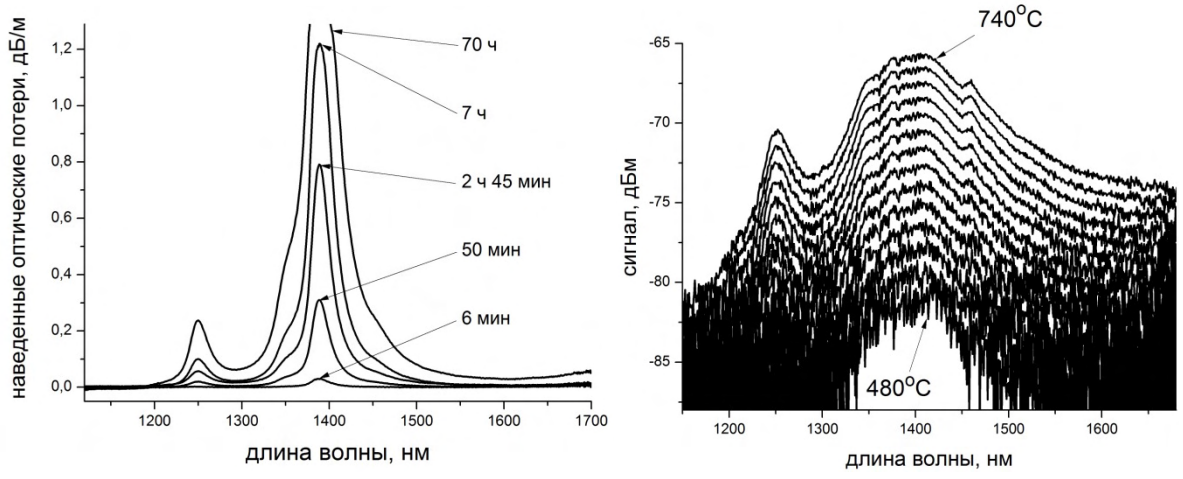


Рис. 1. а) Наведенные оптические потери при различных временах выдержки световода в водородной атмосфере при температуре 700°С. б) Спектры термического излучения световода при различных температурах, шаг изменения температуры – 20°С

Как видно из рисунка 1 а) в процессе выдержки волоконного световода при температуре 700°С в атмосфере водорода наблюдается рост оптических потерь в полосах поглощения ОН групп. Причем появление полосы поглощения на длине волны 1380нм происходит практически мгновенно после напуска водорода в камеру, т.е. металлическое покрытие практически не препятствует проникновению водорода в световод при температуре 700°С. Оптические потери в телекоммуникационном диапазоне длин волн (1530 – 1565 нм) выросли не более чем на 50 дБ/км, что является приемлемым уровнем при использовании отрезков волокна длиной несколько метров. Также следует отметить, что при использовании волоконных световодах при температурах свыше 500°С следует учитывать собственное свечение стекла см. рис. 2 б).

После окончания термических испытаний проводилось измерение прочности исследуемых образцов методом двухточечного изгиба см. рис. 2.

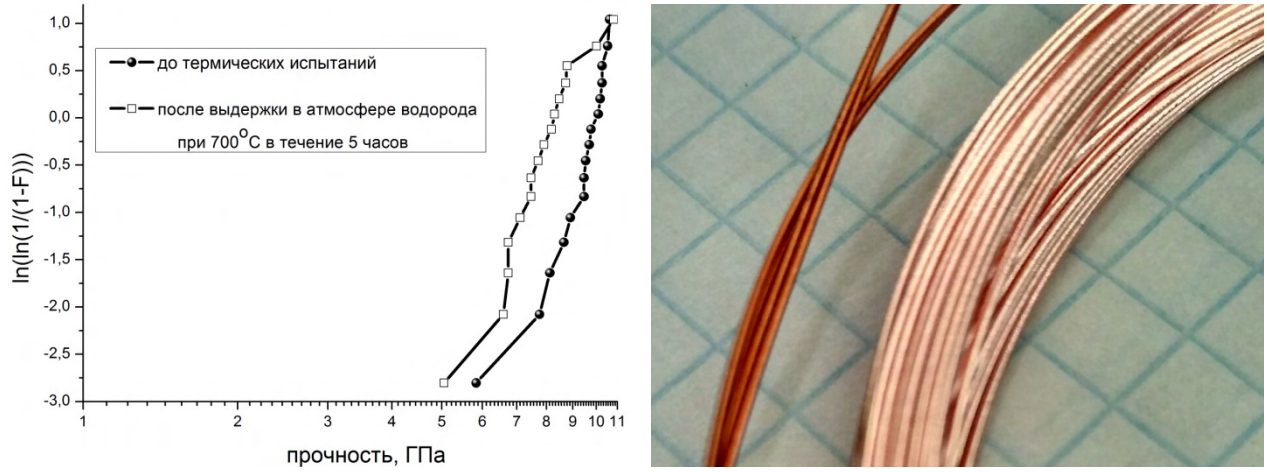


Рис. 2. а) Графики Вейбулла прочности на изгиб волоконных световодов до и после тестирования в атмосфере водорода при температуре 700°С в течение 5 часов. б) Внешний вид волоконных световодов в медном покрытии: слева – световод не подвергавшийся термическим испытаниям, справа – световод после тестирования в атмосфере водорода при температуре 700°С в течении 70 часов

После выдержки меднопокрытых волоконных световодов при температуре 700°С наблюдается снижение прочности на 1-2 ГПа в течение 5 часов и на 3-4 ГПа в течение трех суток. Также наблюдается восстановление оксидов на поверхности меди под действием водорода см. рис. 2 б). Еще одним практически важным эффектом является слипание витков световод друг с другом вследствие диффузии меди, что необходимо учитывать при эксплуатации металлопокрытых световодов при высоких температурах.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили приемлемые эксплуатационные характеристики световодов в медном покрытии.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проекта RFMEFI60417X0183.

Литература

1. *Biswas D.R., Optical Engineering 1991 30(6), 772*
2. *Pinnow D.A, et al, Appl. Phys. Lett., 1979, v. 34, № 1, pp.17-19*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ПОЛИИМИДНЫМ ЗАЩИТНО-УПРОЧНЯЮЩИМ ПОКРЫТИЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Булатов М.И., **Саранова И.Д.**, **Смирнова А.Н.**

Пермская научно-производственная приборостроительная компания, г. Пермь
** E-mail: BylatovMI@gmail.com*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16096

Для применения оптических волокон при повышенных температурах до 300 °С и агрессивных условиях внешней среды в нефтегазовой промышленности, авиакосмической технике, медицине и энергетике требуются специальные защитные полимерные покрытия (ЗУП) [1]. Полиимидное ЗУП отличается повышенной термостойкостью, высокими механическими характеристикам, устойчивостью к органическим растворителям и маслам.

В настоящее время существует дефицит информации о поведении оптических потерь оптических волокон (ОВ) с полиимидным ЗУП при повышенных температурах.

На ПАО «ПНППК освоена технология серийного производства ОВ с полиимидным ЗУП. Для определения критической повышенной температуры, при которой начинается деструкция полиимидного покрытия, проводился термогравиметрический анализ (ТГА) на оборудовании «STA 449C Jupiter» фирмы «NETZSCH» (Германия) в инертной атмосфере (Рис.1).

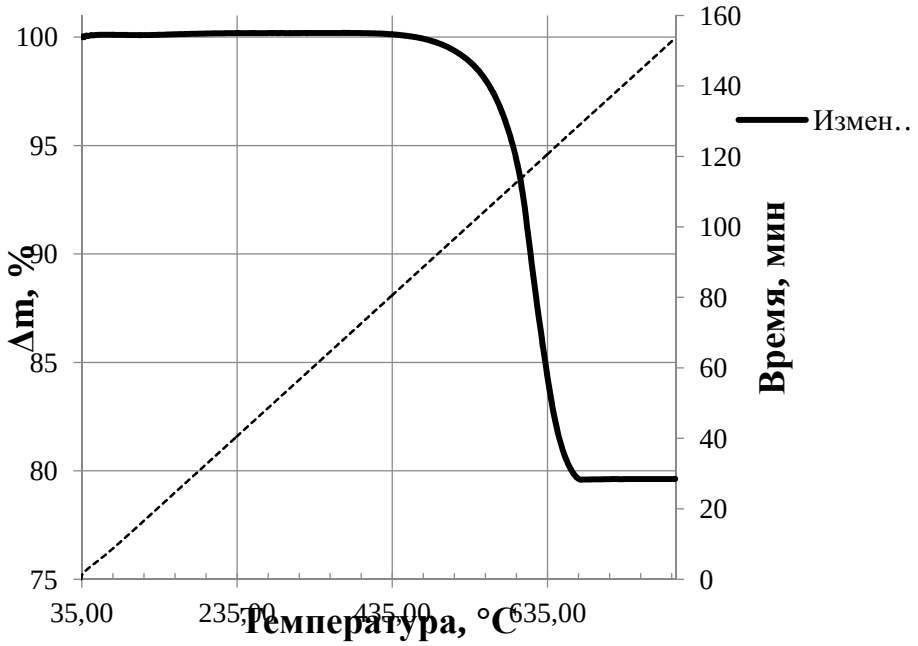


Рис. 1. ТГА кривая ОВ в полиимидном ЗУП

На графике видно, что масса образца не изменяется вплоть до 400 °С., следовательно, ОВ с полиимидным ЗУП способно эксплуатироваться без разрушения покрытия до температур 400 °С в инертной атмосфере.

Для определения зависимости оптических потерь при повышенных температурах от времени проведены испытания образцов одномодового германосиликатного ОВ с диаметром кварцевой оболочки (125 ± 1) мкм и полиимидном ЗУП с общим диаметром (155 ± 5) мкм. ОВ длиной 500 м исследовалось в виде свободной намотки диаметром 150 мм.

Во время температурных испытаний ОВ помещалось в термостат, концы ОВ выводились наружу для регистрации проходящего оптического сигнала во время температурных испытаний (Рис. 2). Цикл испытаний: нагрев – выдержка – охлаждение, проводился дважды. Сигнал оптической мощности регистрировался на длине волны 1500 нм измерителем мощности EXFO LTB-1.

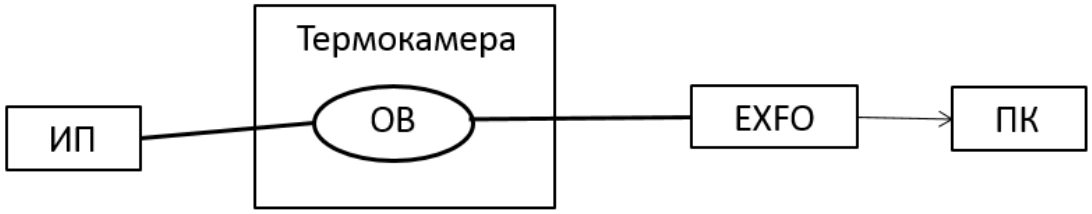


Рис.2. Схема испытаний. ИП – источник питания, ПК – персональный компьютер

На рис.3 представлен график зависимости оптических потерь, пересчитанных из значений оптической мощности, одномодового ОВ и температуры от времени.

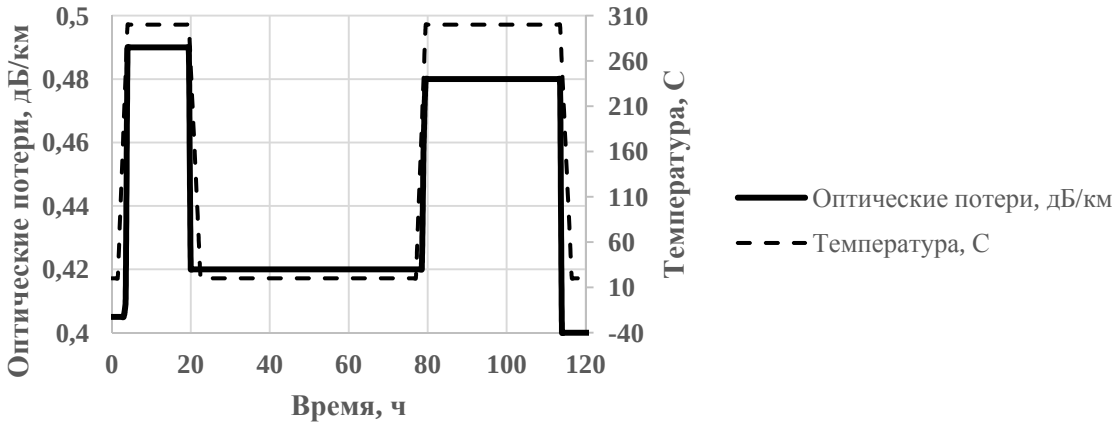


Рис. 3. Зависимость оптических потерь и температуры от времени

Оптические потери при нагреве до 300 °С возрастают на 0,1 дБ/км, остаются постоянными при температурной выдержке и возвращаются к изначальным значениям при охлаждении.

При изменении температуры происходит изменение механических свойств полиимидного ЗУП. Вероятно, при нагреве это вызвало дополнительные микроизгибы и скручивание ОВ, которые привели к увеличению оптических потерь.

В результате проведенного исследования показано, что одномодовое германосиликатное ОВ в полиимидном ЗУП производства ПАО «ПНППК» способно выдерживать температуры до 300 С в течение как минимум 60 ч без необратимой деградации свойств ОВ.

Литература

1. *Lars Hoffmann., et al., Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., 13, p. 363-378 (2007)*

ИЗМЕРЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ, ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Чернышева М.А.
Leibniz Institute of Photonic Technologies, Jena, Germany
[*] *E-mail:* maria.chernysheva@eibniz-ipht.de

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16097

Открытие лазеров с пассивной синхронизацией мод, способных генерировать импульсы ультракороткой длительности, привело к революционным изменениям в таких областях как обработка материалов, локация, медицина. Одновременно возникла необходимость характеризации режимов генерации, а именно длительности и профиля импульса.

Использование фотодиодов и осциллографов для детектирования импульсов по сей день остается самым предпочтительным методом, так как позволяет напрямую наблюдать за динамикой импульсов. Благодаря недавнему прогрессу в электронике, современные цифровые запоминающие осциллографы получили возможность сохранять достаточно длинные последовательности явлений (в несколько миллисекунд и более). Это позволяет далее при обработке данных перейти от привычной одномерной последовательности к двумерной картине пространственно-временной динамики интенсивности, а следовательно, наблюдать эволюцию записанных явлений в течение тысяч времен обхода резонатора [1]. Однако, разрешение самых современных систем ограничено в ~100 ГГц. К сожалению, такое разрешение все еще недостаточно для точного восстановления фемтосекундных и тем более аттосекундных импульсов.

Исторически, из-за отсутствия прямых способов измерений внимание ученых обратилось в сторону использования нелинейных эффектов. Так, использование методов автокорреляции интенсивности или интерференционной автокорреляции является самым распространенным и точным способом измерения длительности импульсов вплоть до 10 фс. Данный способ позволяет восстановить профиль импульса с помощью достаточного большого усреднения, а следовательно, не позволяет наблюдать за эволюцией импульса во реальном времени. В течение нескольких последних декад данный способ был усовершенствован добавлением измерении фазы и появились такие техники как FROG – частотно-разрешённое оптическое стробирование, или SPIDER – спектрально-фазовая интерференция для прямой реконструкции электрического поля.

Наиболее недавнее направление в исследовании ультракоротких импульсов нацелено на реконструкции временного профиля, фазы и спектра в реальном времени. Данные методы задействуют как прямое детектирование с помощью современных фотодиодов и осциллографов, так и нелинейные и дисперсионные эффекты. Наиболее привлекательными оказались как так-называемый метод «временной-линзы» [2] и дисперсионного преобразования Фурье [3]. Последний метод использует аналогию между дифракцией Фраунгофера в дальнем поле и распространением импульса в среде с большой дисперсией. Суть данного метода состоит в том, что при распространении импульса в оптическом волокне с высокой дисперсией и пренебрежительно малой нелинейностью или отражения от решетки с достаточно большим чирпом, временная форма импульса преобразуется в спектральную и может быть измерена непосредственно с помощью фотодетектора и осциллографа. Таким образом возможно записать карту изменения спектральной интенсивности в течение тысяч времен обхода резонатора. Дальнейшее применение быстрого Фурье преобразования позволяет снова перейти от спектрального профиля к временному – автокорреляционной функции, но с более лучшим разрешением чем разрешение измерительной установки, и достичь таким образом разрешения в 100 фс с шириной полосы10 нм в реальном времени.

В данном докладе будет представлено экспериментальное исследование динамики ультракоротких импульсов в процессе их формирования и становление стабильного режима генерации на примере двунаправленного эрбиевого волоконного лазера с пассивной синхронизацией мод. Для исследования эволюции параметров импульсов использовался метод дисперсионного преобразования Фурье. В настоящее время было показано множество теоретических работ изучающих становление режима пассивной синхронизации мод, однако было представлено только две работы, экспериментально пронаблюдавшие зарождение импульса [4,5]. Все исследования были проведены в однонаправленных лазерах, и по настоящее время нет полного понимания влияние взаимодействия встречных излучений в активной среде и насыщающемся поглотителе на формирования импульсов.

В работе использовался кольцевой волоконный лазер, активной средой в котором являлся световод легированный Эрбием [6], представленный на Рис. 1а. Пассивная синхронизация мод

реализована посредством нелинейной эволюции поляризации и насыщающегося поглотителя на основе одностенных углеродных нанотрубок. Нелинейная эволюция поляризации осуществляется с помощью пары котроллеров поляризации (ПК) и поляризующего световода (ПЗ). 50/50 ответвитель позволяет вывести встречные канали в равной пропорции. Далее импульсы были сведены в один канал с помощью 50/50 ответвителя. Длина портов ответвителя была подобрана таким образом что импульсы, распространяющиеся по направлению часовой стрелки (CW) приходили ровно в середину периода повторения импульсов, распространяющихся по направлению против часовой стрелки (CCW). Один из выходных портов ответвителя шел непосредственно на фотоприемник для измерения пространственно-временной эволюции интенсивности, а второго – через катушку световода с нормальной дисперсией – для дисперсионного преобразования Фурье. Величина дисперсии в линии составляет +1200 пс^2. После того как в лазере был достигнут режим двунаправленной генерации импульсов, лазер накачки был выключен, а триггер на осциллографе был выставлен таким образом, чтобы он записал одно измерение (длительностью 3 мс) как только установится режим. После чего накачка была снова включена на уровень 80 мВт. На рис. 1б изображены карты спектральной интенсивности при зарождении импульсов во встречных каналах. После анализа данных и выполнения быстрого преобразования Фурье были получены карты интенсивности эволюции автокорреляционной функции зарождающихся импульсов (рис. 1в).

Из рис 1б-в видно, что при формировании импульсов оба канала проходят через одинаковые этапы: вибрации импульсов, формирование комплекса импульсов, доминирование одного импульса из комплекса и аннигиляция других суб-импульсов.

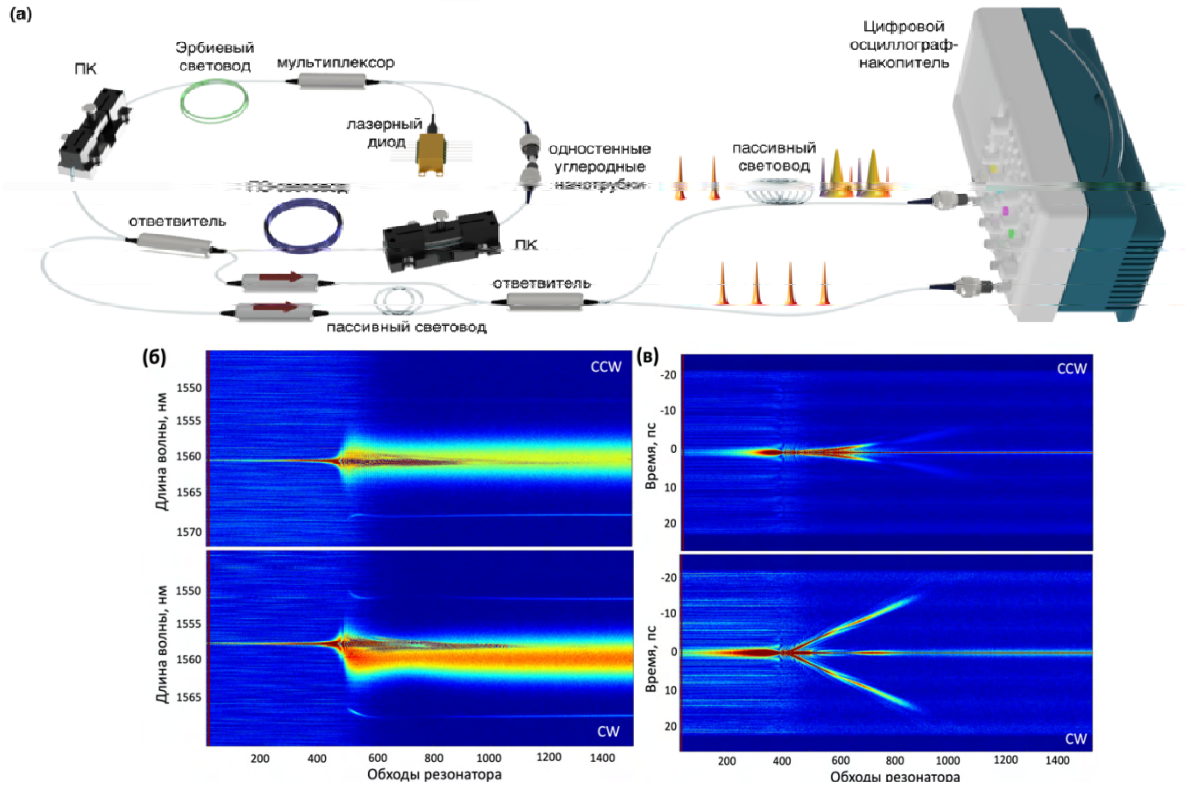


Рис. 1 а) Схема двунаправленного волоконного лазера с пассивной синхронизацией мод и установки для измерения выходных импульсов в реальном времени: б) эволюция оптического спектра и в) автокорреляционной функции встречных каналов

Литература

1. *S. Sugavanam, N Tarasov, DV Churkin "Real-Time Intensity Domain Characterization of Fibre Lasers Using Spatio-Temporal Dynamics," Applied Sciences 6(3) 65 (2016)*
2. *A. Tikan, et al. "Single-shot measurement of phase and amplitude by using a heterodyne time-lens system and ultrafast digital time-holography." Nature Photonics 12(4), 228 (2018)*
3. *K. Goda, and B. Jalali. "Dispersive Fourier transformation for fast continuous single-shot measurements." Nature Photonics 7.2 102 (2013)*
4. *G. Herink, B. Jalali, C. Ropers, D. R. Solli "Resolving the build-up of femtosecond mode-locking with single-shot spectroscopy at 90 MHz frame rate," Nature Photonics 10, 321–326 (2016)*
5. *J. Peng, et al. "Real-time observation of dissipative soliton formation in nonlinear polarization rotation mode-locked fibre lasers," Communications Physics 1, 20 (2018)*
6. *M. Chernysheva, et al. "Isolator-free switchable uni-and bidirectional hybrid mode- locked erbium-doped fiber laser," Optics Express 24(14) 15721 (2016)*

НЕЛИНЕЙНАЯ КОМПРЕССИЯ СПЕКТРА ОТРИЦАТЕЛЬНО ЧИРПИРОВАННЫХ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОМ СВЕТОВОДЕ СО СМЕЩЕННОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

Крылов А.А. [*], **Сенаторов А.К., Яценко Ю.П.**

Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[*] *E-mail:* krylov@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16098

В настоящее время сфера применений источников ультракоротких лазерных импульсов (УКИ) охватывает различные области науки, техники и медицины [1]. При этом в связи с бурным развитием волоконно-оптических технологий, все более широкое распространение получают источники УКИ на основе активных световодов, легированных ионами эрбия (Er^{3+}), которые излучают ~100 фс импульсы в телекоммуникационном диапазоне спектра (вблизи 1.55 мкм) [2,3]. Однако помимо УКИ фемтосекундной длительности, также востребованы спектрально-ограниченные пикосекундные лазерные импульсы, которые, обладая высокой яркостью, могут, в частности, применяться в биофотонике с целью увеличения спектрального разрешения [4], и при создании мощных лазерных систем [5]. В этой связи, стоит отметить, что генерация спектрально-ограниченных импульсов длительностью от нескольких десятков до сотен пикосекунд непосредственно в волоконном лазере представляется довольно трудной задачей, тем более, если необходима перестройка их длительности в таких широких пределах. Тем не менее, эта проблема может быть решена с помощью нелинейного сжатия изначально широкого спектра (то есть, перераспределения энергии с периферии в центральную его часть) за счет фазовой самомодуляции (ФСМ) в световодах с положительной дисперсией групповых скоростей (ДГС) в случае распространения по ним пикосекундных лазерных импульсов с предварительно наведенной отрицательной частотной модуляцией (отрицательным чирпом) посредством дисперсионных линий задержки, таких как призмы, дифракционные решетки и, разумеется, световоды [6-8]. При этом в качестве источника можно использовать стандартные лазеры и усилители, излучающие спектрально-ограниченные фемтосекундные импульсы с гауссовым или солитонным ($sech^2$) профилем огибающей.

Суть этого явления состоит в компенсации линейного отрицательного чирпа входящих в световод импульсов нелинейной положительной частотной модуляцией, индуцируемой ФСМ в процессе их распространения при незначительном изменении длительности, что сопровождается сжатием спектра, которое в идеальном случае завершается при достижении импульсом условия спектральной ограниченности [6-8]. В свою очередь, вследствие того, что сам механизм сжатия спектра является существенно нелинейным, данная методика генерации спектрально-ограниченных пикосекундных импульсов сопряжена с необходимостью тщательной оптимизации параметров как самого лазерного импульса (пиковая мощность, форма огибающей), так и нелинейного световода (ДГС, коэффициент нелинейности, длина) с целью максимизации коэффициента спектрального сжатия, а также, что немаловажно, повышения его качества, определяемого как доля энергии в сжатом спектральном пике (параметр Штреля) [6-8]. Так, благодаря оптимизации энергии отрицательно-чирпированных импульсов на длине волны 1552.5 нм, было реализовано 12-ти кратное сжатие исходного параболического спектра с параметром Штреля около 0.5, на выходе нелинейного световода длиной 1 км с ДГС β_2=+0.96 пс^2/км и аттенюацией 1 дБ/км, что соответствовало генерации практически спектрально-ограниченных импульсов (отклонение около 12%) длительностью ≈70 пс [6], являясь одним из лучших результатов с точки зрения соотношения коэффициента сжатия и качества сжатого спектра, опубликованных к настоящему моменту.

В представленной работе, экспериментально и теоретически исследована нелинейная компрессия спектра отрицательно-чирпированных гауссовых импульсов пикосекундной длительности на центральной длине волны вблизи 1560 нм за счет фазовой самомодуляции при их распространении в телекоммуникационном световоде SMF-LS в условиях малой положительной дисперсии групповых скоростей.

Положительно-чирпированные гауссовы импульсы длительностью ≈25 пс и максимальной энергией 759 нДж на длине волны ≈1560 нм, с выхода мощного полностью волоконного эрбиевого источника, созданного по стандартной схеме «задающий генератор–стретчер–усилитель» [9], направлялись в двухпроходную дисперсионную линию задержки на основе пары объемных поляризационно-независимых дифракционных решеток с плотностью штрихов 940 мм$^{-1}$, которая вносила удельную отрицательную ДГС β_2= –11.9 пс^2/м и потери ≈1 дБ. Варьирование длительности

импульсов и, соответственно управление их чирпом, осуществлялось посредством изменения расстояния между решетками; при этом импульсы приобретали отрицательную частотную модуляцию, если расстояние между решетками превосходило ΔL=11 см, что соответствовало точке дечирпирования (минимальной длительности) импульса. Далее отрицательно-чирпированные импульсы вводились в телекоммуникационный световод SMF-LS (LEAF Submarine, @CORNING Corp.) с малой положительной ДГС β_2= +2.45 пс^2/км (длина волны нулевой дисперсии λ_{ZD}=1570 нм) и аттенюацией менее 0.25 дБ/км на длине волны 1560 нм. Необходимо особо подчеркнуть, что пиковая мощность (и, соответственно, энергия) импульсов имеет решающее значение в процессе нелинейного сжатия спектра, полностью определяя его динамику и характеристики импульсов на выходе световода. Поэтому для прецизионного управления энергией импульсов, сразу на выходе дисперсионной линии задержки в коллимированном пучке, устанавливался аттенюатор в виде щели с шириной, варьируемой посредством микрометрического винта с разрешением 10 мкм. Длина световода SMF-LS в процессе экспериментов варьировалась от 3 м до ≈530 м в зависимости от длительности отрицательно-чирпированных импульсов на входе. Спектры на выходе нелинейного световода регистрировались спектроанализатором ANDO с максимальным разрешением 0.01 нм.

Автокорреляционные функции (АКФ) интенсивности дечирпированного импульса длительностью 0.4пс и отрицательно-чирпированного максимальной длительностью 38 пс (ΔL=25 см) на выходе дисперсионной линии задержки показаны на Рис.1а. В свою очередь, на Рис.1б представлены спектры импульсов на входе (Δλ≈10 нм) и выходе (Δλ≈0.23 нм) световода SMF-LS длиной 530 м при оптимальной энергии импульсов 2.1 нДж, что соответствует коэффициенту сжатия спектра C≈43 и параметру Штреля (доля энергии в сжатом пике) S≈0.5. Стоит также отметить, что ДГС световода, вклад которой может рассматриваться в данном случае как малая поправка к действию нелинейности, играет, тем не менее, важную роль в процессе нелинейного сжатия спектра, способствуя улучшению его качества [7].

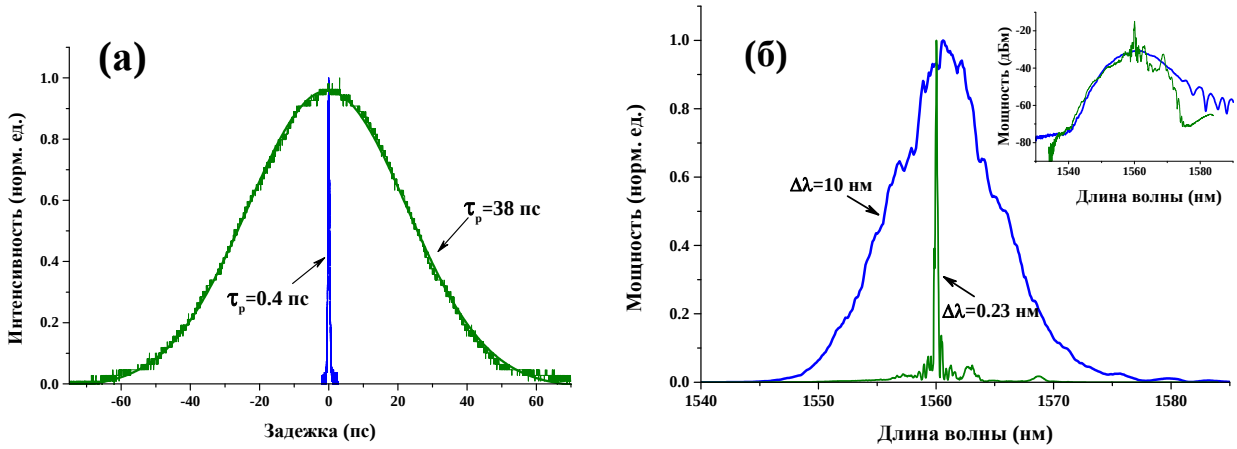


Рис.1. АКФ интенсивности дечирпированного и отрицательно-чирпированного импульсов на выходе дисперсионной линии задержки (а); спектры 38-пс импульсов на входе и выходе нелинейного световода длиной 530 м при оптимальной энергии 2.1 нДж (б). Вставка: спектры в логарифмическом масштабе

Таким образом, в результате оптимизации длины нелинейного световода, а также энергии входных гауссовых импульсов максимальной длительностью 38 пс, реализовано ≈43-кратное сжатие исходного спектра шириной около 10 нм с долей энергии в сжатом пике шириной ≈0.23 нм около 0.5, что, значительно превосходит все предыдущие результаты по коэффициенту сжатия спектра при соразмерном его качестве в телекоммуникационном диапазоне спектра.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 19-12-00361.

Литература

1. *Diddams S., J. Opt. Soc. Am. B 27, B51-B62 (2010)*
2. *http://avesta.ru/products/lasers/femtosekundnie-volokonnie-laseri/*
3. *http://www.menlosystems.de/*
4. *Andresen E, et al, Opt. Lett. 31, 1328–1330 (2006)*
5. *Limpert J., et al, Appl. Phys. B 74, 191–195 (2002)*
6. *Fatome J., et al, Appl. Opt. 51, 4547-4553 (2012)*
7. *Finot C., et al, J. Opt. Soc. Am. B 33, 760-767 (2016)*
8. *Andresen E, et al, Opt. Lett. 36, 707–709 (2011)*
9. *Krylov A., et al, Las. Phys. Lett. 14, 035104 (2017)*

ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ КОНУСНОГО ЭРБИЕВОГО СВЕТОВОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ САМОФОКУСИРОВКИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В СРЕДАХ С АНОМАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

Андрианов А.В.[1*], Коптев М.Ю.[1], Лихачев М.Е.[2], Бубнов М.М.[2], Липатов Д.С.[3], Анашкина Е.А.[1], Ким А.В.[1], Литвак А.Г.[1]

[1] Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород
[2] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[3] Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН, г.Нижний Новгород
[*]E-mail: alex.v.andrianov@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16099

Исследование нелинейных процессов, протекающих при распространении мощного импульсного лазерного излучения в среде является важным аспектом лазерной физики. Большой интерес представляет исследование пространственно-временных преобразований ультракоротких импульсов при самофокусировке в среде с аномальной дисперсией, которая может сопровождаться значительным укорочением импульса, а также формированием структур поля типа "волн убийц" (rogue waves). В последнем случае требуется наблюдение большого числа реализаций эксперимента для детектирования редких событий и для исследования статистики параметров выходного излучения. Благодаря развитию технологий волоконной оптики появилась возможность проводить исследования самофокусировки в области аномальной дисперсии с помощью компактных волоконных лазерных систем, работающих с достаточно высокой частотой повторения. Нами была разработана лазерная система на основе конусного волоконного эрбиевого усилителя чирпированных импульсов, генерирующая 0.5-пс импульсы с энергией 10 мкДж на длине волны 1.56 мкм. Система использована для исследования самофокусировки мощного импульса в стекле. С помощью оригинальной схемы диагностики импульсов на основе спектральной интерферометрии, работающей в режиме одного импульса ("single-shot"), зарегистрировано формирование сложной структуры импульса с характерной длительностью около 70 фс в приосевой области пучка.

Схема лазерной системы приведена на рис. 1. Задающий лазер с синхронизацией мод генерировал импульсы с частотой повторения 50 МГц, длительностью 230 фс на длине волны 1.56 мкм, которые затем растягивались в отрезке германатного световода с нормальной дисперсией групповых скоростей (–54 пс/нм·км) длиной 320 м до длительности ~100 пс. После чего импульсы усиливались эрбиевым предусилителем до мощности 100 мВт, прореживались акустооптическим модулятором до частоты следования 100 кГц и вновь усиливались во втором предусилителе до средней мощности ~1 мВт.

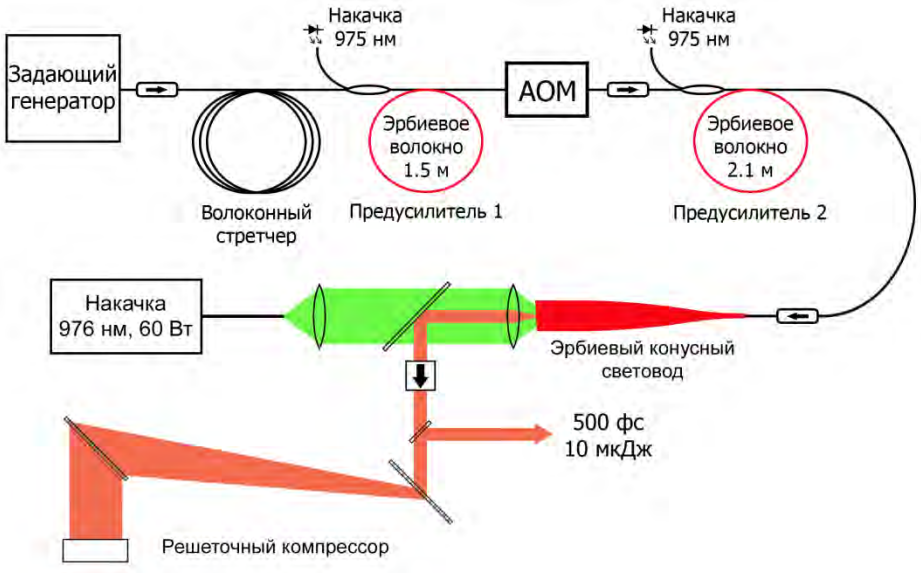


Рис.1. Схема эрбиевой волоконной лазерной системы

В качестве оконечного каскада использовался усилитель на основе эрбиевого активного конусного световода. Его длина составила 3.5 м, диаметр сердцевины на входе 20 мкм, и 75 мкм на выходе. За счет адиабатического увеличения диаметра световода по длине, удается сохранить одномодовый режим распространения излучения в его толстом конце, который в общем случае является многомодовым. Накачка конусного световода осуществлялась мощным многомодовым лазерным диодом на длине волны 976 нм во встречном к сигналу направлении. В результате, после сжатия в дисперсионном компрессоре были получены импульсы длительностью 500 фс с энергией 10 мкДж, при этом энергия в импульсе была ограничена мощностью накачки.

С помощью построенной системы было проведено исследование пространственно-временной динамики импульса, распространяющегося через нелинейную среду с аномальной дисперсией (стекло ВК7) в режиме самофокусировки (см. рис. 2). Излучение с помощью длиннофокусной линзы (20 см) фокусировалось в стержень из стекла длиной 7 см. При высокой энергии импульса излучение испытывало самофокусировку, сопровождавшуюся сильным уширением спектра и изменением временной структуры импульса. Превышение порога самофокусировки было не очень большим: пиковая мощность импульса оценивалась как $P \sim 1.3 P_{cr}$ (P_{cr} - критическая мощность самофокусировки).

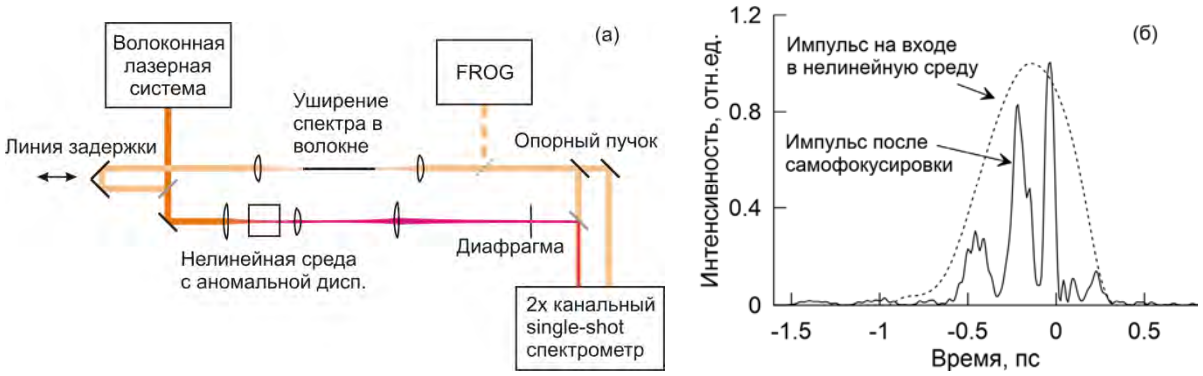


Рис. 2. Схема эксперимента по измерению пространственно-временной структуры импульса, испытавшего самофокусировку в стекле, (а) и результаты измерения (б)

Для восстановления временной структуры импульса в нескольких точках по поперечному сечению пучка был разработан оригинальный метод спектральной интерферометрии со специально подготовленным опорным пучком, работающий в режиме одного импульса ("single-shot"). Опорный широкополосный сигнал для спектральной интерферометрии генерировался за счет уширения спектра импульса от волоконной системы в коротком отрезке нелинейного волокна с нормальной дисперсией (2 см волокна с тонкой сердцевиной, сильно легированной оксидом германия). Спектр шириной более 200 нм полностью покрывал спектральную область, в которой сосредоточена основная энергия исследуемого сигнала. Изображение исследуемого пучка с выходной грани стеклянного стержня переносилось с увеличением на диафрагму с помощью которой могла быть выделена интересующая область пучка; далее исследуемый сигнал объединялся на делительном зеркале (50/50) с опорным пучком. Спектр опорного сигнала и спектральная интерференция одновременно записывались двухканальным спектрометром на основе InGaAs CCD линейного сенсора в режиме одного импульса. Спектральная фаза опорного пучка, который даже несмотря на очень большое уширение спектра был намного стабильнее исследуемого, измерялась методом FROG (frequency resolved optical gating). В результате восстановления формы импульса было выяснено, что при распространении мощного импульса исходной длительностью около 500 фс в режиме самофокусировки в среде с аномальной дисперсией происходит дробление импульса во времени в приосевой области пучка. В нашем случае формировались 2-4 импульса, при этом характерная длительность наиболее коротких импульсов составляла около 70 фс (рис. 2б). Построенная система далее может быть использована для проведения серии экспериментов, в которой предполагается исследовать статистику параметров излучения на выходе нелинейной среды.

Создание и исследование эрбиевого конусного световода проводилось в рамках работ, поддержанных грантом Российского научного фонда № 16-12-10553. Исследование самофокусировки в среде с аномальной дисперсией проводилось в рамках работ, поддержанных грантом Российского научного фонда № 16-12-10472.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВКР-ГЕНЕРАЦИИ ДИССИПАТИВНЫХ СОЛИТОНОВ ВО ВНЕШНЕМ РЕЗОНАТОРЕ ИЗ ФОСФОРОСИЛИКТНОГО ВОЛОКНА

Харенко Д.С.[1,2], Беднякова А.Е.[2,3], Жданов И.С.[1,2,*], Федорук М.П.[2,3], Бабин С.А.[1,2]

[1] *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*
[2] *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*
[3] *Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск*
[*] *E-mail: zhdanovis@iae.nsk.su*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16100

В ряде современных активно развивающихся областей требуются лазерные источники с длинами волн, выходящими за границы имеющихся активных сред. Одной из таких областей является биомедицина, где востребованы относительно недорогие и надежные источники суб-пикосекундных импульсов с высокой пиковой мощностью и длиной волны генерации вблизи 1,3 мкм и 1,7 мкм [1]. Это так называемые окна прозрачности воды, где возможно получить существенно большую глубину проникновения излучения в исследуемый материал. Традиционно для генерации лазерного излучения с указанными длинами волн используются оптические параметрические генераторы, накачиваемые твердотельными титан-сапфировыми лазерами. Стоимость и сложность таких систем крайне высоки, что сдерживает их широкое внедрение на практике. В волоконных системах широкое распространение получил метод рамановского самосдвига частоты солитона, однако для его реализации в области 1,3 мкм необходимо обеспечить аномальную дисперсию волокна, что здесь достигается только использованием специальных волокон, поддерживающих моды высоких порядков [2]. Всё это делает метод рамановского самосдвига также крайне сложным и дорогостоящим в реализации. Однако высокая пиковая мощность обеспечивается и в полностью волоконных лазерах при генерации сильно-чирпованных диссипативных солитонов (СЧДС). Как известно, генерация излучения на новых длинах волн возможна посредством эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Генерация СЧДС посредством ВКР — так называемых рамановских диссипативных солитонов (РДС) — была продемонстрирована совсем недавно [3,4], и потенциально может служить новым перспективным методом генерации суб-пикосекундных импульсов на нестандартных длинах волн. Для увеличения спектрального сдвига предлагается использовать другие типы волокон, например, фосфоросиликатные (P_2O_5), где этот сдвиг составляет величину ~39 ТГц. При накачке в области 1.1 мкм такое волокно позволяет получить генерацию как раз в районе 1.3 мкм [5]. В этой работе мы исследуем особенности использования внешнего резонатора из фосфоросиликатного волокна для генерации СЧДС как экспериментально, так и численно.

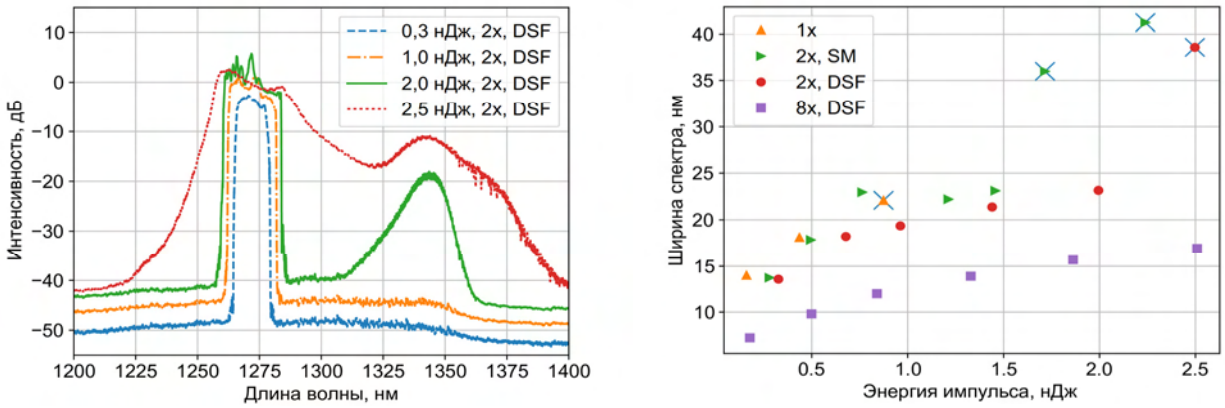


Рисунок 1. Эволюция оптического спектра с увеличением энергии генерируемого РДС (слева); зависимость ширины оптического спектра (по уровню -10 дБ) генерируемого импульса от его энергии при различных конфигурациях внешнего резонатора (справа). Крестами обозначены шумовые режимы с высокой долей ВКР

Схема исследуемого лазера состоит из волоконного лазера накачки и внешнего волоконного кольцевого рамановского резонатора. Так как генерация сильночирпованных диссипативных

солитонов возможна только в области нормальной дисперсии, значения этого параметра были предварительно измерены для ряда доступных волокон. Для используемого фосфоросиликатного волокна она оказалась нормальной и составила порядка 12 пс^2/км. Значение дисперсии также может быть увеличено путём использования волокна со смещённой дисперсией типа DS15-PS (Fujikura). Лазер накачки генерирует диссипативные солитоны, которые после предварительного растяжения и усиления заводятся во внешний резонатор. Длина внешнего кольца выбрана так, чтобы частота повторения накачки была кратна частоте прохождения солитонов по кольцу. Исследовались различные соотношения длин внешнего резонатора к резонатору лазера накачки — режимы т. н. гармонической генерации.

В ходе работы была произведена оптимизация параметров лазера накачки, таких как центральная длина волны, энергия и длительность импульсов. Частота повторения составляла 15,35 МГц. Отношение длины внешнего резонатора к резонатору лазера накачки — 1, 2 и 8. Для увеличения длины использовались как стандартное одномодовое волокно с сохранением поляризации, так и волокно со смещённой дисперсией. С увеличением энергии импульса накачки также увеличивается энергия и ширина спектра РДС вплоть до порога разрушения (рис.1 слева). Увеличение полной дисперсии внешнего резонатора позволяет увеличить этот порог (квадраты на рис. 1 справа), но одновременно приводит и к уменьшению ширины оптического спектра. Кроме этого проведено численное моделирование с использованием подхода, развитого ранее при исследований влияния ВКР в области 1 мкм [6]. В модели рассмотрена аппроксимация функции рамановского отклика из работы [7], соответствующая фосфоросиликатному световоду. Установлено, что узость пика усиления фосфорной компоненты по сравнению с кварцем и расположение нуля дисперсии вблизи 1400 нм качественно изменяют характер усиления и пороги возникновения стохастических ВКР импульсов второго порядка. Изменение концентрации фосфора приводит к изменению соотношения максимумов ВКР-усиления, соответствующих кварцу (SiO_2) и оксиду фосфора (P_2O_5), что также оказывает существенное влияние на генерацию РДС в области 1,3 мкм.

Таким образом, в ходе работы была получена генерация импульсов на длине волны ~1270 нм с энергией до 2,5 нДж, частотой 15.35 МГц и шириной спектра до 23 нм. Оценочная длительность после сжатия до спектрально-ограниченного импульса составила порядка 200 фс. Установлено, что за счёт варьирования полной дисперсии и длины внешнего резонатора можно повысить порог разрушения РДС. Полученные зависимости согласуются с результатами численного моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00409 (Д. С. Х. и И. С. Ж.) и проекта No 38 (0319-2017-0011) комплексной программы фундаментальных научных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» (А. Е. Б., М. П. Ф. и С. А. Б.).

Литература

1. *Xu, C., and Wise, F. W. Nat. Photonics 7, 875–882 (2013)*
2. *L. Rishoj, G. et al, Conf. Lasers Electro-Optics, STh3O.3 (2016)*
3. *S. A. Babin et al., Nat. Commun., 5, 4653 (2014)*
4. *D. Churin et al, Opt. Lett., 40, 2529-2532 (2015)*
5. *D. S. Kharenko et al, Opt. Ex., 26, 15084 (2018)*
6. *A. E. Bednyakova et al., Opt. Ex., 21, 20556, (2013)*
7. *G. Salceda-Delgado et al. Opt Quant Electron 44, 657 (2012)*

МНОГОИМПУЛЬСНЫЕ РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ В ТУЛИЕВОМ ВОЛОКОННОМ КОЛЬЦЕВОМ ЛАЗЕРЕ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

Воропаев В.С.[1*], Донодин А.И.[1], Воронец А.И.[1], Батов Д.Т.[1], Власов Д.С.[1], Лазарев В.А.[1], Тарабрин М.К.[1,2], Крылов А.А.[3], Карасик В.Е.[1]

[1] *Научно-образовательный центр «Фотоника и ИК техника», МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва*
[2] *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, г. Москва*
[3] *Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва*
[*] *E-mail:* vasek@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16101

Волоконные тулиевые лазеры с пассивной синхронизацией мод в настоящее время представляют интерес для широко круга применений в науке, технике и медицине [1]. Одним из наиболее перспективных применений тулиевых волоконных лазеров с синхронизацией мод [2] является генерация суперконтинуума в средней ИК-области спектра, которая может использоваться для количественного и качественного определения концентраций различных газов, в том числе биомаркеров заболеваний человека в выдыхаемом воздухе [3] и газов в составе воздуха окружающей среды [4]. Применительно к вопросу генерации суперконтинуума большое внимание уделяется изучению лазеров с синхронизацией мод с нерегулярными импульсами, такими как солитонный дождь [5] и группы слабосвязанных солитонов [6]. Указанные режимы могут использоваться для генерации суперконтинуума с особенными характеристиками, такими как высокая средняя мощность и высокая равномерность спектральной плотности мощности по всей ширине спектра. В данной работе демонстрируется переключение между двумя нерегулярными режимами многоимпульсной генерации солитонным дождём и группой слабосвязанных солитонов в полностью волоконном кольцевом тулиевом лазере с пассивной синхронизацией мод на основе нелинейной эволюции поляризации путем случайной настройки поляризационных контроллеров.

Схема кольцевого резонатора лазера представлена на рисунке 1,а. Для накачки используется эрбий-иттербиевый лазер с длиной волны 1550 нм и максимальной мощностью 3,36 Вт. Дисперсия групповых скоростей (ДГС) активного алюмосиликатного световода, легированного ионами тулия, составляет β_2 = - 70,8 пс^2/км на длине волны 1900 нм, а поглощение слабого сигнала 44,5 дБ/м на длине волны 1550 нм. На рисунке 1,б показана зависимость выходной мощности лазера от мощности накачки, на рисунке1,в показана дисперсия групповых скоростей световодов резонатора в зависимости от длины волны. Суммарная длина резонатора составила 16,09 м, суммарная ДГС резонатора $\beta_{2\Sigma}$ = - 0,859 пс^2/км, фундаментальная частота повторения импульсов составила 13 МГц. Излучение накачки вводится в резонатор через спектральный мультиплексор 1550/2000, выполненный из световода SMF-28. Два контроллера поляризации используются для настройки режима синхронизации мод. Для однонаправленной генерации и дискриминации импульсов по интенсивности используется изолятор-поляризатор, выполненный из волокна с сохранением состояния поляризации. Для увеличения нелинейности в резонаторе и, как следствие, снижения порога синхронизации мод введено 10,16 м световода SMF-LS, с ДГС равной β_2 = - 45,8 пс^2/км на длине волны 1900 нм, которая меньше значения ДГС световода SMF-28 равной β_2 = - 65,11 пс^2/км на той же длине волны.

При различных настройках контроллеров поляризации наблюдаются два различных режима генерации (солитонный дождь и группы слабосвязанных солитонов), порог синхронизации мод по выходной мощности излучения составил 30 мВт для обоих режимов генерации. На рисунке 2 представлены основные оптические характеристики данных режимов: осциллограммы импульсов (а), автокорреляции интенсивности (б), оптические спектры (в) – измеренные при 500 мВт выходной мощности. Более того, наблюдалось периодическое переключение между режимом генерации солитонного дождя и режимом слабосвязанных солитонов при неизменных положениях контроллеров поляризации и мощности накачки. На рисунке 2,а изображена динамика перехода режима генерации солитонного дождя в режим генерации группы слабосвязанных солитонов. В начале (0 мс) в резонаторе генерируется солитонный дождь с большим расстоянием между импульсами. При времени 100 и 200 мс группа солитонов отделяется от конденсированной фазы, а при времени 300 мс они начинают возвращаться обратно, при времени 400 и 500 мс все солитоны «схлопываются» в конденсированную фазу группы слабосвязанных солитонов, при этом по сравнению с временем 0 мс

длительность группы импульсов уменьшилась в 5 раз, а пиковая мощность импульсов возросла. Полученные импульсы имеют длительность равную 931 фс, ширина спектра для режима генерации солитонного дождя составила 3,1 нм, а для режима генерации группы слабосвязанных солитонов – 1,3 нм. Спектр группы слабосвязанных солитонов плохо аппроксимируется функцией квадрата гиперболического секанса и, судя по всему, представляет собой усредненный спектр нескольких импульсов с различными параметрами.

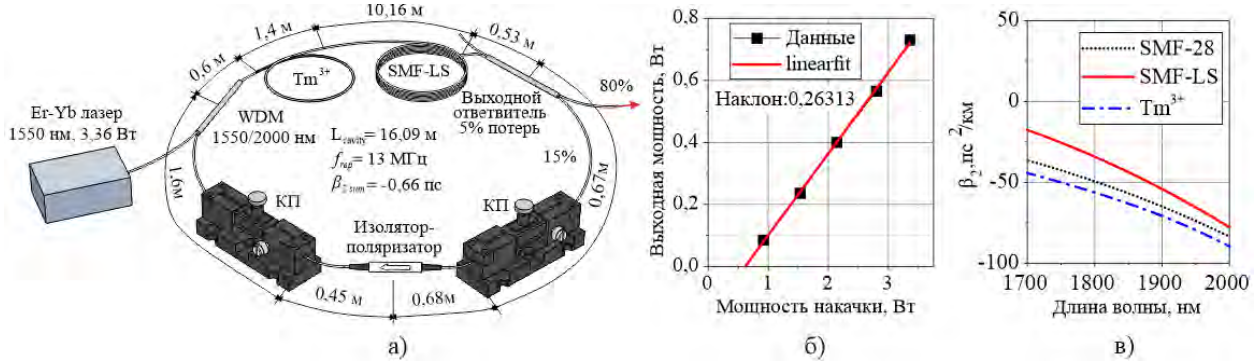


Рис.1. (а) Схема полностью волоконного тулиевого лазера с пассивной синхронизацией мод, основанной на нелинейной эволюции поляризации: WDM – спектральный мультиплексор, КП – контроллер поляризации; (б) зависимость средней мощности лазера от мощности накачки; (в) Дисперсия групповых скоростей световодов, образующих резонатор, в зависимости от длины волны

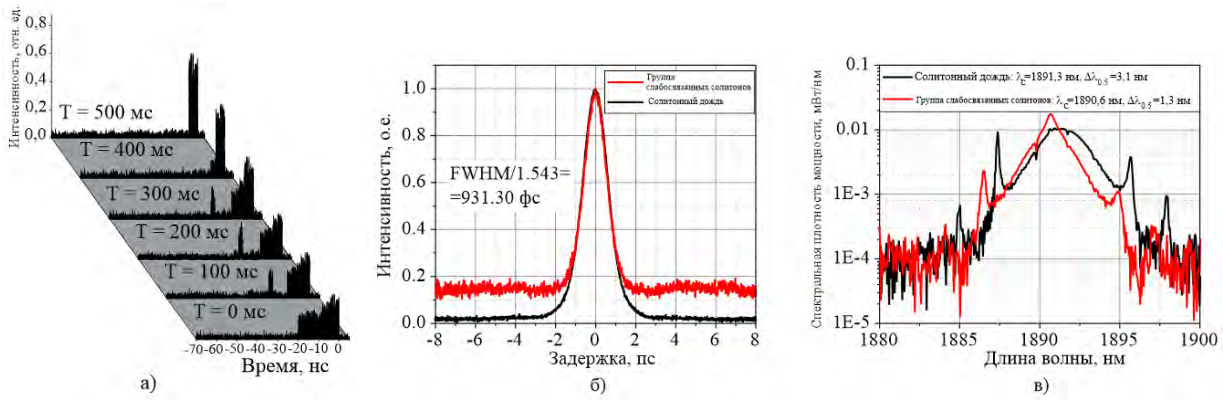


Рис.2. (а) Осциллограмма импульсов, описывающая динамику перехода режима генерации солитонного дождя в режим генерации группы слабосвязанных солитонов; (б) автокорреляция интенсивности солитонного дождя (черная криавя) и группы слабосвязанных солитонов (красная кривая); (в) спектры излучения солитонного дождя (черная кривая) и группы слабосвязанных солитонов (красная кривая)

Автокорреляция интенсивности для режима генерации группы слабосвязанных солитонов имеет более высокое значение отношения пьедестала к пику, равное 0,18 по сравнению с режимом генерации солитонного дождя. Мы предполагаем, что некоторые эффекты (такие как электрострикция или акустические эффекты), действующие как возмущения на резонатор лазера, могут влиять на силу взаимодействия солитонов, что приводит к формированию групп слабосвязанных солитонов.

После усиления мощности данных режимов генерации, они могут быть использованы для генерации некогрентного суперконтинуума с высокой средней мощностью и высокой равномерностью спектральной плотности мощности по всей ширине спектра в флюоридных и халькогенидных световодах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00927.

Литература

1. *Rudy C.W., et al, Opt. Fiber Technol. 20(6), 642-649 (2014)*
2. *Voropaev V.S., et al, Proceedings of ASSL 2018, Boston, United States, paper AM6A.19 (2018)*
3. *Wang C., et al, Sensors 9(10), 8230-8262 (2009)*
4. *Kulkarni O.P., et al,JOSA B 28(10), 2486-2498 (2011)*
5. *Chouli S., et al, Opt. Express. 17(14), 11776-11781 (2009)*
6. *Gumenyuk R., et al, IEEE J. Quantum Electron. 48(7), 903-907 (2012)*

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ С ВЫСОКОЙ ПИКОВОЙ МОЩНОСТЬЮ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1.9 МКМ В СТАНДАРТНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СВЕТОВОДАХ

Донодин А.И.[1*], Воропаев В.С.[1], Воронец А.И.[1], Батов Д.Т.[1], Власов Д.С.[1], Лазарев В.А.[1], Тарабрин М.К.[1,2], Карасик В.Е.[1]

[1] *Научно-образовательный центр «Фотоника и ИК техника», МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва*
[2] *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, г. Москва*
[*] *E-mail:* don1sandr@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16102

В настоящее время волоконные фемтосекундные лазеры являются чрезвычайно перспективными источниками для широкого спектра применений, таких как спектроскопия в среднем ИК-диапазоне [1], генерация терагерцового излучения [2], хирургия [3], частотная метрология [4] – благодаря их надёжности, компактности и экономичности. В последнее время активно исследуются фемтосекундные лазеры с длиной волны излучения около 1,9 мкм [5-13]. Кроме того, большое число работ посвящено получению импульсов высокой пиковой мощности в схемах «задающий генератор – усилитель мощности» [12, 13]. Отдельный интерес представляют полностью волоконные лазерные источники, использующие в своем составе, в том числе, стандартные телекоммуникационные световоды [5 - 7, 9].

Одной из наиболее распространенных форм импульсов на длине волны 1,9 мкм, получаемых в лазерах с использованием стандартного телекоммуникационного световода, является солитон, так как дисперсия групповых скоростей световода в этом диапазоне спектра является отрицательной. Хорошо известно, что фундаментальный солитон сохраняет свою форму при распространении в световоде, а солитоны высшего порядка периодически восстанавливают свою временную и спектральную форму через период солитона. В ряде исследований, посвященных изучению распространения импульсов в волоконных фемтосекундных тулиевых лазерах с применением стандартных телекоммуникационных световодов в составе резонатора, предполагалось существование солитонов высшего порядка [2, 3, 5-7]. В этих работах дисперсия высшего порядка и нелинейные эффекты приводят к развалу солитонов высших порядков, которые не способны воспроизводить свою форму при распространении в световоде. Такие эффекты, как вынужденное комбинационное рассеяние, самообострение возникают при распространении импульсов с высокой мощностью и могут привести не только к уширению спектра, но и к солитонному распаду [14, 15], поэтому генерация солитонов высших порядков с высокой пиковой мощностью в генераторах с синхронизацией мод является сложной задачей, поскольку распад импульса обычно приводит к образованию нестабильных импульсов, таких как шумоподобные импульсы [16] и солитонный дождь [17].

Солитоны высшего порядка, образующиеся в резонаторе лазера, не могут сохранять свои периодические спектральные и временные формы при распространении во внешних по отношению к резонатору стандартных телекоммуникационных световодах, через которые осуществляется вывод излучения, и начинают распадаться. Именно поэтому важно учитывать динамику импульса во внешнем световоде при проведении измерений параметров импульса, особенно автокорреляции и спектра. Динамика ультракоротких импульсов вблизи длины волны 800 нм [18] и 1550 нм [19] достаточно хорошо изучена, однако на длине волны 1,9 мкм дисперсия и нелинейность световода отличается, что приводит к другому характеру распространения импульсов.

В настоящей работе мы изучаем распространение солитонов высших порядков, предполагая наличие эффектов более высокого порядка и их отсутствия вблизи длины волны 1,9 мкм в световоде SMF-28. Для достижения этой цели находилось численное решение обобщенного нелинейного уравнения Шредингера симметричным Фурье-методом с расщеплением по физическим факторам. В предыдущих работах исследовалась генерация импульсов с параметрами, соответствующими солитону 4-го порядка [5, 9], поэтому мы рассматриваем распространение солитонов 4-го порядка с двумя типовыми длительностями 1 пс и 100 фс, поскольку такие импульсы имеют ключевые различия в распространении [18].

Результаты численного моделирования распространения солитонов 4-ого порядка длительностью 1 пс и 100 фс с пиковыми мощностями 6 кВт и 605 кВт, соответственно, с учётом

нелинейности высших порядков (эффекты вынужденного комбинационного рассеяния света и самообострения импульса) и дисперсии высших порядков (до 5 порядка включительно) приведены на рисунке 1. Вначале импульс сжимается, а потом распадается на 4 фундаментальных солитона с различными длительностями, причем длина распада в случае импульса длительностью 1 пс составляет около 1,2 м, а в случае импульса длительностью 100 фс – около 1 см.

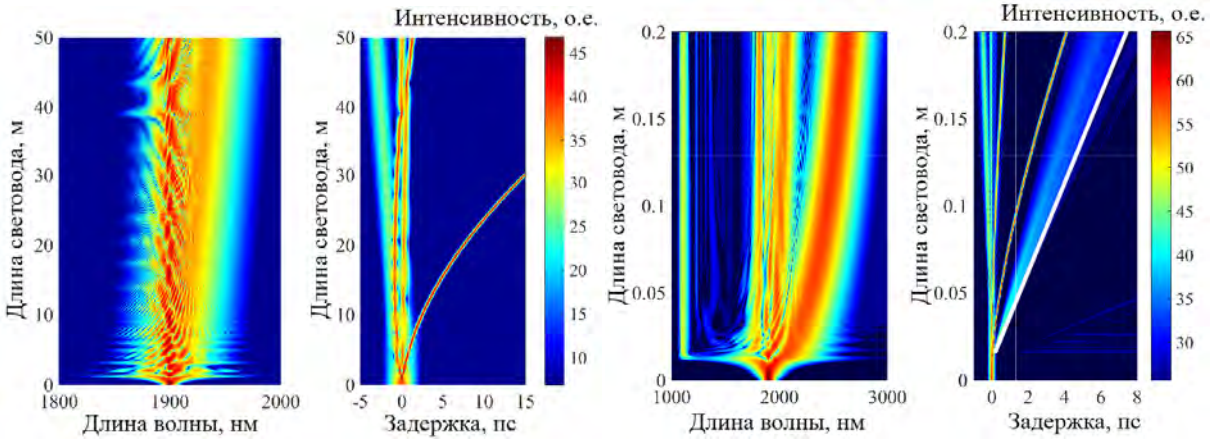


Рис.1. Эволюция временных и спектральных характеристик солитона 4-ого порядка длительностью 1 пс (а) и 100 фс (б) в стандартном телекоммуникационном световоде SMF-28

В настоящей работе показано, что в стандартном телекоммуникационном световоде марки SMF-28 импульсы на длине волны 1900 нм с пиковой мощностью характерной для солитонов высших порядков через определенную длину распадаются на количество фундаментальных солитонов соответствующее порядку. При исследовании высокомощных импульсов, распространяющихся в световоде SMF-28, необходимо учитывать динамику распространения таких импульсов, автокорреляцию и спектр излучения необходимо регистрировать при различных длинах световода, при этом наибольшая мощность у импульса будет при длине световода меньшей длины распада импульса. Если же спектр и автокорреляция не изменяется при различных длинах, то это может говорить о генерации лазера в многоимпульсном режиме, либо в режиме генерации шумоподобных импульсов, что может быть подтверждено при использовании быстродействующего приемника и осциллографа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00927.

Литература

1. *Aalto A., et al., Opt. Lett. 23, 25225-25234 (2015)*
2. *Zaytsev K., et al., Appl. Ph. Lett. 106, 053702 (2015)*
3. *Amini-Nik S., et al., PLOS ONE 5, 1–6 (2010)*
4. *Lazarev V., IEEE Trans. on Ultr., Ferr., and Freq. Contr. 63, 1028–1033 (2016)*
5. *Chernysheva M. A., et al., IEEE J. of Sel. Top. in Quant. Electr. 20, 425–432 (2014)*
6. *Gao C., et al., J. Lightw. Technol. 35, 2988–2993 (2017)*
7. *Voropaev V., ASSL AM6A.19 (2018)*
8. *Voropaev V., Front. in Opt. JTu3A.15 (2017)*
9. *Voropaev V., ICLO 18–18 (2018)*
10. *Kieu K., et al., Photonics Techn. Lett. 21, 128–130 (2009)*
11. *Chamorovskiy A. Y., et al., Laser Ph. Lett. 9, 602–606 (2012)*
12. *Stutzki F., et al., Opt. Lett. 39, 4671–4674 (2014)*
13. *Stutzki F., et al., Opt. Lett. 40, 9-12 (2015)*
14. *Agrawal G. P., et al., Nonlin. Sc. at the Dawn of the 21st Cent., 195–211 (2000)*
15. *Yin L., et al., Opt. Lett. 32, 391–393 (2007)*
16. *Wang Q., et al., Appl. Ph. Lett. 102, 131117 (2013)*
17. *Xu Y., et al., Laser Ph, Lett. 12, 045108 (2015)*
18. *Dudley J. M., et al., Rev. Mod. Phys. 78, 1135–1184 (2006)*
19. *Du Y., et al., Opt. Express 26, 11685-11693 (2018)*

ВРЕМЕННЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОЛЬМИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ ГИБРИДНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД

Филатова С.А.[1*], Камынин В.А.[1], Арутюнян Н.Р.[1,2], Рыбин М.Г.[1,2], Образцова Е.Д.[1,2], Цветков В.Б.[1,3]

[1] *Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва*
[2] *Московский физико-технический институт (государственный университет), МФТИ, г. Долгопрудный*
[3] *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва*
[*] *E-mail:* filsim2910@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16103

Компактные лазерные источники ультракоротких импульсов (УКИ), генерирующие излучение в спектральном диапазоне 2-3 мкм, представляют интерес как для научных, так и для прикладных задач. Такие источники могут быть использованы в качестве задающих генераторов (ЗГ) для объемных усилителей, а также для нелинейного преобразования частоты в область среднего инфракрасного (ИК) и террагерцового (ТГц) диапазонов. Кроме того, такие источники могут применяться для обработки материалов, лазерной локации, газоанализа, атмосферной связи и т.д. Среди оптических волокон на кварцевой основе наибольшие длины волн генерации позволяют получить световоды, легированные ионами гольмия (Ho^{3+}), обладающие широкой полосой усиления 2000-2200 нм [1]. Таким образом, разработка компактных гольмиевых волоконных лазеров, генерирующих УКИ, является актуальной задачей.

В большинстве работ, посвященным гольмиевым волоконным лазерам, генерирующим УКИ, режим синхронизации мод достигается за счет насыщающихся поглотителей, таких как: углеродные нанотрубки [2], графен [3], черный фосфор [4], металлические углеродные нанотрубки [5], полупроводниковые зеркала с насыщающимся поглотителем (SESAM) [6]. Кроме того, режим синхронизации мод в гольмиевом волоконном лазере был получен за счет нелинейного вращения плоскости поляризации (НВПП) [7], а также за счет добавления в схему с НВПП одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) [8], обеспечив тем самым гибридную синхронизацию мод.

В данной работе проведено сравнение различных методов получения синхронизации мод в кольцевом резонаторе гольмиевого волоконного лазера при одинаковых условиях, а также исследовано влияние уровня мощности накачки на временные и спектральные характеристики лазерного излучения. Мы сравниваем следующие методы: НВПП; НВПП+ОУНТ; НВПП+графен.

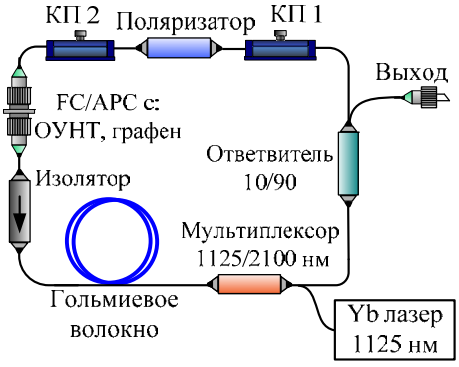


Рис. 1. Экспериментальная установка

Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Накачка гольмиевого волоконного лазера осуществлялась через волоконный мультиплексор иттербиевым (Yb) волоконным лазером, генерирующим непрерывное излучение на длине волны 1125 нм и мощностью до 8 Вт. Кольцевой резонатор лазера состоял из активного гольмиевого волокна, длиной коло 4 м, и стандартного одномодового волокна, длиной около 6 м. Для реализации НВПП в резонатор лазера были добавлены волоконный поляризатор и пара контроллеров поляризации. Для получения гибридной синхронизации мод в схему добавлялись пленка с ОУНТ и графен, зафиксированные между двумя оптическими разъемами с угловой полировкой (FC/APC). Для выделения одного направления распространения генерируемого излучения использовался волоконный изолятор, работающий в области 2 мкм. Для вывода излучения из резонатора лазера использовался волоконный ответвитель с коэффициентом деления 9/1, который обеспечивал выведение 90% мощности. Схема гольмиевого волоконного лазера с синхронизацией мод за счет НВПП отличалась отсутствием пленки с ОУНТ и графена между оптическими разъемами. Значение внутрирезонаторной дисперсии составило –1.1 пс^2.

В зависимости от типа синхронизации мод получены разные параметры лазерного излучения: центральная длина волны излучения варьировалась от 2040 до 2085 нм, средняя выходная мощность

излучения от 5 до 15 мВт, длительность импульсов от 0.5 до 1.3 пс. Частота следования импульсов составила 20.5 МГц.

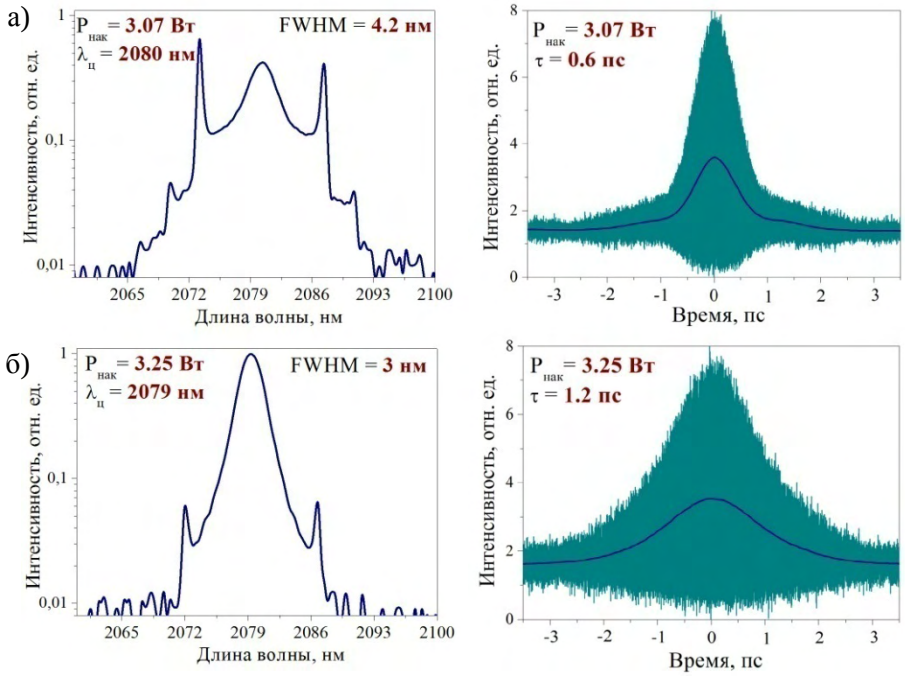


Рис. 2. а) Спектр излучения и АКФ при мощности накачки 3.07 Вт, б) Спектр излучения и АКФ при мощности накачки 3.25 Вт

Также было исследовано влияние уровня мощности накачки на временные и спектральные характеристики лазерного излучения для гольмиевого волоконного лазера, работающего в режиме гибридной синхронизации мод за счет НВПП+ОУНТ. На рис. 2 представлены спектры излучения и автокорреляционные функции (АКФ) для разных значений мощности накачки.

Насыщающиеся поглотители на основе одностенных углеродных нанотрубок и графена были изготовлены и охарактеризованы в рамках проекта № 18-42-130001 Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).

Литература

1. *Hemming A., et al., Optical Fiber Technology, 20(6), 621-630 (2014)*
2. *Chamorovskiy A.Y., et al., Laser Physics Letters, 9(8), 602 (2012)*
3. *Sotor J., et al., Optics Letters, 41(11), 2592-2595 (2016)*
4. *Pawliszewska M., et al., Optics Express, 25(15), 16916-16921 (2017)*
5. *Pawliszewska M., et al., Optics express, 27(8), 11361-11369 (2019)*
6. *Tolstik N., et al., In Mid-Infrared Coherent Sources (pp. MM6C-4). Optical Society of America (2016, March)*
7. *Filatova S.A., et al., Laser Physics Letters, 13(11), 115103 (2016)*
8. *Filatova S.A., et al., JOSA B, 35(12), 3122-3125 (2018)*

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА Bi:SnO-SiO_2-GeO_2 СТЕКОЛ

Галаган Б.И.[1], Денкер Б.И.[1*], Машинский В.М.[2], Сверчков С.Е.[1], Дианов Е.М.[2]

[1] *Институт общей физики им.А.М.Прохорова РАН, г.Москва*
[2] *Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва*
[*] *E-mail:* denker@lst.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16104

Существующие волоконные висмутовые лазеры излучают в спектральной области 1100- 1800 нм. В этой области находятся люминесцентные полосы висмут-содержащих оптических центров. Спектры люминесценции и усиления этих оптических центров сильно зависят от состава стеклянной матрицы. Так волоконные лазеры на основе активированных висмутом алюмосиликатных стекол излучают в области 1150 - 1220 нм, висмутовые фосфоросиликатные волокна в области 1270 - 1360 нм, активированные висмутом чисто кварцевые волокна в области 1380 -1540 нм [1], висмутовые германосиликатные волокна в области 1600-1800 нм [2].

Волоконные висмутовые лазеры уже находят практическое применение. Тем не менее исследования люминесцентных свойств висмута в различных стеклах продолжается. Большой практический интерес для телекоммуникационных систем представляет поиск активированных стеклянных матриц люминесцирующих в диапазоне 1540-1600нм. Недавно в работах [3-5] в некоторых образцах SiO_2–SnO и GeO_2–SnO стекол была обнаружена широкополосная люминесценция в этой области. В связи с этим представляло интерес исследовать люминесцентные свойства GeO_2–SnO стекол, активированных висмутом.

Основные особенности оловосодержащих стекол и их плавления описаны в [4]. В бинарной GeO_2 –SnO системе кристализационно-стабильные составы стекол могут содержать до 50% mol. SnO. Синтез должен проводиться в бескислородной атмосфере, чтобы препятствовать процессу окисления SnO в SnO_2 при этом необходимо принимать во внимание, что SnO является очень сильным восстановителем. Так добавление уже ~0.1% mol. порошкообразного Bi_2O_3 в GeO_2 –SnO шихту приводит в результате синтеза к появлению непрозрачного агломерата с включениями металлических частиц висмута. Нашей задачей было синтезировать концентрационную серию активированных висмутом SnO-GeO_2 стекол с различным соотношением SnO/GeO_2. На первом этапе работы было необходимо подобрать приемлемую с точки зрения технологии концентрацию висмута. Эксперименты показали, что прозрачные образцы 50SnO-50GeO_2 стекол получаются в диапазоне концентраций висмута 5×10^{16} - 1.2×10^{17} cm^{-3}. Для контрольных целей были синтезированы также в идентичных условиях не активированные висмутом образцы стекол 50SnO-50GeO_2 и 100GeO_2. Кроме того для сравнения люминесцентных свойств был синтезирован образец Bi:GeO_2 стекла.

Согласно [6] висмутовые эмиссионные центры образующиеся в GeO2 стеклах и люминесцирующие в области 1600 нм могут быть возбуждены в диапазоне 920-960нм. В настоящей работе мы для возбуждения люминесценции использовали либо модулированное излучение (955 нм) работавшего в непрерывном режиме лазерного диода либо излучение (955 нм) импульсного параметрического лазера. На Рис.1 приведены примеры полученных спектров люминесценции. Так максимум спектра люминесценции активированного висмутом GeO_2 стекла (кривая 1) приходится на длину волны 1650 нм и имеет полуширину ~ 210 нм., что находится в соответствии с данными [6-7]. Проведенные измерения показали, что время жизни люминесценции внутри полосы не зависит от длины волны и равно 565 μs. Эта величина близка к приведенной в [7] – 513 μs. Независимость люминесцентного времени жизни от длины волны регистрации и наблюдаемый экспоненциальный характер кривых затухания люминесценции свидетельствует о наличии в этом случае одного типа ИК-люминесцирующих центров. Добавление SnO приводит к заметным изменениям в полосе люминесценции (кривая 4, образец 20 SnO-80 GeO_2 и кривая 6, образец 50 SnO-50 GeO_2) . Как видно из Рис.1, спектр люминесценции с увеличением концентрации SnO постепенно смещается в область более коротких длин волн. В случае Bi: 50SnO-50GeO_2 стекла полуширина полосы люминесценции становится почти в два раза больше (1370 - 1750 нм). При этом кривые затухания люминесценции также претерпевают изменения – они становятся неэкспоненциальными, а время жизни люминесценции становится зависимым от длины волны регистрации (см. Рис. 1), что свидетельствует о наличии в этих стеклах разных типов ИК-люминесцирующих центров.

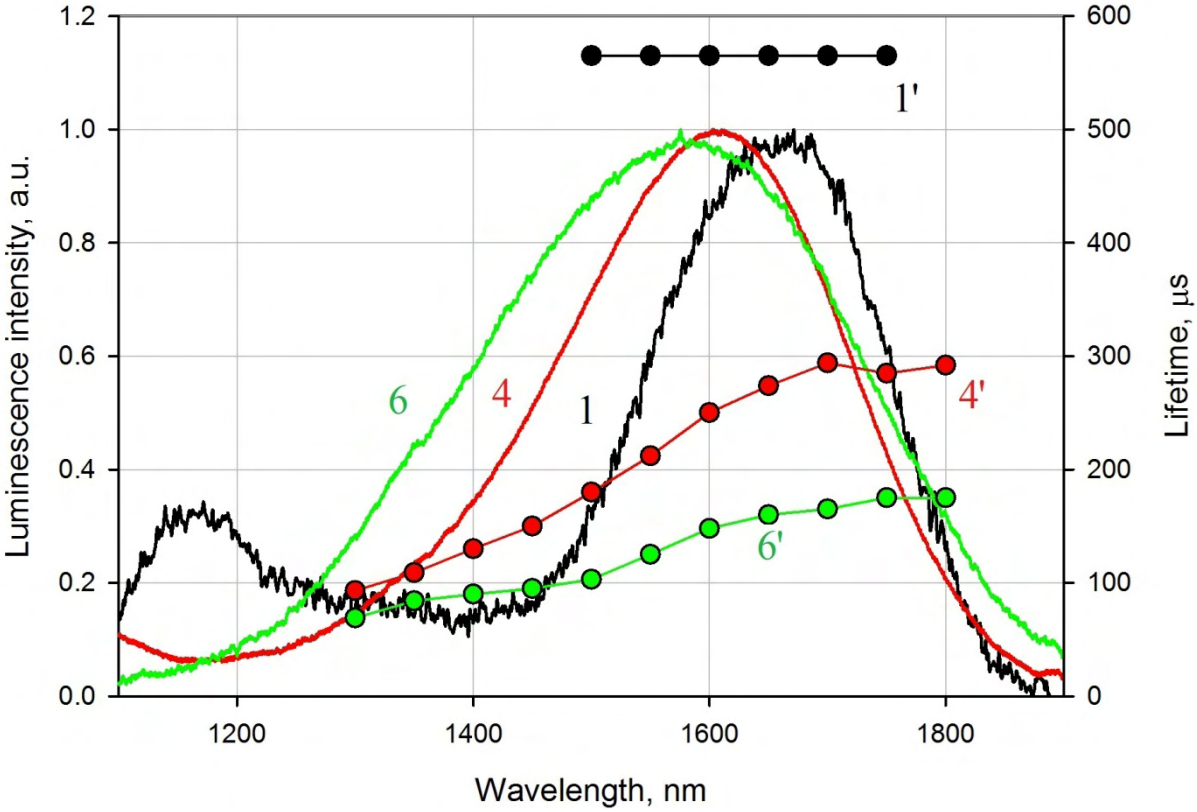


Рис.1 Спектры люминесценции (1- образец Bi:100GeO_2, 4- образец Bi: 20 SnO-80 GeO_2, 6- образец Bi:50 SnO-50 GeO_2) и зависимости времени жизни от длины волны регистрации (1'-образец Bi:100GeO_2, 4'- образец Bi: 20 SnO-80 GeO_2, 6'- образец Bi:50 SnO-50 GeO_2)

Заключение

В работе установлено, что добавление SnO существенно расширяет спектр люминесценции Bi:GeO_2 стекол и смещает его в коротковолновую сторону, перекрывая область ~1540-1600 нм, где пока не была получена генерация в активированных висмутом лазерных материалах. Лазерные усилители перекрывающие этот диапазон представляют большой интерес для телекоммуникационных систем следующего поколения.

Благодарности

Работа поддерживалась РФФИ грантом 17-02-00368 в части синтеза Bi:GeO_2 –SnO стекол и Программой Президиума РАН №32 в части разработки активированных висмутом оптических волокон.

Литература

1. *E. Dianov: Light: Science & Applications 1, 12 (2012)*
2. *S. Firstov, et al, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics PP(99):1-1(2018)*
3. *B. Denker, et al, Appl. Phys. B 120, 13(2015)*
4. *A.Chernov, et al, Applied Physics B 122, 243(2016)*
5. *B. I. Denker, et al, Laser Physics 28, 065801(2018)*
6. *A.Pynenkov, et al, Quantum Electron. 43, 174(2013)*
7. *S. Firstov, et al, Optics Express, 19, 19551(2011)*

ОБЕСЦВЕЧИВАНИЕ ИК-АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА 1550 НМ ПРИ НАГРЕВЕ ВИСМУТОВЫХ СВЕТОВОДОВ

Алышев С.В.[1*], Харахордин А.В.[1], Фирстов С.В.[1,3], Хопин В.Ф.[2], Фирстова Е.Г.[1], Мелькумов М.А.[1], Гурьянов А.Н.[2]

[1] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[2] Институт химии высокочистых веществ РАН, г. Нижний Новгород
[3] МГУ им. Н. П. Огарева, г. Саранск
[*] E-mail: alyshs@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16105

Накачка высокогерманатных световодов, легированных висмутом, на длине волны 1550 нм при комнатной температуре приводит к появлению широкополосной люминесценции с максимумом в районе 1700 нм. Это позволило создать на основе данных световодов эффективные, надёжно работающие волоконные лазеры, усилители и суперлюминесцентные источники [1].

Эксперимент, тем не менее, показал, что ситуация кардинальным образом меняется если световоды нагреть до температуры в несколько сот градусов. В этом случае оптические свойства световода начинают заметно деградировать, что проявляется в постепенном снижении интенсивности люминесценции. Дополнительные исследования показали, что данное явление связанно с разрушением—фотообесцвечиванием—активных центров при одновременном воздействии лазерного излучения и температуры. Этот процесс, однако, обратим и концентрация активных центров восстанавливается, если световод отжигать с выключенной накачкой. Фотообесцвечивание наблюдалось в световодах данного типа и ранее, однако, в этих работах воздействие осуществлялось видимым или ультрафиолетовым лазерным излучением, и процесс шёл уже при комнатной температуре [2].

В данной работе приводятся результаты теоретического исследования данного явления и их сопоставление с экспериментальными данными. В качестве отправной точки на пути понимания этого нового эффекта нами была предложена модель, которая схематически изображена на Рис. 1. При построении модели мы придерживались подхода, ранее применявшегося при рассмотрении явления фоточувствительности [3]. Модель включает в себя как оптические, так и предполагаемые фотохимические процессы. **A** и **A*** обозначают основное и возбуждённое состояние висмутового активного центра, **B** – продукт фотохимической реакции, соответствующий некоторому точечному дефекту, ассоциированному с ионом висмута. Данный дефект не имеет характерных инфракрасных полос поглощения и люминесценции. После включении накачки мощности P, устанавливается определённая населённость состояния **A***, обусловленная балансом процессов поглощения и спонтанного излучения –. Из состояния **A*** есть термически-активируемый путь в состояние **B** с константой скорости реакции :

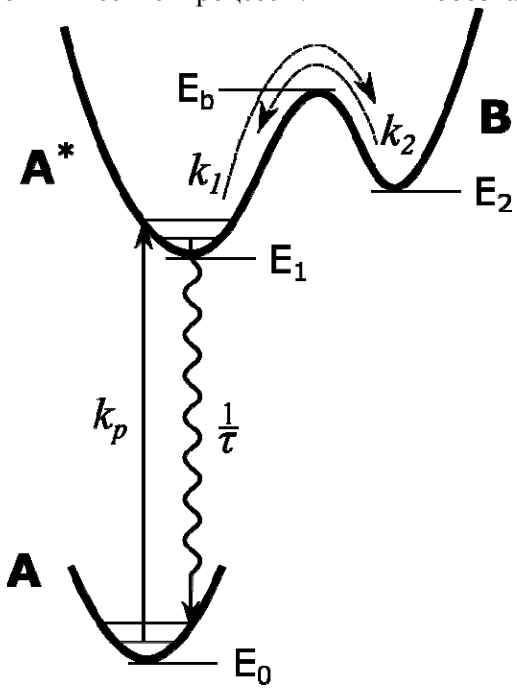


Рис. 1. Схематическое представление предлагаемой модели

. Существует также обратный процесс с константой Таким образом, явление можно рассматривать как обратимую химическую реакцию, в которой в качестве реагентов выступают висмутовые активные центры, а продуктами реакции служат некоторые оптически неактивные точечные дефекты, ассоциированные с висмутом. Константы скоростей реакций определяются согласно известному закону Аррениуса: —— . При заданной температуре система стремиться достичь равновесия, в котором прямой и обратный процессы балансируют друг друга.

Упомянутые явления могут быть описаны системой скоростных уравнений следующего вида:

$$\frac{d[A]}{dt} = -k_p \cdot [A] \cdot P + \frac{[A^*]}{\tau}$$
$$\frac{d[A^*]}{dt} = k_p \cdot [A] \cdot P - \frac{[A^*]}{\tau} - k_1 \cdot [A^*] + k_2 \cdot [B] \quad (1)$$
$$\frac{d[B]}{dt} = k_1 \cdot [A^*] - k_2 \cdot [B]$$

Чтобы учесть неоднородность сетки стекла, необходимо допустить, что характерные значения энергии (E_0, E_1, E_2, E_b) принадлежат некоторому статистическому распределению. В нашей работе мы исходили из упрощающего предположения статистической независимости этих величин (отсутствия эффекта кросс-корреляции) и учитывали распределение только для E_b. Для других величин использовались их средние значения.

Система уравнений (1) интегрировалась численно для каждого значения E_b из распределения. Каждое полученное решение вносило вклад в полное решение пропорционально относительной доли центров, имеющих потенциальный барьер E_b. В качестве распределения использовалась гауссова функция вида $p(E_b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(E_b - \langle E_b \rangle)^2}{2\sigma^2}\right)$, где средние значение $\langle E_b \rangle$ и стандартное отклонение σ рассматривались как подгоночные параметры.

Выяснилось, что модель хорошо воспроизводит динамику фотообесцвечивания висмутовых активных центров и их последующее восстановление при отжиге, для среднего значения энергии активации равного 1.13 ± 0.03 эВ и стандартного отклонения энергии активации (ширины распределения) равного 0.15 ± 0.04 эВ. Данные значения согласуются с предыдущими экспериментальными исследованиями.

Методика проведения экспериментов по обесцвечиванию и отжигу световодов, полученные экспериментальные результаты и их сопоставления с предложенной моделью будут детально изложены во время доклада.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №18-32-20003.

Литература

1. *Firstov S., et al, IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. 24, 0902415 (2018)*
2. *Firstov S., et al, J. Luminescence 182, 87-90 (2017)*
3. *Poumellec B., J. Non- Crystalline Solids 239, 108–115 (1998)*

ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫМ ВОДОРОДОМ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КВАРЦЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ER^{3+} В СЕРДЦЕВИНЕ

Базакуца А.П.*, Бутов О.В.

Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН
* *E-mail:* abazakutsa@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16106

Введение

Эрбиевые одночастотные волоконные лазеры с распределённой обратной связью (РОС) находят всё больше применений в современной сенсорике и телекоммуникациях [1, 2]. Резонатор такого лазера представляет собой короткий участок кварцевого оптического волокна с высоким содержанием эрбия в сердцевине, в котором записана волоконная брэгговская решётка показателя преломления, как правило, с фазовым сдвигом в структуре. Самым распространённым и удобным способом записи такой решётки является УФ облучение волокна эксимерным лазером через фазовую маску, для чего необходимо, чтобы волокно обладало фоточувствительностью. Основным методом повышения фоточувствительности оптического волокна является насыщение его молекулярным водородом. Присутствие водорода в сетке стекла может приводить не только к изменению показателя преломления, но и к росту поглощения, а также ухудшению люминесцентных свойств активных стекол [3].

Темой нашей работы является исследование влияния насыщения водородом на кинетику люминесценции активных волокон, легированных эрбием в различной концентрации.

Эксперимент

В наших экспериментах мы использовали волокна, легированные эрбием в высокой I и малой II концентрации. Все активные волокна были вытянуты из преформ, изготовленных по технологии SPCVD [4]. Параметры образцов указаны в таблице 1:

Таблица 1. Параметры образцов

Образец	Состав сердцевины	Поглощение на 1550 нм, дБ/м	Исходное время жизни люминесценции, мс
I	Si – Er – Al	180	5.41
II	Si – Er	70	11.78

При подготовке к эксперименту, образцы волокон обоих типов были помещены в камеру высокого давления, наполненную водородом до давления 100 атм. Участок камеры с волокнами был нагрет до температуры 100 ^{o}C, что позволило достичь равновесной концентрации водорода $1.04*10^{20}$ $см^{-3}$ в волокне за одни сутки. После насыщения водородом образцы длиной 25 мм помещались под излучение импульсного эксимерного лазера с длиной волны излучения 193 нм с длительностью импульса 20 нс. Полная экспонированная доза для каждого облучённого образца составила 750 J/cm^2.

Люминесценция образцов возбуждалась при помощи лазерного диода на длину волны 980 нм, позволявшего ввести в сердцевину активного волокна излучение мощностью 10 мВт. Для измерения спектров люминесценции был использован оптический спектроанализатор. Для измерения кинетики люминесценции образец активного волокна размещался напротив InGaAs фотодиода с кремниевым оптическим фильтром. Сигнал фотодиода регистрировался высокоскоростным цифровым осциллографом.

Результаты и обсуждение

Как мы выяснили, насыщение водородом и УФ облучение приводит лишь к изменению интенсивности люминесценции образцов обоих типов, причём интенсивность люминесценции высоколегированных образцов типа I падает заметно меньше интенсивности люминесценции слаболегированных образцов типа II. Наиболее информативно изменение кривых кинетики люминесценции, которое показано на рис. 1:

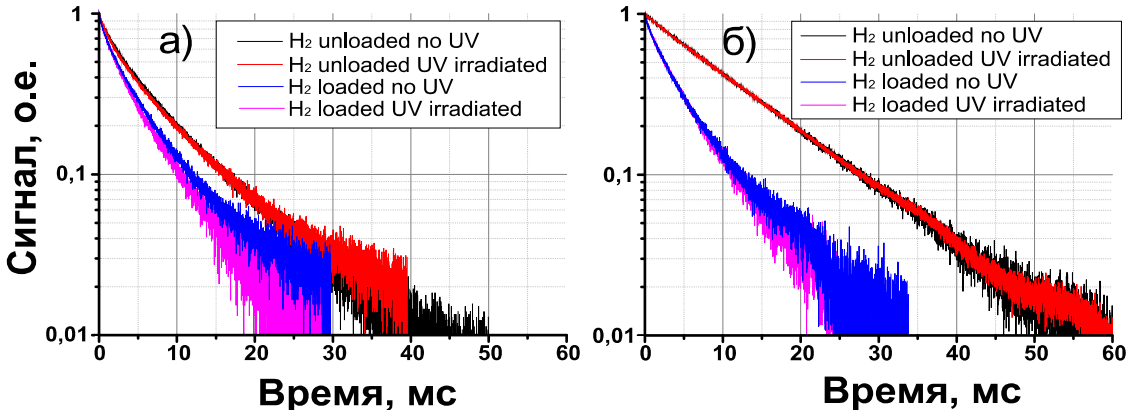


Рис. 1 Кинетика люминесценции образцов типа I а) и II б)

Видно, что изменение кривых кинетики в результате насыщения водородом и УФ облучения принципиально отличается для образцов типа I и II. В образцах типа II насыщение H_2 приводит к изменению формы кривой кинетики из экспоненциальной в так называемую «растянутую экспоненту» [5]:

$$I(t) = I_0 * exp\left(\left(\frac{-t}{\tau}\right)^{\beta}\right) + const, \quad (1)$$

τ имеет размерность времени, β < 1— безразмерный параметр, характеризующий отклонение формы кривой кинетики от экспоненциального вида. Что до образцов типа I, кривая кинетики изначально имеет форму, описываемую формулой (1), и насыщение водородом приводит только к уменьшению τ, но практически не влияет на β:

Таблица 2. Параметры кинетики люминесценции образцов типа I и II

	Sample	H_2 unloaded		H_2 loaded	
		τ, ms	β	τ, ms	B
UV unirradiated	I	5.41	0.76	3.55	0.74
	II	11.78	0.97	3.93	0.76
UV irradiated	I	4.82	0.71	3.30	0.74
	II	11.73	0.96	3.97	0.76

Данная форма кривой кинетики свидетельствует о том, что релаксация возбуждения активных центров сопровождается процессом переноса энергии. Так, для сильнолегированных образцов типа I, имеет место передача возбуждения между соседними ионами Er^{3+}, в то время как для образцов типа II возможна только передача возбуждения от ионов эрбия к молекулам H_2. При этом видно, что насыщение H_2 приводит к четырехкратному уменьшению времени жизни образцов типа II и практически не влияет на образцы типа I. В то же время, УФ облучение практически не влияет на кинетику люминесценции образцов типа II, но приводит к заметному уменьшению τ для I.

Наблюдаемые эффекты могут быть связаны как с различным уровнем кластеризации эрбия в образцах типа I и II, так и с различным окружением активных центров. В соответствии с [6], солегирование сердцевины образцов типа I алюминием может приводить к образованию т.н. «сольватирующей оболочки» вокруг активных центров, приводя к уменьшению вероятности деактивации возбуждения в результате столкновения с молекулой H_2.

Мы благодарим группы Голанта К.М. и Чаморовского Ю.К. из фрязинского филиала ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН за предоставленные образцы активных волокон.

Работа поддержана РФФИ (17-07-01388 А).

Литература

1. *E. Desurvire, "Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications" (Wiley, 1994)*
2. *V. Mizrahi et al, J. Lightwave Technol., LT-11 (12), 20021-2025 (1993)*
3. *A.P. Bazakutsa and K.M. Golant, J Non-Cryst. Solids, 411, 68–75 (2015)*
4. *K.M. Golant, in Deffects in SiO_2 and Related Dielectrics: Science and Technology, 427 – 452 (2000)*
5. *J. Phillips, Rep. Prog. Phys., 59, 1133–1207 (1996)*
6. *F. Funabiki et al, J. Ceramic Soc. Japan 120(11), 447 – 457 (2012)*

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ЭРБИЕВЫХ КОМПОЗИТНЫХ СВЕТОВОДОВ

Галаган Б.И.[1], Денкер Б.И.[1], Камынин В.А.[1], Поносова А.А.[1,2], Сверчков С.Е.[1], Семенов С.Л.[3], Цветков В.Б.[1,4]

[1] *Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва*
[2] *Российский квантовый центр, г. Москва*
[3] *Научный центр волоконной оптики Российской академии наук, г. Москва*
[4] *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва*
[*] *E-mail:* nastya-aleksi@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16107

К актуальным задачам волоконной оптики относится увеличение концентрации ионов эрбия в активных световодах для источников излучения 1.53-1.55 мкм. Это обусловлено потенциальной возможностью улучшения мощностных и энергетических параметров излучения за счет увеличения порога нежелательных нелинейных эффектов, характерных для протяженных активных волоконных сред. Использование высококонцентрированных активных световодов должно облегчить создание одночастотных лазеров с высокой средней мощностью [1, 2] и импульсных лазеров с высокой частотой повторения импульсов [3, 4].

Наиболее перспективными материалами для высококонцентрированных эрбиевых световодов (ЭС) являются лазерные фосфатные стекла. В ряде работ продемонстрированы рекордно высокие коэффициенты усиления на единицу длины полностью фосфатных световодов [5-7]. Однако подобные световоды обладают серьезными недостатками, сдерживающими их применение на практике. Оптические и механические свойства фосфатных стекол деградируют со временем под воздействием окружающей среды, и кроме того, полностью фосфатные световоды практически не поддаются сварке с кварцевыми из-за значительной разности физических свойств этих стекол.

Коллективом авторов ИОФ РАН и НЦВО РАН были разработаны композитные световоды с сердцевиной из высококонцентрированного фосфатного стекла и оболочкой из кварцевого стекла. Предполагалось, что композитная конструкция световодов позволит использовать преимущества обоих стёкол и обеспечит одновременно высокое усиление на единицу длины и высокую механическую прочность.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании свойств разработанных световодов, легированных 1 вес.% и 3 вес.% Er^{3+} , и параметров волоконных источников на их основе.

Для сердцевины световодов были использованы лазерные стекла, содержащие 65 мол.% P_2O_5, 7 мол.% Al_2O_3, 12 мол.% B_2O_3, 9 мол.% Li_2O и 7 мол.% окислов редкоземельных ионов $x{\cdot}Er_2O_3$-$(7-x){\cdot}Gd_2O_3$. В процессе вытяжки световодов состав существенно изменился из-за взаимной диффузии компонентов стёкол сердцевины и оболочки (Рисунок 1). Концентрация P_2O_5 в сердцевинах световодов снизилась до 20-25 мол.%, а SiO_2 увеличилась до 75 мол.%. Аналогичная концентрация P_2O_5 может быть получена при помощи традиционной технологии изготовления заготовок активных оптических волокон методом модифицированного химического парофазного осаждения (MCVD). Тем не менее, концентрации оптически активных и пассивных редкоземельных ионов в сердцевине исследованных световодов, как минимум, на порядок превышают концентрации, достижимые MCVD.

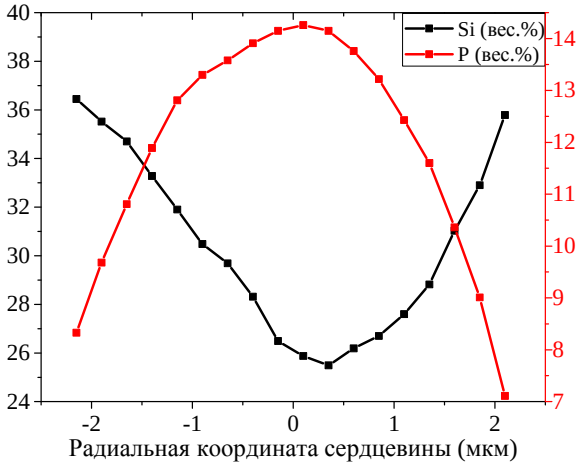


Рис. 1. Распределение компонентов стекла в поперечном сечении сердцевины волокна (3 вес.% Er^{3+}, диаметр 100 мкм)

Исследованные оптические, геометрические и спектроскопические свойства изготовленных световодов приведены в Таблице 1.

Благодаря кварцевой оболочке, сварки между композитными и кварцевыми волокнами хорошо воспроизводились при использовании стандартного сварочного аппарата для телекоммуникационных волокон. Потери на сварках составляли от 0.12 дБ до 1.1 дБ.

Таблица 1. Свойства эрбиевых световодов (ЭС)

Параметр	ЭС#1	ЭС#2
Концентрация ионов Er^{3+} в заготовке, вес.% ($см^{-3}$)	1 ($1.02\cdot10^{20}$)	3 ($3.06\cdot10^{20}$)
Пик поглощения слабого сигнала @980 нм, дБ/см	0.44	1.25
Пик поглощения слабого сигнала @1535 нм, дБ/см	1.4	3.65
Пик усиления слабого сигнала @1535 нм, дБ/см	1.6	3.10
Диаметр сердцевины, мкм	4.3	3.6
Числовая апертура NA	0.265	0.288
Длина волны отсечки, нм	1490	1350

На основе описанных экспериментальных активных световодов реализованы полностью волоконные широкополосные источники излучения, непрерывные волоконные лазеры, усилители и импульсные лазеры.

В однопроходных суперлюминесцентных волоконных источниках (СВИ) со встречной накачкой получено широкополосное излучение. Спектры излучения имели сложную форму с двумя пиками на длинах волн 1535 нм и 1543 нм и шириной на полувысоте порядка 2 нм и 5 нм, соответственно. Максимальная выходная мощность составила ~30 мВт при длине активной среды всего 50 см, тогда как в случае кварцевых эрбиевых световодов для достижения такого уровня мощности требуются десятки метров.

Показано, что в композитных световодах может быть достигнута высокая эффективность лазерной генерации. Выходная мощность непрерывного волоконного лазера на длине волны 1535 нм достигала 105 мВт при длине активного световода, легированного 3 вес.% Er^{3+} , всего 15 см. Дифференциальная эффективность по отношению к поглощенной мощности накачки с учетом потерь на сварках достигала порядка 38 %. Таким образом, высококонцентрированные световоды перспективны для создания одночастотных лазеров с высокой средней мощностью.

Благодаря уникальному составу сердцевины, получены высокие удельные коэффициенты усиления слабого сигнала - 1.6 дБ/см (1 вес.%) и 3.1 дБ/см (3 вес.%) на длине волны 1535 нм. Эти значения ниже теоретически предсказанных (4.7±0.1 дБ/см для 3 вес. % и 1.80±0.05 дБ/см для 1 вес.%), что обусловлено кооперативными процессами. Тем не менее, экспериментально полученный коэффициент усиления 3.1 дБ/см в световоде, легированном 3 вес.% ионов эрбия, является самым высоким среди волокон с аналогичной конструкцией и близким к значениям усиления полностью фосфатных световодов (от 3 до 5 дБ/см).

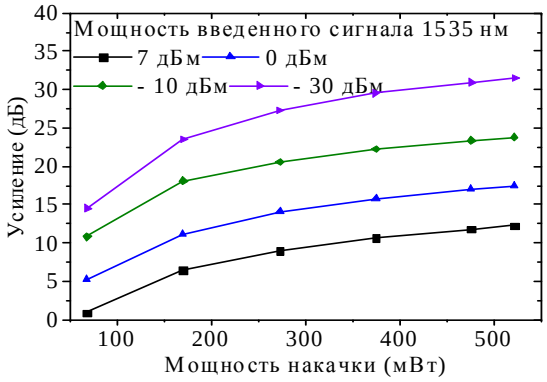


Рис. 2. Усиление в 10 см отрезке световода, легированного 3 вес.% Er^{3+}

Использование композитного световода, легированного 3 вес.% эрбия, длиной не более 19 см в импульсном волоконном лазере с синхронизацией мод на нелинейном вращении плоскости поляризации позволило получить параметры генерации фемтосекундных импульсов аналогичные тем, что могут быть получены с применением нескольких метров эрбиевых кварцевых световодов.

Таким образом, композитные световоды с сильнолегированной Er^{3+} фосфатной сердцевиной в кварцевой оболочке наиболее перспективны для создания усилителей слабого сигнала и волоконных лазеров, требующих короткую длину резонатора, а именно для одночастотных лазеров и лазеров с высокой частотой повторения импульсов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Ольге Николаевне Егоровой (НЦВО РАН) за предоставленные световоды и ООО "НЦВО-Фотоника" за волоконные брэгговские решетки. Работа выполнена при частичной поддержке программы президиума РАН № 5 "Фотонные технологии в зондировании неоднородных сред и биообъектов", РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-01010 и РНФ в рамках проекта 17-12-01564.

Литература

1. *Li L., et al, Appl. Phys. Lett., 85, 2721–3 (2004)*
2. *Qiu T., IEEE Photonic Tech. L., 16, 2592–2594 (2004)*
3. *Ye N.N., et al, Laser Phys., 22, 1247-1251 (2012)*
4. *Thapa R., et al., Opt. Lett., 39, 1418-1421 (2014)*
5. *Hwang B.C., et al, IEEE Photonic Tech. L., 13(3), 197-199 (2001)*
6. *Boetti N.G., et al, J. Opt., 17, 065705 (2015)*
7. *Xu S. H., et al, Opt. Express, 18, 1249-1254 (2010)*

ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 2,718 НМ В АКТИВНОМ ТЕЛЛУРИТНОМ СВЕТОВОДЕ

Муравьев С.В.[1,2*], **Дорофеев В.В.**[2,3], **Колташев В.В.**[4], **Ким А.В.**[1]

[1] *Институт прикладной физики РАН, г. Н. Новгород*
[2] *Центр лазерной технологии и материаловедения, г. Москва*
[3] *Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девятых РАН, г. Н. Новгород*
[4] *Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва*
[*] *E-mail: sergey-muravyev@yandex.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16108

Лазерные системы среднего ИК-диапазона (2,5-5 мкм) используются в различных областях науки и технологий: медицина, спектроскопия, мониторинг окружающей среды и другие. В настоящее время в основе большинства лазерных систем среднего ИК-диапазона используются твердотельные лазеры или параметрические генераторы света. Волоконные лазеры среднего ИК-диапазона также активно развиваются. Наиболее подробно исследованы волоконные лазеры на основе фторидных световодов, допированных ионами эрбия (Er:ZBLAN) [1, 2]. Средняя мощность выходного излучения эрбиевых фтор-цирконатных волоконных лазеров достигает нескольких десятков ватт на длине волны 2,8 мкм. Тем не менее, существует проблема с гигроскопичностью в этих световодах, которая до сих пор не решена.

В представленной работе мы экспериментально и теоретически исследовали новые активные теллуритные световоды, допированные ионами эрбия. Известно, что волокна на основе высокочистых теллуритных стекол являются потенциально перспективными материалами для создания лазеров среднего ИК-диапазона. Одно из важных их преимуществ является то, что такие световоды существенно менее гигроскопичны по сравнению с фтор-цирконатными волокнами.

В нашей группе были созданы волокна с высокой концентрацией ионов эрбия в сердцевине Er_2O_3 (0,4% мол.) и с тремя отражающими оболочками. Они были изготовлены из высокочистых стекол состава TeO_2-WO_3-La_2O_3-Bi_2O_3 с низким поглощением гидроксильных групп (порядка 0,01 $см^{-3}$ в максимуме полосы ~3 мкм). Для исследований использовались образцы световодов с диаметрами сердцевины 10 мкм, внешней оболочки ~200 мкм и с защитным полимерным покрытием. Исследовались генерационные свойства электронного перехода $^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ на длине волны около 2,718 мкм при диодной накачке перехода $^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ на длине волны 0,975 мкм.

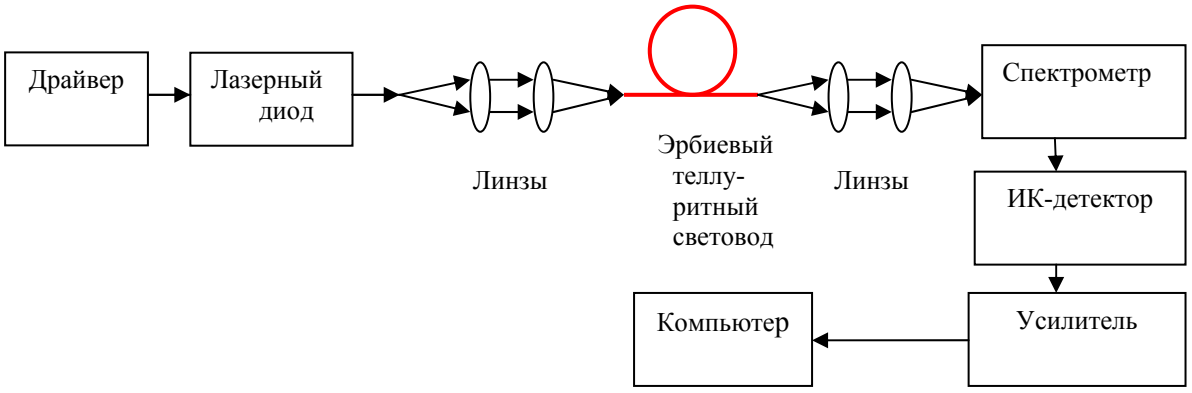


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования генерационных свойств теллуритных световодов, легированных ионами Er^{3+}

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Зеркала лазерного резонатора были напылены на непосредственно на торцы активного волокна. Входное зеркало имело 100% отражение, а выходное - 97% на длине волны генерации. Пропускание излучения диодной накачки на длине волны 975 нм для глухого зеркала составило 60%. Нами впервые была получена лазерная генерация в активном теллуритном световоде, допированном ионами эрбия, на длине волны 2,718 мкм. Энергия лазерных импульсов на выходе из активного волокна длиной 60 см составила ~50 нДж при длительности импульса 3 мкс. Оптический спектр импульсов генерации показан на рис.2.

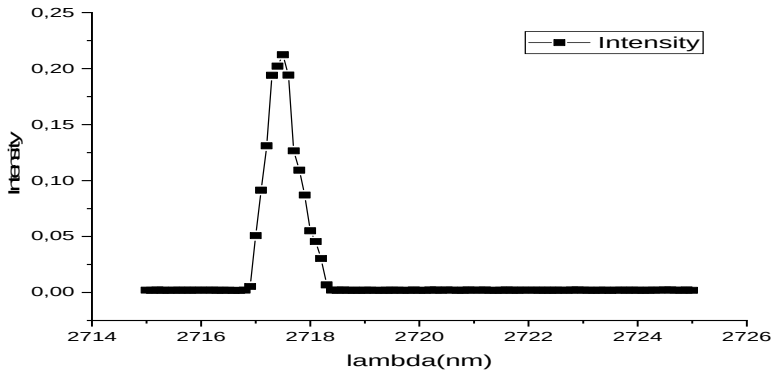


Рис.2. Спектр лазерного излучения на выходе теллуритного световода при импульсной накачке на длине волны 975 нм

Были также исследованы люминесцентные и усилительные свойства активного эрбиевого теллуритного светода от длины волокна и мощности диодной накачки. В качестве затравочного сигнала использовалось суперконтинуумное излучение, полученное на выходе отрезка германатного волокна на вход которого подавалось фемтосекундное излучение эрбиевой волоконной лазерной системой. Суперконтинуумное излучение простиралось примерно до длины волны волны 2.9 микрон. Максимальное усиление на проход входного сигнала составило 2,5 раза.

Литература

1. *Maes F., et al, Optics Express 27, 2170-2183 (2019)*
2. *Aydin Y., et al, Opt. Lett. 43, 4542-4545 (2018)*

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭРБИЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ С КОРОТКИМ РЕЗОНАТОРОМ

Смирнов А.М.[1,2], Базакуца А.П.[1], Бутов О.В.[1]

[1] *ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, г. Москва*
[2] *МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва*
[*] *E-mail:* alsmir1988@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16109

В работе представлены результаты экспериментального исследования особенностей генерации эрбиевых волоконных лазеров с коротким резонатором. Изучены их режимы генерации при непрерывной накачке на длине волны 976 нм. Исследована зависимость параметров и режимов генерации от длины резонатора, мощности накачки и внешней температуры.

Эрбиевые волоконные лазеры широко используются в современной волоконной оптике [1-3]. Особый интерес представляют одночастотные волоконные лазеры с узкой полосой генерации [4,5]. Оптический диапазон 1,5 мкм, характерный для эрбиевых лазеров, позволяет использовать их для оптических сенсоров [6,7], оптической телекоммуникации [8,9] и спектроскопии. Особенностью таких лазеров является высокая вероятность генерации стабильных импульсов. Параметры импульсного режима зависят как от состава и концентрации легирующих элементов в сердцевине волокна, так и от внешних параметров, таких как мощность накачки и рабочая температура.

Используемое в данной работе активное волокно было изготовлено из преформы с высокой концентрацией эрбия в сердцевине SiO_2:Al_2O_3/Er_2O_3 и нелегированной кварцевой оболочкой. Преформы были синтезировали плазмохимическими методом SPCVD [10]. Плазмохимический синтез позволил изготовить сильно легированное эрбием кварцевое волокно (поглощение на 1530 нм ≈180 дБ/м, 0,3 моль.% Er_2O_3). На основе данного световода были изготовлены три эрбиевых лазера по классической схеме Фабри-Перо с двумя брэгговскими зеркалами (FP-EDFL) с длиной резонатора 50 мм, 80 мм и 180 мм. Коэффициенты отражения выходного и глухого зеркал составили 0,55 и 0,95 соответственно. Брэгговские решетки записывались с использованием фазовой маски излучением эксимерного лазера ArF непосредственно в сердцевине активного волокна. Длина волны генерации волоконного лазера определялась периодом брэгговской решетки и составляла 1560 нм. Для стабилизации температурного режима генерации активная часть волокна с записанными решетками помещались в кювету с водой или жидким азотом.

В работе был получен как режим непрерывном генерации, так и режим импульсной генерации, соответствующей пассивной модуляции добротности. Установлена зависимость параметров и режимов генерации от длины резонатора, мощности накачки и температуры окружающей среды. При комнатной температуре формирование импульсного режима генерации характерно для лазеров, где в качестве активатора используются ионы эрбия с высокой концентрацией. Пассивная модуляция добротности в сильнолегированных эрбиевых лазерах реализуется за счет эффекта противоположного эффекту насыщения поглощения [13]. Образование ионных пар эрбия (мини-кластеров) приводит к усилению процесса ап-конверсии [14,15]. Поглощение растет при увеличении интенсивности поля, а не насыщается. Процессы ап-конверсии снижают эффективность накачки лазерной системы за счет ускоренной депопуляции верхнего рабочего уровня эрбия. Рост депопуляции приводит к падению эффективности и увеличению порога генерации лазера, а также к переходу на импульсный режим генерации [13].

Увеличение частоты следования импульсов (рис.1a) и одновременное уменьшение длительности импульсов (рис.1b) с увеличением мощности накачки было измерено для лазеров с длиной резонатора 50 мм, 80 мм и 180 мм при комнатной температуре. Зависимость пиковой выходной мощности от мощности накачки исследуемых лазеров представлена на Рис.1c. Полученные режимы зависят от трех параметров: концентрации ионных пар, времени жизни фотона и скорости накачки [14]. В нашем эксперименте мы варьировали время жизни фотона, изменяя длину резонаторов волоконных лазеров. Интенсивность поля растет с субнаносекундным временам, что следует из оценки времени жизни фотона в резонаторе для лазера FP-EDFL: $\tau_l = 2L/[c(1 - r_1 r_2)]$, где r_1 и r_2 коэффициенты отражения двух зеркал, а L-длина резонатора. Согласно теоретической модели, представленной в работе [13], с увеличением времени жизни фотона за счет увеличения длины резонатора увеличивается длительность импульса (рис.1b) и уменьшается частота следования импульсов (рис.1a).

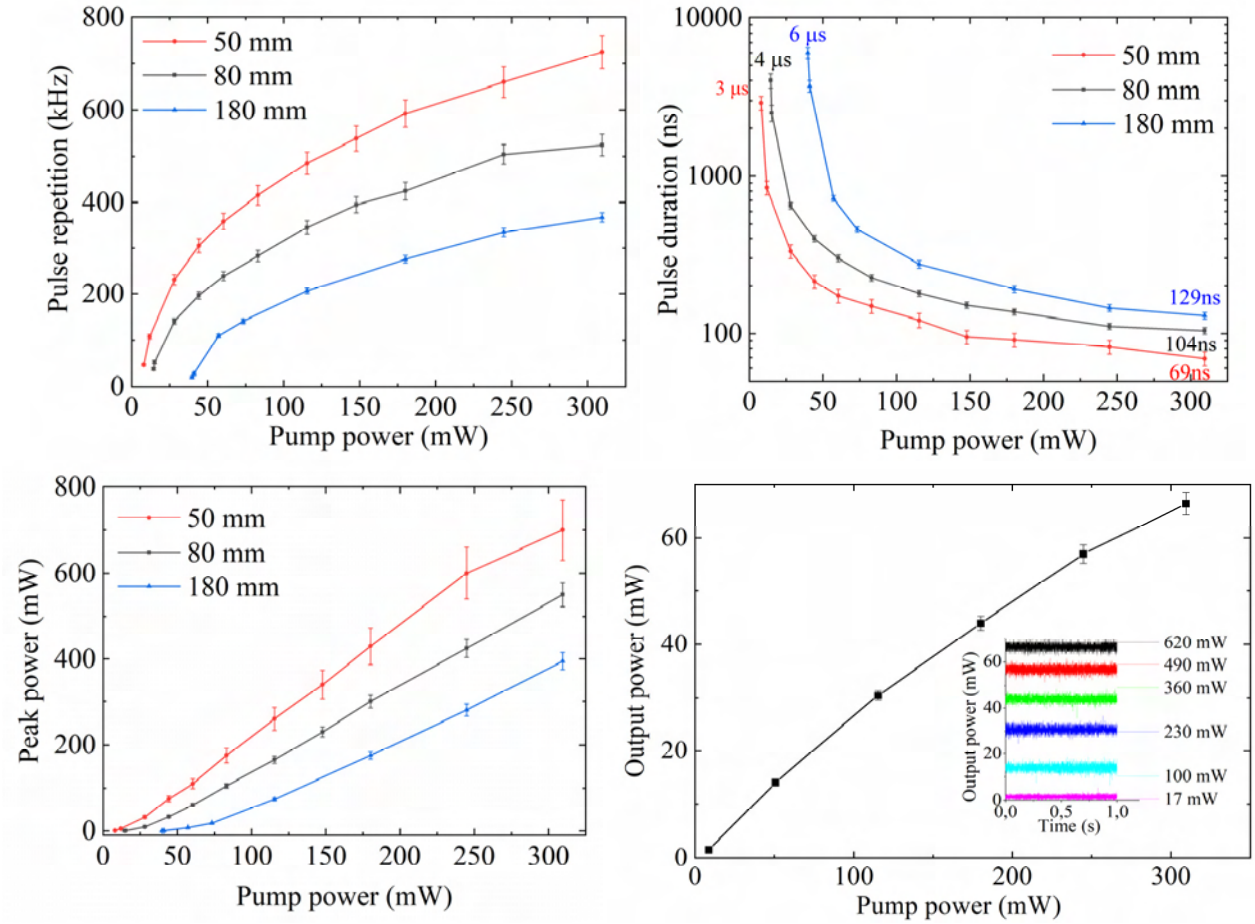


Рис. 1. Зависимость частоты (a), длительности (b) и пиковой выходной мощности (c) импульсов волоконных лазеров от мощности накачки при 300 K. d) Зависимость выходной мощности непрерывной генерации волоконного лазера с длиной резонатора 50 мм от мощности накачки при 77 K

При температуре жидкого азота 77 K был реализован стабильный режим непрерывной генерации сильно легированного эрбиевого волоконного лазера (рис. 1d). Теоретически было показано [13], что этот эффект может быть объяснен уменьшением процесса ап-конверсии в ионных кластерах эрбия и, следовательно, увеличением времени жизни верхнего рабочего состояния, влияющего на переход к импульсному режиму. Замедление процессов ап-конверсиии связано с энергетическим рассогласованием в этом процессе, который возможен при взаимодействии с фононами. При низких температурах энергия фононов уменьшается, что приводит к переключению с импульсного режима на непрерывный режим генерации волоконного эрбиевого лазера.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (проект 17-07-01388).

Литература

1. *A. Bellemare, Progress in Quantum Electronics 27, 211-266 (2003)*
2. *J.D. Bradley et al, Laser & Photonics Reviews 5, 368-403 (2011)*
3. *J. R. Weber, et al Nature 393, p. 769 (1998.*
4. *K. Iwatsuki, et al, Electronics Letters 26, pp. 2033-2035 (1990)*
5. *O.V. Butov, et al, JOSA B 34, A43-A48 (2017)*
6. *O.V. Butov, et al, PIERS Spring, St Petersburg, Russia, 22–25 May, 1594 - 1597 (2017)*
7. *Y. Gong, et al, IEEE Photonics Technology Letters 21, 1725-1727 (2009)*
8. *R.A. Pérez-Herrera, et al, Journal of Lightwave Technology 27, 2563-2569 (2009)*
9. *U. Keller, Nature 424, 831 (2003)*
10. *S. Kim, et al, Optics letters 39, 2986-2989 (2014)*
11. *K.M. Golant, XXI International Congress on Glass (2007)*
12. *A. Kholodkov, et al, Optical materials 27, 1178-1186 (2005)*
13. *A.M. Smirnov, et al, ACS Photonics 5, 5038-5046 (2018)*
14. *F. Sanchez, et al, Phys. Rev. A. 48, 2220-2229 (1993)*
15. *W. Loh, Optics letters 21, 734-736 (1996)*

ГЕНЕРАЦИЯ СУПЕРКОНТИНУУМА В ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ВОЛОКНАХ ПРИ НАКАЧКЕ Cr^{2+}:ZnSe ЛАЗЕРОМ

Леонов С.О.[1*], Ванг Ю.[2], Ширяев В.С.[3], Снопатин Г.Е.[3], Степанов Б.С.[3], Плотниченко В.Г.[4], Карасик В.Е.[1], Гальцерано Д.[2]

[1] Научно-образовательный центр «Фотоника и ИК техника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
[2] Миланский технический университет, г. Милан
[3] Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН, г. Нижний Новгород
[4] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[*] E-mail: leonov.st@ya.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16110

Введение

На сегодняшний день наблюдается интенсивное развитие широкополосных источников в среднем ИК-диапазоне, что объясняется наличием в этом спектральном диапазоне линий поглощения различных органических молекул [1, 2]. Сейчас исследуются несколько конфигураций устройств для получения суперконтинуума в среднем ИК-диапазоне – с использованием нелинейного волокна [3] или специального волновода [4]. Для генерации суперконтинуума в среднем ИК-диапазоне необходимо использовать материалы, прозрачные в диапазоне 1 – 10 мкм, и обладающие необходимыми параметрами по дисперсии (D), нелинейности (γ) и эффективной площади моды (A_{eff}). В качестве материала для изготовления волокна наиболее перспективным представляется использование «мягких» стекол, таких как халькогенидные, фторидные и теллуритные стекла [5].

В данной работе представлены экспериментальные результаты по генерации суперконтинуума в тейпированных микроструктурированных волокнах с подвешенной сердцевиной из $As_{39}Se_{61}$ при накачке импульсами от Cr^{2+}:ZnSe лазера длительностью 35 фс, частотой повторения 170 МГц и средней мощностью до 100 мВт на длине волны 2,4 мкм.

Экспериментальные результаты

Экспериментальная установка состоит из источника фемтосекундных импульсов на основе кристалла Cr^{2+}:ZnSe, изолятора, системы для управления дисперсией излучения накачки, тестируемого волокна и оптического анализатора спектра (рис. 1). В качестве тестируемого волокна использовались тейпированные микроструктурированные световоды с подвешенной сердцевиной из $As_{39}Se_{61}$ с длиной тейпера 10 мм и диаметром сердцевины 1,7 мкм. На рисунке 2а приведены результаты измерения дисперсии участка волокна без тейпера с диаметром сердцевины 10 мкм.

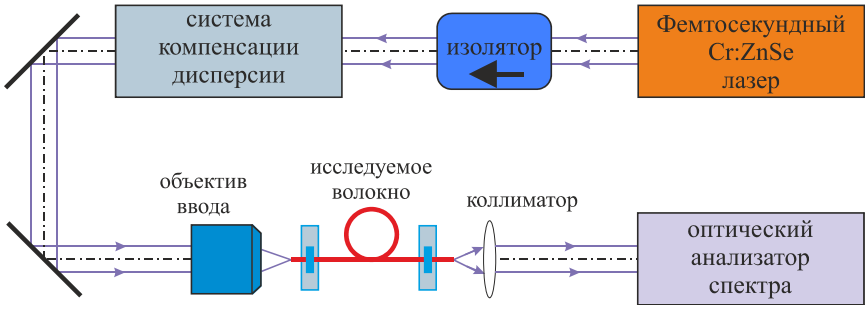
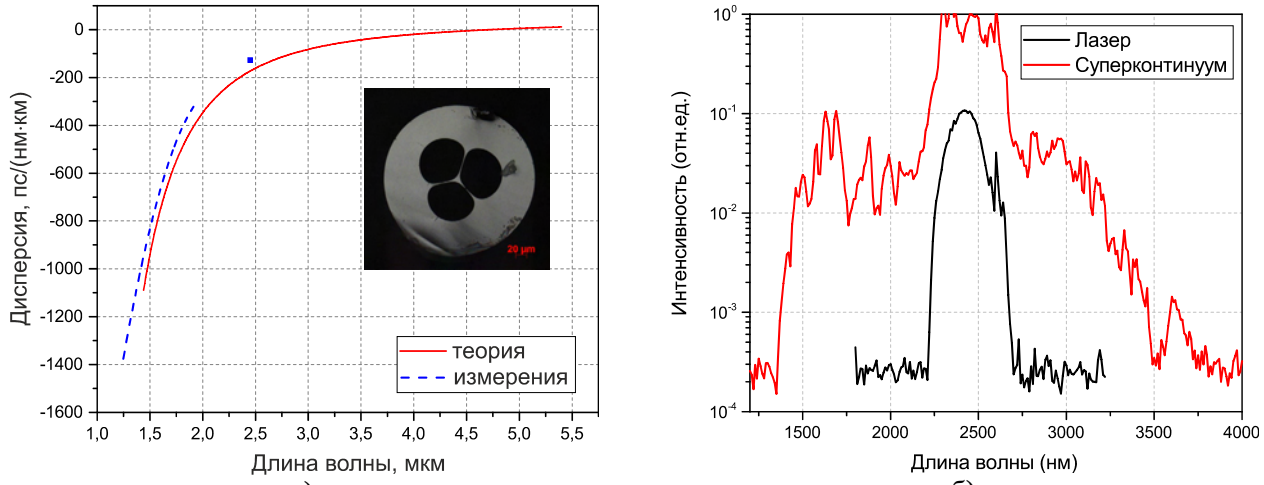


Рис. 1. Схема установки для генерации суперконтинуума в тейпированном микроструктурированном волокне

Излучение на выходе исследуемого волокна коллимировалось линзой CaF_2 без просветляющего покрытия и направлялось на оптический анализатор спектра. Исходный спектр лазера и спектр генерации суперконтинуума при мощности накачки 95 мВт представлен на рисунке 2б. Мощность излучения на выходе волокна в этом случае была равна 35 мВт, что соответствует эффективности ввода 59% с учетом коэффициента отражения Френеля от двух торцов волокна.



а) б)

Рис. 2. а) Зависимость дисперсии для волокна в области вне тейпера (диаметр сердцевины 10 мкм). б) Спектр лазера и спектр генерации суперконтинуума на выходе тейпированного волокна

Полученный спектр генерации суперконтинуума имеет ширину от 1,45 до 3,15 мкм по уровню -20дБ, при этом длинноволновая часть спектра доходит до 3,6 мкм по уровню -30 дБ. На данный момент одним из ограничивающих факторов дальнейшего увеличения ширины спектра генерации суперконтиннума является разрушение сердцевины волокна при подаче мощности лазерного излучения более 100 мВт.

Заключение

В работе продемонстрирована генерация суперконтинуума средней мощностью 35 мВт в тейпированном микроструктурированном волокне с подвешенной сердцевиной при накачке фемтосекундными импульсами Cr^{2+}:ZnSe лазера длительностью 35 фс, частотой повторения 170 МГц и средней мощностью до 100 мВт на длине волны 2,4 мкм. Ширина спектра полученного суперконтинуума находится в диапазоне от 1,45 мкм до 3,15 мкм по уровню -20дБ. Дальнейшее увеличение ширины спектра генерации суперконтинуума за счет увеличения входной мощности в данной конфигурации не представляется возможным, так как происходит разрушение сердцевины волокна при подаче мощности накачки более 100 мВт, что может быть связанно с эффектами трехфотонного поглощения для $As_{39}Se_{61}$.

Благодарность

Данное исследование финансировалось РФФИ согласно исследовательскому проекту № 17-08-00495.

Литература

1. *Dai, S., et al., Applied Sciences, 8(5), 707 (2018)*
2. *Marandi A., et al., Optics express 20(22), 24218-24225 (2012)*
3. *Shaw L. B., et al., International Society for Optics and Photonics 79140P-79140P-5 (2011)*
4. *Gai X., et al., Optics letters 37(18), 3870-3872 (2012)*
5. *Shiryaev V. S., et al., J. Optoelectron. Adv. M. 16(9), 1020-1025 (2014)*

КВАНТОВЫЕ ФЛУКТУАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СОЛИТОНОВ

Мельников Л.А.[1,2*], **Мажирина Ю.А.**[1,2]

[1] *СГТУ им. Гагарина Ю.А., г. Саратов*
[2] *ИОФРАН им. Прохорова А.М., г. Москва*
[*] *E-mail: lam-pels@ya.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16111

Изучение квантовых флуктуаций солитонов в оптических волокнах имеет давнюю историю [1-13]. В докладе представлены результаты расчетов квантовых флуктуаций в режиме распада двухсолитонного импульса в волокне с периодической модуляцией дисперсии (ПМД) [10, 11]. Этот процесс приводит к генерации небольшого числа связанных солитоноподобных импульсов, которые могут быть использованы для телекоммуникаций. Они не являются в строгом смысле солитонами, однако ведут себя практически как солитоны, за исключением того, что их спектральные параметры, определяющие длительность и энергию импульса, не сохраняются при их распространении в волокне с ПМД. Так как этот процесс не описывается аналитически, то и для расчета квантовых флуктуаций следует использовать численные методы. В данной работе используется метод обратного распространения [12,13]. Рассмотрим квантовое нелинейное уравнения Шредингера (КНУШ) для волокна с ПМД:

$$2i\frac{\partial \hat{A}(z,t)}{\partial z}+D(z)\frac{\partial^2 \hat{A}(z,t)}{\partial t^2}+2\hat{A}(z,t)^{\dagger}\hat{A}(z,t)\hat{A}(z,t)=0 \quad . \qquad (1)$$

$\hat{A}$ действует на состояния, которые являются суперпозицией когерентных или фоковских состояний $|\ \rangle=|n_1\rangle|n_2\rangle...|n_s\rangle...$ Для изучения состояний с большим числом квантов можно положить $\hat{A}=\hat{A}(z,t)+\hat{u}(z,t)$. Здесь $\hat{A}(z,t)$ подчиняется обычному (классическому) НУШ для волокна с ПМД, квантовая часть $\hat{u}(z,t)$ подчиняется линеаризованному уравнению:

$$2i\frac{\partial \hat{u}(z,t)}{\partial z}+D(z)\frac{\partial^2 \hat{u}(z,t)}{\partial t^2}+2\hat{A}(z,t)^2\hat{u}^{\dagger}+4\left|\hat{A}(z,t)\right|^2\hat{u}=0 \quad . \qquad (2)$$

В дальнейшем положим *D(z) = 1 — d sin K z.*

Фильтрация. Пусть на входе импульс находится в когерентном состоянии, а на выходе из волокна существует спектральный фильтр [12] $A_{out}(L,\omega)=A_{in}(L,\omega)\left(1-F(\omega)\exp\left[i\phi(\omega)\right]\right)$. Тогда число квантов на выходе:

$$n_{out}=\int dt\left[\left(1-\hat{F}(t)\right)A(t)\right]^{*}\hat{u}(t)+\int dt\hat{c}(t)^{\dagger}\left[\left(1-\hat{F}(t)\right)^{1/2}\hat{F}(t)^{1/2}\right]+h.a.$$

Здесь *c* - шум связанный с фильтрацией [12]. Уравнение (2) можно записать как $\partial\hat{u}/\partial z=\hat{H}\hat{u}$. Измеряемый сигнал на выходе при *z=L:* $S_F(z)=\int_{-\infty}^{\infty}dt\,\mathrm{Re}\left[\left(1-\hat{F}\right)^{*}\hat{u}(z,t)\right]$.

Метод обратного распространения.Если ввести сопряженный оператор $\hat{H}^A$ [12] тогда функция фильтра *g(z,t)* должна подчиняться уравнению:

$$\hat{H}^A g(z,t)=-\frac{i}{2}\frac{\partial^2 g(z,t)}{\partial t^2}-2i\left|A(z,t)\right|^2 g(z,t)+iA(z,t)^2 g(z,t)^{*},\ \text{и тогда}\ \partial S_g/\partial z=0.$$

Решение в обратном направлении сопряженного уравнения при начальном условии $g(L,t)=\left(1-\hat{F}\right)A(L,t)$ дает $g(0,t)$. Тогда вариация числа фотонов:

$\left\langle\Delta n^2\right\rangle=\int dt\left|g(0,t)\right|^2-\int dt\left|(1-F)A(z,t)\right|^2$. Для фильтра вида $F(\omega)=-\eta\omega^2, \hat{F}=\eta\frac{\partial^2}{\partial t^2}$.

Для фундаментального солитона *A(z,t)=sech(t)exp(iz/2)* легко показать, что *g(z,t)=A(z,t),* когда $\eta = 0, d = 0$, и дополнительных флуктуаций нет. Однако, когда *g(L,t)=isech(t)exp(iL/2)* то появляются флуктуации временного положения солитона.

Распространение фундаментального солитона в волокне с резонансной для двухсолитонного импульса продольной частотой изменения дисперсии $K = 4$ сопровождается генерацией дисперсионной волны с малой амплитудой, которой при $d \sim 1$ можно пренебречь.

Оптимальная фильтрация. Сжатие флуктуаций определяется соотношением:

$$R(r,\theta) = Var\left[\left\langle F(z,t,\theta)\middle|\hat{u}(z,t)\right\rangle\right] \Big/ Var\left[\left\langle F(0,t,\theta)\middle|\hat{u}(0,t)\right\rangle\right], F(z,t,\theta) = A(z,t)\exp(i\theta),$$

$$R(z) = A\cos^2\theta + 2B\cos\theta\sin\theta + C\sin^2\theta.$$

Выбором θ можно достичь минимума *R(r, θ)* т.е. максимального сжатия.

Квантовая корреляция (запутывание). Спектральная фильтрация дает также возможность рассчитать корреляцию флуктуаций в отдельных импульсах [9].

В заключение отметим, что метод обратного распространения использован для расчета сжатых состояний оптических солитонов при расщеплении двухсолитонного импульса в волокне с периодически изменяющейся дисперсией. Недиабатические вариации дисперсии приводят к распаду солитона на отдельные импульсы. На первых стадиях расщепления импульсы умеренно сжимаются, в дальнейшем может наблюдаться состояния с суперпуассоновской статистикой при $z > 4$. Расчеты квантовых корреляций показывают, что несмотря на большое временное расстояние между импульсами после распада бризера, корреляции квантовых флуктуаций между импульсами сохраняется. Отметим, что такой подход можно использовать и для других режимов распространения, когда дисперсия непериодическая и когда существует дисперсионная волна.

Работа поддержана грантом РНФ 17-12-01564.

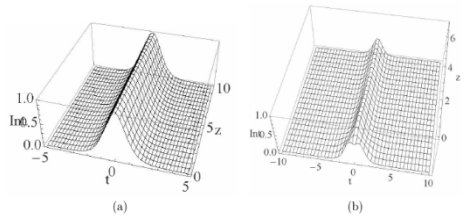


Рис. 1. Односолитонный режим: динамика односолитонного импульса $d = 0, A(0,t) = sech(t)$ ***(a) и соответствующая функция фильтра*** $g(L-z,t)$ ***для*** $d = 0, \eta = 0.3, L = 10$ ***(b)***

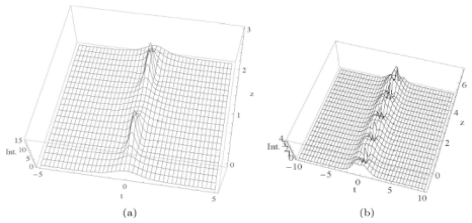


Рис. 2. Двухсолитонный режим: бризер $2\sec h(t)$ ***(a) и его функция фильтра*** $g(z,t)$ ***(b)***

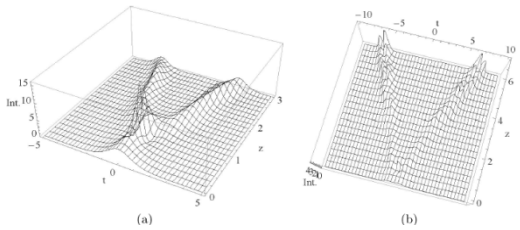


Рис. 3. Расщепление двухсолитонного импульса $2\,sech\,(t)$ ***в волокне с ПМД*** $D(z) = D(1 - 0.25\sin 4z)$ ***(a) и*** $g(z,t)$ ***(b).***

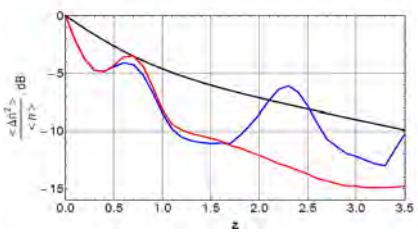


Рис. 4. Оптимальная фильтрация. Показаны зависимости степени сжатия от длины распространения (черные и красные кривые – для $D = const$***, синяя – для волокна с ПМД, черная для односолитонного, красная и синяя – для двухсолитонного режимов)***

Литература

1. *Drummond P., et al, Nature 365, 307–313 (1993)*
2. *Carter S., et al, Phys. Rev. Lett. 58, 1841-1844 (1987)*
3. *Levandovsky D., et al, Opt. Lett. 24, 43-45 (1999)*
4. *Spalter S., et al, Opt. Express 2, 77-83 (1998)*
5. *Lee R.-K., et al, Physical Review A 71, 035801 (2005)*
6. *Lee R.-K., et al, Phys. Rev. A 71, 013816 (2005)*
7. *Tuurke D., et al, Opt. Express 15, 2732-2741 (2007)*
8. *Corwin K., et al, Phys. Rev. Lett. 90, 113904 (2003)*
9. *Lee R.-K., et al, Phys. Rev. A 70, 063817 (2004)*
10. *Mel'nikov, L. A., et al, Quantum Electronics 47, 1083-1090 (2017)*
11. *Gochelashvili K., Bull. Of the Lebedev Phys. Inst., 44, 52-28, (2017)*
12. *Lai Y., et al, Phys. Rev. A 51, 817-829 (1995)*
13. *Mecozzi A., et al, Opt. Lett. 22, 1232-1234 (1997)*

ВОЛОКОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ СЛАБОГО СИГНАЛА НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 0.98 МКМ

Алешкина С.С.[1*], Липатов Д.С.[2], Котов Л.В.[3], Темянко В.Л.[3], Кочергина Т.А.[1], Вельмискин В.В.[1], Бардина Т.Л.[4], Бубнов М.М.[1], Гурьянов А.Н.[2], Лихачев М.Е.[1]

[1] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва, Россия
[2] Институт химии высокочистых веществ РАН, г. Нижний Новгород, Россия
[3] College of Optical Sciences, University of Arizona, г. Тусон, США
[4] Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия
[*] E-mail: sv_alesh@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16112

Интерес к Yb-лазерным источникам, излучающим на длине волны около 0.98 мкм, обусловлен, в первую очередь, перспективой удвоения и учетверения частоты излучения и создания волоконной альтернативы имеющимся газовым лазерам на аргоне и криптоне. Основная сложность реализации Yb-волоконных источников с длиной волны генерации 0,98 мкм, состоит в том, что энергетическая схема ионов Yb помимо излучательных переходов на 0,98 мкм, осуществляемых по трехуровневой лазерной схеме, позволяет излучательные переходы в спектральном диапазоне 1020-1100 нм, происходящих по четырех- и квазитрехуровневой лазерным схемам. В результате этого, для эффективной генерации на длине волны 0,98 мкм необходимым условием является сокращение рабочей длины активного световода до длины недостаточной для усиления спонтанной люминесценции в области более 1 мкм. Выбор схемы генерации излучения на 0,98 мкм так же имеет ограничения. Так как мощность коммерчески доступных одномодовых диодов, излучающих на длине волны 915 нм, не превышает 300 мВт, схема с накачкой по сердцевине ограничена по выходной мощности. Схема с накачкой по оболочке ограничена малым соотношением диаметров сердцевины и оболочки, в результате чего лишь малая доля мощности накачки оказывается поглощенной на рабочей длине световода. К настоящему моменту создание специальных волоконных световодов с увеличенным размером сердцевины позволяет снять это ограничение и реализовать схемы с высокой выходной мощностью и высокой эффективностью преобразования [1]. Однако реализованные конструкции световодов оказываются малоэффективными для создания усилителей слабого сигнала, вследствие высоких порогов генерации. Более того, в большинстве случаев предложенные конструкции световодов не позволяют создание полностью волоконных схем.

В настоящей работе предложен и реализован дизайн специального волоконного световода для усиления излучения слабого сигнала на длине волны 0,98 мкм. Увеличение поглощения накачки из оболочки достигнуто путем дополнительного кольцевого легирования области оболочки, прилегающей к сердцевине. Вследствие того, что выполнение профиля легированной редкой землей области с показателем преломления, равным показателю преломления кварцевого стекла, представляет собой непростую технологическую задачу, показатель преломления легированной Yb^{3+} области оболочки в модели был выбран выше уровня кварцевого стекла. При этом показатель преломления сердцевины был выбран таким образом, чтобы сохранить одномодовость структуры и сохранить размер модового пятна согласующимся с размером модового пятна коммерчески доступных световодов (10 мкм).

Заготовка световода была реализована методом MCVD. В качестве матрицы легированной Yb^{3+} области нами была использована фосфороалюмосиликатная матрица, позволяющая сохранить низкое значение апертуры световода, а так же обеспечить стойкость световода к эффекту фотопотемнения [2]. Световод с диаметром кварцевой оболочки 80 мкм был вытянут в отражающем полимере, обеспечивающем апертуру 0,45. Измеренный профиль показателя преломления световода и изображение его торца приведены на рисунке 1а. Диаметр поля фундаментальной моды, измеренный по осям x и y, был 12 и 15 мкм, соответственно. Поглощение по оболочке, измеренное на длине волны 915 нм, составило 3.4 дБ/м. Вследствие наличия интенсивной полосы поглощения ионов Yb^{3+} на длине волны 0,98 мкм, исследование модового состава было проведено на длине волны около 1,06 мкм. Было показано, что световод в области 1,06 мкм является одномодовым.

Реализованный световод был протестирован в схеме усилителя слабого сигнала. В качестве задающего источника лазерного излучения был использован полупроводниковый диод, пигтелированный волоконным световодом, к выходному концу которого была подварена стабилизирующая длину волны брэгговская решетка. Схема усилителя содержала ответвитель для регистрации мощности входного сигнала, изолятор, специально разработанный объединитель

мощности сигнала и накачки 2+1 в 1, сигнальная жила которого представляла собой световод с диаметром сердцевины и оболочки 10 мкм и 80 мкм соответственно, активный световод и вывод накачки. Выходной конец световода вывода накачки был сколот под углом, чтобы предотвратить обратное отражение. В качестве источника многомодовой накачки был использован полупроводниковый диод, излучающий на длине волны около 0,915 мкм. Оптимальная длина активного световода для усиления сигнала на длине волны 0,98 мкм составила 37 см. При этом эффективность усиления была максимальной на длине волны 0,977 мкм и в режиме насыщения составила 9,7%. Порог генерации был около 3Вт, что позволяло достичь мощности выходного сигнала более 0.5 Вт при использовании относительно маломощного источника многомодовой накачки (10 Вт).

Чтобы оценить возможность применения реализованного световода в качестве усилителя слабого сигнала, нами было проведено исследование влияния мощности входного сигнала на соотношение сигнал/шум на выходе усилителя (отношение мощности усиленного сигнала к интегральной мощности люминесценции вблизи 0,977 мкм). На рисунке 1б показана зависимость добавленной мощности сигнала на длине волны 976.9 нм, генерируемой мощности люминесценции в области 0,98 мкм и люминесценции в области 1,03 мкм от мощности входного сигнала. В ходе исследования установлено, что при мощности входного сигнала около 1 мВт возможно достижение соотношения сигнал/шум более 20 дБ, что для большинства применений является достаточным. Исследование спектров усиления при меньшем уровне входного сигнала (на уровне 10 мкВт) показало, что усиление более 25 дБ может быть реализовано в спектральном диапазоне от 974 нм до 980 нм (рисунок 1в).

Интересно также отметить, что форма спектров усиленной спонтанной люминесценции изменялась в зависимости от длины волны усиливаемого сигнала. Мы предполагаем, что подобное поведение связано с неоднородным уширением спектров люминесценции ионов Yb^{3+}, в результате чего снятие инверсной населенности и проседание люминесценции происходило неравномерно и наблюдалось преимущественно на длинах волн сигнала и прилегающих длин волн.

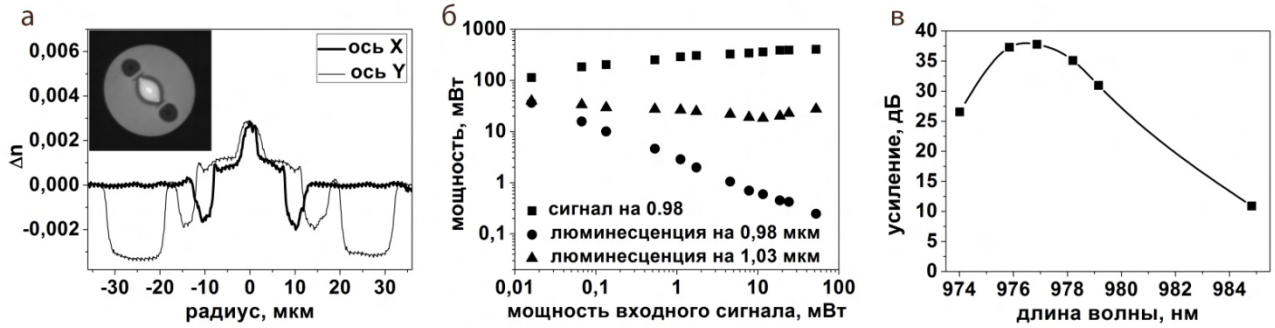


Рисунок 1 а - измеренный по двум ортогональным осям профиль показателя преломления световода, изображение торца световода (на вставке); б – добавленная мощность сигнала на 0.98 мкм, мощность люминесценции в области 0.98 мкм и области 1.03 мкм от мощности сигнала (мощность накачки равна 9 Вт); в – спектральная зависимость коэффициента усиления, измеренного при мощности входного сигнала 10 мкВт

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 18-79-00187

Литература

1. *T. Matniyaz, W. et.al., in* Conference on Lasers and Electro-Optics, *OSA Technical Digest, paper JTh5A.7 (2019)*
2. *Likhachev M., et al, in CLEO/Europe and EQEC 2011 Conference Digest, OSA Technical Digest (CD), paper CJ_P24 (2011)*

ТУЛИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С УПРАВЛЯЕМЫМ САМОСКАНИРОВАНИЕМ ДЛИНЫ ВОЛНЫ

Бударных А.Е.[1,2], **Лобач И.А.**[1,2*], **Каблуков С.И.**[1,2]

[1] *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*
[2] *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*
[*] *E-mail:* lobach@iae.nsk.su

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16113

Самоиндуцированное сканирование или самосканирование – относительно новый эффект в волоконных лазерах [1]. Суть эффекта заключается в пассивной периодической перестройке оптической частоты лазерного излучения. Как правило, динамика длины волны / оптической частоты во времени представляет собой пилообразный сигнал. Считается, что эффект обусловлен формированием в активной среде лазера различных видов относительно долгоживущих динамических решёток, определяющих конкуренцию продольных мод [2]. В свою очередь, наличие самих решеток объясняется продольной модуляцией инверсии населенности лазера, сформированной генерируемой стоячей волной в резонаторе. Стоит отметить, что для определенных конфигураций линейного резонатора, такой лазер генерирует периодические микросекундные импульсы, каждый из которых состоит из одной продольной моды, а оптическая частота изменяется ступенчатым образом от одного импульса к следующему на величину межмодовых биений резонатора [2]. Благодаря простоте конструкции и большому диапазону перестройки (26 нм [3]), подобные лазеры находят своё применение в ряде приложений: опрос волоконных датчиков [4], анализ лазерных спектров [5] и других. К настоящему времени эффект самосканирования частоты был продемонстрирован практически во всех известных волоконных средах: вблизи 1.06 мкм с иттербием [1-2] и неодимом [6], вблизи 1.46 мкм с висмутом [7], вблизи 1.55 мкм с эрбием [8] и вблизи 2 мкм с тулием [3] и гольмием [9].

В первых экспериментах, а также во многих случаях наблюдался постепенный линейный рост длины волны лазера с обратным резким скачком к начальному значению [1-9]. Однако позднее было показано, что возможно и обратное сканирование, когда длина волны уменьшается во времени [10]. Также в работе [10] было показано, что в некоторых случаях изменение мощности накачки позволяет переключать режим сканирования между прямым и обратным. При некотором уровне мощности накачки наблюдалось одновременное существование двух режимов с неконтролируемым переключением между сканированиями двух типов. В настоящей работе демонстрируется самосканирующий линейно-поляризованный тулиевый лазер с генерацией, как и в [3] в области 1920 нм, но в котором с помощью мощности накачки осуществляется управление лазерной динамикой: при малых и больших мощностях накачки инициируется обратное и прямое сканирование длины волны, соответственно, а при некотором среднем уровне мощности накачки в отличие от [10] длина волны останавливается. В последнем случае длина волны остановки определяется предысторией спектральной динамики лазера и может быть зафиксирована в спектральном диапазоне от 1912 до 1923 нм. Таким способом мы впервые для лазера с пассивным сканированием продемонстрировали активную перестройку длины волны.

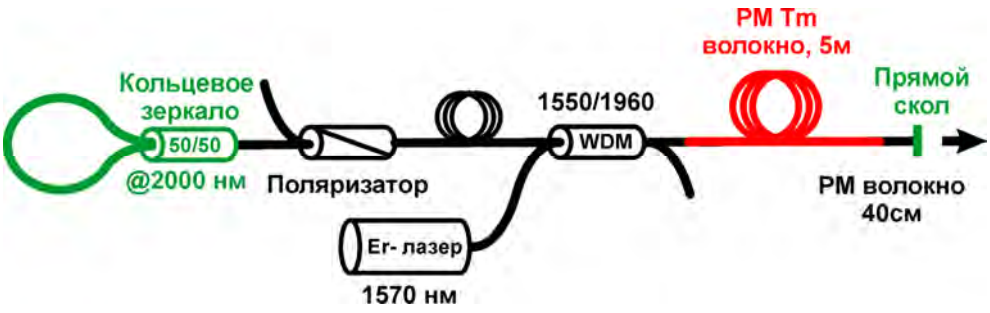


Рис. 1. Схема волоконного лазера с управляемым сканированием длины волны

Схема лазера представлена на Рис.1. Элементы лазера выполнены на основе компонентов с сохранением поляризации. Резонатор образован волоконным кольцевым зеркалом на основе волоконного ответвителя 50/50 с одной стороны и торцом сколотого под прямым углом волокна с

другой стороны. В качестве активной среды использовался отрезок тулиевого волокна (PM-TSF-9/125, Nufern) длиной 4.5 м. Излучение накачки линейно поляризованного одночастотного эрбиевого волоконного лазера с длиной волны 1570 нм и максимальной выходной мощностью до 1.3 Вт заводится в резонатор через спектрально-селективный разветвитель 1550/1960.

Оказалось, что в отличие от [3] при достижении порога генерации (~300 мВт) начинается лазерная генерация с обратным по длине волны самосканированием (Рис.2a,b). При этом, скорость сканирования была достаточно небольшой (~0.1 нм/сек). Дальнейшее увеличение накачки приводит к постепенному замедлению сканирования вплоть до мощностей 420-470 мВт, где спектральная динамика практически не наблюдается (Рис.2c). Дрейф длины волны составил менее 50 пм в течение 5 минут. При этом сама длина волны остановки определялась спектральной динамикой до момента остановки и таким способом могла быть выбрана из диапазона от 1912 до 1923 нм при соответствующем выборе момента остановки сканирования и управлении мощностью накачки. На Рис.2в представлены примеры различных реализаций режима остановки длины волны. Дальнейшее увеличение мощности накачки (более 470 мВт) приводило к скачкообразному росту скорости сканирования и изменению его направления на нормальное (Рис.2d,e). Диапазон сканирования составлял порядка 15 нм. Было установлено, что в случае нормального сканирования лазер генерирует регулярную последовательность одночастотных импульсов [2] со спектральной шириной менее 200 кГц как в работе [3]. Таким образом, в работе продемонстрирован лазерный источник с возможностью управления не только направлением самосканирования, но и остановкой длины волны.

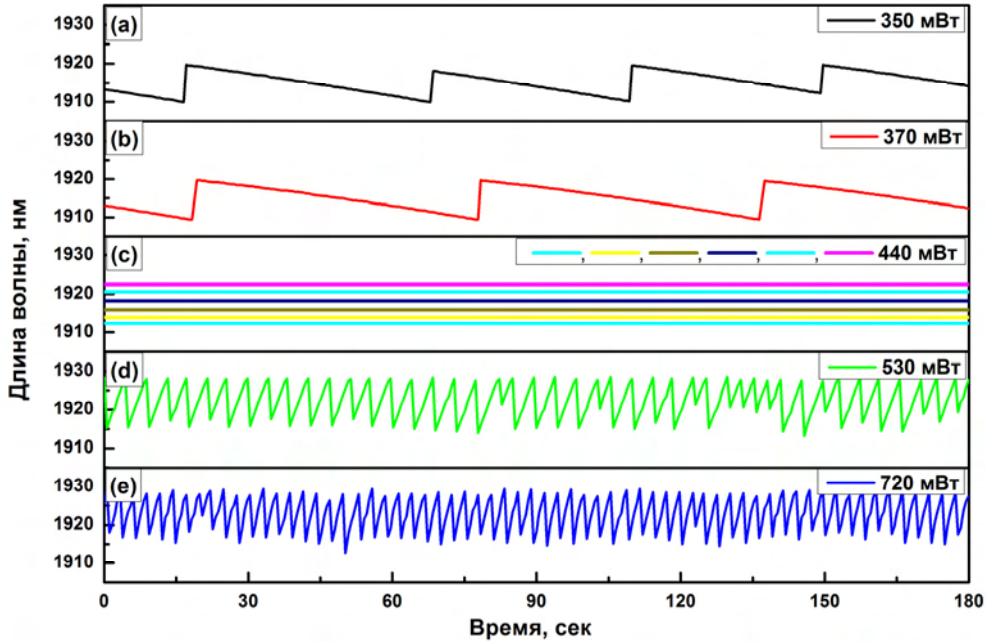


Рис. 2. Динамика длины волны генерации лазера при различных мощностях накачки

Более детальное описание характеристик разработанного волоконного тулиевого источника перестраиваемого излучения, возможных механизмов, лежащих в основе его работы, а также перспектив его практического применения будет представлено в докладе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (грант № 18-12-00243).

Литература

1. *Kir'yanov A.V., et al, Laser Physics Letters 8, 305–312 (2011)*
2. *Lobach I.A., et al, Laser Physics Letters 11, 045103 (2014)*
3. *Budarnykh A.E., et al, Opt. Lett. 43, 5307-5310 (2018)*
4. *Ткаченко А.Ю., и др., Прикладная фотоника, 3, 37-49 (2016)*
5. *Tkachenko A.Yu., et al, Optics Express 25, 17600-17605 (2017)*
6. *Kashirina E.K., et al, Opt. Lett. 44, 2252-2255 (2019)*
7. *Lobach I.A., et al, Optics Express 23, 24833-24842 (2015)*
8. *Navratil P., et al, Opto-Electronics Review, 26, 29-34 (2018)*
9. *Aubrecht J., et al, Optics Express 25, 4120-4125 (2017)*
10. *Navrati P.l, et al, Laser Physics Letters, 14, 035102 (2017)*

НЕОДИМОВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С САМОСКАНИРОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ

Каширина Е.К.[1,2], Лобач И.А.[1,3], Каблуков С.И.[1,3*]

[1] *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*
[2] *Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск*
[3] *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*
[*] *E-mail:* kab@iae.nsk.su

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16114

Перестраиваемые волоконные лазеры находят свое применение в различных областях науки и техники. Среди многообразия перестраиваемых лазеров особое место занимают лазеры с самоиндуцированным сканированием (самосканированием) оптической частоты [1]. Данный тип лазеров работает в режиме релаксационных колебаний, при котором генерация импульсов сопровождается небольшим сдвигом оптической частоты на частоту межмодовых биений резонатора (~2-10 МГц). Сдвиг частоты между импульсами имеет относительно регулярный однонаправленный характер, а сам процесс изменения частоты может продолжаться на масштабах до 7 ТГц [2], пока перестройка не достигает края диапазона, где скачком возвращается в начало, и сканирование повторяется вновь.

Изменение частоты при генерации нового импульса возникает благодаря распределенной обратной связи, динамически формируемой в активной среде узкополосным излучением [1]. Стоячая волна, генерируемая в линейном резонаторе, неоднородно насыщает усиление вдоль активной среды (эффект пространственного выжигание дыр), приводит к продольной модуляции как коэффициента усиления, так и показателя преломления. С одной стороны, данные решетки имеют относительно большое время жизни, поэтому влияют на генерацию последующих импульсов, а, с другой стороны, они сами динамически перезаписываются (изменяются) в процессе генерации новых импульсов. Изменяя положение активной среды внутри резонатора лазера можно управлять величиной относительного сдвига частоты, соответствующего максимальному превышению усиления над потерями [1]. Более того, выбором длин пассивных волокон, расположенных с одной и другой стороны относительно активной среды, можно обеспечить режим одночастотного самосканирования, в котором каждый импульс соответствует генерации на одной продольной моде. Такой режим самосканирования с генерацией регулярных импульсов был продемонстрирован в иттербиевом [1], висмутовом [3] и тулиевом [4] волоконных лазерах. Обычный режим самосканирования с генерацией маломодового излучения был продемонстрирован также в эрбиевом [5] и гольмиевом [6] лазерах.

Следует отметить, что все указанные лазеры [1-6] работают по квази-трехуровневой схеме. При этом ранее не сообщалось о получении режима самосканирования частоты в лазере с четырехуровневой схемой генерации. Между тем, неодимовый лазер с длиной волны генерации 1.06 мкм работает по четырехуровневой схеме, и может быть собран на тех же компонентах, что и хорошо известный иттербиевый волоконный лазер. Однако наши первые попытки заменить иттербиевую усилительную часть лазера (активную среду и накачку) на аналогичную неодимовую часть не увенчались успехом. Самосканирование частоты наблюдается в режиме релаксационных колебаний, а лазер с четырехуровневой схемой быстро переходит в непрерывный режим генерации. Для получения устойчивого режима незатухающих релаксационных колебаний в неодимовом лазере нужно существенно уменьшить спектральную ширину добротности резонатора в сравнении с аналогичной областью в иттербиевом волоконном лазере. Данный момент, по всей видимости, связан с существенно большей шириной однородного насыщения в иттербиевом лазере, которая по оценкам достигает десятков нанометров. С другой стороны, величина однородного уширения в неодимовом стекле ~3 нм [7] на порядок меньше, чем характерная ширина контура усиления. Это приводит к тому, что даже при умеренных выходных мощностях ~1 Вт ширина спектра генерации в неодимовом лазере с широкополосными зеркалами может превысить 10 нм, что на порядки больше, чем в аналогичном иттербиевом лазере. Кроме того, в наших экспериментах наблюдалось, что в волоконных лазерах на базе активных неодимовых волокон с двойной оболочкой PM-NDF-5/125 (Nufern) и IXF-2CF-Nd-5-130 (iXFiber) с сохранением и без сохранения поляризации, соответственно, наблюдается модуляция спектра генерации с периодом ~2 нм. Наличие этой модуляции приводит к хаотичным перескокам частоты между этими компонентами в припороговом режиме генерации.

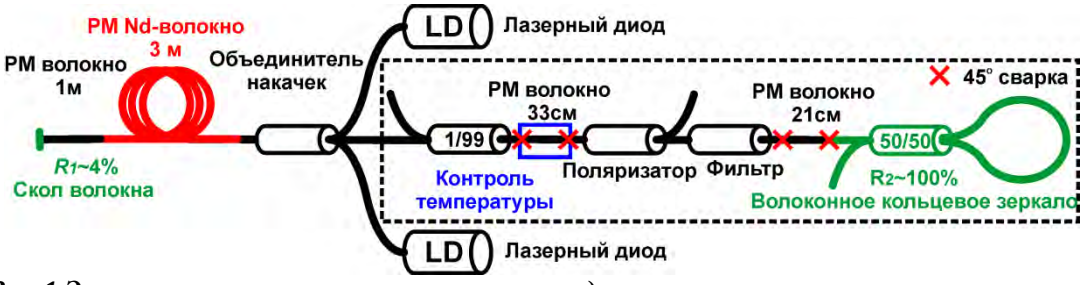


Рис. 1.Экспериментальная схема волоконного неодимового лазера с самосканированием частоты

Оказалось, что уменьшение ширины спектра генерации с помощью узкополосного селектора, помещенного в резонатор, приводит к генерации регулярных микросекундных импульсов с узкополосным излучением и самосканированию частоты в относительно большом диапазоне мощностей. Схема лазера представлена на Рис.1. В качестве такого селектора нами использовался двухкомпонентный фильтр Лио, который в сочетании с полосовым фильтром (ширина спектра пропускания ~11 нм) и кольцевым волоконным зеркалом образовывал отражатель с переменной спектральной шириной. Волоконный фильтр Лио образован тремя поляризаторами и двумя отрезками волокна с сохранением поляризации, чьи оси были сориентированы под углом 45° относительно осей поляризаторов. Ширина спектра пропускания компонент фильтра Лио изменялась обратно пропорционально длине указанных выше отрезков волокна. Оптимизация ширины спектра отражения позволила получить область самосканирования ~ 1.8 нм (Рис.2) в области 1065 нм.

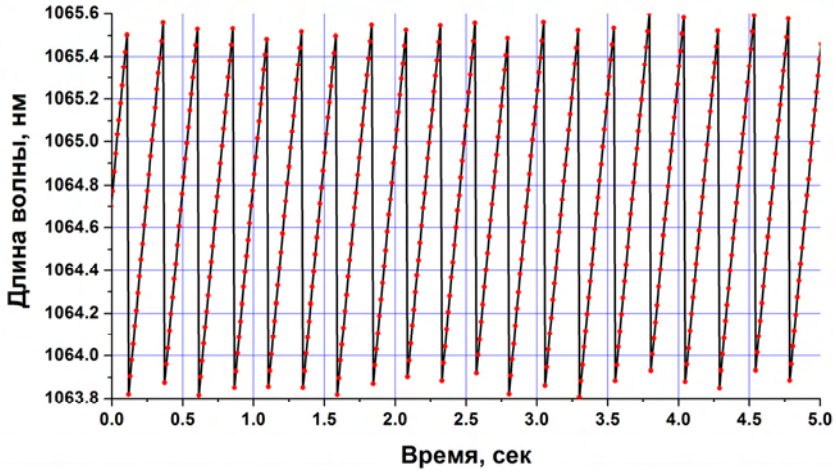


Рис.2. Динамика длины волны лазера при мощности накачки 3 Вт

Также было установлено, что каждый импульс состоит практически из одной продольной моды с шириной линии порядка 1 МГц, а частота между импульсами меняется на частоту межмодовых биений резонатора (~7 МГц). Таким образом, для неодимового волоконного лазера был продемонстрирован режим одночастотного самосканирования частоты, аналогичный другим волоконным средам [1,3-4]. Максимальная выходная средняя мощность генерации в режиме самосканирования превысила 600 мВт.

Более детальное описание характеристик разработанного волоконного неодимового источника перестраиваемого излучения будет представлено в докладе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-12-00243).

Литература

1. *Lobach I.A., et al, Laser Physics Letters 11, 045103 (2014)*
2. *Lobach I.A., et al, Fifth Russian-Chinese Workshop and School for Young Scientists on Laser Physics and Photonics, Novosibirsk, Russia (2015)*
3. *Lobach I.A., et al, Optics Express 23, 24833-24842 (2015)*
4. *Budarnykh A.E., et al, Opt. Lett. 43, 5307-5310 (2018)*
5. *Navratil P., et al, Opto-Electronics Review, 26, 29-34 (2018)*
6. *Aubrecht J., et al, Optics Express 25, 4120-4125 (2017)*
7. *Беликова Т.П., и др, Краткие сообщения по физике 5, 48-51 (1972)*

НОВЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

Иваненко А.В.[1], Нюшков Б.Н.[1,2], Смирнов С.В.[1], Кохановский А.Ю.[1], Кобцев С.М.[1], Серебренников К.В.[1], Луценко Д.Б.[1], Гладуш Ю.Г.[3], Мкртчян А.А.[3]

[1] *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*
[2] *Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск*
[3] *Сколковский институт науки и технологий, г. Москва*
[*] *E-mail:* ivanenko.aleksey@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16115

Волоконные лазеры имеют целый ряд важных достоинств, включая высокий к.п.д., нетребовательность к настройке и юстировке, относительно низкую чувствительность к параметрам окружающей среды, высокое качество выходного пучка и т.п. Вместе с тем, большинство распространённых схем волоконных лазеров обладают ограниченными возможностями по управлению параметрами генерируемого импульсного излучения в рамках одной конфигурации резонатора. Исследования по разработке новых или усовершенствованию существующих конфигураций резонаторов лазеров и насыщающихся поглотителей (НП) для расширения параметров импульсной генерации остаются актуальными и на сегодняшний день [1–4]. Разработка таких волоконных лазеров, генерирующих оптические импульсы с заданными параметрами (длиной волны и шириной спектра, длительностью, чирпом, энергией и т.д.) и позволяющих управлять формой и структурой этих импульсов (генерация одиночных импульсов произвольной формы или импульсных кластеров с разной степенью внутреннего заполнения суб-импульсами) открывает новые перспективы в решении широкого круга задач для научных и практических приложений.

Данная работа посвящена исследованию схем резонаторов с управляемыми импульсными режимами генерации. В работе рассматриваются две схемы реализации управляемых поглотителей и схема с переключением усиления: 1) НП на основе нелинейного петлевого зеркала (НПЗ, рис. 1) с управлением за счёт контроля разности фаз двумя усилителями в петле, 2) НП на основе безматричных углеродных нанотрубок с управлением за счёт прикладываемого светового и электрического полей и 3) модуляция усиления в гибридном волоконно-полупроводниковом лазере на основе полупроводникового усилителя в качестве активной среды.

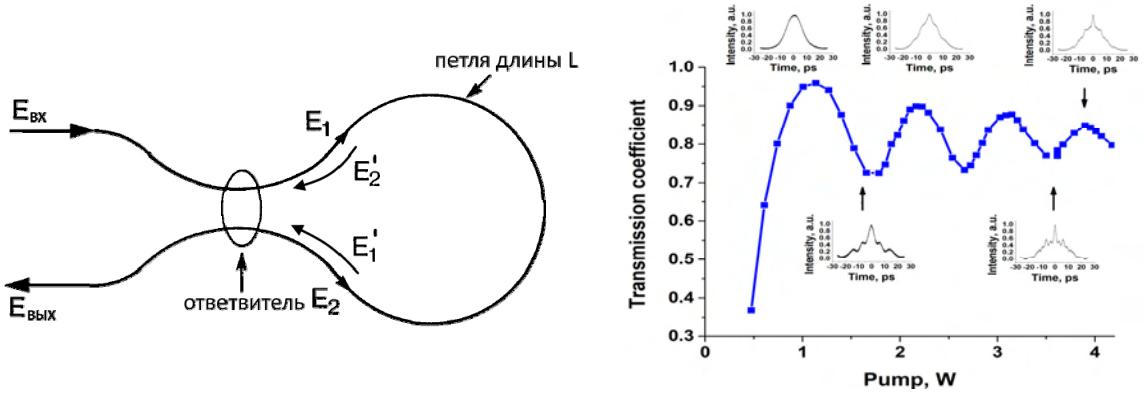


Рис. 1. а) НП на основе НПЗ с двумя усилителями: α – коэффициент деления ответлителя, l1,2,3,4,5 – длины активных и пассивных участков лазера, g1,2 – коэффициенты усиления активного Yb волокна и б) коэффициент пропускания НПЗ и изменение автокорреляционной функции импульсов на выходе НПЗ при разных мощностях накачки усилителя НПЗ (на вставках в рисунок)

В волоконном лазере с нелинейным петлевым зеркалом за счёт управления усилением двух активных волокно в нелинейной петле возможна реализация трёх различных импульсных режимов, отличающихся по ширине оптического спектра, форме и длительности импульсов. Использование двух накачек в лазере также обеспечивает высокую среднюю мощность выходного импульсного излучения (более 0.5 Вт) при сохранении малой длительности импульсов (длительность АКФ порядка 30 пс).

В схеме лазера с НП на основе углеродных безматричных нанотрубок (УБН), нанесённых на сполированную плоскость волокна (D-shape волокно) и управляемых за счет просветления под воздействием оптического излучения и прикладываемого электрического полей (рис. 2), осуществлялась генерация в одном из трёх существенно разных режимов генерации: синхронизация

мод, гармоническая синхронизация мод и непрерывная генерация. Для переключения между режимами использовалось электронное управление НП. Вышеуказанные схемы лазеров позволяют получать импульсы в пс диапазоне. Однако не позволяют напрямую управлять формой импульсов.

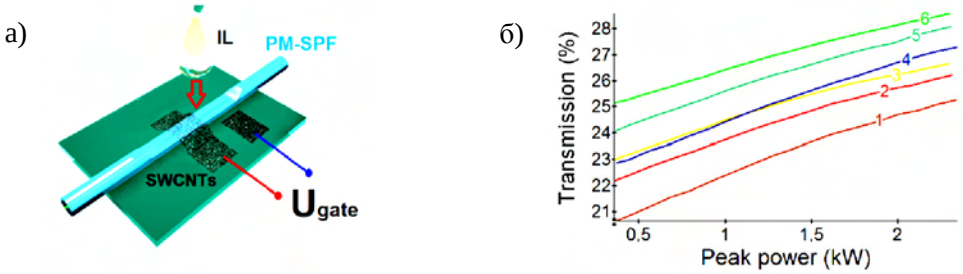


Рис. 2. (а) Образец УБН (SWCNT) с электродами и (б) коэффициент пропускания образца в зависимости от пиковой мощности излучения генерации при разных мощностях управляющего излучения (0 мВт, 60 мВт и 93 мВт): кривые 1-3 - без управляющего напряжения, кривые 4-6 - при подаче напряжения 1 В

В случае использования полупроводникового усилителя (рис. 3) с волоконными входом и выходом в качестве активной среды и в качестве модулятора для получения импульсной генерации продемонстрирована возможность программно-управляемой генерации сложно-произвольных оптических волновых форм в гибридном волоконно-полупроводниковом лазере с синхронной накачкой. В режиме синхронизации мод временной профиль генерируемых импульсов может повторять временной профиль электрических импульсов накачки SOA (рис. 4). Управление временным профилем электрических импульсов накачки позволяет формировать стабильный импульсный паттерн с заданным профилем интенсивности, воспроизводимый на каждом обходе резонатора.

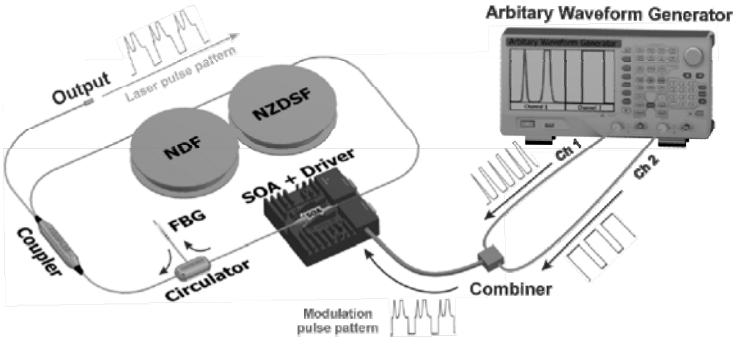


Рис. 3. Схема волоконно-полупроводникового лазера : SOA – полупроводниковый оптический усилитель, NDF – волокно с нормальной дисперсией, NZDSF- волокно с ненулевым смещением дисперсии, CIR – волоконный циркулятор, FBG – волоконная Брэгговская решётка, AWG – генератор сигналов произвольной формы

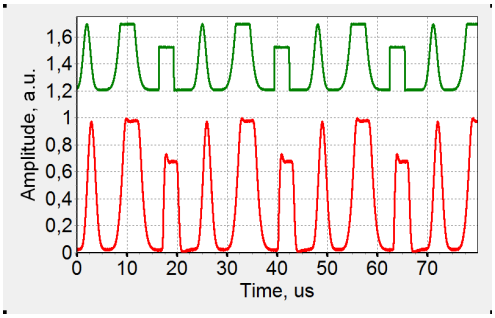


Рис. 4. Осциллограммы 3х-элементных импульсных паттернов: вверху (зелёный цвет) – электрические импульсы накачки, внизу (красный цвет) – генерируемые лазерные импульсы

Все указанные подходы по созданию волоконных импульсных источников оптического излучения с управляемыми параметрами импульсной генерации открывают перспективы создания нового поколения источников лазерного излучения с задаваемыми и управляемыми режимами импульсной генерации и параметрами форм импульсов без изменения конфигурации лазерного резонатора.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-32-20021 и грантов МОН 3.5572.2017/БЧ и 3.889.2017/ПЧ.

Литература

1. *S. Kivistö, R. Herda, and O. G. Okhotnikov, "Electronically Tunable Yb-Doped Mode-Locked Fiber Laser," 20, 2007–2009 (2008)*
2. *S. L. Brunton, X. Fu, and J. N. Kutz, "Self-Tuning Fiber Lasers," 20, (2014)*
3. *B. N. Nyushkov, S. M. Kobtsev, A. K. Komarov, K - J. Opt. Soc. Am. B 35, 2582-2587 (2018)*
4. *Y. S. Fedotov, A. V. Ivanenko, S. M. Kobtsev, and S. V. Smirnov, "High average power mode-locked figure-eight Yb fibre master oscillator," Opt. Express 22, 31379 (2014)*

МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕШЕТОК В ВОЛОКОННОМ САМОСКАНИРУЮЩЕМ ЛАЗЕРЕ

Лобач И.А.[1,2,*], Дробышев Р.В.[1], Подивилов Е.В.[1,2], Каблуков С.И.[1,2]

[1] *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*
[2] *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*
[*] *E-mail* lobach@iae.nsk.su

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16116

Одним из необычных режимов лазерной генерации является самоиндуцированное сканирование (самосканирование) частоты [1]. В этом режиме оптическая частота лазера изменяется скачками от импульса к импульсу на одну частоту межмодовых биений, несмотря на отсутствие каких-либо элементов перестройки в лазере. Причиной сканирования являются динамические решетки усиления и показателя преломления, которые возникают в активной среде самосканирующего лазера во время генерации [2]. Решетки обусловлены продольной неоднородностью инверсии населенности активной среды вследствие формирования стоячей волны в резонаторе. Фактически динамическая решетка становится отражателем внутри резонатора и создает динамическую распределенную обратную связь, которая определяет спектральную динамику лазера. Ранее динамические решетки уже становились объектом исследований (например, [3]). Однако в большинстве работ такие структуры формируются внешним образом, а не в процессе лазерной генерации, как это происходит в лазере с самосканированием частоты. Исследование структур в работающем (горячем) лазере представляет отдельную задачу. Моделирование [4] показывает, что коэффициент отражения таких структур в момент лазерной генерации может достигать десятков процентов. Однако, экспериментальные работы [5-6] демонстрируют несколько меньшие значения.

В частности, в работе [5] были предприняты попытки получить спектр отражения решеток с помощью измерения мощности пробного излучения с фиксированной длиной волны. Перестройка длины волны самосканирующего лазера приводит к постоянной перезаписи динамических решеток и смещению максимума их отражения. Для исключения влияния пробного излучения на лазерную генерацию применялась поляризационное разделение. Оценки, сделанные на основании экспериментальных данных [5] показали, что коэффициент отражения может достигать 7%. Однако, спектр отражения был сильно искажен из-за неоднородности двулучепреломления в волокне с сохранением поляризации. В работе [6] предлагается временное разделение пробного и лазерного излучения. Для этого накачка самосканирующего лазера выключалось в моменты, когда в лазер подавалось пробное излучение. При этом для измерения спектров отражения использовалось перестраиваемое по частоте пробное излучение. Такой подход позволил оценить временные характеристики динамических решеток и получить более подробные спектры отражения решеток. Однако полученные спектры отражения были искажены дополнительной модуляцией, вызванной накоплением пробного излучения в резонаторе самосканирующего лазера. Отметим, что в случае скрещенных поляризаций, использовавшихся в [5], излучение пробного поля не накапливалось в резонаторе, поскольку в лазере присутствует поляризатор. В данной работе, предлагается новая схема измерения спектров отражения динамических решеток, где устранены все указанные недостатки.



Рис. 1 Схема волоконного самосканирующего лазера (черная рамка) и установки для измерения спектра отражения динамических решеток (синяя рамка)

Схема установки представлена на Рис.1. В резонатор самосканирующего лазера [6] был добавлен трехпортовый акусто-оптический модулятор (АОМ), который позволяет разделять процесс записи решеток в активном волокне в горячем резонаторе и их считывания с одновременным размыканием волоконного резонатора. После формирования динамической решетки генерируемым излучением накачка лазера отключалась при помощи генератора сигналов на времена ~ 100 мкс. Как было показано ранее, в течение этого времени решетка продолжает существовать в активном волокне по причине большого времени жизни ~1 мс [7]. Пробное перестраиваемое излучение заводится в самосканирующий лазер с небольшой задержкой после выключения накачки. Фотодетектором регистрируется результат интерференции отражений от выходного зеркала лазера и динамической решетки.

Нужно отметить, что в каждом цикле запуска/выключения накачки старая динамическая решетка определяет оптическую частоту генерации лазера, а спектр отражения новой решетка с точностью до частотного сдвига копирует спектр предыдущей. Характерные спектры отражения, нормированные на сигнал отражения от выходного зеркала лазера, представлены на Рис. 2. Измеренные спектры являются результатом интерференции отраженных волн от выходного зеркала и динамической решетки. Результат интерференции зависит от расстояния между отражателями. Рисунки 2а и 2б демонстрируют уменьшение периода модуляции спектра, связанной с этой интерференцией, с ростом расстояния между этими отражателями.

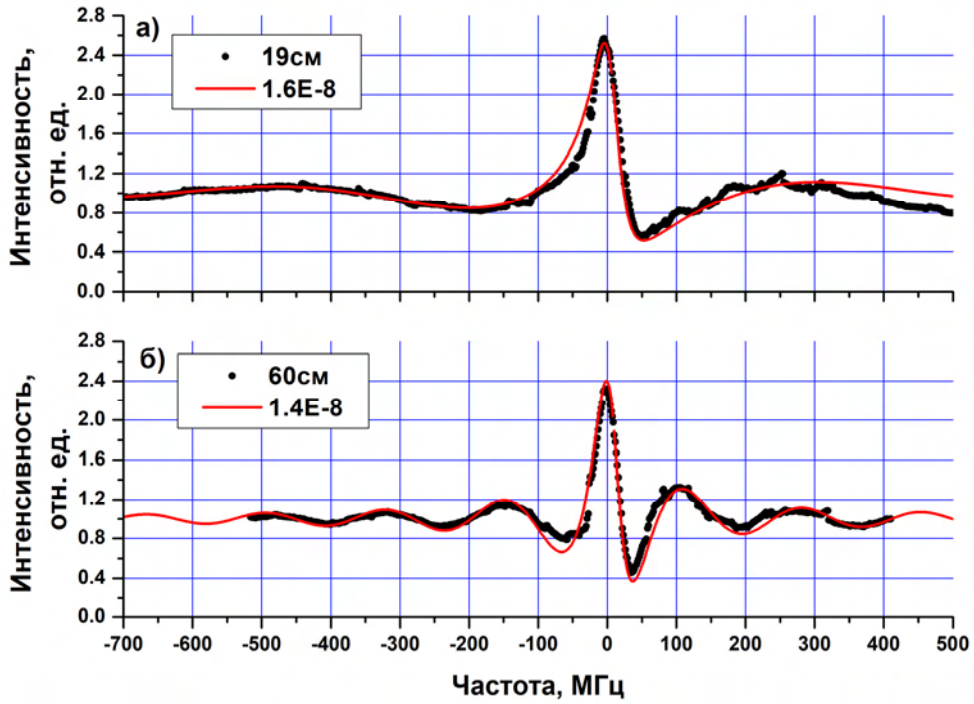


Рис. 2 Объединенный спектр отражения динамических решеток при длине отрезка пассивного волокна вблизи выходного зеркала (а) 19 см и (б) 60 см: точки - эксперимент, линии – теория [5]

Полученные результаты экспериментов описываются теоретическими зависимостями [5] (линии на Рис.2). Основным параметром модели является амплитуда модуляции показателя преломления решетки, которая, исходя из подгонки экспериментальных данных, составила $(1.5\pm0.1)10^{-8}$. Такая модуляция при длине решетки 2.4 м соответствует коэффициенту отражения 0.1%.

Более подробное описание установки и обсуждение результатов будет представлено в докладе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (грант № 18-12-00243).

Литература

1. *Lobach I.A., et al, Optics Express,* 19, *17632–40 (2011)*
2. *Lobach I.A., et al, Laser Physics Letters,* 11, *045103 (2014)*
3. *Gan P., et al, Proc. of SPIE Vol. 10462, pp. 104623Z-1- 104623Z-8 (2017)*
4. *Peterka P., et al, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 24, *3, 902608 (2018)*
5. *Lobach I.A., et al, Optics Letters* 42, *4207-4210 (2017)*
6. *Drobyshev R.V., et al., 2018 International Conference Laser Optics, St. Petersburg, 2018, R1-50, (2018)*
7. *Дробышев Р.В., и др, 8 Семинар по волоконным лазерам, Новосибирск, 59-60, (2018)*

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СУБНАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ИТТЕРБИЕВОМ ВОЛОКОННОМ УСИЛИТЕЛЕ

Жлуктова И.В.[1*], **Камынин В.А.**[1], **Филатова С.А.**[1], **Трикшев А.И.**[1], **Цветков В.Б.**[1,2]

[1]*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, г. Москва*
[2]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва*
**E-mail: iv.zhluktova@gmail.com*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16117

В настоящий момент волоконные лазерные источники субнаносекундных импульсов находят применения во многих областях науки и технологии, благодаря компактности, эффективности и технологичности. А использование эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) обеспечивает генерацию вне спектров редкоземельных элементов, позволяя покрыть область спектра от 1 до 2.3 мкм. Так в ряде работ были продемонстрированы источники с генерацией ВКР, как в твердотельных [1-4], так и в волоконных лазерах[5,6]. Подобные лазеры имеют различные области применения: медицина, спектроскопия, лабораторные исследования и т.д. Отдельно стоит отметить, что при помощи удвоения частоты лазера со стоксовой компонентой возможно получение желтого излучения [7,8], в отличие от использования стандартных иттербиевых лазеров, так как после удвоения их частоты, полученное излучение уходит в зеленую область оптического спектра.

В данной работе представлен полностью волоконный источник субнаносекундных импульсов на длине волны 1125 нм, выделенной из первой стоксовой компоненты задающего лазера при помощи спектрального фильтра. Длительность импульсов спектрально выделенного излучения была не более 200 пс с частотой повторения 1 МГц. За счет использования нелинейного вращения плоскости поляризации излучения в волоконном задающем лазере, была получена пассивная синхронизация мод, а подстройкой контроллеров поляризации достигнуты различные режимы работы волоконного иттербиевого лазера. На рисунке 1 представлена оптическая схема экспериментальной установки.

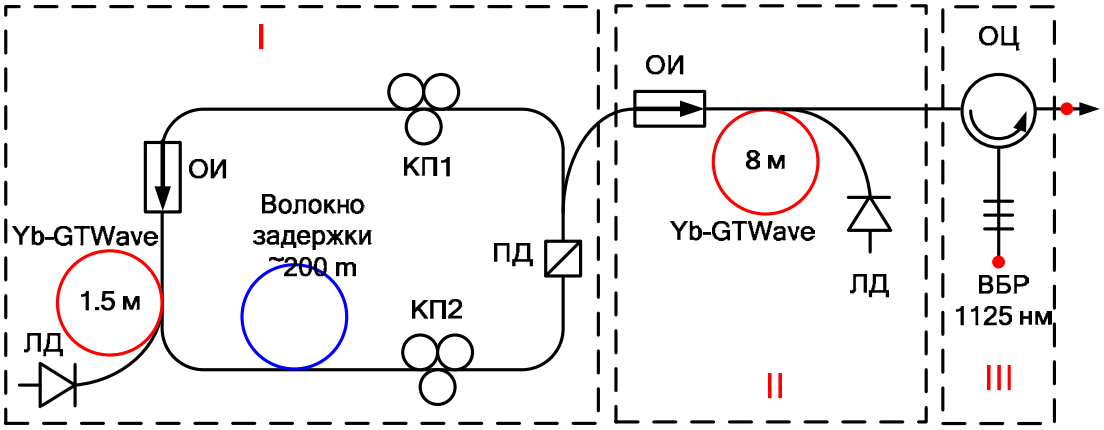


Рис. 1.Схема эксперимента: ЛД- лазерный диод накачки, КП 1,2- контроллеры поляризации, ОИ- оптический изолятор, ПД- поляризационный делитель, ОЦ- оптический циркулятор, ВБР- волоконная брэгговская решетка

В качестве задающего источника был собран полностью волоконный иттербиевый лазер, работающий в режиме пассивной синхронизации мод [9]. В качестве накачки лазера использовался лазерный диод с излучением на длине волны 975 нм. Резонатор задающего источника был сформирован из активного волокна с многокомпонентной оболочкой (GTWave), легированного ионами иттербия, и 200 м одномодового волокна SMF.Так как лазер работает на эффекте нелинейного вращения плоскости поляризации, в резонатор были добавлены пара коммерчески доступных контролеров поляризации. Вывод излучения из резонатора осуществлялся при помощи поляризационного делителя. Длительность импульсов иттербиевого лазера в одном из режимов составляла не более 1 нс, с частотой следования 1 МГц.

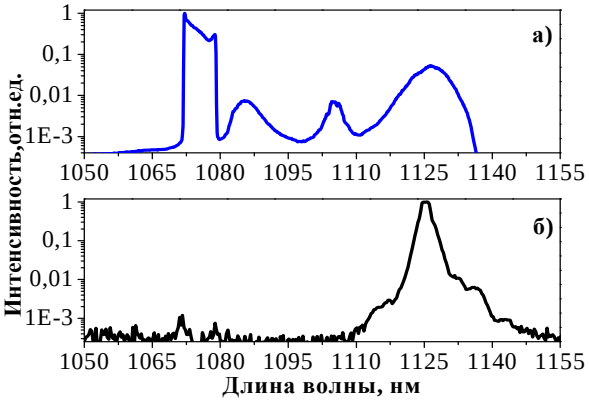


Рис. 2. Оптические спектры задающего источника (а) и селектированного излучения на 1125 нм (б)

На рисунке 2 (а) представлен оптический спектр иттербиевого лазера. Из спектра видно, что основной пик, который приходится на длине волны 1075 нм, имеет почти плоскую вершину со сглаженными краями. Данный пик характерен диссипативным солитонам, но так же здесь присутствует ВКР генерация, стоксовая компонента которой приходится на длину волны 1128 нм [10]. Режим лазера был подобран так, чтобы разница между основной длиной волны и пиком стоксовой компоненты составляла примерно 10 дБ (Рис.2(а)). В дальнейшем излучение от задающего источника усиливалось для обеспечения хорошего уровня сигнала при селекции излучения при помощи спектрального фильтра, в качестве которого выступали волоконная брэгговская решетка, с высоким коэффициентом отражения, на длине волны 1125 нм и оптический циркулятор.

На рисунке 2 (б) представлен оптический спектр селектированного излучения на длине волны 1125 нм. В зависимости от режима генерации задающего лазера, максимальная средняя мощность спектрально выделенного излучения варьировалась от 4.5 мВт до 25 мВт, а длительности импульсов не превышали 200 пс с частотой повторения 1 МГц.

В итоге были получены различные режимы работы иттербиевого лазера в зависимости от положения контроллеров поляризации и в дальнейшем проведены исследования по изучению динамики распространения импульсов селектированного излучения на длине волны 1125 нм.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 17-12-01564 «Перепутанные солитоны в оптических волокнах с переменной по длине дисперсией».

Литература

1. *Granados E., et al, Opt. Express 18, 5289–5294 (2010)*
2. *Granados E., et al, Opt. Express 17, 569–574 (2009)*
3. *Warrier A.M., et al, Opt. Express 22, 3325–3333 (2014)*
4. *Frank M., et al, Opt. Lett. 43, 2527-2530 (2018)*
5. *Liu W., et al, Opt.Express 24,26715-26721 (2016)*
6. *Aguergaray C., et al, Opt. Lett. 38,2644-2646 (2013)*
7. *Донцова Е.И., и др., Квантовая электроника, 46, 989–994(2016)*
8. *Petrasiunas M.J., et al, Opt. Express 22, 17716-17722 (2014)*
9. *Трикшев А.И., и др., Квантовая электроника, 46, 1085–1088 (2016)*
10. *Kharenko D.S., et al, Opt. Lett., 37, 4104 (2012)*

ЛАЗЕРЫ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 2.5 ÷ 5 МКМ НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВЫХ СВЕТОВОДОВ С ПОЛОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ

Гладышев А. В.[*]

Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[*] *E-mail:* alexglad@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16118

Создание световодов с полой сердцевиной (СПС) открыло путь к разработке лазеров нового типа – газовых волоконных лазеров (ГВЛ). Такие источники излучения могут сочетать в себе преимущества как волоконных лазеров (компактность, низкий порог генерации, одномодовое излучение), так и газовых лазеров (высокая выходная мощность, малая ширина линии генерации). Благодаря сильной локализации излучения в полой сердцевине некоторых типов СПС, ГВЛ позволяют генерировать излучение даже в тех областях спектра, где оболочка СПС имеет сильное фундаментальное поглощение. В частности, оставаясь в рамках хорошо освоенной технологии кварцевого стекла, ГВЛ способны генерировать в среднем ИК диапазоне, представляющем большой интерес из-за наличия в нем линий поглощения многих химических соединений.

За последние годы был получен целый ряд новых результатов, продемонстрировавших возможность создания в спектральном диапазоне 2.5 ÷ 5 мкм эффективных ГВЛ на основе полых световодов из кварцевого стекла. В данной работе представлен краткий обзор последних достижений в этой области исследований.

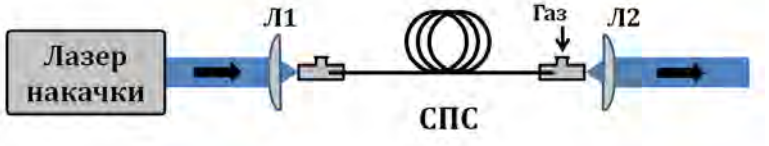


Рис. 1. Типичная схема газовых волоконных лазеров. Л1 и Л2 – линзы для ввода и вывода излучения из полой сердцевины световода, заполненной активным газом

Наиболее распространенным подходом при создании газовых волоконных лазеров является применение безрезонаторной однопроходной схемы (рис. 1). Торцы СПС герметично фиксируются в миниатюрных газовых кюветах, которые имеют окошки для ввода/вывода излучения и позволяют закачивать в полую сердцевину различные газы, служащие активной средой лазера. Ключевым фактором, позволившим продвинуться в средний ИК диапазон, является использование СПС с отрицательной кривизной границы сердцевина-оболочка (рис. 2) [1-3], которые позволяют снизить оптические потери в световоде на 3 порядка по сравнению с поглощением кварцевого стекла в этом диапазоне спектра. При этом полый световод обеспечивает малый диаметр поля моды (~ 20 ÷ 70 мкм) и большую длину (~ 1 ÷ 20 м) взаимодействия излучения с активной средой.

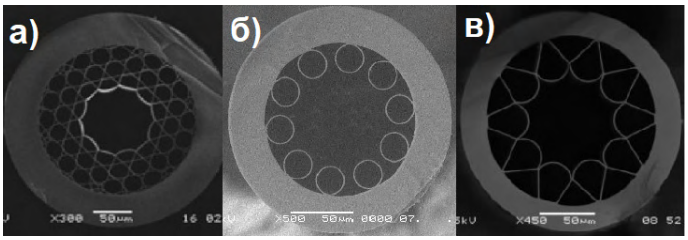


Рис. 2. Микрофотографии торцов кварцевых СПС с отрицательной кривизной границы сердцевина-оболочка. а) световод типа Кагоме [1], б) револьверный световод [2] и в) световод с оболочкой в форме «парашютиков» [3]

ГВЛ на основе инверсии населенностей. Применение в качестве активной среды дипольно-активных молекулярных газов позволяет получать генерацию в среднем ИК диапазоне за счет инверсии населенностей между колебательно-вращательными энергетическими уровнями молекул. В качестве накачки используются лазерные источники ближнего ИК диапазона, обладающие перестройкой по длине волны, которая необходима для точного попадания в узкие ($\Delta\nu$ ~ 1 ГГц) линии поглощения активного газа. При накачке перестраиваемым излучением параметрических генераторов были продемонстрированы наносекундные ГВЛ на основе таких газов как C_2H_2, CO_2, N_2O и CO,

генерирующие на длинах волн 3.1, 4.3, 4.6 и 4.67 мкм, соответственно [1, 4]. Поскольку в таких ГВЛ переход с нижнего лазерного уровня в основное состояние происходит безызлучательно, за счет столкновений молекул газа, то для эффективной и стабильной работы лазера необходимо оптимизировать давление газа. Характерное давление активного газа в ГВЛ лежит в диапазоне 0.001 ÷ 0.1 атм.

Наибольшее развитие получили ГВЛ на основе ацетилена C_2H_2. Для этого газа длина волны накачки (1.53 мкм) попадает в полосу усиления ионов эрбия, что позволило использовать в качестве накачки эрбиевые волоконные лазеры [5]. На сегодняшний день в ГВЛ на основе ацетилена C_2H_2 достигнута непрерывная генерация с выходной мощностью 1.1 Вт на длине волны 3.1 мкм [3]. При этом эффективность генерации по отношению к поглощенной мощности накачки составляет 33 %. Кроме того, реализована ступенчатая перестройка длины волны генерации в диапазоне 3.09 – 3.21 мкм с шагом ~4 нм [6]. Нет сомнений, что в скором будущем аналогичный прогресс будет достигнут в ГВЛ на основе CO_2, излучающих в области 4.3 мкм и накачиваемых излучением тулиевых волоконных лазеров в области 2 мкм.

Рамановские ГВЛ. Применение в качестве активной среды рамановски-активных газов существенно расширяет доступный диапазон длин волн генерации. Особый интерес представляют легкие молекулярные газы, такие как H_2, D_2, CH_4, поскольку они обладают большим рамановским сдвигом (4155 $см^{-1}$, 2987 $см^{-1}$, 2917 $см^{-1}$, соответственно), что позволяет создавать однокаскадные рамановские ГВЛ среднего ИК диапазона, источником накачки для которых могут служить импульсные волоконные лазеры, генерирующие в хорошо освоенных спектральных диапазонах около ~1.0, 1.5 и 2.0 мкм. Типичные значения давления газа в рамановских ГВЛ составляют ~10 атм и более.

За последние три года на основе кварцевых револьверных световодов, заполненных изотопами водорода (H_2, D_2), продемонстрированы наносекундные рамановские ГВЛ на длинах волн 2.9, 3.3, 3.5 и 4.4 мкм [7, 8]. Квантовая эффективность в первых работах составляла ~10÷15 %. В результате оптимизации рамановского ГВЛ на основе H_2 квантовая эффективность преобразования 1.56→4.42 мкм достигла теоретического предела 55 %, обусловленного оптическими потерями (~1 дБ/м) на длине волны генерации [2]. Средняя выходная мощность на длине волны 4.42 мкм составила 1.4 Вт, несмотря на большой квантовый дефект преобразования 1.56→4.42 мкм.

На основе кварцевых СПС, заполненных метаном (CH_4), реализованы двухкаскадные рамановские ГВЛ среднего ИК диапазона. При накачке наносекундными импульсами (~0.4 нс) на длине волны 1.06 мкм продемонстрировано рамановское преобразование 1.06→1.54→2.81 мкм с квантовой эффективностью 65 % [9]. Кроме того, показано эффективное преобразование 1.06→1.54→2.81 мкм в пикосекундном режиме (12 пс) [10]. Квантовая эффективность составила 40 %, а пиковая выходная мощность достигала 10 МВт на длине волны 2.81 мкм. Перспективной, но пока еще не решенной задачей остается разработка фемтосекундных рамановских ГВЛ среднего ИК диапазона.

Таким образом, достигнутые за последнее время результаты по лазерной генерации в спектральной области 3÷5 мкм, убедительно демонстрируют, что газовые волоконные лазеры могут быть эффективными источниками лазерного излучения среднего ИК диапазона. При этом они имеют большой потенциал для наращивания средней и пиковой выходной мощности. Такие лазеры, несомненно, найдут разнообразные применения в таких областях как биомедицина, газоанализ и обработка материалов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №19-12-00361.

Литература

1. *Nampoothiri A. V. V., et al., Opt. Mater. Express 2, 948-961 (2012)*
2. *Astapovich M. S., et al., IEEE Photonic. Tech. Lett., 31(1), 78-81 (2019)*
3. *Xu M., et al, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 24(3), 1-8, Art no. 0902308 (2018)*
4. *Aghbolagh F. B. A., et al., Opt. Lett. 44, 383-386 (2019)*
5. *Wang Z., et al., Opt. Express 22, 21872-21878 (2014)*
6. *Zhou Z., et al., Opt. Express 26, 19144-19153 (2018)*
7. *Gladyshev A. V., et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 24(3), 1-8, Art no. 0903008, (2018)*
8. *Gladyshev A. V., et al., Quantum Electron. 47(12), 1078–1082 (2017)*
9. *Li Z., et al., Opt. Lett. 43, 4671-4674 (2018)*
10. *Cao L., et al., Opt. Express 26(5), 5609-5615 (2018)*

ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ТУЛИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР

Колегов А.А*., Софиенко Г.С.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск
** E-mail:* albatrosing@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16119

Тулиевые волоконные лазеры стали популярны благодаря их спектру излучения, который лежит в области от 1900 нм до 2100 нм. Они находят применение в таких направлениях как медицина (лазерные хирургические аппараты) [1-4], накачка гольмиевых активных элементов [5], которые имеют обширное применение в медицине [6] и в лидарных системах [6]. Наиболее востребованы тулиевые лазеры в медицине. В настоящее время разработано множество методик лечения заболеваний с помощью лазерного излучения, которые нашли применение в оториноларингологии, дерматокосметологии, лечении сосудистых заболеваний, кардиохирургии, ортопедии и травмоталогии, нейрохирургии, гинекологии и проктологии, хирургии, стоматологии, урологии и др.

Характер воздействия излучения на биоткани существенно зависит от длины волны. Спектр излучения волоконных лазеров с активным волокном, легированным ионами тулия соответствует выраженному пику поглощения в биотканях. Излучение в этой области спектра обладает хорошими режущими свойствами, малой зоной теплового повреждения и хорошей коагуляцией. Лазеры мощностью до 40 Вт успешно используются для остеоперфорации, в геникологии, проктологии и сосудистой патологии. В последнее время стали использоваться спросом лазеры с мощностью излучения 50-120 Вт в урологии для трансуретальной энуклеации простаты и литотрипсии (дробление камней в организме человека). Наилучший эффект последних двух операций (как и большинства других) с использованием лазерного излучения наблюдается при использовании импульсно-периодического режима излучения. Такой режим может быть достигнут с помощью модуляции излучения источников накачки активного волокна лазера или с помощью модуляции добротности резонатора. В последнем случае лазер имеет малые массогабаритные характеристики и высокую пиковую мощность излучения. Как показали исследования [7], хороший клинический эффект наблюдается при использовании излучения со следующими параметрами: длительность импульса 100 нс, частота следования импульсов 100 кГц, средняя мощность излучения 10 Вт. Излучение с указанными характеристиками можно получить в тулиевом волоконном лазере с пассивной модуляцией добротности. Концептуальная схема лазера представлена на рис. 1.

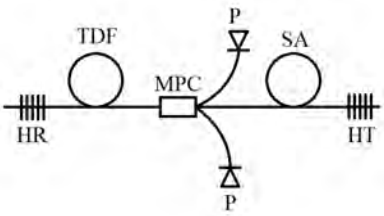


Рис. 1. Принципиальная схема тулиевого волоконного лазера с пассивной модуляцией добротности резонатора

HR, HT – волоконные брегговские решетки (зеркала резонатора), MPC – волоконный объединитель накачки, TDF – тулиевое волокно, SA – насыщающийся поглотитель, P – источник накачки

В представленной на рис.1 схеме достигнута генерация излучения с необходимыми для проведения операций параметрами.

Литература

1. *Abushkin I.A., et al. Proc. of SPI.E 892,89263Q1-89263Q11(2014)*
2. *Abushkin I.A., et al. Proc. of SPIE. 8565, 85650V1-85650V7 (2013)*
3. *Thomas R., et al. World J. Urol. 28, 45–51 (2010)*
4. *Серебряков В.А., и др., Опт. ж.12, 3-13 (2015)*
5. *Серебряков В.А., и др. Опт. ж. 12. 17-24 (2016)*
6. *Scholle K., et al. Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics, 471-500 (2010)*
7. *Замятина В.А., и др. Радиофотоника 4, 20-35 (2015)*

ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННЫЙ ГАЗОВЫЙ РАМАНОВСКИЙ ЛАЗЕР С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ГЕНЕРАЦИИ 4.4 МКМ

Астапович М.С., Гладышев А.В.*, Худяков М.М., Косолапов А.Ф., Лихачев М.Е., Буфетов И.А.

Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва

**E-mail:* alexglad@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16120

Источники лазерного излучения с длиной волны генерации более ~2.5 мкм востребованы для многочисленных практических приложений, таких как биомедицина, газоанализ, детектирование и обработка материалов. Особый интерес представляют лазеры, способные генерировать высокую выходную мощность и при этом обеспечивать высокое оптическое качество выходного пучка. Перспективным подходом к созданию таких лазеров является использование револьверных световодов с полой сердцевиной (СПС), заполненной различными дипольно-активными или комбинационно-активными газами. Благодаря сильной локализации излучения в полой сердцевине, револьверные СПС позволяют получать низкие оптические потери в среднем ИК диапазоне, даже если оболочка световода изготовлена из кварцевого стекла. На сегодняшний день на основе кварцевых СПС продемонстрирован целый ряд газовых волоконных лазеров (ГВЛ), в том числе рамановских, генерирующих на длинах волн от 2.8 до 4.6 мкм [1-5]. Однако, конструкция указанных лазеров опирается на использование объемных элементов для ввода излучения накачки в полый световод. Таким образом, теряются такие преимущества волоконных лазеров как компактность, надежность конструкции и отсутствие механических юстировок.

В данной работе впервые продемонстрирован полностью волоконный газовый рамановский лазер среднего ИК диапазона. Благодаря сварному соединению волоконного выхода лазера накачки и револьверного СПС, заполненного водородом, реализован свободный от механических юстировок ГВЛ, генерирующий наносекундные импульсы на длине волны 4.42 мкм с выходной средней мощностью 360 мВт и квантовой эффективностью 46 %. При этом параметр качества пучка составил $M^2 = 1.4$.

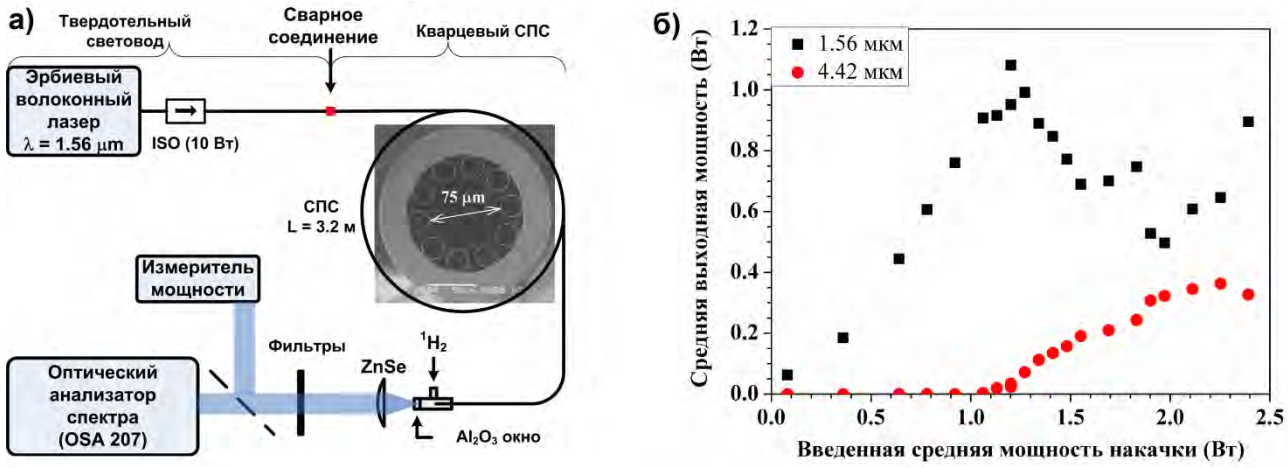


Рис. 1. (а) Схема экспериментальной установки. (б) Зависимости средней выходной мощности полностью волоконного рамановского ГВЛ от введенной средней мощности накачки. Представленные зависимости измерены как на длине волны накачки 1.56 мкм (черные квадраты) так и на стоксовой длине волны 4.42 мкм (красные точки)

Конструкция рамановского ГВЛ схематично показана на рис. 1а. В качестве источника накачки использовался эрбиевый волоконный лазер, генерирующий на длине волны 1.56 мкм импульсы длительностью 2 нс и частотой повторения 75 кГц. Средняя выходная мощность лазера накачки составляла 5 Вт, что соответствует пиковой мощности 33 кВт. Выходной торец волоконного лазера накачки подваривался к входному торцу револьверного СПС с помощью специально разработанной программы на сварочном аппарате (Fitel S175). Не смотря на существенно различающиеся диаметры полей мод твердотельного и полого световодов (20 и 55 мкм, соответственно), удалось достигнуть частичного согласования мод свариваемых световодов, за счет формирования в области стыковки

конусной перетяжки. В результате оптические потери на сварке составили ~3 дБ и оставались стабильными во всем диапазоне используемых давлений газа в полом световоде (1 – 60 атм). При этом сварка надежно обеспечивала герметичность и механическую прочность соединения.

В качестве активной среды рамановского ГВЛ использовался кварцевый револьверный СПС, заполненный водородом до давления 50 атм. Длина световода составляла 3.2 м, диаметр поля моды равнялся 55 мкм. Измеренные оптические потери составили менее 0.1 дБ/м на длине волны 1.56 мкм, и ~1.1 дБ/м на длине волны 4.42 мкм.

Порог рамановской генерации наблюдался при введенной пиковой мощности накачки ~8 кВт (средняя мощность 1.2 Вт), что хорошо согласуется со значением порога, полученным нами ранее в рамановском лазере с объемным вводом накачки [4]. Выше порога генерации средняя выходная мощность ГВЛ растет линейно с введенной мощностью накачки (рис. 1б, красные точки). Максимальная средняя мощность на длине волны 4.42 мкм составила 360 мВт при введенной мощности накачки 2.3 Вт. Таким образом, квантовая эффективность преобразования 1.56→4.42 мкм составила 46 %, что близко к теоретическому пределу (55 %), определяемому уровнем оптических потерь кварцевого револьверного СПС на стоксовой длине волны. Повышение введенной мощности накачки до значений более 2.3 Вт приводит к снижению выходной мощности рамановского ГВЛ. Этот эффект требует дальнейшего исследования и может быть связан как с выделением тепла в точке сварки когда лазер работает в режиме высокой средней мощности, так и с возникновением конкурирующего нелинейного процесса – возникновения рамановской генерации на вращательных переходах молекул водорода (1.56→1.72 мкм). Измерения диаметра выходного пучка как функции расстояния от выходного торца рамановского лазера позволили оценить параметр качества пучка на длине волны 4.42 мкм, который составил M^2 = 1.4.

Таким образом, впервые создан полностью волоконный газовый рамановский лазер, реализующий однокаскадное преобразование 1.56→4.42 мкм в револьверном СПС, заполненном молекулярным водородом. Квантовая эффективность преобразования составила 46 % при средней выходной мощности 360 мВт на длине волны 4.42 мкм. Измеренный параметр качества пучка составил M^2 = 1.4. Полученные результаты демонстрируют перспективность ГВЛ для создания компактных, надежных и эффективных лазеров среднего ИК диапазона, потребность в которых диктуется многочисленными применениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (№ 19-12-00361).

Литература

1. *Cao L., et al., Opt. Express 26(5), 5609-5615 (2018)*
2. *Gladyshev A. V., et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 24(3), 1-8, Art no. 0903008, (2018)*
3. *Xu M., et al, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 24(3), 1-8, Art no. 0902308 (2018)*
4. *Astapovich M. S., et al., IEEE Photonic. Tech. Lett., 31(1), 78-81 (2019)*
5. *Aghbolagh F. B. A., et al., Opt. Lett. 44, 383-386 (2019)*

2,07-МИКРОННЫЙ ГОЛЬМИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Вольф А.А.[1,2], Скворцов М.И.[1,2*], Камынин В.А.[3], Жлуктова И.В.[3], Абдуллина С.Р.[1], Достовалов А.В. [1,2], Цветков В.Б.[3], Бабин С.А.[1,2]

[1] *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*
[2] *Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия*
[3] *Институт общей физики им А.М. Прохорова, г. Москва*
[*] *E-mail:* qwertymikhails@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16121

Благодаря высокой стабильности выходного одночастотного излучения, низкому уровню шума (сигнал/шум ~70 дБ), узкой линии генерации (0,1-10 кГц), волоконные лазеры с распределенной обратной связью (РОС-лазеры) имеют широкий диапазон применений от спектроскопии до сенсорных систем. При генерации в диапазоне длин волн ~ 2 мкм спектр применений увеличивается. В первую очередь это связано с тем, что около 2.1 мкм находится локальный минимум поглощения атмосферы, что позволяет использовать двух-микронное излучение в атмосферных оптических линиях связи, лазерной локации. Благодаря сильному поглощению на 2 мкм для воды, основной составляющей биологической ткани, достигается значительный нагрев небольших ее участков, что позволяет производить очень точные разрезы и может быть использовано в хирургии.

Как правило, для формирования структуры РОС-лазера в активном световоде применяется технология ультрафиолетовой записи через фазовую маску. Однако применение фазовой маски не позволяет варьировать длину волны генерации и является дорогостоящим решением. В работе [1] был впервые продемонстрирован лазер с распределенной обратной связью, в качестве резонатора которого выступала 32-мм волоконная брэгговская решетка (ВБР) с фазовым π-сдвигом, изготовленная с помощью методики поточечной фемтосекундной записи в активном эрбиевом волоконном световоде. Методика введения фазовых сдвигов в структуру ВБР основана на быстром смещении волоконного световода с помощью пьезокерамического транслятора [2]. Одной из особенностей ВБР, созданных с помощью фемтосекундного (фс) лазерного излучения, является относительно большая величина двулучепреломления ($\delta n \sim 10^{-5}$-10^{-4}), что на порядок больше, чем для ВБР, записанных с помощью УФ излучения. Это приводит к тому, что порог генерации достигается только для одной поляризационной моды. Кроме того, применение подобной методики позволяет изготавливать такие структуры в нефоточувствительных световодах.

В настоящей работе впервые представлен РОС-лазер с длиной волны генерации 2,07 мкм, изготовленный по фс технологии. В качестве активной среды использовалось маломодовое высоколегированное Ho^{3+} волокно длиной 42 мм, поглощение которого составило ≈110дБ/м на длине волны 1,150 мкм. Экспериментальная схема представлена на рис. 1.: излучение накачки на 1,125 мкм с максимальной мощностью ≈5,5 Вт заводилось через спектрально-селективный разветвитель (ССР) в активный световод, в котором была изготовлена ВБР структура с π-сдвигом. Далее излучение генерации на 2,07 мкм выводилось на измерительные приборы также посредством ССР.

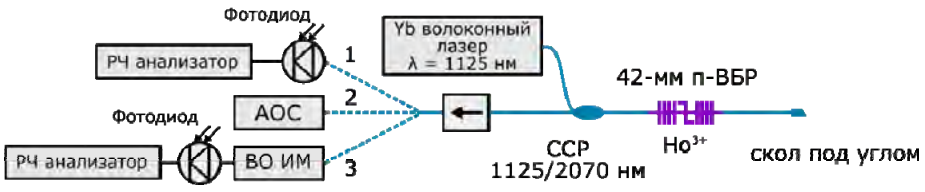


Рис.1.Схема экспериментальной установки: РЧ анализатор – радиочастотный анализатор, АОС – анализатор оптических спектров, ВО ИМ – волоконно-оптический интерферометр Майкельсона, ССР – спектрально-селективный разветвитель

В ходе работы были изучены режимы генерации при различных температурных условиях. В случае, когда резонатор был помещен в жидкий азот (≈ -196°C), непрерывный режим наблюдался уже на пороге генерации. В конфигурации, где резонатор РОС-лазера находился при комнатной

температуре (≈ 20°C) наблюдался самопульсирующий режим при мощности накачки более 2 Вт, что значительно больше порогового значения (1,5 Вт). На рис.2(а) представлена зависимость выходного излучения от мощности накачки в случае охлаждения резонатора до криогенной температуры.

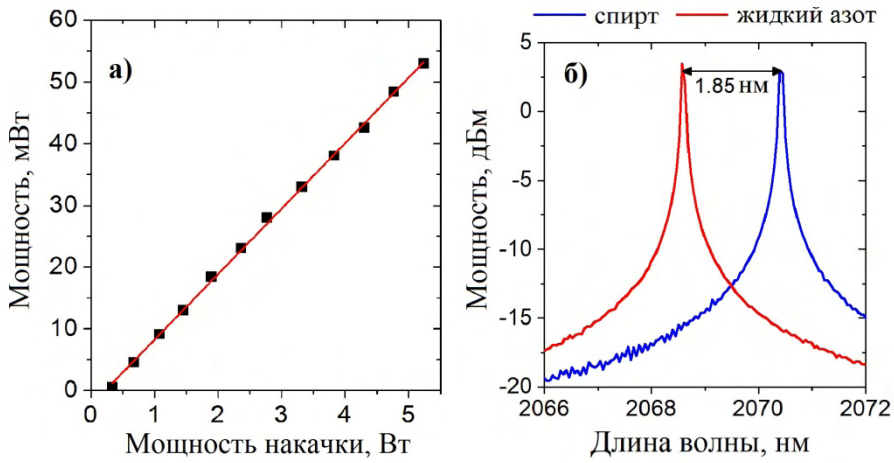


Рис.2(а)Зависимость мощности выходного излучения от мощности накачки (б)Спектры генерации для различных конфигураций: синий цвет – резонатор охлаждался спиртом(комнатная температура), красный цвет – резонатор помещен в жидкий азот (криогенная температура)

Порог генерации наблюдался при мощности накачки ≈ 350 мВт, максимальная мощность генерации составила 53 мВт при 5,2 Вт накачки. Таким образом, дифференциальная эффективность для генерации, распространяющейся противоположно излучению накачки, составила ≈ 1,1%. Так же, при охлаждении резонатора, наблюдался значительный сдвиг спектра генерации в коротковолновую область, в нашем случае он составил ≈ 1,85 нм, как показано на рис.2(б). Так как излучение на 2 мкм сильно поглощается в световоде (≈0,2дБ/м), то использование методик на основе гетеродинирования для определения спектральной ширины в данном случае не подходит. Для измерения был применен подход, описанный в работе [3], где ширина определялась из измеренного фазового шума и составила ≈ 10кГц.

Таким образом, применение поточечной методики записи ВБР структур позволило изготовить первый однополяризационный РОС-лазер в гольмиевом световоде. В докладе мы более детально обсудим результаты экспериментов и потенциальные применения таких лазерных источников.

Работа выполнена в рамках темы госзадания ИАиЭ СО РАН (рег. № АААА-А17-117062110026-3).

Литература

1. *Skvortsov M.I., et al, Laser Phys. Lett. 15, 035103 (2018)*
2. *Wolf A.A., et al, Opt. & Laser Technol. 101, 202(2018)*
3. *Domenico G., et al, Appl. Opt. 49, 4801 (2010)*

СПЕКТРАЛЬНАЯ И ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В ГОЛЬМИЕВОМ ВОЛОКОННОМ УСИЛИТЕЛЕ

Камынин В.А.[1], **Филатова С.А.**[1], **Жлуктова И.В.**[1], **Цветков В.Б.**[1,2]

[1] *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия*
[2] *Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16122

Источники ультракоротких импульсов (УКИ), работающие в спектральном диапазоне более 2 мкм, привлекают внимание благодаря ряду их возможных применений, таких как перспективные системы связи, обработка материалов, генерация суперконтинуума, газовый анализ, медицина и т. д. [1]. Следует отметить, что для большинства применений выходная энергия импульсов самого задающего лазера недостаточна. Таким образом, актуальной задачей является усиление ультракоротких импульсов двухмикронного спектрального диапазона. Стоит отметить, что для получения импульсов с заданными характеристиками необходимо детальное рассмотрение спектральной и временной динамик УКИ в гольмиевых волоконных усилителях [2]. Однако за последние несколько лет было представлено не так много исследований, посвященных этой проблеме [3, 4]. В данной работе продемонстрированы эксперименты по изучению временной и спектральной динамик УКИ в зависимости от параметров входного импульса, длины и концентрации активного волокна.

В качестве задающего генератора (ЗГ) был использован гольмиевый волоконный кольцевой лазер, работающий в режиме гибридной синхронизации мод [5]. Возможность изменения длин резонатора и активной среды лазера позволила получить различные спектральные и временные параметры импульса. УКИ от ЗГ усиливались гольмиевым волоконным усилителем. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Излучение ЗГ направлялось в усилитель через волоконный ответвитель 99/1, чтобы иметь возможность контролировать характеристики ЗГ. Для подавления обратной связи был установлен изолятор. Накачка усилителя осуществлялась на длине волны 1125 нм через мультиплексор. В качестве активной среды использовались волокна, легированные ионами гольмия с различной концентрацией. Выходное излучение анализировалось с помощью автокоррелятора и спектрометра.

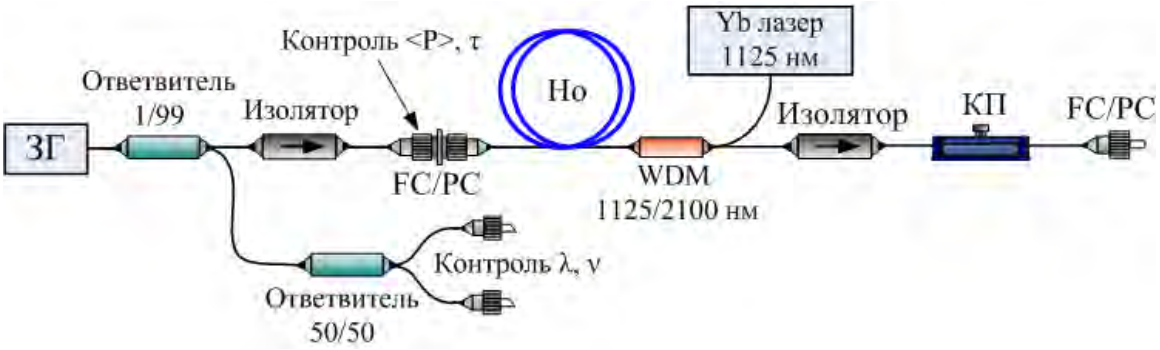


Рис.1 Схема экспериментальной установки

На рис. 2 показаны спектры и автокорреляционные функции импульсов а) на выходе из ЗГ, б) измеренные на выходе гольмиевого усилителя при уровне выходной мощности 160 мВт. В последнем случае видна значительная деформация импульса и спектра, связанная с нелинейным преобразованием излучения за счет высокой пиковой мощности в среде с отрицательной дисперсии групповых скоростей. При дальнейшем увеличении накачки усилителя распад импульса продолжался, что приводило к уширению спектра в длинноволновую область спектра вплоть до 2.4 мкм.

В данной работе были исследованы временная и спектральная динамики ультракоротких импульсов при распространении в гольмиевом волоконном усилителе. Наблюдалось уменьшение длительности импульсов с 1200 фс до 200 фс и существенной уширение спектра.

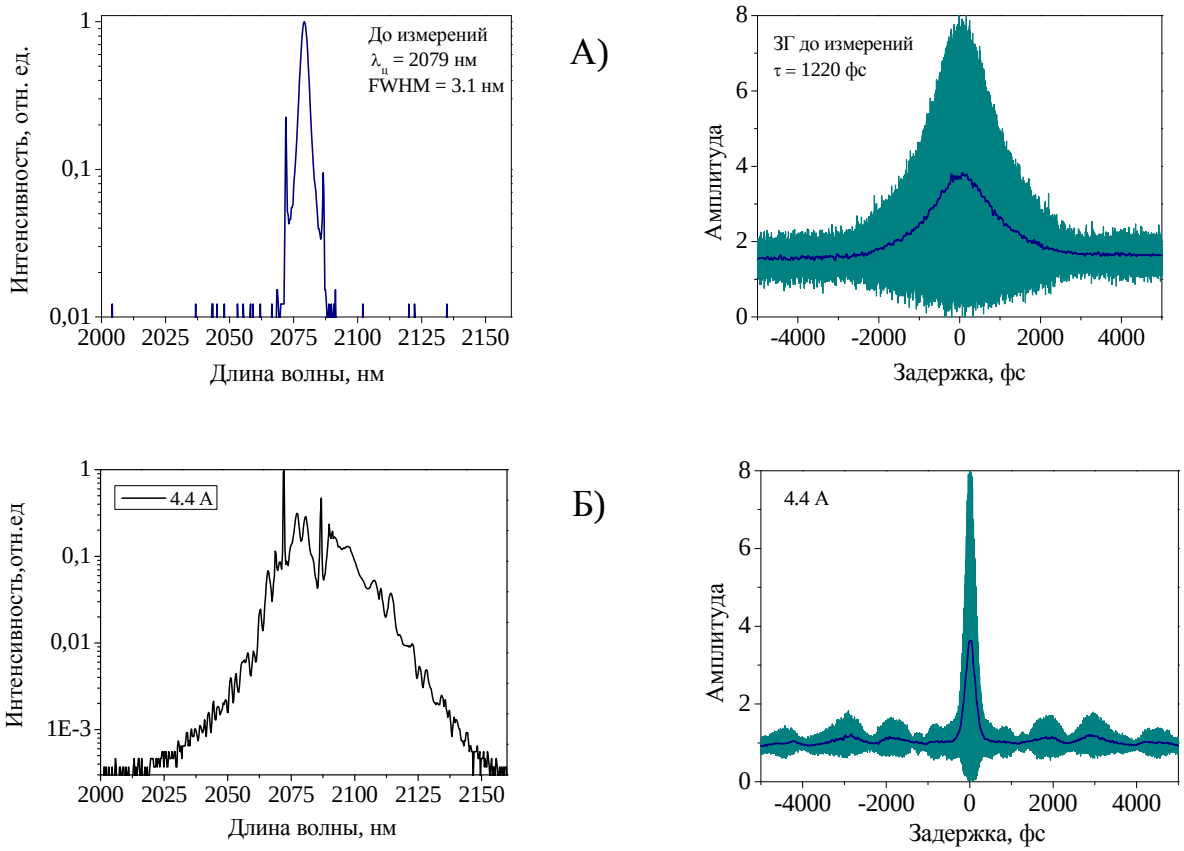


Рис.2 Спектры и автокорреляционные функции импульсов а) на выходе из ЗГ, б) измеренные на выходе гольмиевого усилителя при уровне выходной мощности 160 мВт

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН № 5 "Фотонные технологии в зондировании неоднородных сред и биообъектов”.

Литература

1. *Scholle K. et al. IntechOpen, 471-500 (2010)*
2. *Kamynin, V. A., et al. Las. Phys. Lett. 11.5 (2014)*
3. *Wang M. et al. Opt. Lett.. 43.19 4619-4622 (2018)*
4. *Hinkelmann M. et al. Opt. Expr.25.17 20522-20529 (2017)*
5. *Filatova S. A. et al. JOSA B. JOSA B 35.123122-3125 (2018)*

РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ CARS

Антропов А. А.[1*], Евменова Е. А.[1], Харенко Д. С.[1,2], Кузнецов А. Г.[1], Каблуков С. И.[1], Бабин С. А.[1,2]

[1] *Институт Автоматики и Электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*
[2]*Новосибирский национальный исследовательский государственный институт, г. Новосибирск*
[*] *E-mail: Antropov.ilp@gmail.com*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16123

Когерентная антистоксова Рамановская спектроскопия (CARS) на данный момент являются одним из передовых и перспективных методов для идентификации молекулярных соединений и процессов в них. Она также очень полезна для проведения неинвазивных диагностических исследований. CARS активно развивается и открывает новые перспективы в изучении внутриклеточного и межклеточного взаимодействия липидов, ядер или цитоплазмы [1,2].

Для реализации задачи необходим широкий спектр регистрации комбинационного рассеяния, что позволит идентифицировать сложные молекулярные соединения. Известно, что существующие и используемые в настоящее время лазеры для реализации CARS-спектроскопии, дороги и сложны в обслуживании. Обычно это твердотельные лазеры на основе объемных оптических элементов, такие как титан-сапфировый лазер и оптические параметрические генераторы с нелинейными кристаллами. Использование оптических параметрических генераторов обусловлено тем, что они могут обеспечить преобразование длины волны на необходимую величину. Волоконно-оптические параметрические генераторы (FOPO) [3] в отличие от нелинейных кристаллов обеспечивают возможность получения широкого диапазона перестройки (от 500 до 3000 см$^{-1}$) [4, 5] и позволяют создать системы с меньшей стоимостью и отсутствием необходимости юстировок для долговременной работы или для создания мобильной установки.

В данной работе мы представляем установку для CARS спектроскопии с полностью волоконным источником, который накачивает волоконно-оптический параметрический генератор на длине волны около 1030 нм (Рис.1).

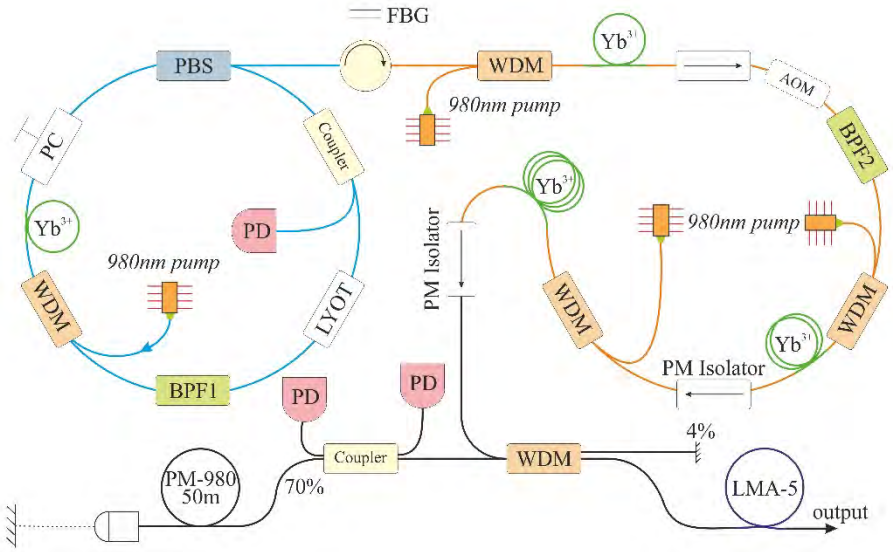


Рис. 1. Схема установки: PBS – поляризационный делитель пучка, Coupler – разветвитель, LYOT – фильтр Лио, BPF – широкополосный фильтр, WDM – мультиплексор, PD – фотодиод, FBG – волоконная Брегговская решетка, AOM – акустооптический модулятор, PC – контроллер поляризации

В качестве задающего генератора использован волоконный источник на основе волокна, легированного Yb^{3+} и работающего в режиме диссипативных солитонов при центральной длине волны 1030 нм с частотой повторения ~ 12,8 МГц (Рис.2а), соотношение сигнал шум радиочастотного спектра на уровне 75 дБ, длительность импульса ~6 пс, а после отражения от узкополосной ВБР ~85 пс. Импульсы усиливаются в 3-х каскадах волоконного усилителя также на основе Yb волокна до пиковой мощности ~1.8 кВт (Рис. 2б). Достижение такой пиковой мощности возможно благодаря использованию АОМ после 1го каскада усилителя, в режиме прореживания до частоты ~ 1МГц.

а) б)

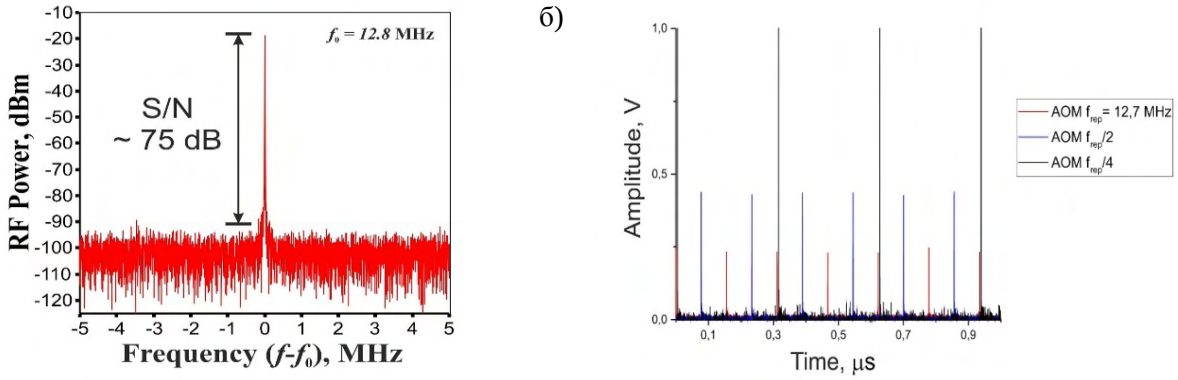


Рис. 2. Радиочастотный спектр основной гармоники (а) и осциллограма импульсов в зависимости от степени открытости АОМ (б)

Используя данный источник в качестве накачки, мы наблюдали однопроходную параметрическую генерацию вблизи 800 нм в фотонно-кристаллическом волокне LMA5-PM длиной 1 м. (рис.3а). На Рис. 3б показана пиковая мощность излучения на выходе 3го каскада.

а) б)

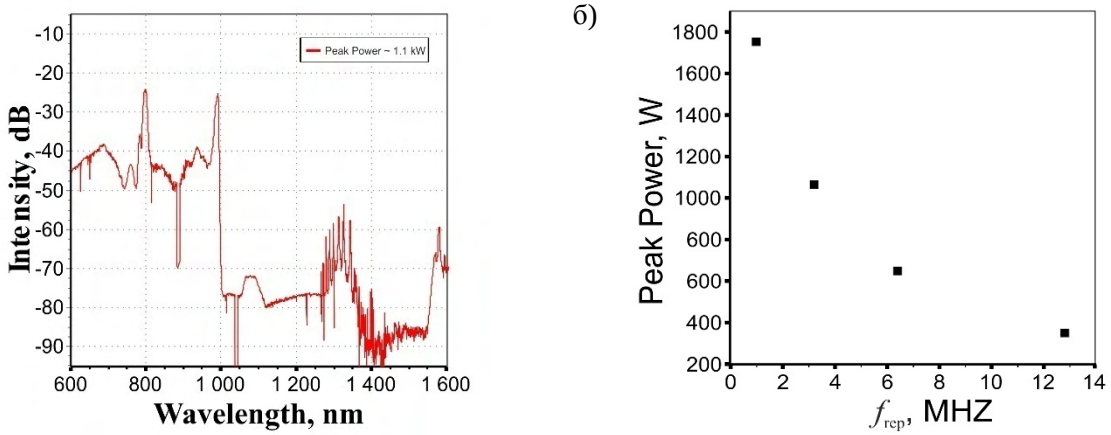


Рис. 3. Спектр параметрической генерации (а) и зависимость пиковой мощности от частоты (б)

Для достижения таких пиковых мощностей были оптимизированы выходные параметры каждого каскада усиления (средняя мощность и выходной спектр сигнала, степень насыщения сигнала) были исследованы в зависимости от тока диодов накачки и от степени открытия АОМ (полностью открыт или в режиме прорежения, вплоть до пропускания каждого 13 импульса). На основе полученных результатов был оптимизирован режим работы каждого каскада усилителя при различной степени открытия АОМ.

Работа выполнена при поддержке проекта No 38 (0319-2017-0011) комплексной программы фундаментальных научных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования».

Литература

1. *Gottschall T. et al. Optics express T. 22. – №. 18, p. 21921-21928, (2014)*
2. *Krafft C. et al. Chemical Society Reviews T. 45. – №. 7, p. 1819-1849, (2016)*
3. *Lefrancois S. et al. Optics letters. T. 37. – №. 10, p. 1652-1654, (2012)*
4. *Baumgartl M. et al. Optics express. T. 20. – №. 4, p. 4484-4493, (2012)*
5. *Zobina E. A., et al. Opt. Express 23, p. 16589-16594, (2015)*

ВКР-ЛАЗЕР С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ НА ОСНОВЕ МАССИВА ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК

Абдуллина С.Р.[1*], Скворцов М.И.[1,2], Власов А.А.[1], Подивилов Е.В.[1,2], Бабин С.А.[1,2]

[1] *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*
[2] *Новосибирский государственный университет*
[*] *E-mail:* abdullina.sofia@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16124

Известно, что волоконные лазеры с распределенной обратной связью (РОС-лазеры) представляют собой надежный источник одночастотного излучения, но для их изготовления требуется специальная методика записи волоконной брэгговской решетки (ВБР) с фазовым сдвигом, что представляет особенную сложность в случае ВКР-лазеров на основе пассивных волокон с длинными ВБР, см. [1] и цитируемую литературу. В то же время ВКР-лазеры очень востребованы, поскольку позволяют получать генерацию в широком диапазоне длин волн, в отличие от лазеров на основе активных волокон. Для получения узкополосной генерации ВКР-лазеров в качестве альтернативы РОС может использоваться случайная распределенная обратная связь (СРОС), возникающая при отражении от ВБР со множеством случайных фазовых сдвигов или массива ВБР, записанных через интервалы случайной длины [2,3]. Так, в работе [2] продемонстрирован ВКР-лазер с длиной волны генерации 1.5 мкм на основе ВБР длиной 1 м со 1500 случайными фазовыми сдвигами. В припороговом режиме получена одночастотная генерации с шириной линии ~430 кГц, при увеличении выходной мощности до ~1 мВт наблюдалось резкое уширение линии и переход в некогерентный режим. Максимальная мощность составила 15 мВт при ширине линии 0.3 нм и эффективности генерации 0.8%.

В данной работе представлено развитие схемы ВКР-лазера со СРОС на основе массива ВБР, записанных со случайными фазами и амплитудами в пассивном волокне [3]. Структура лазера была оптимизирована с точки зрения потерь и числа решеток в массиве, в результате чего длина лазера составила ~7 м, число решеток – 33.

На рис. 1а приведена рефлектограмма массива ВБР, измеренная с помощью рефлектометра LUNA. Статистическое распределение ВБР по коэффициентам отражения хорошо описывается гауссовой функцией, наиболее вероятный коэффициент составляет ~30%. Для получения генерации в качестве источника накачки использовался непрерывный линейно-поляризованный иттербиевый лазер с длиной волны генерации 1045.2 нм мощностью до 14 Вт. Порог ВКР-генерации по заведенной мощности накачки составил 0.8 Вт. Мощностные характеристики лазера представлены на рис. 1б. Мощность стоксовых компонент на длине волны 1092 нм, распространяющихся в прямом и обратном по отношению к накачке направлениях, достигает 3 Вт при максимальной мощности накачки. Мощностные кривые испытывают перегибы при мощности накачки около 2 Вт, рис. 1б.

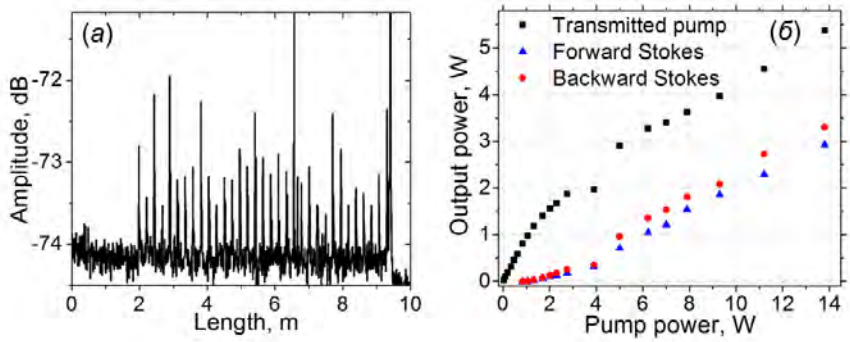


Рис.1. (а) Рефлектрограмма массива ВБР, измеренная с помощью рефлектометра LUNA; (б) Выходная мощность накачки, прошедшей через массив ВБР (квадраты), и мощности стоксовых компонент, распространяющихся в прямом (треугольники) и обратном (круги) по отношению к накачке направлении в зависимости от мощности накачки

На рис. 2а приведены радиочастотные спектры выходного излучения: одночастотный режим наблюдается до уровня мощности 12 мВт, несколько мод – при 15 мВт и ~100 мод при 40 мВт (что соответствует мощности накачки 1.5 Вт). Это поведение качественно согласуется с разработанной теоретической моделью когерентной (маломодовой) ВКР-генерации. При дальнейшем увеличении выходной мощности число мод резко возрастает, ширина линии генерации при максимальной выходной мощности достигает 80 пм. Таким образом, точка перегиба мощностных характеристик при мощности накачки ~2 Вт (соответствующая мощности стоксовых компонент ~100 мВт) может считаться пределом мощности для когерентного режима.

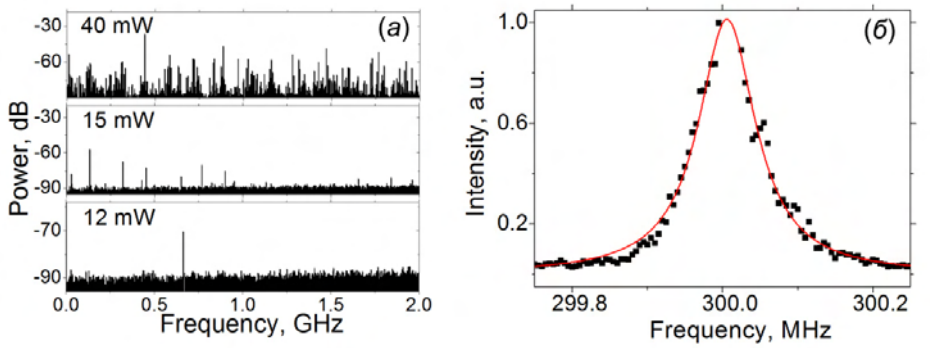


Рис.2 (а) Радиочастотный спектр стоксовой компоненты, измеренный при различных уровнях выходной мощности; (б) Спектр биений стоксовой компоненты, распространяющейся назад, измеренный методом само-гетеродинирования при уровне выходной мощности 10 мВт

Для измерения ширины линии в одночастотном режиме (10 мВт выходной мощности) использовался метод само-гетеродинирования: ширина сигнала биений на полувысоте составила 100 кГц, что соответствует ширине спектральной линии менее 50 кГц – на порядок меньше, чем в работе [2], рис. 2б, в то время как мощность излучения в нашем случае на порядок выше.

Также в работе продемонстрирована внутрирезонаторная параметрическая генерация на длине волны 1140 нм, возникающая за счет эффекта четырехволнового смешения (ЧВС) благодаря узкой линии стоксова излучения. Показана возможность перестройки длины волны холостого излучения ЧВС за счет перестройки длины волны накачки ВКР-лазера, являющейся сигнальной волной процесса ЧВС.

Лазеры такого типа благодаря узкой линии и достаточно высокой мощности генерации, доступной в широком диапазоне длин волн, могут быть использованы в телекоммуникационных и сенсорных системах. Также их излучение можно эффективно преобразовать в видимую область спектра за счёт удвоения частоты, что расширит область применений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-52-7822 (работа М.И.С., Е.В.П. и С.А.Б. по исследованию случайной генерации) и темы госзадания ИАиЭ СО РАН № гос. рег. АААА-А17-117062110026-3 (работа С.Р.А. и А.А.В. по записи случайных ВБР). Авторы выражают благодарность за предоставленное оборудование ЦКП «Спектроскопия и оптика» (http://ckp-rf.ru/ckp/3046/).

Литература

1. *Loranger S. et al, Optica 5, 295-302 (2018)*
2. *Gagné M., Kashyap R., Opt. Lett. 39, 2755-2758 (2014)*
3. *Скворцов М.И. и др., Квант. электроника. 47, 696-700 (2017)*

УСИЛЕНИЕ, КОГЕРЕНТНОЕ СУММИРОВАНИЕ, СЖАТИЕ И УЛУЧШЕНИЕ КОНТРАСТА МОЩНЫХ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В МНОГОСЕРДЦЕВИННЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ

Андрианов А.В.[1*], Калинин Н.А.[1,2], Егорова О.Н.[3], Липатов Д.С.[4], Анашкина Е.А.[1], Балакин А.А.[1], Скобелев С.А.[1], Ким А.В.[1], Литвак А.Г.[1]

1Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород
[2] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород
[3] Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, г. Москва
[4] Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН, г. Нижний Новгород
[*]E-mail: alex.v.andrianov@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16125

Разработка активных и пассивных многосердцевинных волокон (МСВ) с взаимодействующими сердцевинами открывает новые возможности и перспективы для создания источников мощных ультракоротких импульсов.

Активные МСВ являются интересной альтернативой волокнам с большим размером моды для построения лазерных усилителей с высокой пиковой мощностью. Нами теоретически и в численном моделировании найдены несколько вариантов структур сердцевин МСВ и соответствующие конфигурации поля, которые являются устойчивыми в сильно нелинейном режиме. Например, в волокнах с четным числом одинаковых сердцевин, распложенных на кольце, а также в квадратной матрице с сердцевинами в узлах существуют супермоды, у которых интенсивность излучения во всех сердцевинах одинакова, а фаза поля между соседними сердцевинами отличается на π (моды типа "плюс-минус"). Данные супермоды устойчивы при высокой пиковой мощности, многократно превышающей самофокусировочный порог для волокна с одной сердцевиной [1]. Данный результат открывает возможность масштабирования пиковой мощности волоконных систем на основе МСВ.

В нашем эксперименте впервые была продемонстрирована возможность усиления моды типа "плюс-минус" в специально разработанном иттербиевом 6-сердцевинном световоде с двойной оболочкой. Для эффективного возбуждения требуемой супермоды была разработана система синтеза распределения поля на входе волокна на основе жидкокристаллического пространственного модулятора света, а также система диагностики, позволяющая измерять амплитудные и фазовые профили всех возбужденных супермод. Изображение поперечного сечения волокна, а также измеренные профили интенсивности и фазы моды "плюс-минус" на выходе волокна показаны на рис. 1. За счет специального алгоритма оптимизации входного поля было достигнуто содержание моды "плюс-минус" более 80% в выходном излучении. При накачке в первую оболочку многомодовым лазерным диодом была достигнута выходная мощность около 1 Вт при частоте повторения 50-пикосекундных импульсов 1 МГц. Доля моды "плюс-минус" на выходе и ее профиль не изменялись заметным образом при увеличении мощности, что говорит о ее устойчивости.

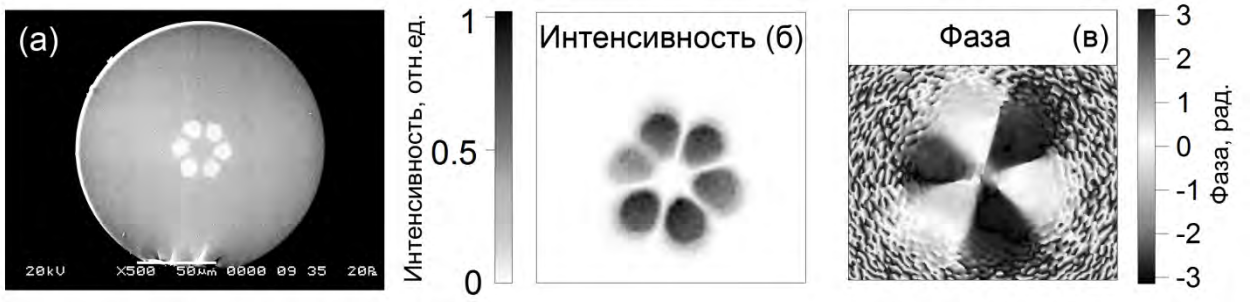


Рис.1. Поперечное сечение экспериментального иттербиевого МСВ (а), измеренные интенсивность (б) и фаза (в) моды "плюс-минус"на выходе МСВ

Возможности дальнейшего масштабирования энергии и пиковой мощности были исследованы в полномасштабном трехмерном численном моделировании, показавшем, что наиболее эффективно мода "плюс-минус" может быть усилена в конусных многосердцевинных световодах, а также в световодах с квадратной матрицей сердцевин. В численном моделировании продемонстрировано достижение пиковой мощности порядка 20 МВт непосредственно на выходе 12-сердцевинного конусного усилителя. Также в численном моделировании были исследованы различные варианты

схемы когерентного суммирования, позволяющие преобразовать излучение с выхода МСВ в один пучок с эффективностью более 70%.

Пассивные МСВ с достаточно сильно связанными сердцевинами могут быть эффективно использованы для нелинейного управления параметрами ультракоротких импульсов, в частности для сжатия и увеличения их временного контраста. Нами экспериментально продемонстрирован эффект нелинейного подавления дискретной дифракции (эффект "запирания") мощного излучения, введенного в центральную сердцевину 7-сердцевинного кварцевого световода. Впервые систематически исследованы изменения временной формы фемтосекундного импульса в сердцевинах на выходе МСВ при изменении входной энергии импульса, запущенного в одну из сердцевин [2]. Впервые экспериментально продемонстрировано, что при распространении в коротком отрезке МСВ может быть существенно улучшен контраст мощного фемтосекундного импульса за счет перетекания излучения низкоинтенсивного пьедестала импульса из центральной в боковые сердцевины при сохранении высокоинтенсивной центральной части импульса в центральной сердцевине, т.е. продемонстрирована работа МСВ в качестве насыщающегося поглотителя. Показано, что при распространении мощного ультракороткого импульса в семисердцевинном световоде в режиме "запирания" излучения в центральной сердцевине происходит сильное уширение спектра за счет фазовой самомодуляции. Близкая к квадратичной фаза импульса на выходе МСВ может быть скомпенсирована при линейном распространении в среде с аномальной дисперсией и импульс может быть сжат с 370 фс на входе в МСВ до 53 фс при энергии на выходе 140 нДж. Контраст сжатого импульса существенно (около 100 раз) превосходит контраст импульса на входе в МСВ за счет эффекта "очистки" импульса от пьедестала в МСВ так и за счет увеличения пиковой мощности при компрессии (рис. 2).

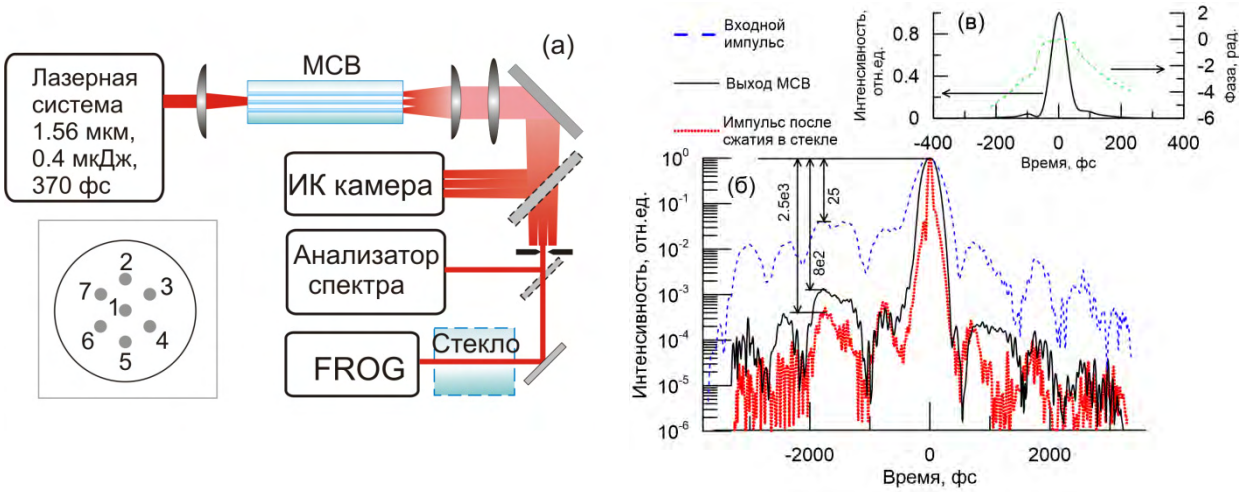


Рис. 2. Схема эксперимента по исследованию нелинейных преобразований импульса в МСВ (а), временная структура импульса на выходе системы в логарифмическом (б) и линейном масштабе (в)

Далее теоретически были найдены устойчивые стационарные и осциллирующие во времени пространственно-временные распределения поля (пространственно-временные солитоны или оптические пули) в МСВ в области аномальной дисперсии групповых скоростей. В МСВ с сердцевинами, расположенными по кольцу и центральной сердцевиной найдены режимы, при которых возможно когерентное суммирование излучения из всех сердцевин в центральную сердцевину, сопровождающееся компрессией импульса и возбуждением структур солитонного типа. В численном моделировании продемонстрирована возможность когерентного суммирования и сжатия импульса в 30 раз до минимальной длительности 15 фс с эффективностью около 50%.

Разработка легированной иттербием заготовки световода проводилась при поддержке гранта РНФ № 17-13-01343. Исследование распространения излучения в многосердцевинных волокнах поддержано грантом РНФ № 16-12-10472. Исследование когерентного суммирования поддержано Министерством науки и высшего образования РФ (Договор № 14.W03.31.0032).

Литература

1. *Balakin A., et al, Phys. Rev. A, 98, 043857 (2018)*
2. *Andrianov A., et al, Opt. Lett. 44, 303-306 (2019)*

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ МОЩНЫХ ОПТОВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

Колегов А.А.[*], **Кулаков Д.В., Галеев А.В., Исаев А.В.**

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск
[*] *E-mail:* albatrosing@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16126

Лазеры стремительно вошли в нашу жизнь с момента их изобретения и стали использоваться во многих направлениях, среди которых промышленность (обработка металла и других материалов, аддитивные технологии, высокоточные технологии), дальнометрия, системы 3d-видения, медицина и многие другие. Благодаря развитию оптоволоконных технологий волоконные лазеры стали повсеместно заменять традиционные газовые и твердотельные лазеры, чему способствовали следующие преимущества: компактность, высокий КПД, устойчивость к механическим воздействиям, надежность и отсутствие необходимости в юстировке и обслуживании. Настоящая работа посвящена проблемным вопросам разработки мощных волоконных лазеров.

Наращивание выходной мощности излучения волоконного лазера в основном ограничено такими физическими факторами как оптический пробой и нелинейные эффекты (вынужденное комбинационное рассеяние в случае широкополосного излучения и вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна в случае узкополосного излучения) [1]. Пороги проявления этих факторов увеличиваются с ростом диаметра сердцевины волокна, по которому распространяется излучение [1]. Увеличение сердцевины волокна влечет за собой ухудшение качества излучения, которое часто характеризуют параметром M^2. Наиболее лучшее сочетание диаметра сердцевины волокна и его числовой апертуры, обеспечивающее параметр $M^2 < 1.2$ (можно считать близким к дифракционному), и выходную мощность 2-3 кВт – 20 мкм с числовой апертурой NA=0,06 и 25 мкм числовой апертурой NA=0,045 [2]. Дальнейшее уменьшение числовой апертуры приводит к нарушению полного внутреннего отражения и выходу излучения из сердцевины, а увеличение диаметра – к заметному ухудшению качества излучения.

Принципиальная схема разработанного в РФЯЦ-ВНИИТФ одномодового волоконного лазера мощностью 2 кВт представлена на рис. 1.

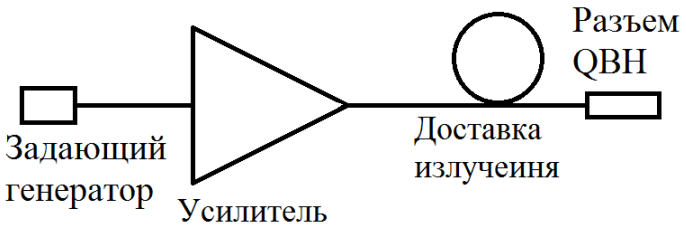


Рис. 1. Принципиальная схема мощного волоконного лазера

Разработанный лазер генерирует излучение мощностью 2 кВт с длиной волны 1080 нм, шириной спектра 3 нм и может использоваться для обработки материалов и в аддитивных технологиях. В лазере используется волокно с диаметром сердцевины 20 мкм и числовой апертурой NA=0,06, что обеспечивает высокое качество излучения.

Особое внимание при изготовлении мощного волоконного лазера необходимо уделять его оптоволоконным компонентам, которые должны вносить потери не более единиц процентов и иметь достаточный теплоотвод. В противном случае потери излучения на компонентах могут привести к их выходу из строя и других компонентов оптического тракта лазера.

Литература

1. *Dawson J., et al, Opt. Express. 16, 13240-13266 (2008)*
2. *Khitrov V., et al, Proc. of SPIE 8961, 89610V (2014)*

ОСОБЕННОСТИ ОБЪЕДИНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ С ПОМОЩЬЮ ОПТОВОЛОКОННЫХ СИГНАЛЬНЫХ ОБЪЕДИНИТЕЛЕЙ

Колегов А.А.*, Черникова А.В., Сарасеко Д.В., Денисенко К.А.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск
** E-mail:* albatrosing@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16127

Максимальная выходная мощность волоконного лазера имеет ряд физических ограничений [1] и часто простым способом наращивания мощности излучения для использования в технологических целях оказывается объединение нескольких мощных волоконных лазеров с помощью оптоволоконного объединителя.

На рис. 1 приведена схема объединения волоконных лазеров.

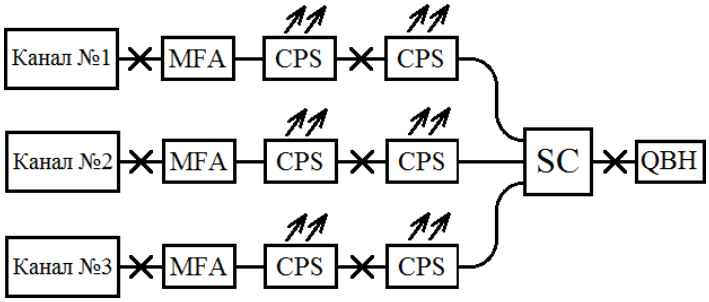


Рис. 1. Схема объединения

Выходное волокно одного лазера имеет диаметр сердцевины 20 мкм и оболочки 400 мкм (20/400). Адаптер поля моды (MFA) на своем входе имеет волокно, согласованное с выходным волокном лазера, а на выходе – волокно с параметрами 20/130. Фильтры оболочки (CPS) выводят излучение из кварцевой оболочки, накопленное вследствие внутренних потерь в MFA и на сварках. Каждый из волоконных лазеров через MFA соединяется с волоконным сигнальным объединителем 7→1 (SC), который имеет 7 входных волокон, согласованных с выходным волокном MFA, а выходное волокно имеет параметры 100/120/360.

При оптоволоконном объединении излучения киловаттного уровня необходимо уделять особое внимание используемым элементам – адаптеры поля моды и сами объединители. Внутренние потери этих элементов не должны превышать 2%, т.к. излучение мощностью 20 Вт, вышедшее из сердцевины волокна может привести как к возгоранию волокна, так и к его пробою в критических местах. На рис. 2 представлены ватт-амперные характеристики (зависимость выходной мощности излучения от тока источников накачки) трех волоконных лазеров и результат их объединения.

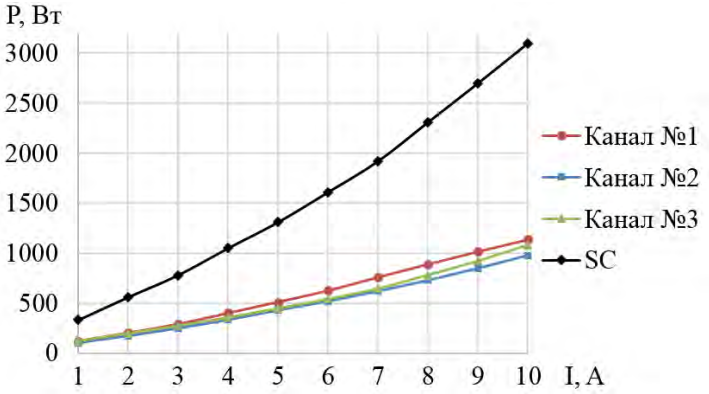


Рис. 2. Зависимость выходной мощности лазерного излучения от тока источников накачки

На рисунке 3 представлена динамика максимальной выходной мощности лазерного излучения. Следует отметить, что обратная связь по мощности не использовалась и стабильность обеспечивается только термодинамическим равновесием.

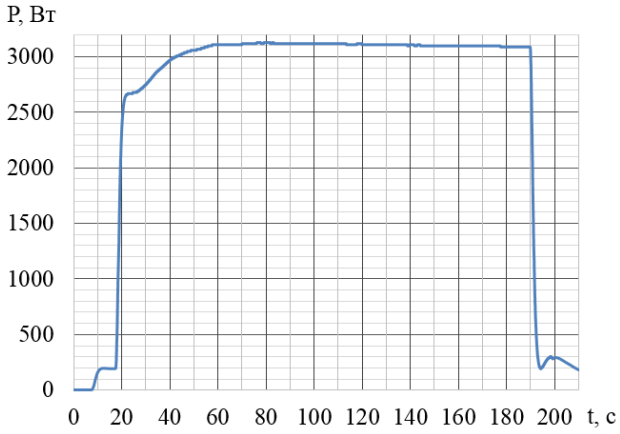


Рис. 3. Временная зависимость мощности излучения

На рис.4 приведен суммарный спектр излучения.

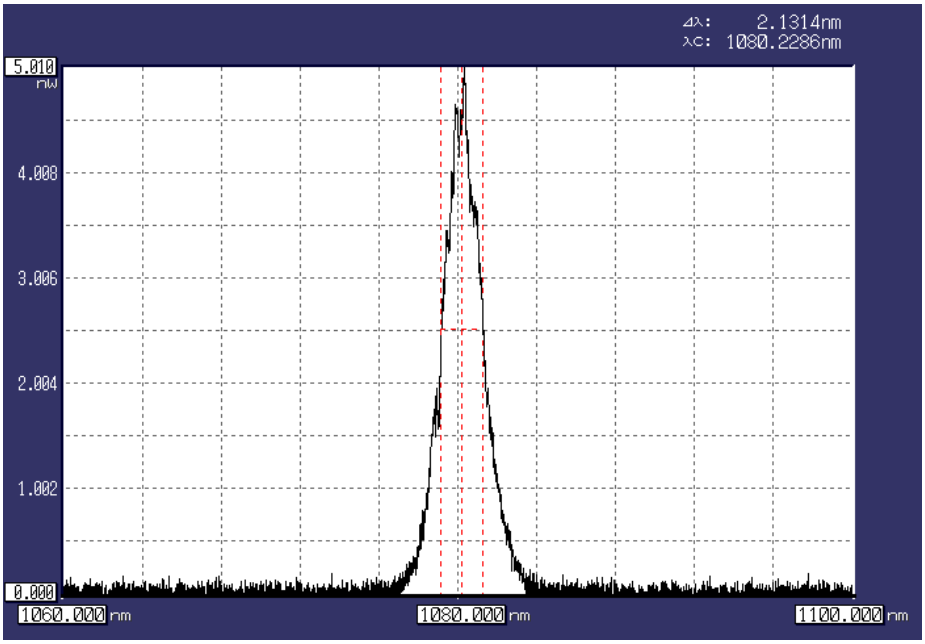


Рис. 4. Суммарный спектр излучения

Таким образом, получено, что максимальное значение мощности лазерного излучения составило 3,1 кВт. Потенциальная возможность увеличения мощности с помощью сигнального оптоволоконного объединителя, используемого в работе, до 10 кВт. Показаны основные особенности использования оптоволоконных объединителей для суммирования излучения.

Литература

1. *Dawson J., et al, Opt. Express. 16, 13240-13266 (2008)*

ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ER/ER-YB УСИЛИТЕЛЬ ОДНОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ПИКОВОЙ МОЩНОСТЬЮ 2 КВТ И ВЫСОКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

Худяков М.М.[1,2*], Бубнов М.М.[2], Липатов Д.С.[3], Гурьянов А.Н.[3], Лихачёв М.Е.[1]

[1] *Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва*
[2] *Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный, Московская область*
[3] *Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН, г. Нижний Новгород*
[*] *E-mail: DAngeL.74@gmail.com*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16128

Ряд атмосферных задач, связанных с регистрацией отраженного света (LIDAR) или измерением интегральных потерь в газе, требует одночастотных импульсных лазерных источников с высокой пиковой мощностью (0.1-10 кВт) и относительно высокой длительностью (0.1-1 мкс) в безопасном для глаз спектральном диапазоне. Волоконные усилители на базе легированных оксидом эрбия (Er) световодов с накачкой по оболочке являются наиболее подходящим и наиболее развитым на данный момент решением. До 4 кВт пиковой мощности в одночастотном одномодовом импульсе длительностью 80 нс было продемонстрировано в работе [1]. Однако эффективность преобразования накачки в сигнал была крайне низкой – около 5%, что было вызвано большим количеством непоглощённой накачки. Другой подход к созданию лазерных источников с высокой пиковой в этой спектральной области – использование световодов солегированных оксидами эрбия и иттербия (Er-Yb). Высокая эффективность (46%) была продемонстрирована в таких усилителей для непрерывного излучения [2], однако для этого требовалась встречная накачка и высокий уровень входной мощности (на уровне 10 Вт). В случае усиления импульсов до предельных пиковых мощностей такая конфигурация оказывается неприемлемой вследствие развития нелинейных эффектов в объединителе накачки и сигнала, приваренного на выходе активного световода. В случае же попутной накачки и относительно низкой входной мощности эффективность преобразования накачки в сигнал так же не превышает единиц процентов [3].

В настоящей работе мы предлагаем решить проблему низкой эффективности в Er и Er-Yb усилителях путём создания комбинированного Er/Er-Yb усилителя. Использование Er световода в качестве предусилителя позволяет усилить слабый входной сигнал (10-100 мВт) до уровня нескольких Вт с высокой эффективностью относительно поглощённой накачки. Усиленный сигнал вместе с большим количеством непоглощённой накачки (до 70% процентов от введённой) вводится в Er-Yb световод, приваренный напрямую после Er световода, где накачка с высокой эффективностью преобразуется в сигнал. Отдельным достоинством такой схемы является то, что Er и Er-Yb световоды имеют разные стеклянные матрицы сердцевины и сигнал вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ), возникающий в Er-Yb световоде, не усиливается в Er. Таким образом, увеличение общей длины световода при сварке Er и Er-Yb световод не приводит к снижению порога ВРМБ. Фактически максимально достижимая пиковая мощность в комбинированном усилителе будет определяться тем световодом (Er или Er-Yb), который имеет наименьший порог ВРМБ, с поправкой на распределение сигнала по длине усилителя. В данной работе удалось достичь пиковой мощности 2 кВт с эффективностью 25.1%.

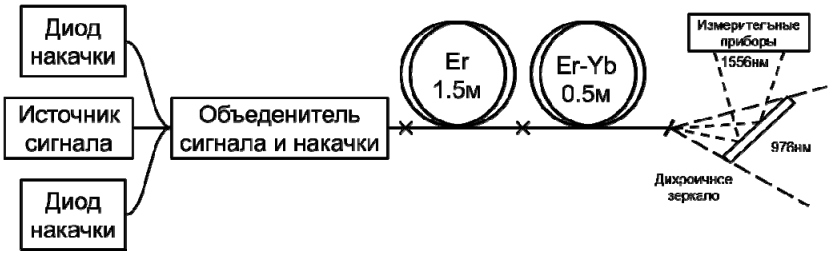


Рис. 1. Схема комбинированного усилителя

Схема полностью волоконного комбинированного построенного в схеме МОРА представлена на рис.1. Источник сигнала, использовавшийся в данной работе, создавал импульсы с частотой повторения 20 кГц и средней мощностью 100 мВт , форма которых подбиралась таким образом, чтобы

после усиления получались прямоугольные импульсы с длительностью 250 нс. Два стабилизированных по длине волны на 976 нм многомодовых лазерных диода давали до 45 Вт накачки, которая вместе с сигналом через 2+1 в 1 волоконный объединитель сигнала и накачки заводилась в Er световод аналогичный использованному в [4]. Er световод имел сердцевину диаметром 35 мкм, легированную P_2O_5 и Al_2O_3 в равной доле, с числовой апертурой ~0.017. Его внешняя оболочка имела форму квадрата со стороной 110 мкм. Оно было покрыто полимерным покрытием с низким показателем преломления, которое имело числовую апертуру ~0.46. Сразу после Er световода был напрямую приварен Er-Yb световод – коммерчески доступный LMA-EYDF-25P/300-HE Nufern световод. Сердцевина этого световода была сильно легирована P_2O_5 и имела диаметр 25 мкм. Вокруг сердцевины находился легированный GeO_2 слой - пьедестал, толщина которого равнялась 25 мкм. Таким образом числовая апертура сердцевины по отношению к пьедесталу составила ~0.105 и пьедестала к оболочке ~0.2. Внешняя оболочка световода имела форму восьмиугольника с расстоянием между параллельным сторонами 300 мкм. Для предотвращения обратного отражения от выходного торца световода к нему был приварен короткий отрезок световода без сердцевины с диаметром 400 мкм. Мы использовали дихроичное зеркало для отделения накачки от выходного сигнала.

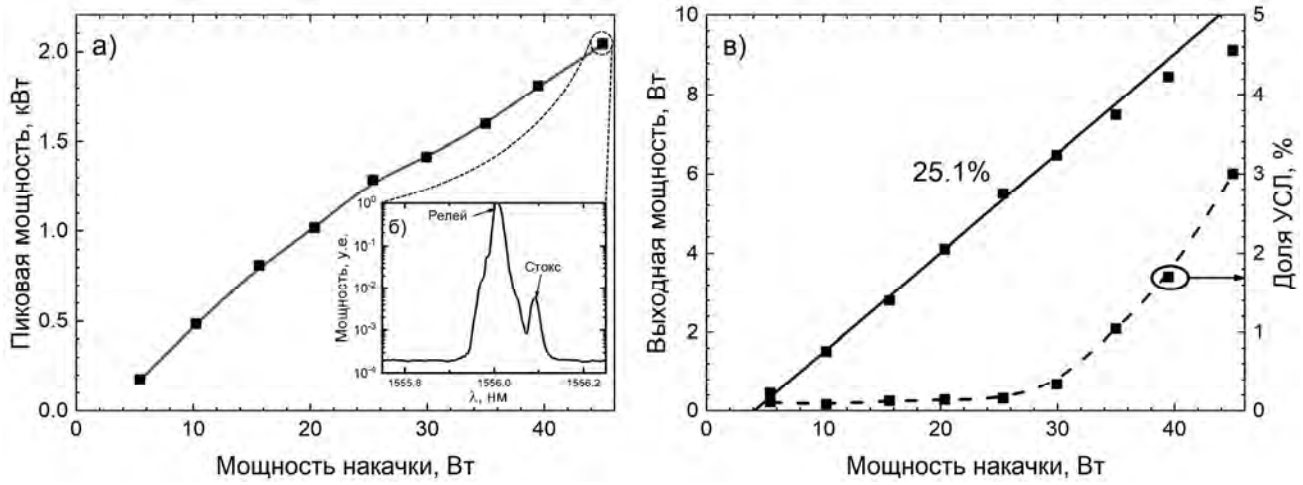


Рис. 2.а) Зависимость выходной пиковой мощности от мощности накачки; б) спектр сигнала, распространяющегося в обратном направлении; в) зависимость выходной мощности и доли усиленной спонтанной люминесценции (УСЛ) от мощности накачки

Результаты представлены на рис.2. Для контроля доли усиленной спонтанной люминесценции (УСЛ) в выходном сигнале был использован интегрирующий фотоприёмник [5]. При максимальной мощности накачки в 45 Вт была получена пиковая мощность 2 кВт с эффективностью 25.1%. При этом, в спектре сигнала, распространяющегося назад, доля мощности в первом стоксе ВРМБ была существенно меньше уровня сигнала релеевского рассеяния, то есть порог ВРМБ в данном случае не был достигнут. В то же время, доля УСЛ составила 3%. Таким образом, в данном случае ограничивающим фактором явилась максимальная энергия, запасённая в усилителе.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 18-19-00687.

Литература

1. *L. V Kotov, M. E. Likhachev, M. M. Bubnov, V. M. Paramonov, M. I. Belovolov, D. S. Lipatov, and A. N. Guryanov, "Record-peak-power all-fiber single-frequency 1550 nm laser," Laser Phys. Lett., vol. 11, no. 9, p. 095102, Sep. 2014*
2. *O. De Varona, W. Fittkau, P. Booker, T. Theeg, M. Steinke, D. Kracht, J. Neumann, and P. Wessels, "Single-frequency fiber amplifier at 15 μm with 100 W in the linearly-polarized TEM_00 mode for next-generation gravitational wave detectors," Opt. Express, vol. 25, no. 21, p. 24880, Oct. 2017*
3. *Z. Zhao, H. Xuan, H. Igarashi, S. Ito, K. Kakizaki, and Y. Kobayashi, "Single frequency, 5 ns, 200 μJ, 1553 nm fiber laser using silica based Er-doped fiber," Opt. Express, vol. 23, no. 23, p. 29764, 2015*
4. *M. M. Khudyakov, M. M. Bubnov, A. K. Senatorov, D. S. Lipatov, M. E. Likhachev, A. A. Rybaltovsky, O. V. Butov, A. N. Gur'yanov, and L. V. Kotov, "Cladding-pumped 70-kW-peak-power 2-ns-pulse Er-doped fiber amplifier," in Fiber Lasers XV: Technology and Systems, 2018, vol. 10512, p. 41*
5. *L. Kotov, M. Likhachev, M. Bubnov, O. Medvedkov, D. Lipatov, A. Guryanov, K. Zaytsev, M. Jossent, and S. Février, "Millijoule pulse energy 100-nanosecond Er-doped fiber laser," Opt. Lett., vol. 40, no. 7, p. 1189, 2015*

УСИЛИТЕЛЬ ИМПУЛЬСОВ С ВЫСОКОЙ СРЕДНЕЙ (100 Вт) И ПИКОВОЙ (1 МВт) МОЩНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ИТТЕРБИЕВОГО СВЕТОВОДА-КОНУСА

Бобков К.К.[1*], Левченко А.Е.[1], Вельмискин В.В.[1], Кочергина Т.А.[1], Алешкина С.С.[1], Бубнов М.М.[1], Липатов Д.С.[2], Лаптев А.Ю.[2], Гурьянов А.Н.[2], Лихачев М.Е.[1]

[1] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва, Россия
[2] Институт Химии Высокочистых Веществ им. Г.Г. Девятых РАН, г. Нижний Новгород, Россия
[*] E-mail: wittkoss@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16128

В настоящее время все больший интерес привлекают применения лазеров ультракоротких импульсов для обработки материалов. В данном случае критически важным является одновременное достижение относительно короткой длительности импульса (от десятков фемтосекунд до десятков пикосекунд) и большой энергии в импульсе. Что обеспечивает модификацию, либо испарение материала в зоне фокусировки лазерного излучения без повреждения соседних областей. Дополнительным требованием промышленности к таким лазерам является высокая частота следования импульсов (а следовательно – и высокая средняя мощность), для того, чтобы увеличить скорость обработки материалов.

В настоящее время иттербиевые импульсные лазеры являются наиболее перспективными для решения таких задач. Лазеры строятся по схеме задающий генератор – усилитель мощности, при этом если схема генерации импульсного излучения достаточно хорошо отработана в настоящее время, то создание усилителя импульсов пикосекундной длительности с большой средней и пиковой мощностью является нетривиальной задачей. Увеличение пиковой мощности ограничено развитием ряда нелинейных эффектов (фазовая самомодуляция, вынужденное комбинационное рассеяние, четырехволновое смешение), приводящих, например, к порче пространственной и спектральной формы импульса. Увеличить порог нелинейных эффектов можно лишь используя световоды с большой площадью поля моды, то есть с увеличенным диаметром сердцевины до десятков-сотни рабочих длин волн. Такие световоды, по сути, являются маломодовыми, а одномодовый режим работы в них реализуется за счет различных механизмов потерь высших мод или селективного возбуждения фундаментальной моды. Так, при селективном возбуждении фундаментальной моды использование световода-стержня с диаметром сердцевины 100 мкм позволило усилить импульсы длительностью 3 пс до 0.9 МВт пиковой мощности и 130 Вт средней мощности [1]. Однако дальнейшее увеличение средней мощности было ограничено появлением эффекта модовой нестабильности: образование термически-индуцированной решетки, вызванной интерференцией фундаментальной и первой высших мод, на которой излучение из фундаментальной моды рассеивается в первую высшую моду и обратно с частотой порядка нескольких кГц при превышении некоторого порога средней мощности [2]. В то же время существует альтернативная конструкция световода с большой площадью поля моды: так называемые, световоды-конусы, в которых излучение сигнала распространяется от абсолютно одномодового входного конца к сильно многомодовому выходному концу. Между концами диаметр сердцевины плавно увеличивается, за счет чего излучение распространяется в фундаментальной моде, увеличивающейся в диаметре, без возбуждения высших мод [3]. Усиление в чисто одномодовом режиме, теоретически, должно позволить создать усилитель с одновременно большой средней и пиковой мощностями, превосходящими результаты, продемонстрированные с использованием упомянутого выше световода-стержня.

В настоящей работе демонстрируется усилитель на основе иттербиевого анизотропного световода-конуса с общей длиной 2.45 м и диаметром сердцевины на входе и выходе 9 и 46 мкм, соответственно (Рис. 1). Установка реализована по классической схеме усилителя мощности задающего генератора: 6 пс импульсы с центральной длиной волны 1064 нм и частотой следования 9.2 МГц генерировались коммерчески доступным генератора фирмы Fianium ltd., предусиливались в маломощном волоконном каскаде до средней мощности 17 мВт при длительности 8 пс и вводились по средствам сварки в тонкий конец световода-конуса. Излучение накачки от многомодового диода с центральной длиной волны 976 нм и апертурой 0.15 вводилось в световод-конус с помощью системы линз и дихроичных зеркал навстречу усиливаемого сигнала.

В используемом световоде-конусе удалось усилить импульсы до средней мощности 96 Вт, что при измеренной длительности 8.3 пс соответствует пиковой мощности 1.2 МВт. Из спектра сигнала на максимальной мощности (Рис. 2, а) видно, что первая стоксовая компонента вынужденного

комбинационного рассеяния только начала появляться. Таким образом, уровень средней мощности был ограничен имеющимся источником накачки. Эффективность преобразования накачки в сигнал составила 66% (Рис. 2, б). Из автокорреляционных кривых (Рис. 2, в) видно, что импульс лишь незначительно уширился (с 8 до 8.3 пс), а нелинейный режим усиления (сильное спектральное уширение за счет фазовой самомодуляции) привел к ухудшению формы импульса. При максимальной выходной мощности лазера эффекта модовой нестабильности нами не наблюдалось.

Таким образом, в работе демонстрируется большой потенциал иттербиевых световодов-конусов в плане достижения одновременно высоких средней и пиковой мощностей.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №18-19-00687.

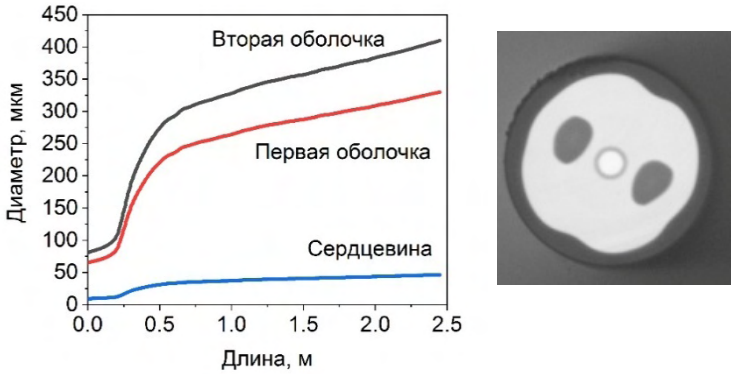


Рис. 1. Изменение диаметров сердцевины и оболочек по длине световода-конуса и фотография сечения световода-конуса

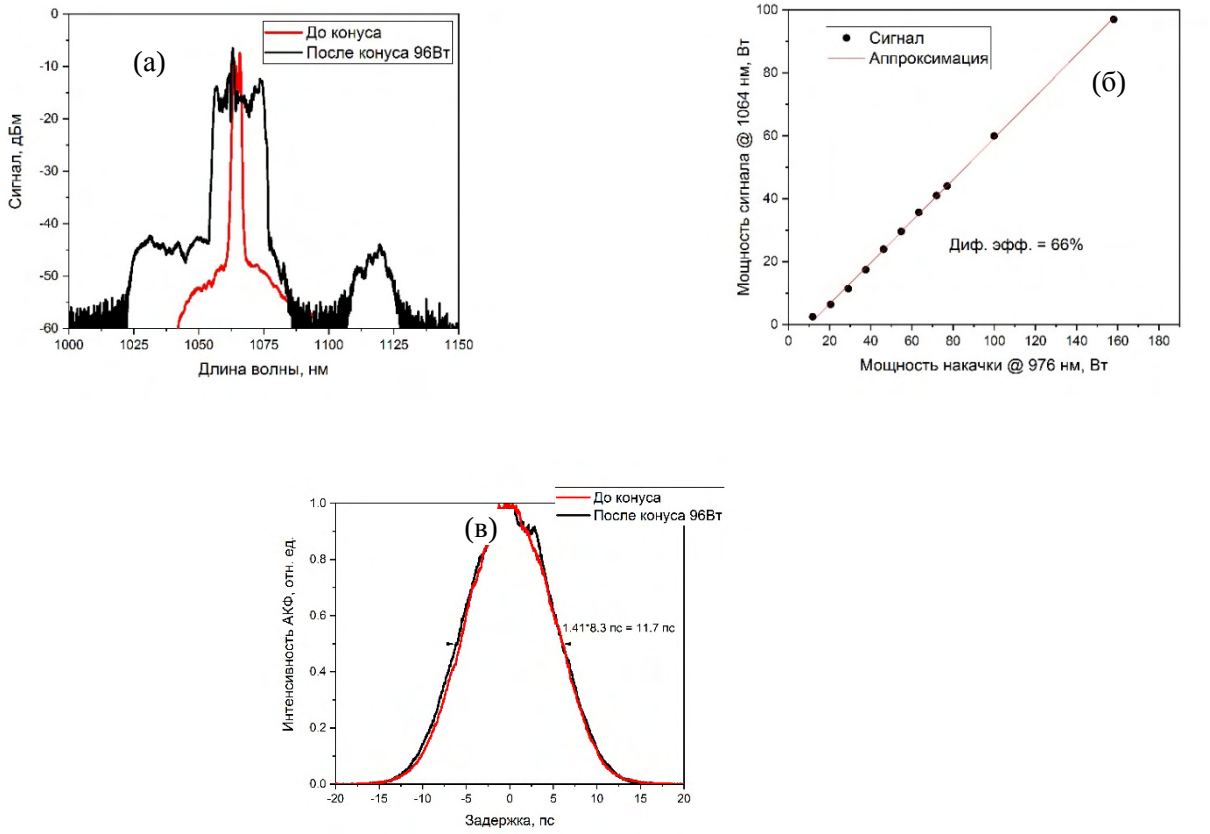


Рис. 2. а) спектр сигнала до и после световода-конуса, б) зависимость выходной мощности сигнала от мощности накачки, в) автокорреляционные функции импульсов до и после световода-конуса.

Литература

1. *Zhao Z. et al., JOSA B 31, 33-37 (2014)*
2. *Smith A., Smith J.J., Opt. Express 19, 10180-10192 (2011)*
3. *Kerttula J. et al., Opt. Express 20, 25461-25470 (2012)*

ГЕНЕРАЦИЯ СВЯЗАННЫХ СОЛИТОНОВ В ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ С СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ВЫСОКОНЕЛИНЕЙНОМ РЕЗОНАТОРЕ

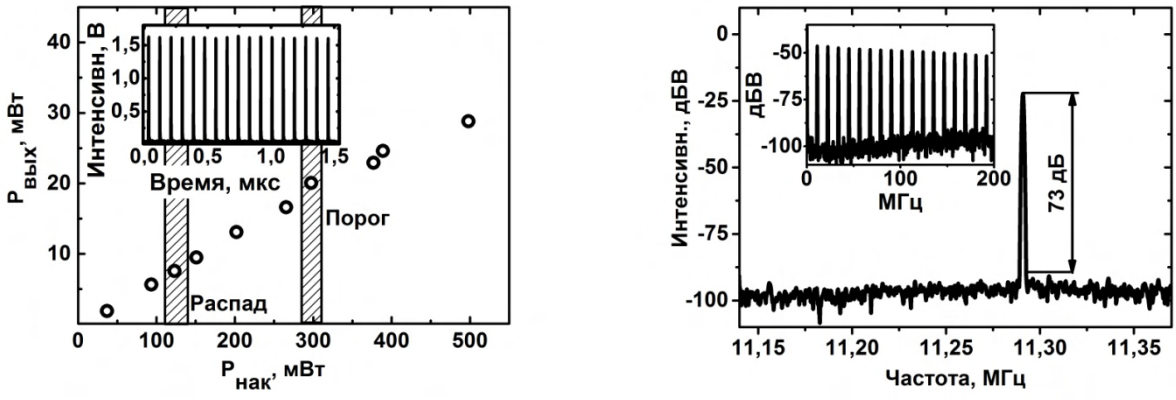
Дворецкий Д.А.[1*], Орехов И.О.[1], Куделин И.С.[2], Сазонкин С.Г.[1], Пнев А.Б.[1], Карасик В.Е.[1], Денисов Л.К.[1]

[1] МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
[2] Астонский университет, г. Бирмингем, Великобритания
[*] E-mail: ddvoretskiy@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16130

Волоконные лазеры ультракоротких импульсов (УКИ) могут рассматриваться в качестве платформы для развития перспективных применений, благодаря сложной нелинейной динамики генерации в резонаторе. Так, в последнее время получена генерация новых режимов: симиларитонных импульсов [1], шумоподобных импульсов, связанных солитонов (солитонных молекул) [2] и режим генерации солитонного дождя [3]. Режим генерации связанных солитонов может быть использован в различных областях фотоники, таких как, телекоммуникации и связь, в области метрологии частоты и времени, в обработке материалов и т.д. [4]. Например, исследование связанных импульсов привлекательно для увеличения пропускной способности линии связи в телекомуникациях за счет увеличения алфавита кодирования сигнала. Идея кодирования с помощью связанных солитонов предполагает уход от двоичной системы к произвольному числу символов 2N, где N – число солитонов в связанном состоянии [5]. Однако, необходима разработка способов управления параметрами связанных импульсов (кодирования сигнала) и разработка способов приема сигнала (декодирование сигнала). Кроме того, генерация когерентно связанных групп солитонов может значительно увеличить эффективность усиления ультракоротких импульсов, что открывает новые горизонты в холодной микрообработке новых материалов [6].

В данной работе получена стабильная генерация дечирпированных ультракоротких импульсов в связанном состоянии с контролируемым числом связанных состояний N в диапазоне 7 < N <17 при изменении мощности накачки.

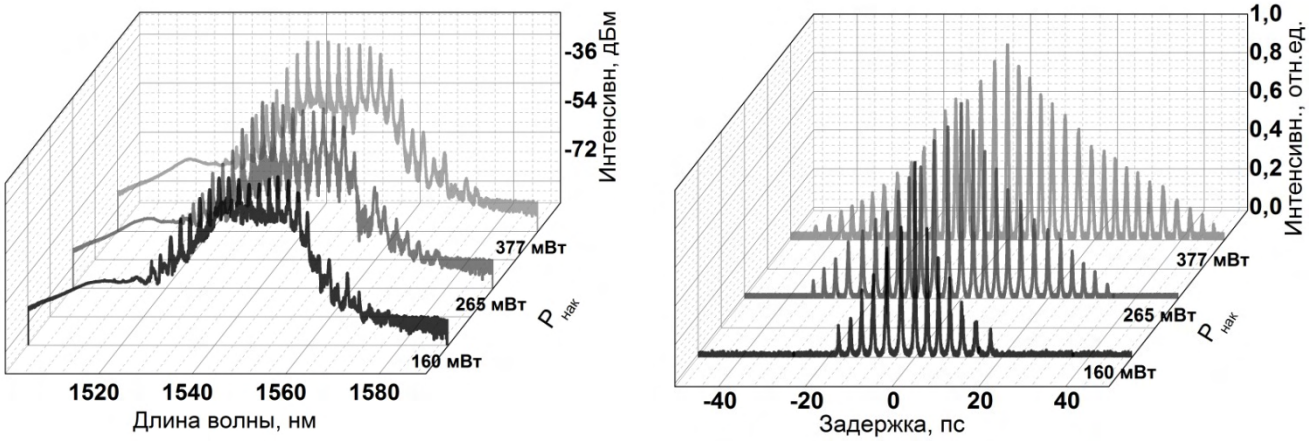


а) б)

Рис. 2: (а) Зависимость выходной средней оптической мощности от входной. На вставке: последовательность импульсов; (б) Радиочастотный спектр генерации вблизи частоты повторения импульсов. На вставке: радиочастотный спектр в диапазоне частот от 0 до 200 МГц

Экспериментальная установка волоконного лазера с синхронизацией мод на основе нелинейной эволюции поляризации и высоконелинейным резонатором подробно описана в работе [7]. В этой работе демонстрируется формирование когерентно-связанных импульсов, которые возникают в резонаторе лазера при мощности накачки около 300 мВт. На рисунке 1(а) приведена зависимость выходной средней оптической мощности от входной при максимальной выходной средней мощности ~ 30 мВт, а на вставке приведена типичная выходная последовательность УКИ. Порог генерации режима связанных импульсов наблюдался при определенной настройке контролеров поляризации в

схеме резонатора и при выходной мощности генерации, превышающей 20 мВт. При этом распад режима генерации наблюдается при значительно меньшей выходной мощности – около 10 мВт. Стоит отметить, что подобный гистерезис между порогом генерации и ее распадом ранее был предсказан теоретически и типичен для подобных режимов генерации [8]. На рисунке 1(б) приведен радиочастотный спектр генерации вблизи частоты повторения импульсов ~ 11,3 МГц с высоким отношением сигнал-шум ~73 дБ, что свидетельствует об устойчивости полученной генерации, а на вставке приведен радиочастотный спектр в диапазоне частот от 0 до 200 МГц.



а) б)

Рис. 2: ***(а) Экспериментальная зависимость выходного спектра импульсов от мощности накачки; (б) Экспериментальная зависимость автокорреляции выходных импульсов от мощности накачки***

Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами теоретического исследования эффекта квантования энергии солитона в волоконном лазере УКИ, описанного в работе [1]. Так, наибольшая энергия солитона в связанном состоянии с длительностью τ_p ограничена фундаментальной энергией солитона $E_s \sim | \beta_2 | / (\gamma \cdot \tau_p)$, где γ – это суммарный нелинейный коэффициент, β_2 – суммарная дисперсия второго порядка в резонаторе. Квантование энергии солитона ведет к разделению общей энергии импульса в резонаторе при мощности превышающий фундаментальный порог и формированию связанного состояния УКИ из фундаментальных солитонов. Таким образом, наиболее простой способ контролировать количество связанных УКИ – это изменение мощности накачки волоконного резонатора. На рисунке 2(а) приведена полученная экспериментальная зависимость выходного спектра импульсов от мощности накачки в диапазоне 160-377 мВт. Отметим, что положение интерференционных полос не меняется при увеличении мощности накачки, а значит полученный режим генерации остается неизменным в эксперименте. На рисунке 2(б) приведена экспериментальная зависимость автокорреляции выходных импульсов от мощности накачки (с помощью автокоррелятора FR-103WS; FEMTOCHROME RESEARCH INC., Berkeley, California, USA). Получена генерация связанных солитонов с контролируемым числом связанных состояний N в диапазоне $7 < N < 17$ при фиксированном времени между импульсами ~ 4,5 пс и длительностью одного УКИ по полувысоте < 0.5 пс.

Данная работа проведена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-32-20017 и № 18-38-00615.

Литература

1. *I.O. Zolotovskii et al 2016 Quantum Electron. 46 1092*
2. *Mashiko Y., Fujita E., and Tokurakawa M., Opt. Express 24, 26515-26520 (2016).*
3. *Nhan Duc Nguyen, Le Nguyen Binh, Optics Communications, Volume 282, Issue 12, 2394-2406 (2009)*
4. *Alioune Niang, Foued Amrani, , et al., Applied Physics B, Volume 116, Issue 3, pp 771–775 (2014)*
5. *Chernysheva, M. et al. Sci. Rep. 7, 44314 (2017)*
6. *Tong Zhou, John Ruppe, et al. Opt. Express 23, 7442-7462 (2015)*
7. *Dmitriy A. Dvoretskiy, et al. J. Opt. Soc. Am. B 35, 2010-2014 (2018)*
8. *Andrey Komarov, Herve Leblond, and François Sanchez "PHYSICAL REVIEW A, 71, 053809, 2005*

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИВАЕМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭФФЕКТ ПОСТЕПЕННОЙ ДЕГРАДАЦИИ МОДЫ В ИТТЕРБИЕВОМ УСИЛИТЕЛЕ

Бобков К.К.*, Бубнов М.М., Алешкина С.С., Лихачев М.Е.

Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва, Россия
* *E-mail:* wittkoss@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16131

Создание активных световодов с большой площадью моды позволило поднять уровень пиковой мощности волоконных систем до уровня пиковой мощности, демонстрируемого твердотельными установками. В таких световодах, являющихся, по сути, маломодовыми, одномодовый режим работы осуществляется за счет различных механизмов подавления высших мод. Таким образом, изначально доля мощности усиливаемого сигнала присутствует в высших модах. В результате чего развитие различных негативных явлений может приводить к ухужшению качества выходного пучка. Одним из примеров является хорошо изученный эффект модовой нестабильности [1], приводящий быстрому изменению пространственного распределения интенсивности излучения на выходе световода (от фундаментальной моды к первой высшей) с частотой порядка нескольких килогерц. Кроме того, в случае иттербиевых систем недавно обнаруженный нами эффект постепенной деградации моды [2], приводит к плавному ухудшению качества выходного излучения в течение десятков и сотен часов. Оба эффекта вызваны тем, неодомодовость световода приводит к интерференции между фундаментальной и первой высшей модами, в результате чего из-за различных механизмов образуется длиннопериодная решетка показателя преломления, на которой происходит перекачка мощности излучения из фундаментальной моды в первую высшую моду. При этом, в случае эффекта модовой нестабильности данная решетка имеет термическую природу – в результате чего эффект обладает порогом и обратимостью. А в случае эффекта деградации моды, решетка образуется в результате изменения по длине световода количества наводимых центров окраски, вызванных эффектом фотопотемнения, которые отличаются стабильностью при нормальных условиях. В результате чего, эффект деградации моды характеризуется необратимостью (уменьшение мощности накачки не приводит к восстановлению фундаментальной формы моды) и большим временем наблюдения эффекта (десятки и сотни часов), зависящим от временной константы эффекта фотопотемнения. К настоящему времени, эффект деградации моды слабо изучен, что, в первую очередь, связано с большим временем его наблюдения.

В данной работе нами была исследована зависимость характерного времени деградации выходного излучения от энергии/пиковой мощности усиленного сигнала. Как было сказано выше, решетка наводится в результате эффекта фотопотемнения, характерное время которого зависит от матрицы стекла, в которую введены ионы иттербия [3]. Поэтому, с целью сокращения времени экспериментов, нами был создан маломодовый (длина волны отсечки 1800 нм) иттербиевый световод с большой площадью поля моды (диаметр сердцевины 20 мкм) с сердцевиной из алюмосиликатного стекла, характеризующегося сильной подверженностью эффекту фотопотемнения [3]. Для экспериментов была создана установка, состоящая из задающего генератора (длительность импульсов 245 пс, центральная длина волны 1028 нм, собственная частота 20.5 МГц), нескольких маломощных усилительных каскадов, акустооптического модулятора и финального каскада усиления, на основе описанного выше световода с вводом излучения многомодовой накачки в отражающую оболочку световода. Исследуемый световод наматывался на алюминиевую катушку диаметром 6 см и фиксировался на ней с помощью эпоксидного клея. С помощью акустооптического модулятора осуществлялось прореживание импульсов задающего генератора (частота повторения изменялась в диапазоне 2.05-20.5 МГц), с целью варьирования величины энергии импульсов. Также был проведен эксперимент, в котором в качестве задающего генератора использовался непрерывный лазер с центральной длиной волны 1030 нм. Во всех экспериментах средняя мощность усиливаемого сигнала на входе в финальный каскад составляла 100 мВт, а на выходе – 10 Вт. Во время экспериментов нами непрерывно регистрировалась мощность на выходе системы с помощью измерителя мощности, а также качество выходного излучения путем измерения параметра M^2 с помощью коммерческой установки Thorlabs M2MS. Эксперименты проводились по два раза для каждого значения энергии.

На Рис. 2, а приведены данные для одного из экспериментов (частота следования импульсов 2.05 МГц, энергия 5.3 мкДж): на графике видно падение выходной мощности, что характерно для

эффекта фотопотемнения, и резкое ухудшение качества выходного излучения (увеличения параметра M^2) в области 4 часов, с максимумом величины M^2 в области 6 часов. На вставках приведено распределение интенсивности выходного излучения в нескольких точках временного интервала. Время, которое требовалось для наблюдения первой высшей моды, принималось нами за характерное время эффекта деградации моды. На Рис. 2, б приведен график полученной зависимости характерного времени эффекта деградации моды от величины энергии импульсов на выходе системы. Как видно из графика, снижение энергии импульса (за счет изменения частоты следования импульсов, при фиксированных средней мощности и длительности импульса) приводит к замедлению эффекта деградации моды. При этом эффект деградации моды наблюдается даже при усилении сигнала непрерывного источника. Значительный разброс точек вызван невозможностью повторения экспериментов при идентичных условиях, главным из которых является степень возбуждения высших мод.

Таким образом, впервые было проведено экспериментальное исследование зависимости эффекта модовой деградации от параметров лазерного излучения (в настоящем исследовании от энергии импульсов, имеющих одинаковую длительность 245 пс), которое показывает, что именно для импульсных систем с высокой энергией настоящий эффект имеет наиболее быстрое развитие.

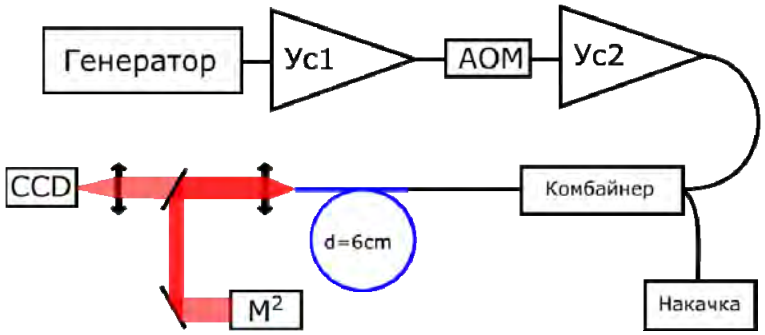


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

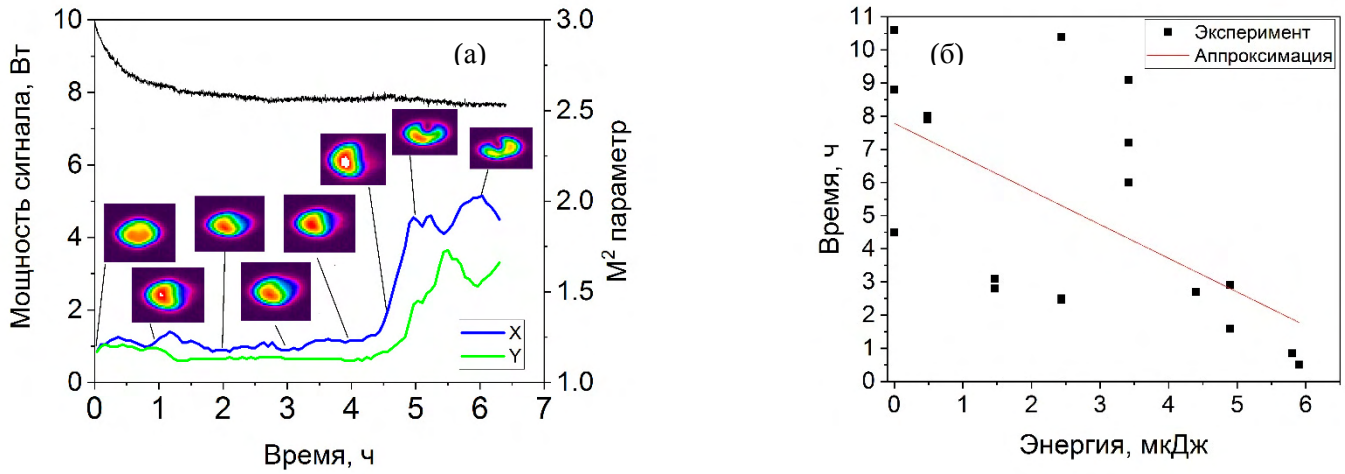


Рис. 2. а) данные для эксперимента с энергией 3.42 мкДж; б) сводные данные экспериментов

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 18-19-00687.

Литература

1. *Smith A., Smith J.J., Opt. Express 19, 10180-10192 (2011)*
2. *Бобков К.К., и др, Прикладная фотоника 2, 287-298 (2015)*
3. *Бобков К.К., и др, Квантовая электроника 44, 1129-1135 (2014)*

ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОГО НАСЫЩАЮЩЕГОСЯ ПОГЛОТИТЕЛЯ ИЗ ОДНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Мкртчян А.А.[1*], **Гладуш Ю.Г.**[1], **Копылова Д.С.**[1], **Иваненко А.В.**[2], **Нюшков Б.Н.**[2], **Кохановский А.Ю.**[2], **Кобцев С.М.**[2], **Насибулин А.Г.**[1]

[1] *Сколковский институт науки и технологии, г. Москва*
[2] *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*
[*] *E-mail:* aram.mkrtchyan@skoltech.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16132

Импульсная генерация в волоконных лазерах зависит от нелинейных оптических свойств насыщающегося поглотителя, таких как глубина модуляции, интенсивность насыщения, время релаксации. Эти свойства определяются материалом и геометрией насыщающегося поглотителя. Как правило, эти параметры могут быть заданы только во время изготовления поглотителя. Например, глубина модуляции насыщающегося поглотителя из однослойных углеродных нанотрубок на полированном оптоволокне, определяется как диаметром нанотрубок, так и толщиной и длиной покрытия полированной поверхности волокна [1]. В данной работе демонстрируется управляемый насыщающийся поглотитель с контролируемой глубиной модуляции, который позволяет осуществлять переключение между режимами импульсной генерации волоконного лазера. Управление глубиной модуляции осуществляется с помощью сдвига уровня Ферми подачей небольшого напряжения на нанотрубки в электрохимической ячейке на полированном волокне.

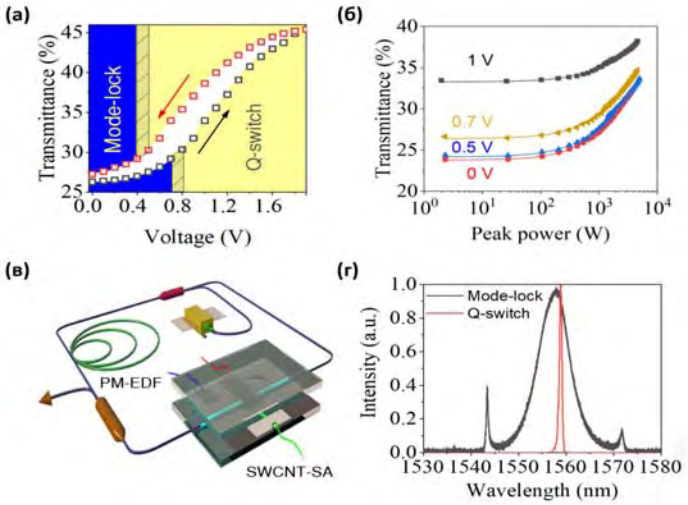


Рис. 1. а) Линейное и б) нелинейное пропускание электрохимической ячейки в зависимости от подаваемого напряжения, на длине волны 1550 нм; в) Схема переключаемого импульсного волоконного лазера. г) Спектры импульсов с синхронизацией мод (черная кривая) и с модуляцией добротности (красная кривая)

Для изготовления электрохимической ячейки использовались пленки однослойные углеродных нанотрубок, синтезированные аэрозольным синтезом и собранные на нитроцеллюлозном фильтре. Пленки нанотрубок переносились на полированное оптоволокно на стеклянной подложке с электродами и покрывались с ионной жидкостью. Полученная ячейка инкапсулировалась в аргоновой атмосфере. С помощью непрерывного и импульсного лазера было показано, что линейное и нелинейное поглощения зависят от положения уровня Ферми. Сдвиг уровня Ферми осуществлялся подачей напряжения на ячейку (Рис. 1а,б). На Рис. 1а и 1б показаны линейное и нелинейное пропускание ячейки в зависимости от подаваемого напряжения, измеренные соответственно непрерывным и импульсным лазерным излучением длиной волны 1550 нм. Для управления режимами импульсной генерации электрохимическая ячейка была интегрирована в кольцевой резонатор волоконного лазера с сохранением поляризации в полностью волоконной схеме (Рис. 1в) [2]. Управление насыщением поглощения углеродных нанотрубок позволяло переключать режим импульсной генерации лазера между синхронизацией мод с пикосекундными импульсами и модуляцией добротности с микросекундными импульсами, спектры которых показаны на Рис. 1г.

Литература

1. *Mkrtchyan A.A., et al, Opt. Mater. Express 9 1551-1561 (2019)*
2. *E.J. Lee et al., Nat. Commun. 6, 6851 (2015)*

ВЫСОКОАПЕРТУРНЫЕ МЕТАЛИНЗЫ, ТОРОИДАЛЬНЫЙ И ОБРАТНЫЙ ПОТОК В ФОКУСЕ

Котляр В.В.

Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, г. Самара
E-mail: kotlyar@smr.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16133

В последнее время для формирования лазерных пучков с заданными свойствами используют оптические элементы с метаповерхностью [1-5]. Компоненты с метаповерхностью представляют из себя наноструктурированную пленку из металла, полупроводника или диэлектрика толщиною 100-200 нанометров и с размером неоднородности меньше длины волны. Метаповерхность может состоять из набора наностолбиков [4, 5] или набора субволновых бинарных дифракционных решеток [3]. Расположение столбиков (или штрихов дифракционной решетки) и их размеры варьируются по поверхности элемента так, чтобы одновременно управлять заданным образом амплитудой, фазой и поляризацией падающего света в каждой точке метаповерхности.

Возникает вопрос: можно ли рассчитать такую метаповерхность, которая бы при разном освещении формировала световые поля то с поляризационной, то с фазовой сингулярностью?

В данной работе теоретически и численно показано, что металинза, содержащая в себе бинарную зонную пластинку с числовой апертурой близкой к единице и набор бинарных субволновых дифракционных решёток, работающих как полуволновые пластины, и выполняющих поворот вектора поляризации падающего поля на угол $m\varphi$, формируют сходящийся векторный цилиндрический пучок m-го порядка (при падении света линейной поляризации) или фазовый вихрь с топологическим зарядом m (при падении света с круговой поляризацией). В остром фокусе такого сходящегося светового поля на оптической оси имеет место обратный поток световой энергии, сравнимый с прямым потоком.

На рис. 1а показан внешний вид бинарного рельефа метаповерхности, состоящий из 16-ти секторных субволновых бинарных дифракционных решеток, который преобразует падающую плоскую волну с линейной поляризацией в пучок с цилиндрической поляризацией 2-го порядка.

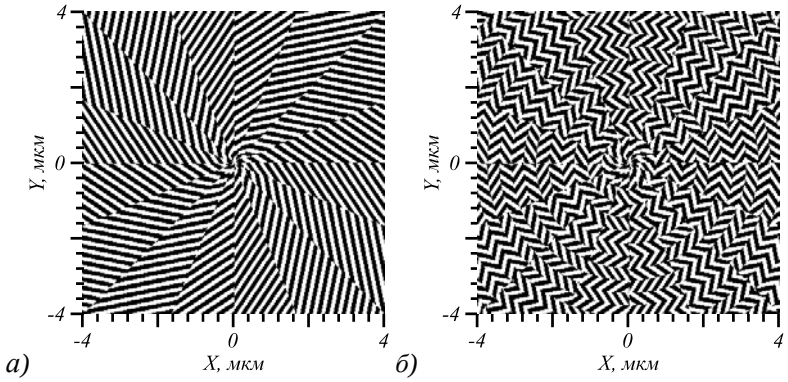


Рис. 1. Метаповерхность для формирования цилиндрической поляризации 2-го порядка (а) и бинарная металинза (б), фокусирующее это излучение

А на рис.1б показана металинза, объединяющая пропускание субволнового поляризаторa (рис.1а) и бинарной зонной пластинки с числовой апертурой близкой к единице. Металинза составлялась из 16 секторов. В каждом секторе решетки чередуются в соответствии с зонами зонной пластинки Френеля, рассчитанной на фокусное расстояние $f=\lambda=633$ нм: в каждой следующей зоне направление поляризации поворачивается на π относительно предыдущей. При этом направление штрихов решеток, примыкающих к границе зон, взаимно перпендикулярно. При показателе преломления материала метаповерхности $n=4{,}352+0{,}486i$ (аморфный кремний) высота рельефа составляет 120 нм. Период решеток составляет 220 нм.

Если осветить плоской волной метаповерхность на рис. 1а, то прошедшее световое поле на расстоянии длины волны от метаповерхности будет иметь распределение интенсивности и поляризации, показанное на рис. 2а. На рис.2б показано распределение цилиндрической поляризации

2-го порядка. Видно, что оба распределения поляризации на рис.2а и 2б совпадают и повернуты на 180 градусов относительно друг друга.

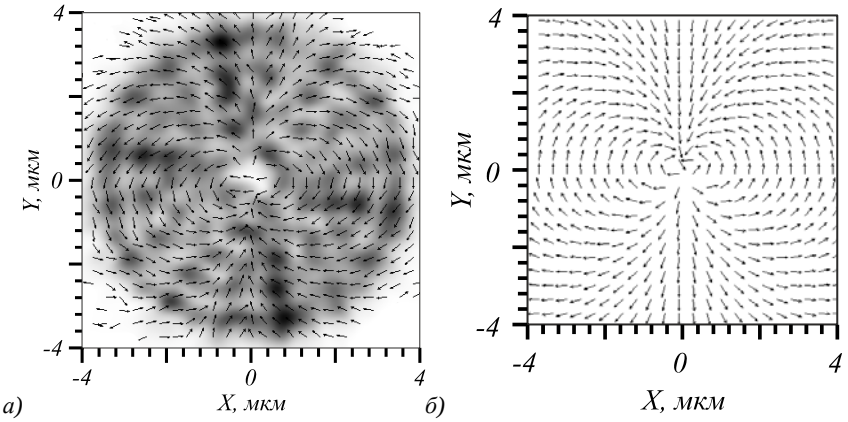


Рис. 2. Интенсивность излучения, прошедшего через метаповерхность (а), изображенную на рис. 1а (негатив). Стрелками показано направление поляризации по полю в идеальном случае (б) и после прохождения металинзы (а)

Как видно из рис.2, преобразование с помощью метаповерхности не дает равномерного светового распределения интенсивности, так как в разных секторах процент света, проходящий через них различный. На рис. 3 представлены результаты расчета фокусировки излучения металинзой (рис. 1б) для падающей плоской волны с линейной поляризацией, ограниченной апертурой 8 мкм.

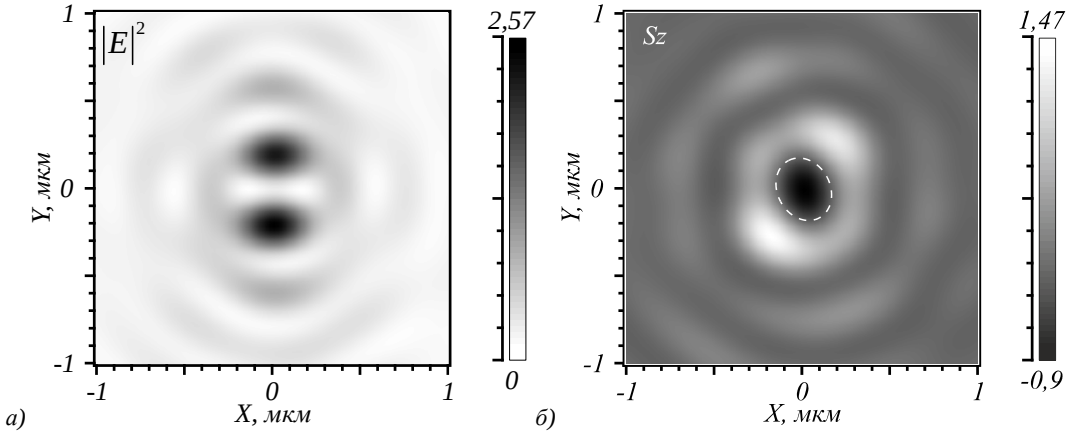


Рис. 3. Интенсивность (а) и продольная проекция вектора Пойнтинга (б) в фокусной плоскости на расстоянии 0,6 мкм от металинзы. Падающее поле с линейной поляризацией

Из рис.3б видно, что имеет место обратный поток энергии в центре фокусного пятна (выделено пунктиром). Область с обратным потоком в плоскости XY представляет собой эллипс, диаметры которого составляют 0,27 мкм и 0,35 мкм (длина волны 0,633 мкм). В случае использования металинзы (рис. 1*б*) при фокусировке теряется симметрия вдоль оси X и Y в проекции вектора Пойнтинга, что объясняется разной эффективностью при преобразовании поляризации в зависимости от угла поворота вектора электрического поля. Дифракционная эффективность металинзы на рис.1б около 30%.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 17-19-01186) в части расчета спиральной метаповерхности и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-29-20003) в части моделирования острой фокусировки лазерного излучения.

Литература

1. *Yu N., et al, Sc. 334, 333-337 (2011)*
2. *Arbabi I., et al, Nat. Nanotechn. 10, 937-943 (2015)*
3. *Kotlyar V., et al, Opt. Express 25, 8158-8167 (2017)*
4. *Tian S., et al, Opt. Express 27, 680-688 (2019)*
5. *Park C., et al, Opt. Express 27, 667-678 (2019)*

КЛАССИЧЕСКИЕ И КВАНТОВЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА С НАНОМЕТРОВОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ВРЕМЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ

Мелентьев П.Н.[*], **Балыкин В.И.**

Институт спектроскопии РАН, г. Москва, г. Троицк
[*] *E-mail:* melentiev@isan.troitsk.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16134

Основное преимущество плазмоники заключается в том, что она позволяет контролировать свет на нанометровых пространственных масштабах [1-4].

В настоящей работе мы демонстрируем развитие основных элементов плазмонной оптики, в том числе классические и квантовые источников света как на нанометровом пространственном масштабе, так и на фемтосекундной временной шкале с использованием: (1) фотолюминесценции плазмонных наноструктур, (2) генерации гармоник в единичных плазмонных наноструктурах, (3) генерации когерентного излучения в различных гибридных системах образованных плазмонными наноструктурами, квантовыми излучателями и волноводными системами.

Литература

1. *Brongersma M. L., Shalaev V. M. Science, 328, 440 (2010)*
2. *Klimov V.V., Nanoplasmonics, Pan Stanford (2014)*
3. *Balykin V. I., Melentiev P. N., Phys. Usp. 61, 133 (2018)*
4. *Balykin V. I., Phys. Usp. 61, 846 (2018)*

КОГЕРЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ БЕЗРЕЗОНАТОРНЫХ ЛАЗЕРОВ

Зябловский А.А.[1,2*], **Доронин И.В.**[1,2,3], **Андрианов Е.С.**[1,2,] **Пухов А.А.**[1,2,3], **Лозовик Ю.Е.**[4], **Виноградов А.П.**[1,2,3], **Лисянский А.А.**[5]

[1] *Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, г. Москва*
[2] *Московский физико-технический институт, г. Москва*
[3] *Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, г. Москвы*
[4] *Институт спектроскопии РАН, г. Троицк*
[5] *Департамент физики квинс колледжа городского университета Нью-Йорка, Нью-Йорк, США*
[*] *E-mail:* zyablovskiy@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16135

Безрезонаторными лазерами называют системы, содержащие активную среду, в которой происходит усиление электромагнитных волн за счет процессов вынужденного излучения. Из-за отсутствия резонатора в безрезонаторных лазерах не происходит переход к автоколебательному режиму. Однако безрезонаторные лазеры демонстрируют пороговую зависимость выходной мощности излучения от накачки и сужение ширины линии излучения с ростом накачки. Такое поведение объединяет безрезонаторные лазеры с обычными лазерами с резонатором. Нами был исследован вопрос о зависимости функции когерентности второго порядка излучения от безрезонаторных лазеров. Известно, что в обычных лазерах выше порога генерации функция когерентности второго порядка излучения стремится к единице, что указывает на когерентность лазерного излучения. В тоже время, вопрос о когерентности излучения от безрезонаторные лазеров остается открытым.

Главным препятствие к нахождению функции когерентности второго порядка излучения от безрезонаторных лазеров является отсутствие выделенных резонатором мод электромагнитного поля, взаимодействующих с активной средой. Данный факт приводит к необходимости учитывать взаимодействие активной среды с большим числом мод электромагнитного поля с разными собственными частотами и волновыми векторами.

Для описания взаимодействия электромагнитного поля с активной средой мы использовали гамильтониан Джейнса-Каммингса в приближении вращающейся волны [1]. Также мы учитывали взаимодействие мод электромагнитного поля и атомов активной среды с вспомогательными резервуарами (внешней средой), что необходимо для описания процессов релаксации и некогерентной накачки атомов активной среды.

Основываясь на гамильтониане системы, мы получили уравнения Гейзенберга-Ланжевена для динамики операторов системы, исключив из рассмотрения переменные резервуара. При исключении переменных резервуара мы использовали Борн-Марковское приближение, то есть считали, что система не влияет на состояние резервуара и взаимодействие системы и резервуара определяется только текущим состоянием системы. На следующем шаге, используя метод «system size expansion» [1], мы перешли от операторных уравнений к уравнениям Максвелла-Блоха с шумом для комплексных переменных. Получившиеся уравнения содержат релаксационные и шумовые слагаемые, подчиняющиеся флуктуационно-диссипативной теореме [1].

В качестве модели безрезонаторного лазера нами была рассмотрена активная среда с длиной L, помещенная внутрь одномерного волновода с длиной L_0. Длина волновода выбиралась много большей, чем длина активной среды ($L_0>>L$). Учитывалось взаимодействие активной среды с большим числом мод волновода, имеющих собственные частоты вблизи частоты перехода в активной среде. Длина волновода и число рассматриваемых мод увеличивались до тех пор, пока динамика системы не переставала от них зависеть.

Путем численного моделирования уравнений Максвелла-Блоха с шумом было показано, что мощность выходного излучения рассматриваемого безрезонаторного лазера пороговым образом зависит от скорости накачки, а ширина линии излучения резко уменьшается на пороге. Рассчитана зависимость функции когерентности второго порядка для излучения безрезонаторного лазера от мощности накачки. Показано, что как ниже, так и выше порога функция когерентности второго порядка излучения безрезонаторного лазера равняется 2 [2]. То есть излучение безрезонаторного лазера является некогерентным. Также показано, что функция когерентности второго порядка не зависит от частоты и не имеет особенностей (т.е. не отклонятся от 2) вблизи частоты перехода в активной среде [2].

Также мы исследовали зависимость функции когерентности второго порядка излучения многомодового лазера от мощности накачки и частоты. Наши расчеты показали, что функция когерентности второго порядка излучения многомодовых лазеров стремится к единице на частотах, соответствующих модам резонатора. Данный результат указывает на принципиальное различие между когерентными свойствами излучения от обычных лазеров и от безрезонаторных лазеров.

Таким образом показано, что функция когерентности второго порядка излучения от безрезонаторного лазера равняется 2 как ниже, так и выше порога на кривой зависимости выходного излучения от мощности накачки. Продемонстрировано, что измерение функции когерентности второго порядка может служить для определения перехода системы к лазерной генерации.

Полученные результаты имеют как фундаментальное, так и прикладное значение. С фундаментальной точки зрения интересным представляется вопрос о механизмах работы астрофизических мазеров [2, 3], которые формируются в межзвездных облаках газа [2-4] и в атмосферах планет [5, 6]. Они испускают электромагнитное излучение в узком диапазоне частот. Существую разные точки зрения на механизмы работы астрофизических мазеров. Возникновение излучения от астрофизических мазеров связывают как с лазерной генерацией в случайной среде (random laser) [3, 7], так и с безрезонаторной генерацией [8]. Измерение функции когерентности второго порядка излучения от астрофизических мазеров может позволить определить механизмы формирования таких источников излучения.

С практической точки зрения различие между безрезонаторными лазерами и лазерами с резонатором в величине функции когерентности второго порядка может быть важным при разработке источников излучения, применяемых в двух фотонной спектроскопии [9, 10]. Также полученные результаты могут применяться для изучения характеристик супер люминесцентных диодов (SLD). Супер люминесцентные диоды применяются в качестве мощных источников излучения с широким спектром в оптической когерентной томографии [11] и спектроскопии. Наши оценки показывают, что такие источники излучения могут быть как безрезонаторными лазерами, так и многомодовыми лазерами с низкодобротным резонатором. Изучение функции когерентности второго порядка излучения от SLD может позволить детектировать наличие обратной связи в таких устройствах и добиться лучшего управления их свойствами.

Литература

1. *Carmichael H., An open systems approach to quantum optics (Springer-Verlag, Berlin, 1991), p. 179*
2. *Doronin, I.V., et al, Opt. Exp. 27, 10991-11005 (2019)*
3. *Weaver H., et al, Nature 208, 29-31 (1965)*
4. *Letokhov V. S., IEEE J. of Quant. Electr. 8, 615 (1972).*
5. *V. S. Letokhov and S. Johansson, Astrophysical Lasers (Oxford University, 2009)*
6. *Johnson M. A., et al, Astrophys. J. 208, L145-L148 (1976)*
7. *Mumma M. J., et al, Science 212, 45-49 (1981)*
8. *Lavrinovich N. N. and Letokhov V. S., Sov. Phys. JETP 40, 800-805 (1975)*
9. *Johansson S. and Letokhov V. S., Phys. Rev. Lett. 90, 011101 (2003)*
10. *Ferri F., et al, Phys. Rev. Lett. 94, 183602 (2005)*
11. *Valencia A., et al, Phys. Rev. Lett. 94, 063601 (2005)*
12. *Huang D., et al, Science 254, 1178-1181 (1991)*

ТЕОРИЯ РАМАНОВСКОГО ЭФФЕКТА В ЛАЗЕРНУЮ ЭПОХУ

Виноградов А.П.[1,2,3*], **Шишков В.Ю.**[1,2], **Андрианов Е.С.**[1,3], **Пухов А.А.**[1,2,3], **Лисянский А.А.**[4,5]

[1] *Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, г. Москва*
[2] *Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, г. Москва*
[3] *Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Москва*
[4] *Квинс Колледж Городского университета Нью-Йорка, Соединенные Штаты Америки, 11367 Нью-Йорк, Флашинг, бульв. Киссена, 65-30а*
[5] *Образовательный центр Городского университета Нью-Йорка, Соединенные Штаты Америки, 10016 Нью-Йорк*
[*] *E-mail:* a-vinogr@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16136

Квантовая теория комбинационного рассеяния (КР) была создана на заре квантовой физики, когда излучение атомами света ассоциировалась исключительно с переходами атома из одного собственное состояние в другое. Иными словами она была существенно резонансной, что выражалось в применении «золотого правила Ферми» к расчетам наблюдаемых величин. Квантовая теория рассматривает рассеяние света как следующие друг за другом акты поглощения и излучение фотона [1].

Адаптация этой теории к описанию даже проблемы упругого, релеевского рассеяния потребовала много феноменологических предположений, в частности, введение виртуального уровня. Хотя такое предположение и дает наглядную картину явления, в поддержку введения виртуального уровня не было представлено каких-либо строгих доказательств. Кажется, что это предположение было сделано исключительно только для того, чтобы оправдать попытку свести проблему рассеяния к известной проблеме поглощения и испускания фотонов, когда квантово-механическая система переходит с одного уровня на другой. Это не обеспечивает адекватного понимания явления и приводит к неоправданным усложнениям теоретического построения, когда появляются новые факты. Так для объяснения КР необходимо рассматривать два виртуальных уровня и делать предположение о расщеплении основного состояния, для объяснения КАРС необходимо вводить четыре виртуальных уровня и т.п.

С другой стороны, начальные теории совершенно не рассматривали процесс излучения фотонов. Теперь известно, что самопроизвольное излучение происходит за счет взаимодействия возбужденного атома с резервуаром мод свободного пространства [2]. Нельзя ограничиваться рассмотрением мод с фиксированной частотой, как того требует золотое правило Ферми. Более того, квантово-механический анализ рассеяния, как следующие друг за другом акты поглощения и излучение фотона, предсказывает, что спектр рассеянного света должен иметь конечную ширину линии и отличаться от дельта-функции [2]. Таким образом, процесс поглощения-излучения фотона становится неупругим.

В 1928 году Мандельштам, Ландсберг и Раман обнаружили неупругое КР. Спектр КР характеризуется появлением наряду с центральной линией, связанной с упругим рэлеевским рассеянием, двух дополнительных спутников, равноудаленных от центральной линии на частотах, малых по сравнению с частотой падающей волны и частотами оптических переходов в молекулы.

Изобретение лазеров открыло новую страницу в исследованиях комбинационного рассеяния света. Сильные световые поля лазеров привели к проявлению нелинейности взаимодействия света с молекулами. В настоящее время ряд нелинейно-оптических явлений, связанных со спонтанным комбинационным рассеянием, образуют новую отрасль спектроскопии, а именно «колебательную спектроскопию» [3]. Основой этих явлений является взаимодействие колебаний ядер квантовой системы с внешним полем через взаимодействие с электронной подсистемой. Эти явления включают в себя вынужденное комбинационное рассеяние, когерентное стоксово (CSRS) и антистоксово (CARS) рассеяние и т.п.

Лазеры также привнесли новую характеристику явления, а именно, когерентность света. Оказывается, что даже при падении когерентного света рамановские сигналы могут быть когерентными или некогерентными. Напомним, что классическая теория предсказывает в этих случаях только последовательный ответ. Квантовый подход предполагает возможность двух процессов. Первый - это спонтанный переход, дающий некогерентный свет, второй - стимулированный переход, приводящий к когерентному свету.

Спонтанное излучение атомов некогерентное и имеет конечную ширину линий. Т. о. для объяснения когерентности рамановских и релеевского сигналов необходимо ввести новые идеи.

В 1937 году Раби [4] рассмотрел прецессию магнитного дипольного момента в магнитном поле показал, что вероятность изменения направления спина атома на противоположное с частотой Раби. Во второй половине прошлого века этот результат был использован в квантовой оптики для описания периодических колебаний инверсной населенности двухуровневой системы, помещенной в когерентное возбуждающем поле. Ниже мы используем этот результат для описании как упругого, так и неупругого нерезонансного рассеяния света. Следуя [2,5], мы рассмотрим динамику квантовой системы под действием классического света, тогда как излучение системы рассматривается как следствие взаимодействия системы с резервуаром мод свободного пространства. Чтобы избежать феноменологического предположения, мы изучаем динамическую как электронную, так и ядерную подсистему молекулы одновременно. Параметрическое взаимодействие между этими подсистемами описывается с помощью гамильтониана типа Фрёлиха, который следует из модели молекулы Борна-Опенгеймера [6].

Учет взаимодействия возбужденного состояния атома с резервуаром моды в свободном пространстве приводит к переходам в состоянии суперпозиции, что проявляется в появлении в спектре излучения наряду с когерентным излучением вынужденного колебательного дипольного момента, а также слабый триплет Моллоу [7]. Однако интенсивность этих линий, имеющих конечную ширину линий, меньше, чем интенсивность линий, излучаемых вынужденными колебаниями. Поскольку вынужденные колебания, не связанные с переходами между уровнями, дают нулевую ширину линии, как в случае классического рассмотрения. Взаимодействие с резервуаром свободного пространства не расширяет линию вынужденных колебаний. Взаимодействие с этим резервуаром приводит только к излучению, т. е. к передаче энергии от когерентных колебаний дипольного момента к колебаниям мод свободного пространства.

В рамках такого подхода последовательно рассмотрены релеевское рассеяние и роль осцилляций атомов молекулы на возникновение КР, ГКР, а также роль параметрического резонанса осцилляций атомов молекулы в возникновении рамановского когерентного отклика в ВКР, КАРС.

Литература

1. *Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М., Берестецкий, В.Б., Теоретическая физика (Том 4. Квантовая электродинамика). Москва: Наука (1989)*
2. *Скалли, М.О., Зубайри, М.С., Квантовая оптика. Москва: Физматлит (2003)*
3. *Aroca, R., Surface-Enhanced Vibrational Spectroscopy. West Sussex: John Wiley & Sons (2006)*
4. *Rabi, I. I., Phys. Rev., 51, 652-654 (1937)*
5. *Лоудон, Р., Квантовая теория света. Москва: Мир (1976)*
6. *Born, M., Oppenheimer, R., Quantum Chemistry: Classic Scientific Papers (World Scientific 20th Century Chemistry), 8, 1-24, (2000)*
7. *Mollow, B. R., Phys. Rev., 188, 1969--1975 (1969)*

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МИКРОСФЕРЫ ТИПА ЯДРО-ОБОЛОЧКА ДЛЯ УСИЛЕНИЯ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ И ФОТОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Ноздрюхин Д.В.[1,2], Беседина Н.А.[2], Ефимова О.[1], Чернышев В.С.[1], Гиппиус Н.А.[1], Дьяков С.А.[1], Ященок А.М.[1*], Горин Д.А.[1]

[1] Сколковский институт науки и технологий, г. Москва
[2] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет РАН, г. Санкт-Петербург
[*] E-mail: a.yashchenok@skoltech.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16137

Многомодальная визуализация химических маркеров, биологически активных молекул, клеток и тканей в последние годы вызывает значительный интерес для биофизических исследований и биомедицинских применений [1]. Повысить разрешение и контраст изображений в значительной мере удалось за счет совместного использования методов визуализации, таких как компьютерная томография (КТ), фотоакустическая визуализация (ФА), флуоресцентная микроскопия (ФМ), гигантское комбинационное рассеяние (ГКР), позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) [2]. Среди перечисленных методов визуализации, интеграция метода ФА и ГКР представляется перспективным подходом для визуализации исследуемых объектов, в том числе биологической природы. Объединение метода ФА и ГКР в значительной мере позволяет повысить разрешение по глубине и проводить анализ молекулярного состава исследуемого объекта [3,4].

В данной работе были синтезированы микросферы, содержащие наноструктурированные оболочки из одностенных углеродных нанотрубок и золотых наночастиц, которые оказались эффективны для усиления комбинационного рассеяния и фотоакустического сигнала. Было найдено, что, варьируя концентрацию нанотрубок и наночастиц золота в структуре оболочек можно настраивать поглощение микросфер в видимой и ближней ИК области спектра. Проведен теоретический расчет дисперсии мод поверхностного плазмонного поляритона (ППП) для пленки золота толщиной 10 нм на подложке из диоксида кремния. По изображениям поверхности микросфер во вторично-испускаемых электронах построены изображения в пространстве Фурье. Полученные микросферы оказались эффективны для регистрации ФА и ГКР сигналов ex vivo в тканях головного мозга мыши.

Литература

1. *Martí Bonmatí L., et al, Contrast Media Mol. Imaging, 5 180-189, (2010)*
2. *Cicchi R., et al, J Biophotonics. 7, 86-95 (2014)*
3. *Cha M.G., et al, Nanoscale. 9, 12556-12564 (2017)*
4. *Peng Y., et al, J. Mater. Chem. B, 6, 2813-2820 (2018)*

ГИГАНТСКОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ НА РЕЗОНАНСНОЙ КРЕМНИЙ-СЕРЕБРЯНОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ

Сарычев А.К.[1*], Иванов А.В.[1], Быков И.В.[1], Богинская И.А.[1], Лагарьков А.Н.[1], Рыжиков И.А.[1], Нечаева Н.Л.[2,3], Курочкин И.Н.[2,3], Бондаренко А.В.[4], Гирель К.В.[4]

[1] Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва, Россия
[2] Институт биохимической физики им. Эмануэля РАН, Москва, Россия
[3] Химический факультет, Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Россия
[4] Белорусский Государственный Университет Информатики и Радиоэлектроники, Минск, Беларусь
[*] E-mail: sarychev_andrey@yahoo.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16138

Усиление комбинационного рассеяния различными поверхностями известно, как гигантское комбинационное рассеяние (ГКР). Исследование и использование ГКР лимитировано фоновой люминесценцией, излучаемой той же поверхностью. Мы исследуем резонансную метаповерхность, изготовленную из периодических кремниевых микрогребней (см Рис. 1,2). Кремниевые гребни покрыты серебряным нанослоем. Реальный эксперимент и компьютерное моделирование демонстрируют аномальную оптическую реакцию метаповерхности, которая обусловлена возбуждением различных металл-диэлектрических поверхностных резонансов.

Мы обнаружили усиление сигнала ГКР от монослоя 4-Меркаптофенилбороновой кислоты (4-МФБК) при нанесении на микро гребневую кремниевую метаповерхность. Очень важно, что полученный таким образом спектр 4-МФБК характеризуется большим отношением комбинационного рассеяния к люминесценции (отношение сигнал/шум). В результате метаповерхность работает как эффективный ГКР сенсор.

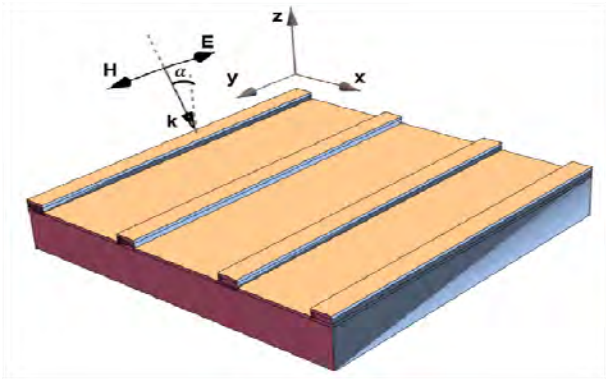


Рис. 1. Регулярная, гребневая, кремний-серебряная метаповерхность

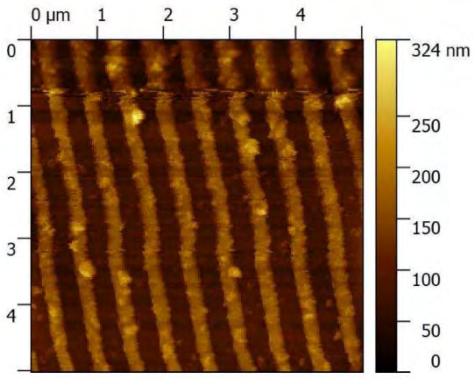


Рис. 2. Атомно-силовая микроскопия метаповерхности, гребни видны как светлые полосы

Основным преимуществом кремния как материала для ГКР сенсоров является практически полное отсутствие сигнала люминесценции. Более того, кремний имеет высокий показатель преломления с относительно низким коэффициентом поглощения в красной и близкой инфракрасной (ИК) части оптического спектра ($n \approx 3.8$, $\kappa \approx 0.01$; $\lambda = 700$ нм). Оптические потери в кремнии увеличиваются в синей части оптического спектра. Коэффициент усиления ГКР пропорционален четвертой степени локального электрического поля $G \sim \int |E(r)|^4 dr \sim Q^4$ (см., например, [1]), и достаточно иметь добротность резонатора $Q \approx n/\kappa > 6$ для увеличения сигнала ГКР на три порядка величины. Поэтому кремниевые метаповерхности могут быть использованы в качестве ГКР сенсора на длине волны большей, чем зеленый свет. В нашей работе мы исследуем взаимодействие света с метаповерхностью из посеребренных кремниевых гребней, которая проявляет металл-диэлектрические резонансы в видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах. Параметры гребней и нанотолщина серебряного слоя подобраны так, что метаповерхность имеет аномальные оптические свойства в диапазоне $\lambda = 700 \div 800$ нм. Молекулы 4-МФБК, иммобилизованные на поверхности, используются в качестве индикатора усиления электрического поля и явления ГКР. Структура метаповерхности, показанная на Рис.1 и 2, формируется с использованием высокоразрешающей электронно-лучевой литографии и последующего ионного травление кремния. Период гребней

меняется от 520 до 600 нм, все гребни имеют почти одинаковую высоту 80 нм, и ширину 120 нм, как показано на Рис. 2. Метаповерхность покрыта 30 нм серебряной пленкой с помощью электронно-лучевого испарения. Компьютерное моделирование и реальный эксперимент показывают, что метаповерхность обычно имеет два типа резонансов: один из них обусловлен возбуждением поверхностных плазмонов, длина волны которых приближенно совпадает с периодом гребней [2], второй резонанс — это специфический металлодиэлектрический резонанс типа Фабри-Перо [1]. Поле поверхностных плазмонов в основном концентрируется на поверхности серебра в области между гребнями, в металлодиэлектрическом резонансе электромагнитное поле концентрируемся внутри кремниевых гребней. Поскольку ширина гребня много меньше длины волны то частота металлодиэлектрического резонанса не зависит от угла паления α. Эти резонансы видны как горизонтальные линии на Рис. 3. При падении электромагнитной волны под некоторым углом, металлодиэлектрические и плазмонные резонансы гибридизируются, как показано черным кругом на Рис. 3. Совпадение резонансов дает максимальное усиление локального электрического поля. Примечательно, что серебро также наносится на боковые грани гребней, хотя в данный момент мы не полностью контролируем толщину боковой серебряной пленки.

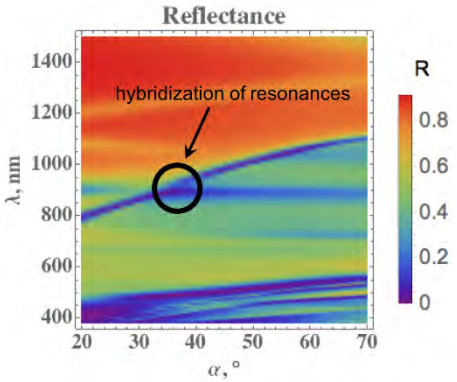


Рис. 3. Компьютерное моделирование углового отражения; период гребней 560 нм, высота 80 нм, ширина 120 нм

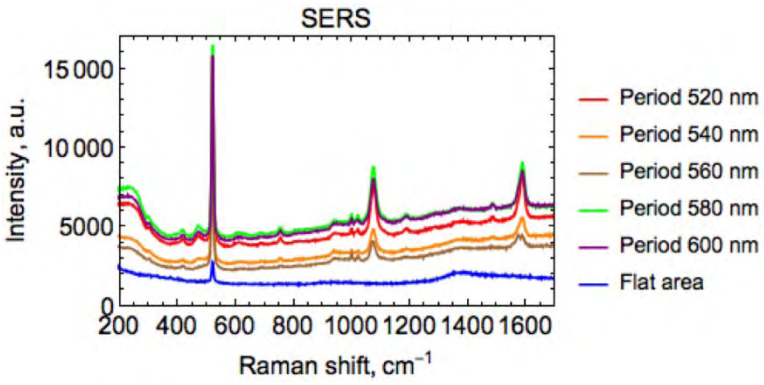


Рис. 4. Спектры комбинационного рассеяния от молекул 4-МФБК, иммобилизованных на метаповерхностях с различными периодами гребней; сравнение с 4-МФБК на гладкой серебряной пленке

Нами исследованы спектры комбинационного рассеяния молекул 4-МФБК, нанесенных на образец, а также проведен сравнительный анализ сигнала комбинационного рассеяния от структурированных областей, состоящих из периодических гребней, с сигналом от молекул 4-МФБК, осаждённых на неструктурированную область образца (Рис. 4). Молекулы 4-МФБК через атомы серы ковалентно связаны с серебренной пленкой. Спектры ГКР, возбужденные лазерным излучением λ= 785 нм (использован объектив 10X, мощность излучения P=140 мВт), регистрировались с помощью WiTec спектрометра. Спектральные линии обнаружены на частотах 690 $см^{-1}$,1010 $см^{-1}$, 1020 $см^{-1}$,1080 $см^{-1}$,1500 $см^{-1}$,1580 $см^{-1}$, что соответствует спектру 4-МФБК. Мы оцениваем усиление комбинационного рассеяния как $G\sim10^4 \div10^5$. Наблюдаемое усиление сигнала ГКР указывает, что метаповерхность может использоваться в качестве сенсора комбинационного рассеяния света.

В заключение, нами исследованы оптические свойства кремниевой метаповерхности, покрытой тонким слоем серебра. Результаты эксперимента и компьютерного моделирования указывают на возбуждения металлодиэлектрических резонансов, которые проявляются в усилении локального электрического поля и соответственных провалах в спектрах отражения. Достигнутое соотношение сигнала комбинационного рассеяния света к люминесценции позволяет рассматривать разработанные метаповерхности как эффективные ГКР сенсоры. Мы считаем, что усиление комбинационного рассеяния связано с большим локальным оптическим полем и образованием ковалентной связи между молекулами 4-МФБК и слоем серебра.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Гранты № 17-08-01448 и 18-58-00048) и Президиума Российской академии наук (программа № 56).

Литература

1. *Sarychev A.K., Ivanov A.V., Lagarkov A.N., Barbillon G., Materials, 12,103-142 (2019)*
2. *Dykhne A.M., Sarychev A.K., Shalaev V.M., Phys. Rev. B67, 195402 (2003)*

УСИЛЕНИЕ ЭФФЕКТА РАМАНА С ПОМОЩЬЮ ИНФРАКРАСНОГО ИСТОЧНИКА СВЕТА

Шишков В.Ю.[1,2,3*], **Андрианов Е.С.**[1,2,] **Пухов А.А.**[1,2,3], **Виноградов А.П.**[1,2,3], **Лисянский А.А.**[4]

[1] *Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, г. Москва*
[2] *Московский физико-технический институт, г. Москва*
[3] *Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, г. Москвы*
[4] *Департамент физики квинс колледжа городского университета Нью-Йорка, Нью-Йорк, США*
[*] *E-mail:* vladislavmipt@gmail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16139

Рамановское рассеяние, которое также называют комбинационным рассеянием, это разновидность неупругого рассеяние света [1, 2]. В настоящее время с явлением рамановского рассеяния связывается целый ряд оптических методов измерения, объединенных понятием «вибрационная спектроскопия» [3]. В основании этих явлений лежит взаимодействие колебаний ядер молекулы или твёрдого тела с ее электронной подсистемой. В экспериментах по когерентному рамановскому рассеянию (CARS) молекулы освещаются двумя волнами, разница частот между которыми примерно равна собственной частоте колебаний ядер молекулы [4-6]. В результате происходит возбуждение когерентных колебаний ядер молекул, которое проявляется в нелинейной зависимости интенсивности сигнала CARS от интенсивности падающего поля. В данном докладе мы рассмотрим метод усиления рамановского сигнала с помощью инфракрасного источника (ИК) света. Как и метод CARS, он использует взаимодействие между электронной и ядерной подсистемами молекулы в виде гамильтониана взаимодействия Фрёлиха. При падении электромагнитного поля на молекулу это взаимодействие приводит к созданию эффективной силы, действующей на ядра молекулы. Из-за нелинейности гамильтониана Фрёлиха частотный спектр этой силы содержит всевозможные суммы и разности частот падающего электромагнитного поля. Метод CARS основан на том, что разность двух оптических сигналов совпадает с собственной частотой колебаний ядер молекулы. Резонансное возбуждение колебаний ядер молекул происходит и в том случае, когда сумма двух частот падающей ИК волны совпадает с собственной частотой колебаний ядер молекулы. Это возбуждение достигается даже для молекул, не имеющих дипольных моментов колебательных переходов. Благодаря когерентности ИК излучения возбужденные колебания ядер в разных молекулах также когерентны. Благодаря этой когерентности сигналы от молекул на стоксовой и антистоксовой частотах также являются когерентными. Это приводит к усилению рамановского сигнала, пропорционального квадрату числа молекул в объеме накачки, тогда как рамановский сигнал, возникающий из-за температурных флуктуаций, линейно пропорционален количеству молекул. Предлагаемый метод отличается от двухфотонного метода, предложенного в работе [7], где для возбуждения молекулы из основного состояния в возбужденное состояние необходим каскад переходов между вспомогательными колебательными уровнями молекулы с ненулевыми дипольными моментами. Дополнительные колебательные уровни необходимы для прямого взаимодействия молекулы с ИК светом. Этот метод применим только к конкретным молекулам, имеющим такие дополнительные колебательные уравни. Метод, описанный в данном докладе, основан на нелинейном взаимодействии электронной и ядерной подсистем. Усиление рамановского сигнала обусловлено резонансным взаимодействием второй гармоники падающего инфракрасного света с ядрами молекулы. Важным аспектом предлагаемого способа является то, что когерентные колебания ядер возбуждаются во всех молекулах, находящихся в освещенном объеме. В результате интенсивность рамановского сигнала становится пропорциональной квадрату числа освещенных молекул [8, 9]; тогда как интенсивность спонтанного комбинационного сигнала линейно зависит от числа молекул.

Литература

1. *Raman, C.V. and K.S. Krishnan, A new type of secondary radiation. Nature, 1928. 121(3048): p. 501*
2. *Mandelstam, L.I. and G.S. Landsberg, New phenomenon in scattering of light (preliminary report). J. Russ. Phys.-Chem. Soc., 1928. 60: p. 335*
3. *Ferraro, J.R., Introductory raman spectroscopy2003: Elsevier*
4. *Ganikhanov, F., et al., High-sensitivity vibrational imaging with frequency modulation coherent anti-Stokes Raman scattering (FM CARS) microscopy. Optics letters, 2006. 31(12): p. 1872-1874*
5. *Cheng, J.-X., A. Volkmer, and X.S. Xie, Theoretical and experimental characterization of coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy. JOSA B, 2002. 19(6): p. 1363-1375*
6. *Vartiainen, E.M., Phase retrieval approach for coherent anti-Stokes Raman scattering spectrum analysis. JOSA B, 1992. 9(8): p. 1209-1214*
7. *A. J. Traverso, et al., Two-Photon Infrared Resonance Can Enhance Coherent Raman Scattering. Phys. Rev. Lett., 2018. 120(6): p. 5*
8. *Bergner, G., et al., Quantitative detection of C-deuterated drugs by CARS microscopy and Raman microspectroscopy. Analyst, 2011. 136(18): p. 3686-3693*
9. *Bengtsson, P.-E., L. Martinsson, and M. Aldén, Combined vibrational and rotational CARS for simultaneous measurements of temperature and concentrations of fuel, oxygen, and nitrogen. Applied spectroscopy, 1995. 49(2): p. 188-192*

УЛЬТРАТОНКИЕ ПЛЕНКИ ЗОЛОТА ДЛЯ ФОТОННЫХ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Волков В. [1,2*], **Якубовский Д.**[1], **Стебунов Ю.**[1,2], **Киртаев Р.**[1], **Ермолаев Г.**[1,3], **Миронов М.**[1], **Новиков С.**[1], **Воронин К.**[1] **и Арсенин А.**[1,2]

[1] *Московский физико-технический институт*, г. *Долгопрудный*
[2] *GrapheneTek, инновационный центр «Сколково»*
[3] *Сколковский научно-технический институт*, г. *Москва*
[*] *E-mail:* vsv@mci.sdu.dk

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16140

Открытие графена — первого двумерного материала, представляющего собой единичную плоскость графита толщиной в один атом углерода, а также последующее изучение его удивительных свойств ознаменовало появление новых областей исследований в науке и технике и даже нового мира материалов [1]. В настоящее время известно уже более сотни двумерных материалов, обладающих интересными свойствами, благодаря которым им находят применение в самых разных сферах от биомедицины до электроники и аэрокосмоса. Все известные двумерные материалы принадлежат к классу слоистых кристаллов, для которых характерна слабая связь между слоями и сильная — внутри слоя. Отделить такой слой не так трудно, например, графен от графита отделили с помощью скотча. Однако есть множество неслоистых материалов, и возникает задача получения двумерных слоев из этих материалов. Например, для различных приложений оптоэлектронике требуются прозрачные и проводящие электроды. Двумерные слои золота, серебра или меди могли бы стать незаменимыми для гибкой и прозрачной электроники (складывающиеся дисплеи, электронная бумага и одежда, линзы со встроенной электроникой и др.), однако они не относятся к классу слоистых, и до настоящего времени отсутствовали технологии получения таких ультратонких металлических пленок на произвольных поверхностях. Сверхтонкие металлические электроды способны стать технологической основой и для высокоэффективных нейроинтерфейсов, которые могут не только решить ряд медицинских проблем, но и приблизить нас к непосредственной интеграции нервной системы живых организмов с электронными устройствами.

Металлическую пленку отслаиванием с помощью скотча не получить, но ее можно осадить с помощью термического испарения объемного металла в высоком вакууме. Испаряемый металл осаждается на подложку, атомы металла собираются на поверхности в наночастицы, эти частицы при дальнейшем осаждении металла растут, между ними появляются соединения, получается пленка с пустотами, которые в дальнейшем заполняются. Достаточно однородные пленки высокопроводящих металлов удается получать на толщинах около 20 нанометров, но их нельзя считать прозрачными [2]. Пленки меньшей толщины из-за наличия неоднородностей и пустот характеризуются малой проводимостью, то есть теряются металлические свойства. Это можно объяснить на примере металлической сетки, которая хуже проводит электрический ток по сравнению со сплошным металлическим листом. Перед учеными стоит задача добиться высокой проводимости металлических пленок на толщинах менее 10 нанометров. Для примера на рисунке 1 продемонстрирована поверхность металлической пленки, осажденной на обычную кремниевую подложку. Видно, что при толщине 9 нм в пленке еще есть заметные пустоты.

В данном исследовании мы отталкивались от гипотезы о том, что двумерные металлы можно получить на поверхности других двумерных материалов. Первым делом попробовали графен, но оказалось, что он почти не смачивается металлом и при определенных условиях приводит к нехарактерному для металлов росту — практически в виде столбов [3]. При таком механизме наночастицы растут вверх, а пустоты между ними заполняются металлом с большим трудом. Металлические пленки на графене интересны для ряда приложений, например, для поверхностно усиленной рамановской спектроскопии, но они не проводят электрический ток на малых толщинах. В дальнейших исследованиях рассматривалась кинетика роста металлов на двумерных дихалькогенидах переходных металлов и, в частности, на двумерном дисульфиде молибдена. Известно, что золото очень плохо взаимодействует практически со всеми веществами, но с соединениями серы оно может образовывать прочные химические связи. Так, на кремниевую подложку со слоем диоксида кремния SiO_2 и монослоем дисульфида молибдена MoS_2 с помощью термического испарения в высоком вакууме осаждались тонкие слои золота. По изображениям электронной и атомно-силовой микроскопии была изучена структура золотых пленок разной толщины, выращенных на чистой поверхности SiO_2 и поверхности SiO_2, с монослоем MoS_2 (смотреть рисунок 1). Наличие одного слоя

двумерного материала позволило получить сплошные пленки золота с характерной для металлов электрической проводимостью на толщинах всего 3–4 нанометра [4] Этим пленкам по своим характеристикам уступают значительно более толстые пленки золота, полученные без использования интерфейса из двумерного материала. Поскольку одним из ключевых применений таких металлических слоев является фотоника и оптоэлектроника, мы детально изучили их оптические свойства с помощью спектральной эллипсометрии и впервые представили миру значения оптических констант для таких ультратонких пленок золота.

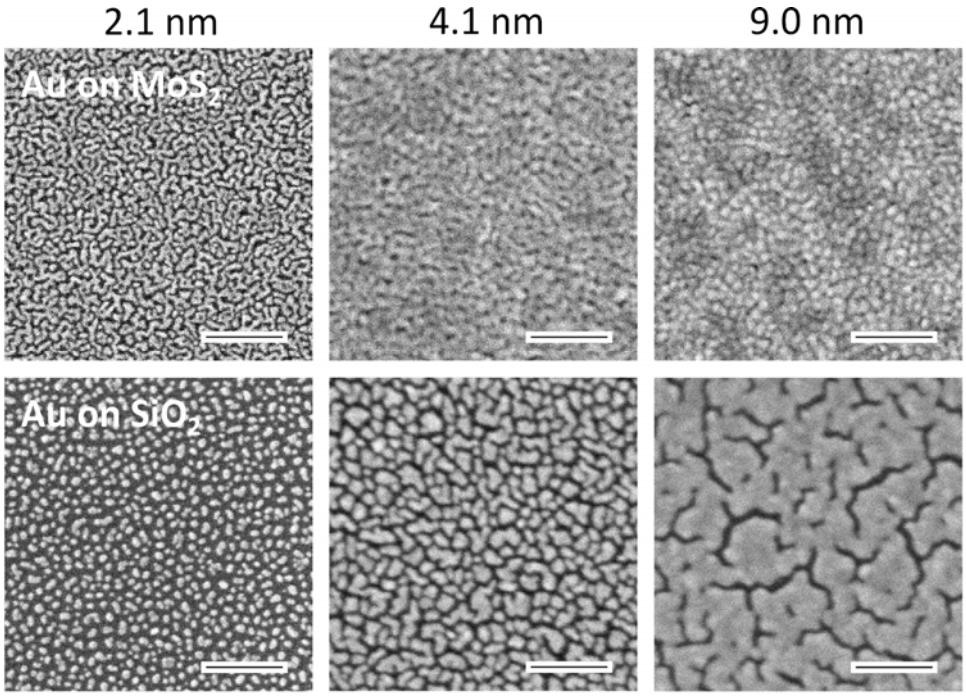


Рис. 1. Электронная микроскопия золотых пленок разной толщины. Сверху — пленка на подложке из дисульфида молибдена (MoS_2), снизу — пленка на кремниевой подложке со слоем диоксида кремния (SiO_2)

Предполагается, что такие квазидвумерные слои металлов будут интегрированы в многослойные «бутерброды» из различных двумерных материалов, которые имеют название ван-дер-ваальсовых гетероструктур. Комбинируя разные монослои, можно получать новые материалы с неожиданными свойствами.

Литература

1. *Novoselov K.S. , et al, Science 306, 666 (2004)*
2. *Yakubovsky D.Y., et al, Opt. Express. 25, 25574 (2017)*
3. *Yakubovsky D.Y., et al, Nanomaterials 8 (12), 1058 (2018)*
4. *Yakubovsky D.Y., et al, Advanced Materials Interfaces 6 (13), 1970082 (2019)*

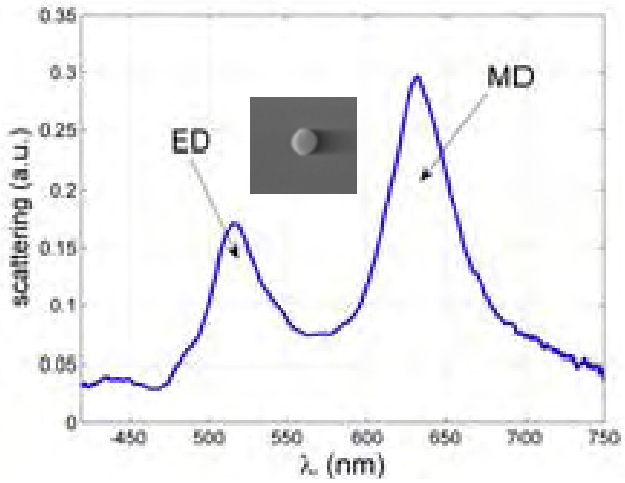
МУЛЬТИПОЛЬНЫЕ РЕЗОНАНСЫ КРЕМНИЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФОТОНИКИ

Евлюхин А.Б.

Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Москвовская область
[*] *E-mail:* a.b.evlyukhin@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16141

Недавно было продемонстрировано, что сферические кремниевые наночастицы могут резонансно рассеивать электромагнитные волны оптического диапазона.Установлено, что резонансы наночастиц размером 200-300 нм, реализуемые в видимой области спектра, связаны с возбуждением магнитных и электрических мультипольных моментов этих наночастиц [1-3]. В данной работе обсуждается происхождение магнитного дипольного (мультипольного) резонанса в диэлектрических наночастицах и представляются недавние теоретические и экспериментальные результаты, в этой области исследований. На рисунке показано СЭМ-изображение сферической наночастицы кремния и соответствующий ей спектр рассеяния света, демонстрирующий два резонанса около 520 нм и 630 нм. Теоретический анализ [1,2] показал, что резонансные пики спектра соответствуют возбуждению электрического (ED) и магнитного (MD) дипольного момента наночастицы. Для фабрикации кремниевых наночастиц был использован метод лазерной печати.



Приведена информация о теоретическом подходе, позволяющем проводить мультипольный анализ рассеяния света наночастицами произвольной формы, расположенными в свободном пространстве или на подложке. Обсуждается влияние магнитно дипольного резонанса на пространственное распределение рассеянного света и поверхностных плазмон поляритонов. Развит метод мультипольного анализа спектров светового отражения и пропускания двумерных массивов наночастиц и метаповерхностей. Основное внимание уделено первым мультиполям, в том числе магнитному квадруполю и электрическому октуполю. Показано, что в в решетках наночастиц кремния может реализоваться резонансное подавление отражения света за счет эффекта Керкера [1]. При изучении диаграмм рассеяния света на наночастицах различной формы [3] показано, как пространственное распределение рассеянного света может быть связано с перекрытием различных мультипольных мод, резонансно возбуждаемых в наночастицах. Применение метода мультипольного анализа для изучения особенностей коэффициентов отражения и пропускания метаповерхностей показало, что интерференция между волнами, излучаемыми несколькими мультипольными моментами наночастиц, может приводить к подавлению отражения или пропускания света в системе[4]. В частности может реализоваться «эффект невидимой решетки», при котором свет, проходя через метаповерхность практически без амплитудных и фазовых искажений, возбуждает мультипольные моменты наночастиц [4].

Литература

1. *Evlyukhin A.B., et al, Nano Lett. 12, 3749- (2012)*
2. *Evlyukhin A.B., et al, J. Opt. Soc. Am. B 30, 2589 (2013)*
3. *Terekhov P.D., et al, Phys. Rev. B 96, 035443 (2017)*
4. *Terekhov P.D., et al, Phys. Rev. B 99, 045424 (2019)*

СПЕКТРОСКОПИЯ МОЛЕКУЛ И НАНОМАТЕРИАЛОВ, УСИЛЕННАЯ ПЛАЗМОНАМИ

Драчев В.П.

Сколковский Институт Науки и Технологий, Москва, Россия, 121205
University of North Texas, Denton, TX, USA 76203
E-mail: v.drachev@skoltech.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16142

Металлические частицы малых размеров поддерживают возбуждение локализованных плазмонов. Возникающие при этом высокие локальные поля являются основной причиной усиления оптических откликов, линейных и особенно нелинейных. Такие эффекты как гигантское комбинационное рассеяние, усиление фотолюминесценции, усиление радиационноой релаксации возбуждения, зависимость от геометрии металлических наноструктур нашли применение в сенсорах, оптоэлектронике и метаматериалах. Недавние эксперименты открывают новые аспекты этих эффектов [1-3]. Несколько объемных процентов золотых наночастиц увеличивают двухфотонного поглощения пленок органических молекул в сотни раз [1]. Кооперативные эффекты в излучении молекул красителей взаимодействующих через плазмонные возбуждения [2]. Неожиданно высокодобротный плазмонный резонанс в наночастицах Co в УФ части спектра, 275 нм, где многие биомолекулы имеют электронные резонансы, делает наночастицы Co привлекательным материалом для биосенсоров [3]. Причиной высокодобротного резонанса являются однодоменные частицы с поляризацией спинов, где присутствуют два независимых канала проводимости для электронов с противоположными спинами и с сильно разными константами релаксации электронов.

Литература

1. *V. P. Drachev, et al., Engineered nonlinear materials using gold nanoantenna array. Scientific Reports 8: 780 (2018)*
2. *D. P. Lyvers, M. Moazzezi, V. C. de Silva, D. P. Brown, A. M. Urbas, Y. V. Rostovtsev, and V. P. Drachev, Cooperative bi-exponential decay of dye emission coupled via plasmons. Scientific Reports 8: 9508 (2018)*
3. *H. Bhata, A.E. Aliev, and V.P. Drachev, New mechanism of plasmons specific for spin-polarized nanoparticles. Scientific Reports 9: 2019 (2019)*

КАРТИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ МЕТОДАМИ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ НАНОСКОПИИ ОДИНОЧНЫХ МОЛЕКУЛ И КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Наумов А.В.[1,2,*], Гладуш М.Г.[1,2], Горшелев А.А. [1], Еремчев И.Ю. [1], Голованова А.В. [1,2], Kohler J.[3], Kaodr L.[3]

[1] Институт спектроскопии РАН, Москва, Троицк
[2] Московский Педагогический Государственный Университет, Москва
[3] University of Bayreuth and BIMF, Bayreuth, Germany
[*] E-mail: a_v_naumov@mail.ru [*] Web-page: www.single-molecule.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16143

Современная оптическая (люминесцентная) спектромикроскопия одиночных квантовых излучателей (ОКИ) добилась впечатляющих успехов как с точки зрения развития экспериментальной техники, так и с точки зрения теоретических моделей, описывающих взаимодействие света с ОКИ – органическими молекулами, полупроводниковыми нанокристаллами, диэлектрическими и гибридными наночастицами. Так, например, уже активно используются в науках о жизни методы наноскопии (люминесцентной микроскопии сверхвысокого пространственного разрешения) с детектированием изображений одиночных молекул. Данное направление было отмечено Нобелевской премией по химии 2014 года. В то же время, как справедливо отметил в своей статье [1] один из основателей данного направления проф. М.Оррит: “Single-molecule chemistry is more than superresolved fluorescence microscopy”. Потенциал экспериментальных методов контроля и управления взаимодействием света с ОКИ только начинает использоваться. В частности, существует возможность многопараметрической (гиперспектральной) характеризации в нанометровом масштабе конденсированных сред.

Возможность картирования значений показателя преломления в субмикрометровом масштабе представляет значительный фундаментальный и прикладной интерес в самых разных областях естествознания. В частности, наука о полимерах остро нуждается в новых методах диагностики сложных полимерных смесей и структур, нанопленок, нановолокон. Био- и медицинская физика также использует методы контрастной диагностики, основанные на детектировании границ сред с различными показателями преломления. Существует также целый ряд нанотехнологических задач, которые требуют контроля материальных характеристик среды на нанометровом масштабе (напр., синтез калиброванных диэлектрических наночастиц). Одним из подходов для диагностики локальных полей и материальных характеристик в микро- и наноструктурах стала флуоресцентная наноскопия с детектированием спектров одиночных примесных излучающих центров, выступающих в качестве спектральных нанозондов. [2]

В настоящем докладе мы показываем как техника флуоресцентной наноскопии с детектированием одиночных квантовых излучателей (молекул, квантовых точек) может быть использована для характеризации тонкопленочных структур и нанообъектов. [3],[4] Обсуждаются методы флуоресцентной наноскопии одиночных квантовых излучателей (органических молекул, полупроводниковых коллоидных квантовых точек) в широком диапазоне температур, их приложения для исследования внутри и межмолекулярных процессов; диагностики локальной структуры и внутренней динамики материалов и наноструктур.

Регистрация люминесцентных изображений одиночных точечных излучателей позволяет реконструировать координаты источника с субдифракционной (нанометровой) точностью, которая ограничена только стабильностью установки, отношением сигнал к шуму регистрируемого излучения и размерами самого точечного источника. Реконструкция координат излучателей осуществляется путем анализа (инструментальной модификации) аппаратной функции точечного источника (PSF). Модификация PSF по биспиральной схеме методами адаптивной оптики [5] позволяет восстановить все 3 координаты точечного источника с нм точностью. [6]

Особенно информативными и наиболее чувствительными к параметрам ближайшего окружения являются бесфононные спектральные линии (БФЛ) примесных центров, наблюдаемые, как правило, при криогенных температурах. [7] Наноскопия с детектированием БФЛ ОМ позволяет осуществлять своеобразную «спектральную нанотомографию», отражающую различные особенности локальной структуры и динамики образца, напр., картировать материальные характеристики образца с субволновым пространственным разрешением. [3]

Новый импульс в развитии наноскопия приобрела с появлением новых искусственных люминофоров - полупроводниковых коллоидных КТ. Одиночные КТ проявляют эффект мерцания люминесценции, связанный с Оже-ионизацией и туннельными переходами атомов, что, в свою очередь, связано с наличием дефектов в структуре, на поверхности и интерфейсах оболочечных КТ. [8] Эффект мерцания может быть использован при разработке новых методов наноскопии.

Разработка экспериментальных методов наноскопии проводится в рамках крупного проекта фундаментальных научных исследований по направлениям, поддержанным Президиумом РАН (проект №5 «Фотонные технологии...») и Государственного задания ИСАН.

Литература

1. *M. Orrit, "Single-Molecule Chemistry is More than Superresolved Fluorescence Microscopy", Angewandte Chemie-International Edition, 54, 28, (2015) 8004-8005*
2. *A. Aubret, A. Pillonnet, J. Houel, C. Dujardin, F. Kulzer, "CdSe/ZnS quantum dots as sensors for the local refractive index", Nanoscale, 8, 4, (2016) 2317-2325*
3. *A.V. Naumov, A.A. Gorshelev, M.G. Gladush, T.A. Anikushina, A.V. Golovanova, J. Kohler, L. Kador, "Micro-Refractometry and Local-Field Mapping with Single Molecules", Nano Letter**s**, 18, 10, (2018) 6129-6134*
4. *I.Y. Eremchev, M.Y. Eremchev, A.V. Naumov, "Multifunctional far-field luminescence nanoscope for studying single molecules and quantum dots (50th anniversary of the Institute of Spectroscopy, Russian Academy of Sciences)", Physics-Uspekhi, 62, 3, (2019) 294-303*
5. *S.R.P. Pavani, M.A. Thompson, J.S. Biteen, S.J. Lord, N. Liu, R.J. Twieg, R. Piestun, W.E. Moerner, "Three-dimensional, single-molecule fluorescence imaging beyond the diffraction limit by using a double-helix point spread function", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 106, 9, (2009) 2995-2999*
6. *A. Naumov, I.Y. Eremchev, A.A. Gorshelev, "Laser selective spectromicroscopy of myriad single molecules: tool for far-field multicolour materials nanodiagnostics", European Physical Journal D, 68, 11, (2014)*
7. *A.V. Naumov, "Low-temperature spectroscopy of organic molecules in solid matrices: from the Shpol'skii effect to laser luminescent spectromicroscopy for all effectively emitting single molecules", Physics-Uspekhi, 56, 6, (2013) 605-622*
8. *I.Y. Eremchev, I.S. Osad'ko, A.V. Naumov, "Auger Ionization and Tunneling Neutralization of Single CdSe/ZnS Nanocrystals Revealed by Excitation Intensity Variation", Journal of Physical Chemistry **C**, 120, 38, (2016) 22004-22011*

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ В ДИСКРЕТНОЙ ФОТОНИКЕ

Маймистов А.И.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва
E-mail: maimistov@pico.mephi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16144

В последние два десятилетия можно было заметить стремление отыскать и изучить аналогии между явлениями физики конденсированных сред и оптики. Хорошо известным примером являются фотонные кристаллы. Фотоны, подобно электронам в кристаллической решетке, рассеиваясь на периодически расположенных в пространстве диэлектрических структура (шариках, стержнях) приобретают свойства частиц, описываемых волнами Блоха, а их спектр состоит из чередующихся запрещенных и разрешенных зон. С другой стороны, электромагнитное поле может быть локализовано в диэлектрических ловушках (микрорезонаторах или волноводах), периодически расположенных в пространстве. В таком случае фотоны могут перемещаться между соседними диэлектрическими ловушками за счет нарушенного полного внутреннего отражения. Аналогично электронам, которые будучи сильно связанными с ионами кристаллической решетки, могут перемещающимися между узлами решетки только за счет квантового туннелирования. Эта аналогия хорошо работает, если характерное расстояние между диэлектрическими структурами порядка длины волны электромагнитного излучения. Дискретность среды в этом случае играет существенную роль, и можно говорить о фотонных решетках и дискретной фотонике. В представленном сообщении будет рассматриваться случай, когда электромагнитные волны могут распространяться в виде бегущих волн только вдоль волноводов, в поперечном направлении перенос энергии происходит только за счет туннельной связи между соседними волноводами.

Простейшим примером фотонной решетки является линейка волноводов или цепочка микрорезонаторов. Использование оптически нелинейных диэлектриков в качестве материала, из которого изготовлены волноводы, делает возможным наблюдать нелинейные волновые явления, такие как модуляционная неустойчивость и образование локализованных (на решетке или на оси волновода) волновых пакетов – дискретных солитонов. Известно, что взаимодействие дискретных солитонов может быть неупругим. То есть, это не истинные солитоны, которые отвечают решениям вполне интегрируемых систем дифференциально-разностных уравнений, но долгоживущие уединенные волны. В случае квадратичной нелинейности волноводов в ряде работ были исследованы параметрические процессы и образование связанных многочастотных солитонов.

Фотонная решетка, элементарная ячейка которой содержит более двух узлов, демонстрирует многозонный спектр линейных возбуждений, и волновые процессы в них могут быть более сложными. В качестве примеров недавно исследованных одномерных фотонных решеток надо отметить зигзагообразные решетки волноводов и бинарных линейки волноводов, в которой чередуются знаки показателя преломления или коэффициенты связи. В первом случае спектр линейных волн содержит запрещенную зону для волн, бегущих вдоль волноводов. Ширина запрещенной зоны меняется вдоль зоны Бриллюэна, обращаясь в нуль на границах зоны. В таких моделях были найдены аналоги щелевых дискретных солитонов, которые, не являясь истинными солитонами, аномально устойчивы и сохраняют свою форму при столкновениях. Важно заметить, что бинарная линейка волноводов недавно стала привлекать внимание как аналог модели Су-Шриффера-Хигера, используемой для описания электронных свойств полиацетилена. В этой модели имеет место зеркальная симметрия, что выражается в наличии двух конфигураций длинной молекулы полиацетилена, минимумы энергии для которых, разделены энергетическим барьером. В фотонном аналоге лишний волновод в решетке, играющий роль дефекта, может разделять две топологически различные конфигурации фотонной решетки. В настоящее время уделяется большое внимание исследованию локализации электромагнитной волны на таком топологическом дефекте.

Присутствие третьего узла в элементарной решетке в некоторых случаях приводит к появлению в спектре фотонов дополнительной зоны, имеющую нулевую кривизну. Такая плоская зона в физике конденсированных сред, а теперь и в оптике, привлекает большое внимание, как новый механизм локализации. Установлено, что моды плоской зоны не устойчивы – локализованные волны становятся распространяющимися под действием любых малых возмущений. В нелинейной одномерной решетке, допускающей плоскую зону, была изучена модуляционная неустойчивость различных конфигураций распределения излучения по волноводам, для которых поток фотонов вдоль решетки нулевой.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-00278).

ТЕОРИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЗАДАЧЕ РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА НАНОЧАСТИЦАХ

Береза А.С.[1,2], Немыкин А.В.[1,2], Фрумин Л.Л.[1,2], Перминов С.В.[3], Шапиро Д.А.[1,2*]

[1] *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск*

[2] *Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

[3] *Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск*

[*] shapiro@iae.nsk.su

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16145

Важнейшей проблемой фотоники и плазмоники является рассеяние плоской волны различными объектами. В квантовой механике общим методом получения приближенного аналитического решения задачи рассеяния является борновское приближение. К сожалению, это приближение не применимо в фотонике из-за различия граничных условий [1]. В данном докладе мы разрабатываем улучшенное борновское приближение, которое пригодно для электромагнитной волны. В случае цилиндра предложено дополнительно использовать специальную функцию Грина [2], которая позволяет частично суммировать ряд и увеличить точность.

Мы проверили формулы путем сравнения с численными расчетами методами граничных элементов и точечных диполей. Показано, что уже первое улучшенное борновское приближение дает угловую диаграмму рассеянного излучения качественно (рис.1), а третье обеспечивает количественное согласие с точностью 3-5% (рис.2).

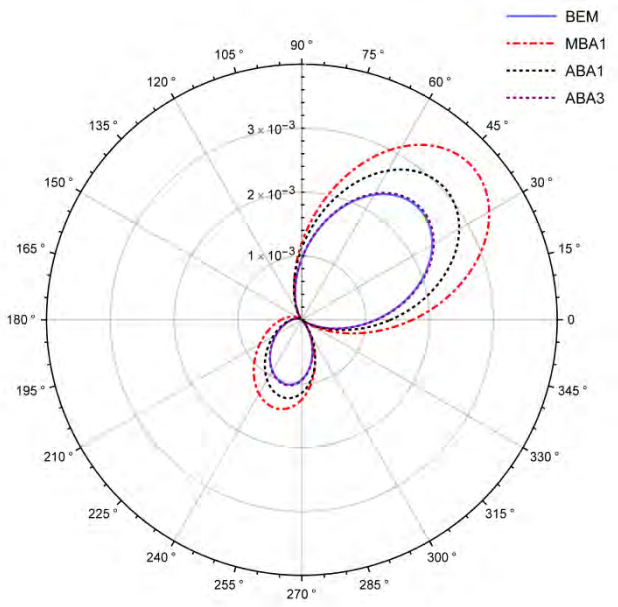


Рис. 1. Квадрат модуля магнитного поля при рассеянии на двух параллельных стеклянных цилиндрах. Показатель преломления 1.5, радиусы и расстояние 0.1 мкм, длина волны 1.512 мкм, расстояние от центра первого цилиндра до точки наблюдения 3 мкм. Первый порядок с учетом граничных условий для уравнений Максвелла (штрих-пунктир), первое улучшенное борновское приближение (штрихи), третье (точки), метод граничных элементов (сплошная линия). Плоская p-волна падает под углом 45° к линии, соединяющей центры сечений

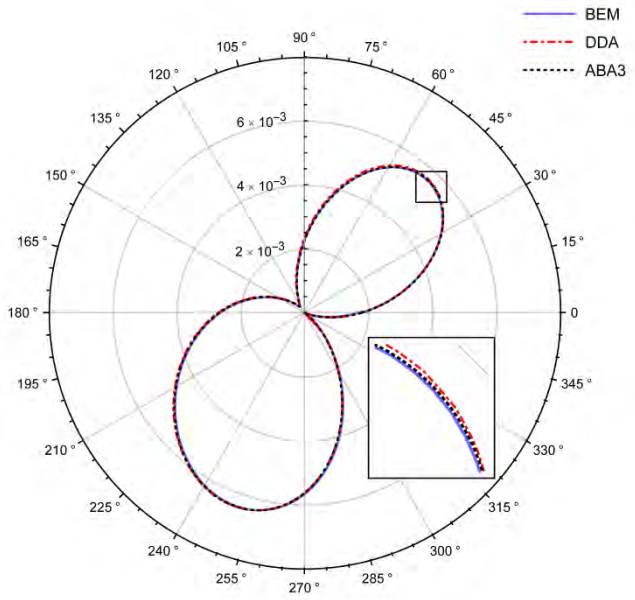


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но первый цилиндр изготовлен из золота с диэлектрической проницаемостью -91+10i. Третье улучшенное борновское приближение (точки), метод граничных элементов (сплошная кривая), приближение точечных диполей (штрих-пунктир). На врезке увеличенный фрагмент, отмеченный на диаграмме квадратом

Литература

1. *Немыкин А. В., Берёза А. С., Шапиро Д. А. Письма в ЖЭТФ 108 (9) 613 (2018)*
2. *Bereza A. S., Nemykin A. V., Perminov S. V., Frumin L. L., Shapiro D. A. Phys. Rev. A. 95, 063839 (2017)*

ДИПОЛЬНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ И ФУРЬЕ МОДАЛЬНЫЙ МЕТОД ДЛЯ ОПИСАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕШЁТОК НАНОЧАСТИЦ

Фрадкин И.М.[1], Дьяков С.А.[1], Гиппиус Н.А.[1*]

[1] Сколковский институт науки и технологий, Большой бульвар, 30, Москва, 121205, Россия
[2] Московский физико-технический институт, Институтский пер.,9, Долгопрудный, 141701, Россия
[*] E-mail: n.gippius@skolytech.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16146

Периодические фотонные структуры являются одним из наиболее важных структурных элементов в современной фотонике, поскольку они формируют основу для множества оптических устройств. Модальный метод Фурье (FMM) (или метод матрицы рассеяния) является очень эффективным инструментом для изучения оптических свойств многослойных вертикально-инвариантных периодических структур. Однако он не справляется с массивами мелких частиц из-за высоких градиентов их локальных полей: для достижения точных результатов требуется большое количество гармоник Фурье. В этой работе [1] представлена реализация дискретного дипольного приближения (DDA) для построения матриц рассеяния для массивов резонансных наночастиц. Такой подход сильно ускоряет вычисления и, следовательно, дает возможность для тщательного рассмотрения различных слоистых структур с небольшими периодическими включениями в рамках метода матрицы рассеяния. Мы демонстрируем эффективность предложенного подхода, рассматривая плазмонные решетки, встроенные в однородную среду, а также размещенные как внутри так и на на поверхности оптического волновода. В этих системах наблюдаются как локализованные поверхностные плазмонные резонансы, так и плазмонные резонансы, обусловленные наличием решетки, а также происходит их гибридизация с фотонными модами. Высокая точность и быстрая сходимость нашего подхода демонстрируются сравнением с методом конечных элементов (FEM) и методом матрицы рассеяния.

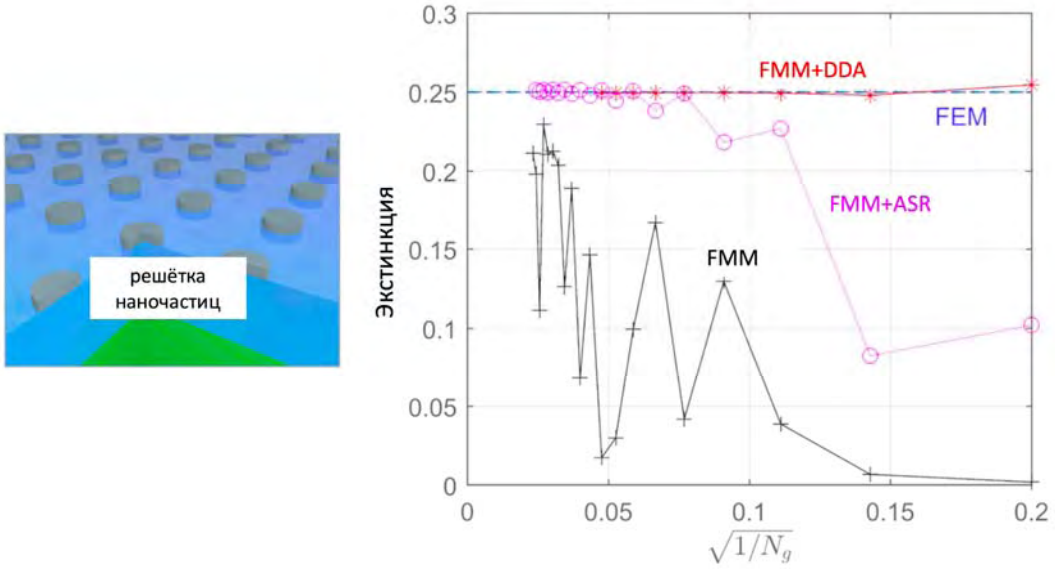


Рис. 1. Рассчитанная экстинкция решетки наночастиц (изображённой на вставке слева) для луча света падающего по нормали к плоскости решётки. Результаты численных расчётов различными методами показаны в зависимости от числа учитываемых в расчёте пространственных гармоник (N_g). Предложенный нами подход с использованием дискретного дипольного приближения (FMM+DDA) сходится существенно быстрее, чем Фурье модальный метод, даже с использованием адаптивных координатных сеток (FMM+ASR)

Литература

1. *Fradkin I.M., Dyakov S.A., and Gippius N.A., Phys. Rev. B, 99(7), 075310 (2019)*

ВИБРАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ КОЛЕБАНИЙ МОЛЕКУЛ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ SERS КАК РАМАНОВСКИЙ СПАЗЕР

Шишков В.Ю.[1,2,3], Андрианов Е.С.[1,3*], Пухов А.А.[1,2,3], Виноградов А.П.[1,2,3], Лисянский А.А.[4,5]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, г. Москва
[2] Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, г. Москва
[3] Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Москва
[4] Квинс Колледж Городского университета Нью-Йорка, Соединенные Штаты Америки, 11367 Нью-Йорк, Флашинг, бульв. Киссена, 65-30а
[5] Образовательный центр Городского университета Нью-Йорка, Соединенные Штаты Америки, 10016 Нью-Йорк
[*] E-mail: andrianov.es@mipt.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16147

Открытие лазеров (когерентных источников света) дало новый толчок в развитии эффекта комбинационного рассеяния (КР), или эффекта Рамана. Были открыты вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), рамановский лазер и т.п. Формально ВКР возникает, когда КР-активные молекулы освещаются двумя когерентными лучами света: слабым по интенсивности сигналом с частотой ω_S и большой по интенсивности волной накачки с частотой ω_P [1]. Для понимания процессов, происходящих при взаимодействии внешнего когерентного излучения с молекулами, испытывающими КР, важную роль играет взаимодействие между электронной и ядерной подсистемами молекулы. Роль взаимодействия электронной и ядерной подсистем молекулы в создании ВКР обсуждалась в [1]. В случае, когда частота накачки ω_P больше, чем частота сигнала, а разность частот падающих лучей близка к частоте вибрационных колебаний молекулы ω_V, наблюдается усиление сигнала на частоте ω_S. Если рамановский усилитель поместить в резонатор, то роль сигнальной волны может играть мода резонатора с частотой ω_S. В этом случае при освещении системы когерентным полем с частотой ω_P с надпороговой амплитудой в системе будут наблюдаться автоколебания поля в резонаторе на частоте ω_S. Для получения рамановского лазирования наиболее часто используются Фабри-Перо резонаторы, брэговские решётки, замкнутые в кольцо волокна и резонаторы на моде шепчущей галереи [2].

В настоящей работе рассматривается случай, когда роль моды резонатора выполняет ближнее поле, возникающее при плазмонном резонансе металлической наночастицы. Естественно ожидать, что в такой схеме будет наблюдаться спазирование [3]. Однако в недавней экспериментальной работе [4] исследовалось воздействие внешнего когерентного поля на плазмонную наночастицу, с прикрепленной к ней КР-активной молекулой. Было показано, что такая система проявляет вибрационную нестабильность. При интенсивностях внешнего поля выше некоторого порогового значения число вибрационных колебаний молекул начинает возрастать, что выражается в нелинейной зависимости стоксовского и антистоксовского сигналов от интенсивности внешнего поля.

В настоящей работе найдена тесная связь между рамановским лазером и наблюдаемой в работе [4] вибрационной неустойчивостью. Показано, что если частота внешнего поля превосходит частоту резонатора на собственную частоту вибрационных колебаний молекул, то при соответствующих накачках в системе должны возникать автоколебания поля в резонаторе и вибрационных колебаний молекул. При этом порог генерации вибрационных колебаний (вибрационная неустойчивость) совпадает с порогом генерации фотонов (рамановский лазер). Если скорость релаксации поля в резонаторе много меньше скорости релаксации вибрационных колебаний, то число генерируемых плазмонов много больше числа генерируемых квантов вибрационных колебаний. В обратном случае, когда скорость релаксации вибрационных колебаний много меньше скорости релаксации плазмонов, то число генерируемых квантов вибрационных колебаний много больше числа генерируемых плазмонов (рамановский спазер [3]). В промежуточном случае, когда скорости релаксации вибрационных колебаний и поля в резонаторе сравнимы, имеет место резкое уменьшение как числа вибрационных колебаний, так и числа плазмонов.

Литература

1. *Boyd, R.W., Nonlinear Optics. 2007: Academic Press.*
2. *Feng, Y., et al., Raman Fiber Lasers, ed. Y. Feng. 2017: Springer*
3. *Bergman, D.J., Stockman, M.I., Phys. Rev. Lett., 90, 027402 (2003)*
4. *Lombardi, A., et al, Phys. Rev X 8, 011016 (2018)*

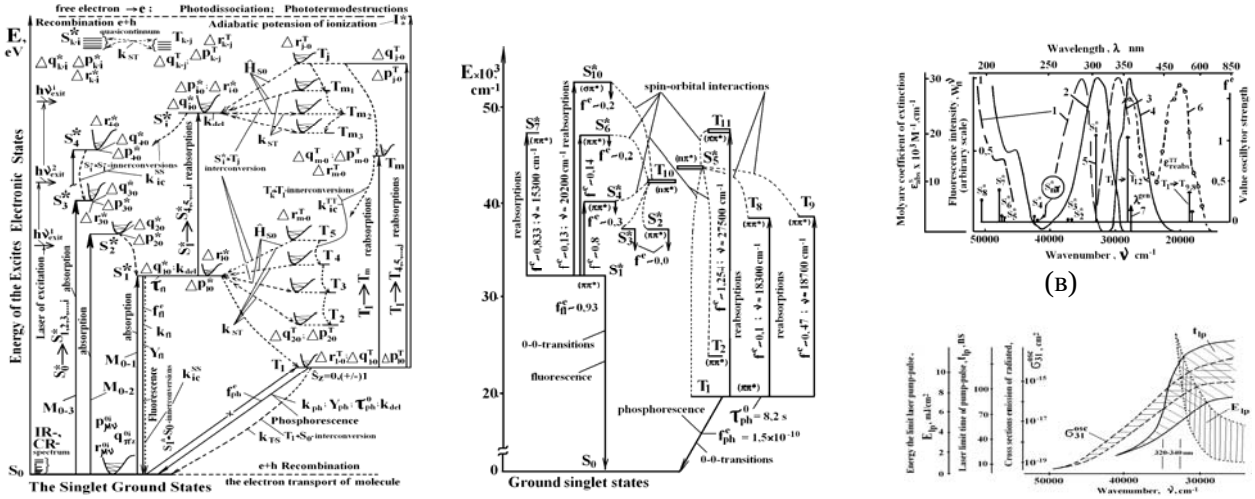
СПЕКТРОСКОПИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЗБУЖДЁННЫХ СОСТОЯНИЙ МНОГОАТОМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НАНОФОТОНИКИ 829.DOC

Обухов А.Е.*

ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны Российской Федерации, г. Москва»
** E-mail:* aobukhov@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16148

Широкое применение люминофоров в науке и технике, например, в качестве Дай-лазеров и усилителей в парах, растворах, кристаллах или полимерах, новых типов OLEDs-диодов, сенсоров, зондов и полупроводниковых транзисторов, жидко-кристаллических систем, солнечных батарей и источников электрического тока, а также медицинских и биологических препаратов и т.п. основано на использовании уникальных оптических и ядерно-магнитных свойств органических и неорганических многоатомных соединений в нанофотонике. Методами спектроскопии ЯМР ^{1}H и ^{13}C, ИК-, УФ-поглощения, РР- рамановского рассеяния, флюоресценции (ФЛ) и фосфоресценции (ФФ), электролюминесценции в растворах при 500-77 *K*, охлажденной сверхзвуковой струи при 2,6-4 *K* в парах, при накачки лазерами и лампами, электронами и ионами измерены и с применением квантово-химических методов ЛКАО-МО ССП расширенное-КВ ЧПДП/С интерпретированы фотофизические свойства соединений [1].



(а) (б) (в) (г)

Рис. 1 а и б. Предложенная новая физико-математическая модель расчета полного спектра синглетных и триплетных электронно-возбужденных состояний ($S^*_i T_j D_m Q_n$ЭВС) ("элементарный акт") и излучательных и безизлучательных многоступенчатых релаксационных электронно-колебательных и спин-орбитальных переходов при внутренней (ВК) и интеркомбинационной (ИКК) конверсий в многоатомных соединениях (в терминах дублет D^*_i и квартет Q^*_j для иона) вследствие возбуждения активных колебаний $\{r_n\}$ (где r_n координаты электронов для равновесной ядерной конфигурации) промежуточных термов T_m и T_n, $\{l\}$ квазиконтинуум неактивных колебательных уровней, V_n матричные элементы спин-орбитального взаимодействия умноженные на факторы Франка-Кондона; V_{nl} матричные элементы оператора ангармонизма, $\{\Gamma_n\}$ (Гц) ширины уровней активных колебаний за счет колебательной релаксации, M_{0i} матричные моменты электрических дипольных переходов

Вертикальными стрелками обозначены частоты и силы осцилляторов переходов $S_1^* \rightarrow S_0$, $S_1^* \rightarrow S^*_{2,\ldots,i}$, $T_1 \rightarrow S_0$ и $T_1 \rightarrow T_{2,\ldots,j}$, формируемых накачкой до акта испускания флюоресценции или фосфоресценции. На горизонтальных линиях отмечены потенциальные кривые для каждого типа ЭВС, а также $\Delta r_{\mu\nu}$, $\Delta p_{\mu\nu}$ и $\Delta q_{\mu\nu}$, $\Delta\rho_{\mu\nu}$ длины, порядки валентных связей и заряды и полные электронные плотности на атомах. Free electron это энергия работы выхода электрона для нового механизма многоступенчатой фотоионизации молекулы. (б) – полный спектр спин-орбитально и электронно-колебательно взаимодействующих S^*_i, T_j, D_m, Q_nЭВС и (в) – Спектры: УФ-поглощения, флюоресценции, наведённого триплет-триплетного поглощения 2,5-дифенил-1,3-оксазола и (г) – закономерности изменения сечений вынужденного испускания, пороговой плотности накачки и времени предельной длительности переднего фронта импульса накачки генерации day-лазеров при переходе из УФ в видимую область спектра. Предложены новые формулы для квантово-химического вычисления абсолютных квантовых выходов ФЛ (КВФЛ) и ФФ (КВФФ) с учетом электронной

природы каждого типа ЭВС, определяющих соотношением констант скоростей (КС) излучательных и безизлучательных переходов при ИКК и ВК между нижними, средними и высокими ЭВС [2]:

$$\gamma_{fl} = k_{S_1^* \to S_0} / \left(k_{S_1^* \to S_0} + k_{S_i^* \approx > S_0} + \sum_{i=1,\, j=1}^{n,m} k_{S_i^* < \approx > T_j} \right), \quad (1)$$

где $k_{S_1^* \to S_0}$ КСФЛ и $k_{T_1 \to S_0}$ КСФФ, $\sum_{i=1,\, j=1}^{n,m} k_{S_i^* < \approx > T_j}$ сумма КС ИКК и ВК между всеми типами СТЭВС, $k^*_{(T_1 \to T_j)}$ введенная новая эмпирическая константа, определяющая эффективность фотоионизации, $k_{S_1^* \approx > S_0}$ КС ВК и $k_{T_1 \approx > S_0}$ КС ИКК при переходе из самых низших СТЭВС.

Зависимость скорости нарастания (крутизны) переднего фронта импульса накачки, при котором возможно осуществить генерацию оптического излучения (ГОИ) в Дай-лазерах представлена с помощью новой формулы:

$$t_{lp} \le \left[\left(1 - \gamma_{fl}\right) / \tau_{fl} \right] \left\{ \frac{[\sigma_{31}^{osc}(\nu^{\max}) - \sigma_{S^*S^*}^{reabs}(\nu^{osc})]}{\sigma_{TT}^{reabs}(\nu^{osc})} - \frac{[\sigma_{13}^{abs}(\nu^{exit}) - \sigma_{S^*S^*}^{reabs}(\nu^{exit})]}{\sigma_{TT}^{reabs}(\nu^{exit})} \right\}, \quad (2)$$

где $2/k_{ST} = \left[\left(1 - \gamma_{fl}\right) / \tau_{fl} \right]$ КС ИКК, γ_{fl} КВФл и τ_{fl} ВЖФл, $\sigma_{31}^{osc}(\nu^{\max})$ [$\sigma_{31}^{gen}(\nu^{osc})$] и $\sigma_{13}^{abs}(\nu^{exit})$, $\sigma_{3SS}^{reabs}(\nu^{osc})$, $\sigma_{2TT}^{reabs}(\nu^{osc})$, $\sigma_{3SS}^{reabs}(\nu^{exit})$ и $\sigma_{2TT}^{reabs}(\nu^{exit})$ сечения поглощения и вынужденного испускания и перепоглощения на длинах волн накачки ν^{exit} и ГОИ ν^{gen} в экспериментальных и квантовохимически рассчитанных спектрах наведенного синглет-синглетного $S_1^* \to S_{1,\ldots,i}^*$ и триплет-триплетного $T_1 \to T_{1,\ldots,j}$ поглощения ион-катион-радикальных форм (Рис. 1).

В результате определены: 1) коэффициент преломления и дисперсия среды на требуемых частотах накачки; 2) абсолютный и относительный КВФЛ и КВФФ; 3) параметры ГОИ (модовый режим, диапазон перестройки и порог) и параметры накачки; 4) направленность химических и фотохимических реакций; 5) энергоэффективность и энерговклад; 6) фотоустойчивость и срок службы; 7) колебательная температура Day-лазера; 8) новый многоступенчатый механизм фотоионизации и термодеструкции; 9) частоты и интенсивности переходов в ФЛ- и ФФ-, поляризуемость в ИК- и КР-, химический сдвиг в ЯМР спектрах и другие параметры. Из результатов работ [1-4] следует, что за время нарастания переднего фронта наносекундной длительности УФ импульса накачки в полных спектрах S_i*T_jElExSt эффективно заселяется предионизационный квазиконтинуум ридберговских состояний.

При действии УФ кванта энергии накачки по механизму многоступенчатых переходов достигается потенциал ионизации и происходит фрагментация структуры происходит по качественной схеме: $(h\nu_i)S_0 \to S_i^* < \approx > T_1 \to T_j \to D^+ + e^-$, т.е. образуется дублетное состояние катиона D^+ и ион-радикальные формы и эксимплексы, а также дырки, поскольку в среду эмитируется целочисленный заряд e^-, участвующие в процессах рекомбинации [1].

Показано, что необходимо комплексно применять оптические, лазерные, ядерно-магнитные экспериментальные методы, а также квантово-химические расчеты полных спектров *S*Tj*ElExSt, для неразрушающего контроля образцов с помощью автоматизированных спектральных комплексов, в которых приборы связаны единой трансмиссией: фурье-ЭПР-ЯМР-ГХ-ХМС+лазерная нано- и фемтосекундная сверхчувствительная (ИК+КР)-фотометрия фурье-(КР+КР)-микроскоп (построение «энергетического образа“ атомно-молекулярной структуры поверхности деталей) +Искусственный интеллект управления интерпретацией.

Литература

1. *Обухов А.Е. Оптика и спектроскопия, 124, вып. 5, 662 - 668 (2018)*
2. *Obukhov A.E. Book of Abstracts Moscow International Symposium on Magnetism (MISM). 1-5 July 2017, Moscow. Faculity of Physics M.V. Lomonosov MSU. P. 590*
3. *Обухов А.Е. Спектроскопия основного и возбуждённых состояний в разных условиях, - М.: «Спутник+», 2012, 212 с.*
4. *Obukhov A.E., Laser Phys. 7. P. 110-1132 (1997)*

ОПТОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ВБЛИЗИ НАНОВОЛОКОННЫХ СТРУКТУР

Тофтул И.Д., Петров М.И.*

Университет ИТМО, центр нанофотоники и метаматериалов, Санкт-Петербург
* *E-mail: m.petrov@metalab.ifmo.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16149

Введение

Интерес к оптическим силам и оптомеханическому манипулированию физическими объектами непрерывно растет со времен первого экспериментального подтверждения оптического удержания микрочастиц [1]. Исследование оптических сил позволяет как получать ответы на важные фундаментальные вопросы, такие как непосредственное детектирование спинового момента света в эванесцентных волнах [2], так и предоставляет новые методики для практических применений в медицине и биологии [3, 4]. В последнее время оптические волокна диаметром в несколько сот нанометров (нановолокна) стали активно использоваться для исследования оптомеханического взаимодействия света и вещества. Кроме того, что оптические волокна обладают крайне низкими коэффициентом поглощения в области прозрачности, а также технологичны в оптических применениях, они позволяют легко создавать и контролировать световые пучки с заданными свойствами, а именно с определенным спиновым и орбитальным угловым моментом света. Наличие угловых моментов света сильно меняет характер оптомеханического взаимодействия и приводит к ряду новых эффектов.

Результаты

Достаточно тонкое оптоволокно, а именно с волновым числом $V = kR_f\sqrt{n_1 - n_2} < 2.4$, является одномодовым, где k - волновой вектор возбуждающего поля в вакууме, R_f -- радиус оптоволокна, n_1 и n_2 - показатель преломления оптоволокна и окружающей среды соответственно. Кроме того, при таком соотношении радиуса к длине волны часть моды начинает быть локализована вне волокна в виде эванесцентной волны [5], что позволяет добиться эффективного взаимодействия распространяющейся моды с объектами вне волновода. В данной работе рассматриваются две принципиально разные геометрии: (1) взаимодействие распространяющейся моды внутри волокна на частицу в непосредственной близости к поверхности к волокну, что приводит к эффективному тензору поляризуемости, и (2) взаимодействие частиц (одной или нескольких) с внешнем полем с учетом близости к оптоволокну, что приводит к дальнодействию при оптическом связывании.

Наведенная анизотропия вблизи нановолокна. Механический отклик частицы, размеры которой много меньше длины падающей волны, удобно описывать с помощью поляризуемости α, которая представляет собой функцию линейного отклика частицы на падающее поле E: $p = \alpha E$, где p - наведенный дипольный момент. Если частица находится рядом с некоторой структурой (поверхность, волновод и тд), то необходимо учесть ее самодействие на саму себя (многократное перерассеяние света частицей и волноводом). Для корректного учета этого эффекта был использован подход функций Грина:

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}}^{\text{ind.}} = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0 \frac{k_0^2}{\varepsilon_0}\hat{\mathbf{G}}_s(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_0)}$$

где $\hat{G}(r_0, r_0)$ – функция Грина системы посчитанная в координате центра наночастицы, а α_0 - поляризуемость частицы в вакууме. Это приводит к тому, что изотропная в вакууме наночастицы эффективно приобретает анизотропные свойства, что схематически показано на Рисунке 1.

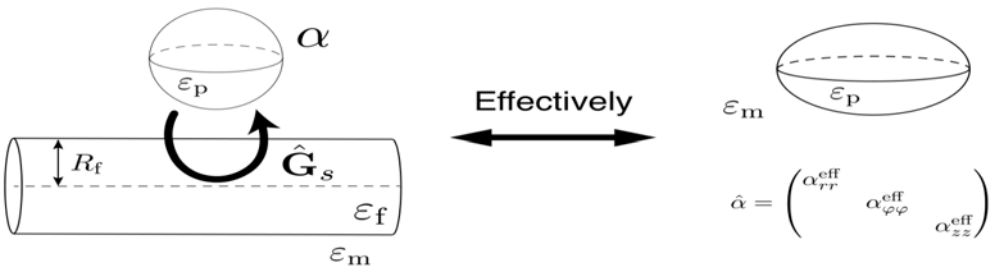


Рисунок 1. Появление эффективной анизотропии у дипольной частицы. Тензор поляризуемости не зависит от относительного угла скручивания между частицей и волокном

Наличие данной анизотропии потенциально возможно пронаблюдать следующим образом. Радиальную компоненту оптического момента, который стремится вращать частицу вокруг её собственного центра масс, со стороны фундаментальной моды нановолкна HE11, поле которой мы обозначили через ***E***, можно записать в следующем виде:

$$T_r^{\text{anis.}} = \frac{1}{2}\,\mathrm{Re}\,(\alpha_{\varphi\varphi} - \alpha_{zz})\,\mathrm{Re}\left(E_\varphi^* E_z\right) + \frac{1}{2}\,\mathrm{Im}\,(\alpha_{\varphi\varphi} + \alpha_{zz})\,\underbrace{\mathrm{Im}\left(E_\varphi^* E_z\right)}_{\sim S_r^{\text{el.}}=0},$$

где первое слагаемое напрямую зависит от степени анизотропии, а второе слагаемое пропорционально радиальной компоненте плотности спинового момента, которая равна нулю для фундаментальной моды HE11. Таким образом наличие эффективной анизотропии фактически приводит к дополнительному вращающему механическому моменты, которые может быть задетектирован в эксперименте.

Оптическое связывание около волокна. Оптические нановолокна эффективно используются для удержания одиночных наночастиц или их ансамблей. Однако при связывании большого ансамбля наночастиц можно добиться роста устойчивости цепочки с ростом количества удерживаемых наночастиц. Известно, что при оптическом связывании в свободном пространстве сила взаимодействия является осциллирующей, однако быстро затухает с расстоянием [7]. Наличие нановолокно позволяет добиться дальнодействия за счет наличия дополнительного канала связи между частицами, как показано на Рисунке 2.

Около положения равновесия потенциал является гармоническим и возвращающая сила подчиняется линейному закону $F = -\kappa\,\Delta z$, с эффективной жесткостью κ и отклонением от положения равновесия Δz. Наша теория показывает, что за счет использования нановолокна можно добиться линейного роста жесткость с ростом числа частиц N в цепи: $\kappa \sim N$.

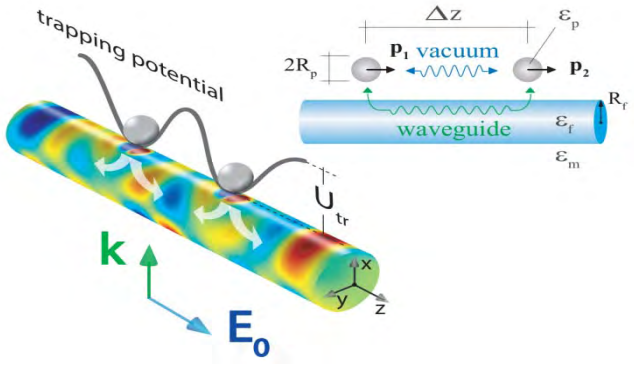


Рисунок 2. Конфигурация эффективного оптического связывания с использованием поперечной накачки

Заключение

В данной работе был рассмотрены новые оптомеханические эффекты, которые возникают вблизи за счет оптомеханического взаимодействия наночастицы и мод нановолокна. Был рассмотрен эффект возникновения эффективной анизотропии даже у оптических изотропных наночастиц, что приводит к появлению дополнительного вращающего момента. Также было показано, что оптическое связывание наночастиц вблизи нановолокна приводит к растущей устойчивости цепочки при увеличении ее длины.

Литература

1. *Ashkin, Arthur, et al. "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles." Optics letters 11.5 (1986): 288-290*
2. *Bliokh, Konstantin Y., Aleksandr Y. Bekshaev, and Franco Nori. "Extraordinary momentum and spin in evanescent waves." Nature communications 5 (2014): 3300*
3. *Neuman, Keir C., and Attila Nagy. "Single-molecule force spectroscopy: optical tweezers, magnetic tweezers and atomic force microscopy." Nature methods 5.6 (2008): 491*
4. *Shields IV, C. Wyatt, Catherine D. Reyes, and Gabriel P. López. "Microfluidic cell sorting: a review of the advances in the separation of cells from debulking to rare cell isolation." Lab on a Chip 15.5 (2015): 1230-1249*
5. *Le Kien, Fam, et al. "Higher-order modes of vacuum-clad ultrathin optical fibers." Physical Review A 96.2 (2017): 023835*
6. *Petrov, Mihail I., et al. "Surface plasmon polariton assisted optical pulling force." Laser & Photonics Reviews 10.1 (2016): 116-122*
7. *Burns, Michael M., Jean-Marc Fournier, and Jene A. Golovchenko. "Optical binding." Physical Review Letters 63.12 (1989): 1233*

СТИМУЛИРОВАННАЯ КОНДЕНСАЦИЯ ФРЕНКЕЛЕВСКИХ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОНОВ

Заседателев А. В.

Сколковский институт науки и технологий (Сколтех), Москва,
Университет Саутгемптона, Великобритания
Email: a.zasedatelev@skoltech.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16150

В работе исследуется динамика процесса конденсации френкелевских экситон-поляритонов в органических микрорезонаторах на основе сопряженного полимера. Впервые была осуществлена стимуляция поляритонной конденсации внешним слабым оптическим импульсом при комнатной температуре. В сочетании с вибронным механизмом релаксации внешняя стимуляция является эффективным механизмом для управляния населенностью поляритоных состояний. Процесс стимулированной конденсации экситон-поляритонов является ключевым при построении активных устройств на принципах сильной связи света с веществом.

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ПО ТЕХНОЛОГИИ RADIO-OVER-FIBER С УПЛОТНЕНИЕМ ПО ОРБИТАЛЬНОМУ УГЛОВОМУ МОМЕНТУ В W-ДИАПАЗОНЕ

Виноградова И.Л., Абдрахманова Г.И.*, Гизатулин А.Р., Грахова Е.П., Мешков И.К., Багманов В.Х., Султанов А.Х.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа
* *E-mail:* guzel.idrisovna@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16151

Технология Радио-по-волокну (Radio-over-Fiber, RoF) является эффективным способом передачи информации, который совмещает достоинства волоконно-оптических систем с гибкостью и мобильностью, присущими радиосвязи. Поскольку диапазон частот, занимаемый современными радиослужбами (до 10 ГГц), характеризуется высокой загруженностью, то одновременно с разработкой новых способов уплотнения, модуляции и кодирования происходит переход в более высокочастотные диапазоны, в частности, рассматривается диапазон 75-110 ГГц (W-диапазон), где возможна безлицензионная работа в широкой полосе частот. Достоинством RoF технологии является простая и эффективная генерация радиосигналов указанного диапазона с использованием оптических методов и средств [1-4].

С целью повышения эффективности использования полосы пропускания каналов связи в данной работе предлагается рассмотреть уплотнение сигналов по орбитальному угловому моменту (ОУМ), поскольку волны с ненулевым порядком ОУМ формируют ортогональный базис сигналов. Помимо этого использование уплотнения по ОУМ в RoF системах дает дополнительные преимущества в виде возможности организации скрытых каналов связи и повторного использования каналов для передачи сигналов управления.

Предлагаемая в данной работе схема построения сегмента RoF W-диапазона включает в себя оптическую часть с генерацией сигнала с заданным порядком ОУМ на длине волны 1310 нм и радиочасть на базе остронаправленной управляемой фазированной антенной решетки (ФАР). При этом предполагается двухмодовая передача, при которой одна оптическая вихревая мода используется для переноса информационного абонентского сигнала и его последующей трансляции в радиопередающую часть RoF, а другая предназначена для переноса служебного сигнала управления диаграммой направленности (ДН) ФАР.

Генерация оптического сигнала с заданным порядком ОУМ основана на использовании лазера и амплитудно-фазового фильтра, рассчитанного на основе Гамильтонова подхода и реализованного на встроенном в световодную линию корпусированном дифракционном оптическом элементе. Фильтр разработан на основе спинорного представления уравнений Максвелла, и его применение позволяет формировать вихревые моды, сохраняющие поляризацию в процессе распространения в оптическом волокне. Аналогичный фильтр должен быть использован на приемной стороне для разделения принятых вихревых мод.

Стоит отметить, что распространение вихревых волн в оптическом волокне неизбежно ведет к разрушению структуры поля из-за различных искажений, поэтому возможным решением указанной проблемы может стать применение солитоноподобных вихревых волн, которые не подвержены влиянию дисперсии и сохраняют свою пространственную структуру.

Касательно построения радиочасти стоит отметить, что здесь имеются определенные трудности, связанные с существенным затуханием радиосигналов в W-диапазоне при распространении как внутри, так и вне помещений ввиду значительного поглощения радиоволн по сравнению с традиционными радиодиапазонами. Это является одной из причин применения остронаправленных ФАР с большим коэффициентом усиления. Другая причина состоит в возможности формирования радиосигналов с заданным порядком ОУМ в случае, если подобный сигнал не был сформирован оптическими средствами.

В связи с этим предлагаемая схема RoF обеспечивает преобразование оптического солитоноподобного сигнала с ОУМ в радиосигнал при помощи радио-оптического конвертора либо же формирование радиосигнала с заданным порядком ОУМ непосредственно самой ФАР. Очевидно, что для детектирования подобного сигнала на приемной стороне должна быть использована аналогичная ФАР, настроенная на соответствующий порядок ОУМ.

Предлагаемая конструкция ФАР выполнена по технологии изготовления печатных плат и включает в себя диаграммообразующую схему в виде линзы Ротмана и круговые излучатели, расположенные по окружности радиуса 2λ на расстоянии λ между центрами соседних излучателей. Вся конструкция представляет собой структуру «сэндвич», с лицевой стороны которой расположены излучатели, с оборотной – линза Ротмана, а в центре между ними, отделенная от них слоями диэлектриков, – плоскость земли.

Таким образом, решения, представленные в данной работе по организации системы связи на основе технологии RoF в W-диапазоне с уплотнением по ОУМ, охватывают разработки как в области оптической генерации солитоноподобных вихревых волн и их преобразования в радиосигнал, так и вопросы реализации радиочасти. Предлагаемая схема обладает существенно меньшим фактором фазовых шумов в сравнении с аналогами за счет использования единственного лазера, а также характеризуется невысокой стоимостью используемого оборудования. Указанные системы могут найти применение в реализации таких технологий, как 5G, Wi-Fi, Интернет вещей, M2M, радиофотоника, 8K UHDTV, облачные вычисления и т.д.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00123.

Литература

1. *Ł. Chorchos et al., IEEE Photonics technology letters, 29(6),* 489-492 (2017)
2. *S. Rommel et al., IEEE Photonics technology letters, 28(21), 2303-2306 (2016)*
3. *Ł. Chorchos et al., Proc. of Conf. Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), 66-69 (2016)*
4. *S. Rommel, J. J. V. Olmos, I. T. Monroy, Proc. of Conf. Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), 197-200 (2016)*

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ НА СТОЙКОСТЬ К СЕЙСМИЧЕСКИМ И ВИБРАЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Корякин А.Г.*, Ларин Ю.Т.

ОАО Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности (ОАО ВНИИКП), г. Москва
E-mail: koryakin-ag@vniikp.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16152

В настоящее время оптические кабели связи и электрооптические кабели начинают полностью вытеснять кабели с медными проводниками, ввиду уменьшения стоимости производства, а так же необходимости модернизации оборудования, позволяющего передавать заметно большее количество информации.

Сложность в эксплуатации оптических и электрооптических кабелей заключается в меньшей стойкости к внешним воздействующим факторам по сравнению с медными аналогами, а так же более сложный монтаж указанных кабельных изделий.

Проанализирована нормативно-техническая документация, указывающая основные требования, предъявляемые к испытаниям кабелей.

В работе приводятся методы и методики испытаний кабелей к сейсмическим и вибрационным воздействиям, с учётом различных типов прокладки кабельных изделий. Рассмотрены три основных типа прокладки: подземная, воздушная и внутриобъектовая [1,2].

Проведена оценка воздействия циклических механических нагрузок на основные конструкции кабелей. Проведены испытания более 40 оптических кабелей и электрооптических кабелей на сейсмические и вибрационные воздействия в соответствии с МИ 16.00-186-2012, ГОСТ 30546.2-98 и ГОСТ РВ 20.57.416-98. Конструкции кабелей выбирались новые, после длительного хранения и бывшие в долгой эксплуатации. Оригинальностью работы являются установленные результаты по наихудшим показателям при испытаниях по типам кабелей. В качестве параметров критериев годности при испытаниях принимался прирост оптического затухания и коэффициент затухания [3].

Полученные результаты, могут использоваться для проведения исследований и испытаний оптических и электрооптических кабелей на сейсмические и вибрационные воздействия. Получаемые данные следует применять при конструировании кабелей, эксплуатирующихся при повышенных вибрационных нагрузках.

Литература

1. *Корякин А.Г., Ларин Ю.Т., Месенжник Я.З., Русаков А.А. Расчет прочности силовых электрооптических погружных кабелей. Главный энергетик, N 9, 2015,с. 24-30*
2. *Корякин А.Г., Ларин Ю.Т., Портнов Э.Л. Расчёт сейсмостойкого оптического кабеля на прочность при воздушной прокладке в условиях воздействия сейсмических волн. Журнал «Фотон-Экспресс» №3,2012 г.*
3. *Корякин А.Г.. Разработка методики оценки устойчивости оптических кабелей к сейсмическим воздействиям: диссертация ... кандидата технических наук: 05.09.02. - Москва, 2018. - 134 с.*

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ

Чаймарданов П.А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М. А. Бонч-Бруевича (СПБГУТ)
[*] *E-mail:* pchai@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16153

В настоящее время на сетях связи широко используются волоконно-оптические системы передачи (ВОСП). По сравнению с другими системами передачи ВОСП обладают самой широкой полосой пропускания, высокой надежностью и защищенностью, низкими потерями и длительным сроком эксплуатации. Данные преимущества определили широкое использование ВОСП как на транспортных сетях, так и на сетях доступа.

Проектирование современных высокоскоростных ВОСП подразумевает обязательное проведение предварительного имитационного моделирования с целью оптимизации ее технико-экономических характеристик. Неправильный выбор компонентной базы может привести к выбору неоптимальной, а иногда и неработоспособной схемы ВОСП.

Для проведения имитационного моделирования ВОСП могут быть использованы известные специализированные программные продукты, такие как Optiwave OptiSystem, RSoft OptSim, VPIPhotonics VPItransmissionMaker и другие. При анализе возможностей и особенностей данных продуктов, а также опыта их использования в отечественных компаниях телекоммуникационной отрасли (ООО Т8, АО НТЦ ВСП «Супертел ДАЛС»), были выявлены основные недостатки данных продуктов: высокая цена, сложность освоения, большое время расчета, отсутствие кроссплатформенности. Кроме того, будучи продуктами иностранного происхождения, они не учитывают используемую компонентную базу и специфику рынка в России.

На базе вышесказанного было принято решение о разработке нового программного продукта, позволяющего производить имитационное моделирование ВОСП, в котором отсутствуют данные недостатки.

На основании предложенных в литературе моделей оптических и оптоэлектронных компонентов [1-4], а также собственных исследований [5], был разработан прототип программного обеспечения (ПО), интерфейс которого представлен на рис. 1.

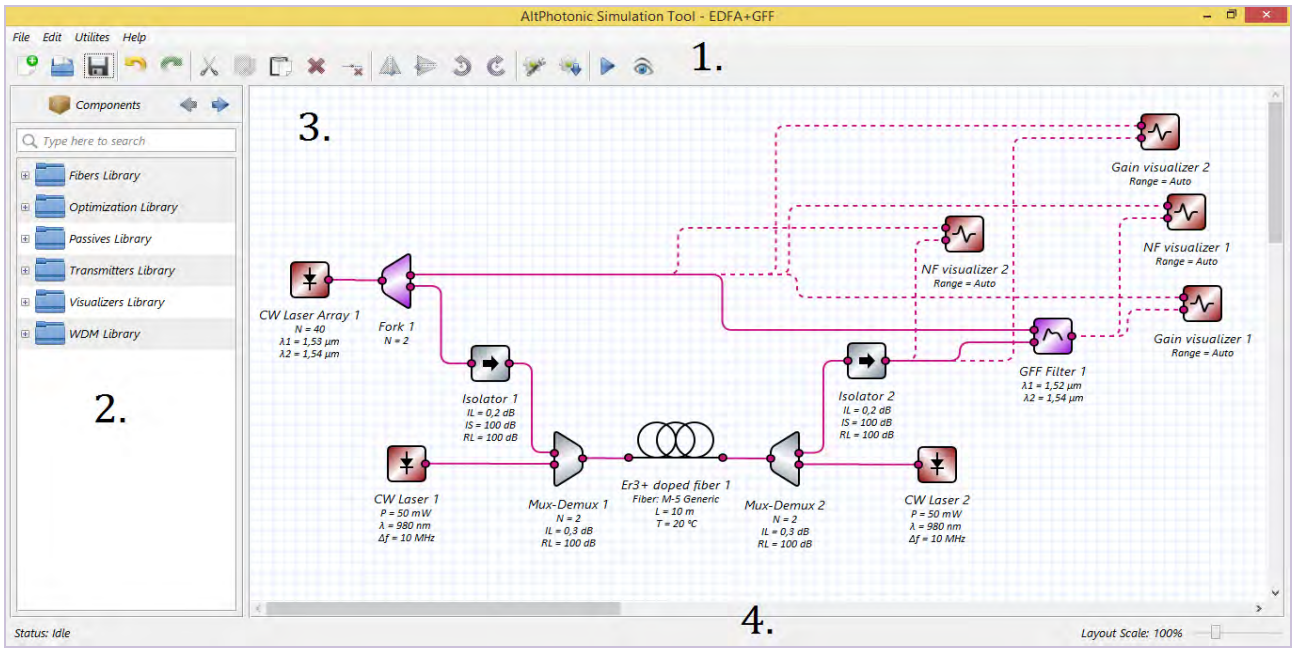


Рис.1. Основное окно прототипа ПО под управлением ОС Windows 8.1 с указанием основных областей (1-4). Представлена схема ОУ EDFA с двунаправленной накачкой для усиления 40-канального сигнала в полосе 1530-1640 нм с мощностью 1 мкВт/канал

Прототип выполнен в виде однооконного приложения, содержащего панель инструментов для управления проектом и проведения имитационного моделирования (1), панель загруженных компонентов (2), область схемы (3), строки статуса и масштаба (4), а также дополнительных диалоговых окон:

– окон загрузки, сохранения и экспорта результатов моделирования для каждого компонента в частности и проекта в целом.

– окон лога сообщений, содержащего в себе все возникшие информационные сообщения, а также предупреждения и информацию об ошибках с указанием времени и причин возникновения.

– окон свойств, кода, результатов для отдельных компонентов и проекта в целом.

– окон справочной информации, содержащих в себе краткие методические указания по использованию разработанного ПО.

Каждый компонент, включенный в состав прототипа ПО, реализует определенную математическую модель, качественно описывающую процессы, происходящие в реальном компоненте.

При помощи графического интерфейса пользователь производит сборку схемы проектируемой ВОСП из предлагаемых компонентов, задает параметры каждого компонента и производит имитационное моделирование. Анализ результатов моделирования, необходимый для принятия проектных решений, может производиться после окончания расчета при помощи специальных компонентов (визуализаторов), которые подключаются к определенным точкам схемы. Все результаты моделирования пользователь может экспортировать во внешние файлы для дальнейшей обработки.

Прототип позволяет:

– моделировать передающие оптические модули, формирующие сигналы с различными форматами модуляции, используемыми в современных ВОСП, включая амплитудные, фазовые и комбинированные форматы, а также форматы с использованием двух поляризаций.

– моделировать процессы распространения оптических сигналов в пассивных компонентах, усилителях EDFA и ВКР-усилителях.

– моделировать процессы распространения оптических сигналов в телекоммуникационных волокнах с учетом затухания, дисперсионных искажений, фазовой самомодуляции, фазовой кроссмодуляции и четырехволнового смешения.

– импортировать исходные данные и экспортировать результаты моделирования, как в виде отдельных файлов, так и в виде отчета.

– работать с компонентной базой, используемой на конкретном предприятии (при подключении к базе данных предприятия).

– производить работу под ОС семейства Windows, Linux, OS X.

По мнению автора, разрабатываемое ПО представляет интерес для компаний, занимающихся проектированием и разработкой новых ВОСП, отдельных компонентов ВОСП, а также для научно-исследовательских и образовательных организаций.

Литература

1. *Erbium-Doped fiber amplifiers. Fundamentals and Technology / Becker P.C., Olsson N.A., Simpson J.R. – Academic Press, 1997*
2. *Erbium-Doped fiber amplifiers. Principles and applications / Desurvire E. – John Wiley & Sons, New York, 1994*
3. *Nonlinear Fiber Optics / Agrawal G.P – Academic Press, 2012*
4. *High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission / Matthias Seimetz. – Springer, 2009*
5. *Чаймарданов П.А., Былина М.С. Новая методика расчета оптического усилителя EDFA с многоканальными источниками сигналов и накачек // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 3. С. 92–102. DOI: 10.18721/JCSTCS.10308*

СПОСОБ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО АКУСТО-ОПТОВОЛОКОННОМУ КАНАЛУ СВЯЗИ МАЛОМОДОВОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ

Бурдин В.А.*, Губарева О.Ю., Гуреев В.О., Масюк С.С.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара
** E-mail:* burdin@psati.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16154

На сегодняшний день термин «акусто-оптоволоконный канал» чаще всего упоминается как средство несанкционированного съёма речевой информации (подслушивание) через штатные волоконно-оптические коммуникации различного назначения [1]. Но, вместе с тем известно о разработках акусто-оптических линий связи. Акусто-оптический канал связи может быть реализован при воздействии акустического поля или сигнала вибро-акустического излучателя на оптическое волокно, что вызовет модуляцию распространяющегося в оптическом волокне оптического сигнала по фазе на акустических частотах. Модулированное акустическим сигналом оптическое излучение распространяется по волоконно-оптическим линиям передачи на достаточно протяженные расстояния. На приеме в результате демодуляции оптического сигнала можно восстановить воздействующий на оптоволокно акустический сигнал.

Подавляющее большинство средств приема акустических сигналов по акусто-оптоволоконным каналам базируется на приеме оптического излучения, распространяющегося в обратном направлении [2]. В данной работе представлен способ передачи данных по акусто-оптоволоконному каналу связи волоконно-оптической линии основанный на приеме оптического излучения, распространяющегося в прямом направлении. Данный способ использует особенности распространения оптического излучения в маломодовых оптических волокнах. В частности, то, что моды распространяются в оптическом волокне с разной скоростью и восприимчивость параметров мод к внешнему акустическому воздействию на оптическое волокно (ОВ) не одинакова. В результате при равномерном возбуждении мод на входе двумодовое ОВ фактически представляет собой интерферометр Маха-Цендера, а при акустичеком воздействии на волокно – акусто-оптический модулятор фазы. Это позволяет сформировать симплексный акусто-оптоволоконный канал связи по двумодовому ОВ маломодовой волоконно-оптической линии передачи. Рассматриваемый в данной работе способ симплексной низкоскоростной передачи данных по ОВ кабельной линии состоит в том, что оптическое излучение лазера возбуждает в ОВ две линейно-поляризованные моды LP_{01} и LP_{11}. При этом, на входе обеспечиваются условия равномерного возбуждения мод в ОВ кабеля. Это моды распространяются по ОВ и поступают на квадратичный детектор фотоприемника. на локальном участке кабельной линии воздействуют через волоконно-оптический кабель на ОВ кабельной линии вибро-акустическим сигналом от передатчика, расположенного на некотором расстоянии от кабеля. В результате чего, распространяющееся в ОВ оптическое излучение модулируется по фазе. Поскольку параметры мод неодинаковы и восприимчивость параметров мод к внешнему акустическому воздействию на ОВ не одинакова эти моды поступят на дальний конец волоконно-оптической линии передачи с разной степенью модуляции по фазе вибро-акустическим сигналом и с фазовой задержкой между модами. Эти моды подают на вход квадратичного детектора, на выходе которого с помощью фильтров выделяют полезный сигнал, Регулируя фазовую задержку за счет изменения длины ОВ, например, растягивая или нагревая его, можно регулировать отношение сигнал/помеха на приеме.

Предложена модель рассматриваемого симплексного акусто-оптоволоконного канала связи по двумодовому ОВ, которая учитывает распределенную связь мод, обусловленную нерегулярностями оптического волокна в кабеле, и зависимость межмодовых связей от вибро-акустического воздействия. При построении модели ограничились анализом для одной строительной длины оптического кабеля, что позволило пренебречь стыковыми связями мод и потерями в оптическом волокне. В работе представлены полученные в результате моделирования передачи данных по рассматриваемому каналу и зависимости вероятности ошибок на приеме от фазовой задержки между модами на приеме и интенсивности локального вибро-акустического воздействия.

Литература

1. *Гришачев В.В., и др., Специальная техника, 2, 2-9(2009)*
2. *Teixeira J.G.V., et al, Photonic Sensors,4(3), 198–208 (2014)*

ПОЛЯРИЗАЦИОННО-СЕЛЕКТИВНОЕ УСИЛЕНИЕ ДЕФЕКТНОЙ МОДЫ В ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ С ПЛАЗМОННЫМ МЕТАСЛОЕМ

Моисеев С. Г.[1,2,3*], Глухов И. А.[1,4], Дадоенкова Ю. С.[1,4], Бентивенья Ф.[4], Иванов О. В.[2]

[1] Ульяновский государственный университет, г.Ульяновск, Россия
[2] УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г.Ульяновск, Россия
[3] Ульяновский государственный технический университет, г.Ульяновск, Россия
[4] Высшая школа инженеров г. Бреста, г.Брест, Франция
[*] E-mail: serg-moiseev@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16155

Продемонстрирована возможность управления состоянием поляризации световой волны, генерируемой полупроводниковой слоисто-периодической структурой, за счет применения в ее составе плазмонного метаслоя. Плазмонный метаслой, образованный двумерным массивом металлических наночастиц несферической формы, размещен в резонаторной области фотонной структуры. Показана возможность управления параметрами генерируемого излучения за счет варьирования положения и структурных параметров метаслоя.

Рассмотрена полупроводниковая структура, состоящая из двух брэгговских зеркал $(AB)^N$ и $(BA)^N$, разделенных композитным слоем (рис. 1(a)). Композитная структура образована усиливающим слоем D, резонаторными слоями C и двумерным массивом наночастиц. Характеристики слоев структуры подобраны таким образом, чтобы в спектре пропускания формировалась фотонная запрещенная зона с дефектной модой, приходящейся на длину волны 1.55 мкм. Метаслой представляет собой двумерную квадратную решетку идентичных наночастиц серебра (рис. 1(b)). Плоскость метаслоя перпендикулярна оси *z* декартовой системы координат. Наночастицы имеют форму эллипсоидов вращения с осью симметрии, ориентированной вдоль оси *x*. Аспектное отношение формы наночастиц обеспечивает совмещение его резонансной частоты, связанной с поверхностным плазмонным резонансом наночастиц, с частотой дефектной моды фотонной структуры.

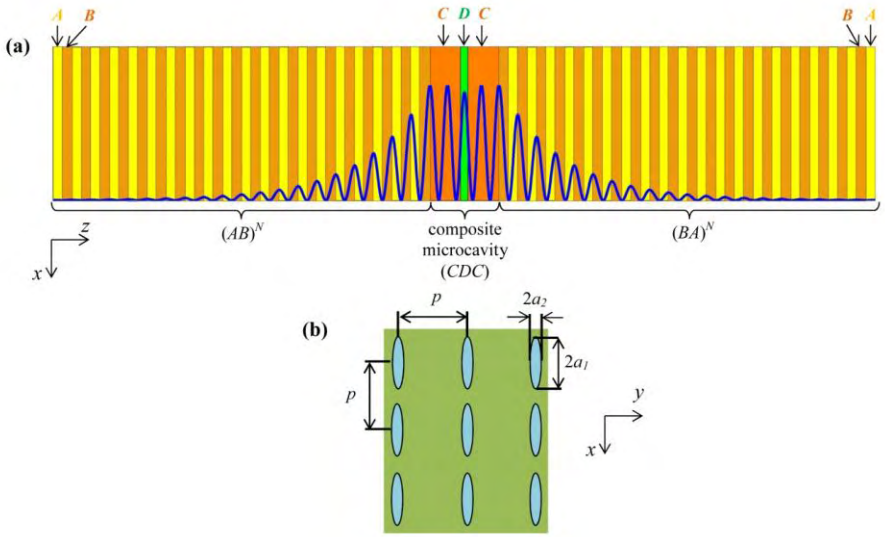


Рис. 1. Фотонно-кристаллическая структура (a) и двумерный массив металлических наночастиц (b), размещенный в резонаторной области CDC

Для анализа спектральных характеристик фотонной структуры применен метод матриц переноса [1]. Каждому слою сопоставлена матрица переноса, характеризующая взаимосвязь полей на его интерфейсах. Так как массив наночастиц взаимодействует с электромагнитной волной аналогично плоской границе раздела двух сред, он рассматривается как интерфейс с собственными коэффициентами пропускания и отражения [2], которые формируют собственную (нефренелевскую) матрицу переноса [3]. Результирующая матрица всей структуры получена путем последовательного

произведения матриц переноса полупроводниковых слоев и плазмонных метаслоев в соответствии с порядком их следования в фотонной структуре.

Проведены расчеты спектра фотонного кристалла для двух ортогональных случаев поляризации электромагнитной волны - «продольной» и «поперечной» поляризаций, отвечающих соответственно параллельной и перпендикулярной ориентации оси симметрии наночастиц по отношению к световому вектору электромагнитной волны. Материалы полупроводниковых слоев структуры выбраны идентичными материалам в составе вертикально излучающих полупроводниковых лазеров (VCSEL) [4]. Определены параметры анизотропного метаслоя и фотонной структуры, обеспечивающих поляризационно-избирательное усиление дефектной моды фотонной структуры: практически полное подавление дефектной моды для продольной поляризации и усиление дефектной моды для поперечной поляризации плоскополяризованной световой волны [5].

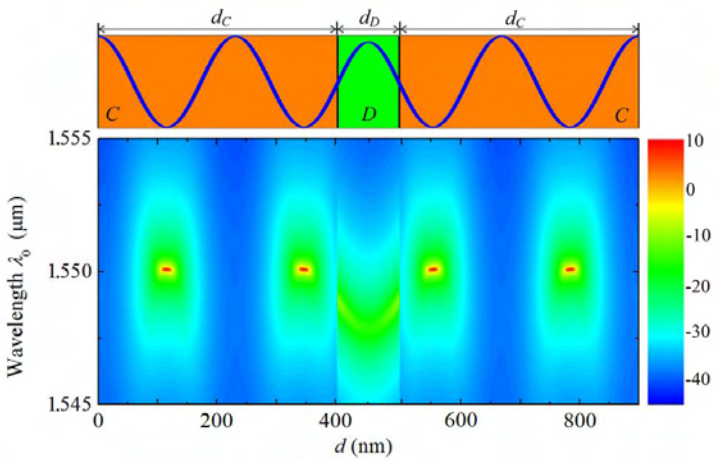


Рис. 2. Спектр пропускания композитной фотонно-кристаллической структуры в области дефектной моды для продольной поляризации световой волны: зависимость амплитуды дефектной моды от положения метаслоя. На верхнем рисунке схематично показано строение резонаторной области и распределение интенсивности световой волны вдоль ее оси

Исследована зависимость амплитуды дефектной моды от местоположения массива наночастиц внутри резонаторной области. Установлено, что расположение двумерного массива наночастиц в точках максимума интенсивности поля приводит к полному подавлению дефектной моды, в то время как расположение монослоя в областях минимума интенсивности локального поля практически не влияет на спектр фотонного кристалла (рис. 2).

Полученные результаты могут быть полезны при разработке квантовых и оптоэлектронных приборов и устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проекты №№ 075-00629-19-00, 3.5698.2017/9.10, 3.7614.2017/9.10), Российского Фонда Фундаментальных Исследований (18-42-730007, 17-02-01382), Conseil Régional de Bretagne, France (PhotoMag, SPEACS); École Nationale d'Ingénieurs de Brest, France (HF-CCCP).

Литература

1. *Born M., Wolf E., Principles of Optics. Cambridge University Press, 1999*
2. *Holloway C. L., et al, IEEE Trans. Electromagn. Compat. 47, 853–865 (2005)*
3. *Katsidis C. C. and Siapkas D. I., Appl. Opt. 41, 3978–3987 (2002)*
4. *Rahman M. A., et al, Int. J. Photon. Opt. Technol. 4, 14-18 (2018)*
5. *Moiseev S. G., Glukhov I. A., Dadoenkova Y. S., Bentivegna F. F. L., JOSA B, 36, 1645-1652 (2019)*

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АНАЛИЗА КОНЦЕНТРАЦИИ ОН-ГРУПП В КРУПКЕ ЧИСТОГО КВАРЦА НА ОСНОВЕ ПОГЛОЩЕНИЯ НА 1,4 МКМ

Бурдин В.В.[1,2], Константинов Ю.А.[1], Смирнов А.С.[1,2*], Первадчук В.П.[2]

[1] *Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Пермь*
[2] *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь*
[*]*E-mail:* a.s.smrnv@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16156

Важным параметром для применения в волоконной оптике особо чистого кварца является концентрация ОН-групп. В данной работе рассматривается разработка метода анализа концентрации в крупке чистого кварца на основе измерения поглощения в области длины волны 1,4 мкм.

ОН-группы, химически связанные с решеткой кварца имеют основной тон оптического поглощения на длине волны 2730 нм (3660 см-1) и, традиционно, измерение поглощения ОН-групп и расчет концентрации производится в этой спектральной области [1-2]. Первый обертон основной полосы поглощения ОН-групп соответствует длине волны 1,4 мкм (~7140 $см^{-1}$), которая является весьма привлекательной, так как близка к окнам прозрачности волоконных кварцевых световодов 1310 нм 1550 нм, однако, интенсивность обертонов примерно на один-два порядка меньше интенсивности основных полос.

Для коэффициента поглощения на длины волны 1383 нм в работе [3] приводится значение 62.7 дБ/км/ppm. Рассмотрим случай наличия в кварце ОН-групп 100 ppm, тогда для слоя кварца толщиной 1 см должно быть падение интенсивности на 0,06 дБ. Изменение интенсивности мало, хотя, принципиально измеримо. Расчет произведен для относительно большой концентрации ОН-групп в крупке. При меньших значениях (1-10 ppm) определить концентрацию на обертоне с хорошей точностью было весьма затруднительно.

Экспериментальная установка использовались: источник излучения - галогенная лампа накаливания 50 Вт (35 мм от образца), образец - помещен в кварцевую кювету с длиной оптического пути 3 мм. Оптическое излучение, пройдя через кювету с образцом, фокусировалось при помощи сферической линзы в волоконный световод, подсоединенный к спектрометру OceanOptics NirQuest 512.

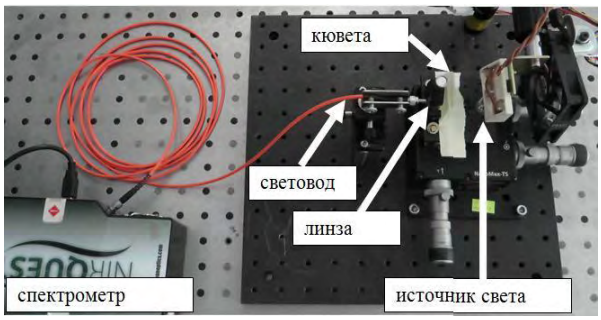


Рис. 1 – Фото экспериментального стенда

Для формирования контрольных спектральных графиков использовались измерения прямого прохождения излучения лампы (без кюветы), с пустой кюветой, кюветы с иммерсионной жидкостью. В ходе данных измерений сколько-либо значимого поглощения излучения в области 1,4 мкм зарегистрировано не было, наблюдалось равномерное снижение мощности по всей ширине спектра.

В качестве образцов для пробных измерений (рис.2) использовались:

1. Образец 1 - содержание ОН-групп по паспорту ~30000 ppm.
2. Образец 2 - содержание ОН-групп предположительно 40-200 ppm.
3. Образец 3 - содержание ОН-групп по паспорту 38±5 ppm.

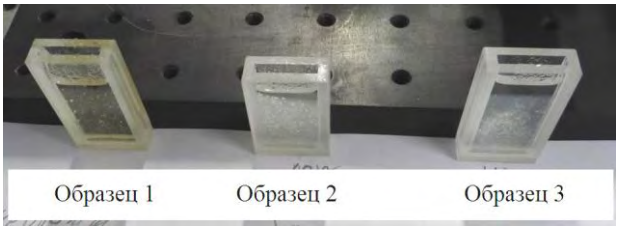


Рис. 2 – Подготовленные образцы в кюветах

Слой кварцевой крупки в несколько миллиметров дает затухание порядка 10 дБ из-за френелевского отражения и последующего рассеяния. Для обеспечения оптической однородности использовался метод погружения в иммерсионную жидкость, имеющую близкий к образцу показатель преломления. В эксперименте в кварцевую кювету помещалась крупка в сухом виде, затем заливалась иммерсионной жидкостью и перемешивалась. Общее падение оптической мощности на свежеподготовленных образцах составляло более 50% от контрольного уровня мощности лампы. После отстаивания в течении 2-х недель, общей просадки мощности на практически не наблюдались.

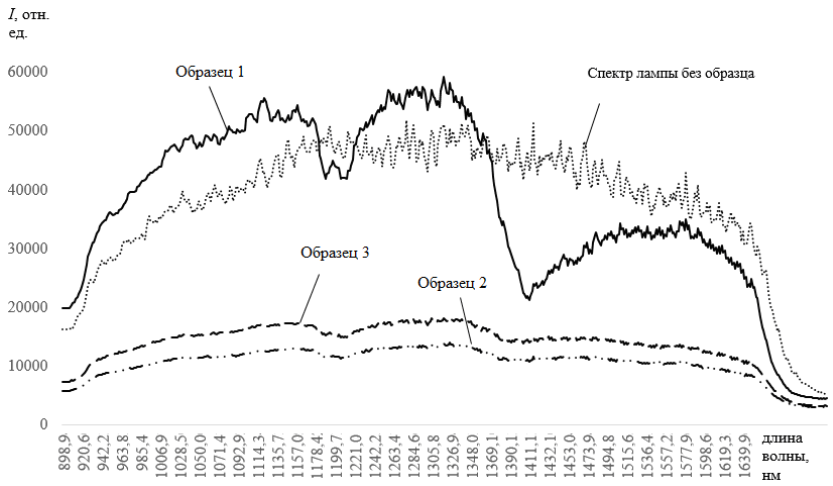


Рис. 3 – Спектры различных образцов в сравнении со спектром лампы. Длина образца 3 мм

Проведение измерений вышеуказанных образцов выявило следующие результаты:

Падение интенсивности на рис.3 в области 1400 нм связано с поглощением ОН - групп. При концентрации ОН - групп 30000 ppm обертон воды для Образца 1 проявляется на спектре очень отчетливо. При концентрациях порядка 40 ppm (Образец 2 на рис.3) обертон различим, однако, количественные измерения при таких концентрациях можно сделать только с ограниченной точностью. Отметим, что полоса поглощения 1400 нм становится не видимой в спектрах пустой кюветы, т.е. установка не регистрирует пары воды, концентрация которых соответствует диапазону 1-10 ppm концентрации ОН - групп в кварце.

Для Образцов 2 и 3 степень поглощения участка в районе 1390 нм остается приблизительно одинаковой, хотя значения концентрации предположительно различаются. Это может быть объяснено разным гранулометрическим составом крупки – гранулы Образца 2 преимущественно крупнее гранул Образца 3. Отсюда следует, что при одинаковом диаметре регистрируемого оптического пучка и длине оптического пути в образце размер гранул крупки будет обратно пропорционален измеряемому поглощению ввиду разного соотношения иммерсионной жидкости и гранул в наблюдаемом участке образца.

Выявлена принципиальная возможность измерять концентрацию ОН-групп по обертону 1400 нм при концентрациях выше 100 ppm. В области концентраций 1-10 ppm необходимо работать с основной полосой поглощения ОН–групп, т.е. нужен источник с длиной волны 2730 нм. Подготовка образцов является важнейшим фактором, который необходимо учитывать при использовании данного метода измерений.

Авторы выражают благодарность инженеру лаборатории фотоники ПФИЦ УрО РАН Клоду Д. за неоценимую помощь в проведении экспериментов и плодотворные дискуссии.

Литература

1. *Plotnichenko V.G., et. al. Journal of Non-Crystalline Solids 261 (2000), P. 186-194*
2. *Sloots B.,Vibrational Spectroscopy, Volume 48, Issue 1, 18 September 2008, Pages 158-161*
3. *Humbach, O. et al, Journal of Non-Crystalline Solids, Volume 203, p. 19-26, 1996*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЛИБРОВОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Первадчук В.П., Давыдов А.Р.*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь
** E-mail:* ardavydov@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16157

Датчики на основе волоконных брэгговских решеток считаются наиболее перспективными из множества использующихся на практике технологий контроля и измерений физических характеристик. Вместе с тем, для волоконно- оптических датчиков актуальна проблема повышения точности измерения физических величин, в первую очередь за счет снижения систематических погрешностей, а именно, методических и инструментальных. Методические погрешности появляются из-за несовершенства способа измерения, применения упрощающих предположений, неверно подобранного метода аппроксимации применяемых формул. Инструментальные погрешности зависят от погрешностей используемых средств измерения: неточности градуировки, конструктивных несовершенств, изменения характеристик в ходе эксплуатации. Оба этих типа погрешностей связаны с проблемой калибровки датчиков. Целью калибровки является приближение физической зависимости между входной и выходной величинами датчика некоторой функциональной зависимостью. При калибровке датчик температуры помещается в термокамеру, температура в которой измеряется термопарой. При изменении температуры регистрируется значение длины отраженной волны (рис.1). Измеренная физическая зависимость длины волны от температуры аппроксимируется функциональной зависимостью, которая называется калибровочной функцией. Для анализа точности калибровочных функций рассмотрим следующие виды аппроксимирующих моделей:

полиномиальные модели: $f(x) = \sum_{i=0}^{n} p_i x^i$; (1)

экспоненциальные модели: $f(x) = \sum_{i=1}^{n} a_i e^{b^i x}$; (2)

отрезки ряда Фурье: $f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^{n} [a_i \sin(wx) + b_i \cos(wx)]$; (3)

сумма синусов: $f(x) = \sum_{i=1}^{n} a_i \sin(b_i x + c_i)$; (4)

степенные модели: $f(x) = ax^b + c$. (5)

После приближения экспериментальных данных одной из функций оценка точности приближения может быть проведена как графически, так и с использованием различных критериев пригодности приближения.

Критерий SSE (Sum of squares due to error) - сумма квадратов ошибок:

$$\mathrm{SSE} = \sum_{k=1}^{n} w_k (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (6)$$

где w_k – весовые коэффициенты, y_k – экспериментальные данные, $\hat{y}_k$ - значения параметрической модели. Критерий R-квадрат (R-square) :

$$\mathrm{SSR} = \sum_{k=1}^{n} w_k (\hat{y}_k - \bar{y})^2, \quad (7)$$

$$\mathrm{SST} = \sum_{k=1}^{n} w_k (y_k - \bar{y})^2,$$

$$\text{R - квадрат} = \frac{\mathrm{SSR}}{\mathrm{SST}} = 1 - \frac{\mathrm{SSE}}{\mathrm{SST}},$$

где $\bar{y}$ - среднее значение наблюдений..Если число параметров модели m сравнимо с числом наблюдений n, то используется критерий уточненный R-квадрат (Adjusted R-square):

$$\text{Adjusted R - square} = 1 - \frac{\mathrm{SSE}(n\text{-}1)}{\mathrm{SST}(n-m)} \quad (8)$$

Стандартное отклонение ошибки RSME (Root mean Squared Error):

$$\mathrm{RSME} = \sqrt{\frac{\mathrm{SSE}}{n-m}} \quad (9)$$

С помощью математического пакета Curve Fitting Toolbox для программы MATLAB по экспериментальным данным (рис. 1) определим вид функциональной зависимости, ее коэффициенты

и рассчитаем критерии пригодности функциональной зависимости. В результате установлено, что среди 22 рассмотренных функций, наиболее точно аппроксимирующих исходные данные, наилучшей по всем четырем рассматриваемым критериям является функциональная зависимость:

$$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^{5}[a_i \sin(wx) + b_i \cos(wx)] \quad (10)$$

В табл. 1 данная зависимость сравнивается с полиномом четвертой степени, который часто используется на практике в качестве калибровочной функции датчиков температуры.

Таблица 1. Значения критериев пригодности двух калибровочных функций

$f(x)$	R-square	Adjusted R-square	SSE	MSE
$12{,}15 - 5{,}47\cos(0{,}051x) - -51{,}97\sin(0{,}051x) - -5{,}648\cos(2\cdot 0{,}051x) - -18{,}83\sin(2\cdot 0{,}051x - -4{,}404\cos(3\cdot 0{,}051x) - -11{,}34\sin(3\cdot 0{,}051x) - -4{,}044\cos(4\cdot 0{,}051x) - -5{,}367\sin(4\cdot 0{,}051x) - -3{,}561\cos(5\cdot 0{,}051x) - -2{,}555\sin(5\cdot 0{,}051x)$	0,998	0,997	76,79	2,263
$6{,}621\cdot 10^{-8}x^4 - 0{,}0005x^3 + +1{,}431x^2 - 1726x + +7{,}637\cdot 10^5$	0,995	0,993	188,584	2,928

Видно, что полином четвертой степени по всем критериям уступает зависимости (10). Таким образом, в качестве калибровочной функции данного датчика температуры лучше использовать отрезки ряда Фурье.

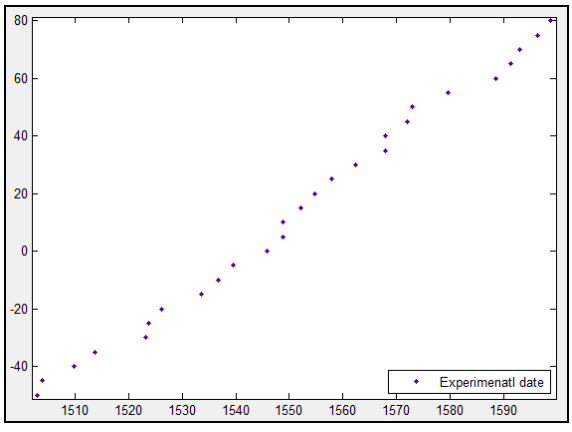


Рис. 1 – Зависимость температуры от длины волны (в условных единицах)

ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ФОТОДИОДА В ПЕТЛЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ЭРБИЕВОГО СВИ

Ширинкин В. Д.[1]*, Ременникова М. В.[2]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь*
[2]*Лаборатория агробиофотоники ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь*
**E-mail: Vadim18051996@mail.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16158

В последнее время для волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) навигационных систем в качестве источника оптического излучения используют эрбиевые суперлюминесцентные волоконные источники (СВИ), отвечающие требованиям к точностным параметрам ВОГ.

Наряду со своими преимуществами, которые обеспечиваются оптической схемой СВИ, рассматриваемые волоконные источники могут иметь недостатки, которые обуславливает дрейф показаний ВОГ. Следует учитывать это, особенно при создании ВОГ навигационного класса точности [1]. Целью настоящей работы было исследование температурной нестабильности выходной мощности СВИ в режиме стабилизации выходной оптической мощности.

В качестве одного из способов стабилизации параметров СВИ можно использовать цепь обратной связи по выходной оптической мощности. Она состоит из разветвителя 1/99 и фотодиода, на который и отводится один процент и значения с которого передаётся на плату управления СВИ, которая в дальнейшем корректирует значение тока лазерного диода. Компоненты, составляющие цепь обратной связи, имеют собственные температурные характеристики. Для того, чтобы компенсацию сделать максимально достоверной, необходимо учитывать характеристику самих компонентов. На данный момент целью исследований стал фотодиод. Для этого были проведены испытания нескольких фотодиодов (модели PD-A-25-9-1-FU и LDPF 0250) для выявления их температурных зависимостей.

Методика измерений заключалась в следующем: в режиме стабилизации источника излучения по току помещали фотодиод и термодатчик в камеру на термоцикл (+20°C → -50°C → +60°C → +20°C) и прописывали его температурную зависимость. Нестабильность выходной оптической мощности рассчитывалась по формуле (1).

$$\Delta P_T = \frac{2 \cdot \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - \overline{P_i})^2}}{\overline{P_T}} \cdot 100\% \qquad (1)$$

Наклон всех полученных зависимостей был схожим, полученные данные о нестабильности выходной оптической мощности представлены в таблице 1.

PD-A-25-9-1-FU	Нестабильность	Нестабильность	LDPF 0250
№1	2,1648	3,3451	№3
№5	4,1125	3,5530	№4
№6	2,9641	2,6965	№8
№7	3,5213	2,9928	№9
№10	4,1961	3,3197	№11
№12	5,1558	2,8413	№13
№14	4,0936	3,8215	№15
№16	4,1376	2,6830	№17

Таблица 1. Нестабильность выходной оптической мощности фотодиодов

Следующим шагом была стабилизация определённого СВИ. Для этого по вышеупомянутому алгоритму провели испытание фотодиода и сняли его температурную характеристику, и по ней построили полином второй степени. Полученная зависимость имеет вид:

$$y = -0{,}00009 * x^2 + 0{,}0123 * x + 35{,}35$$

На основе полученной зависимости рассчитали и ввели регулировочные коэффициенты в блок управления эрбиевого СВИ, после чего повторили испытание. На рисунке 1 представлены значения оптической мощности, полученной через блок управления с фотодиода.

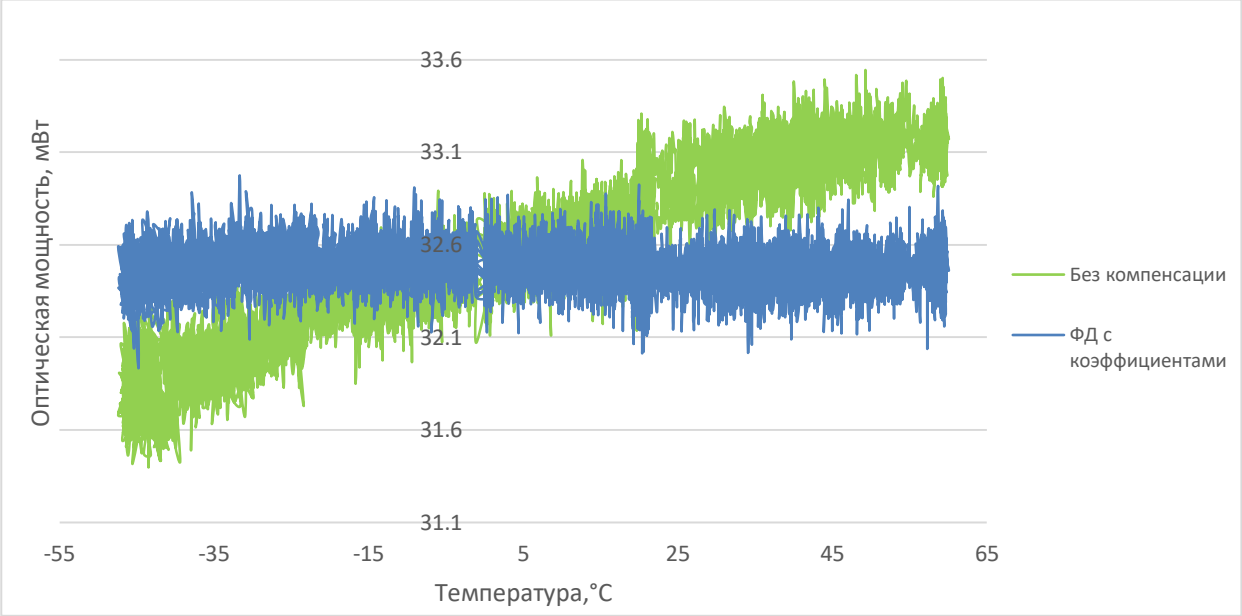


Рис.1. Термостабилизация фотодиода в цепи обратной связи

После этого собрали СВИ и через спектроанализатор сняли реальную оптическую мощность. Аналогично было проведено два эксперимента, в первом были нулевые значения регулировочных коэффициентов (зелёная линия), во втором были внесены коэффициенты для компенсации фотодиода. Результаты представлены на рисунке 2.

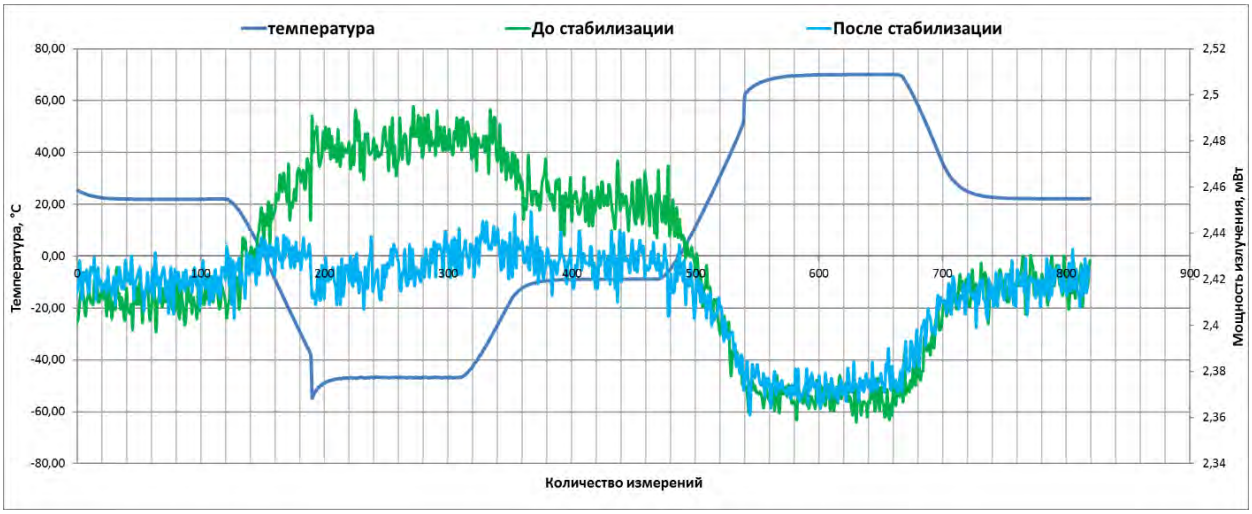


Рис. 2. Выходная оптическая мощность до/после стабилизации

Нестабильность выходной оптической мощности, рассчитанная по формуле (1), до стабилизации равнялась 3,12%, после стабилизации – 1,57%. Однако на представленном графике видно, что в диапазоне отрицательных температур выходная оптическая мощность хоть и стала стабильнее, но в области положительных температур не претерпела изменений. В дальнейшем требуется исследование температурной зависимости разветвителя в цепи обратной связи, т.к. скорее всего на высоких температурах нарушается соотношение оптической мощности 99/1, что и вызывает данный провал по мощности на выходе.

Литература

1. *Шарков И.А., Рупасов А.В., Стригалев В.Е., Волковский С.А. Влияние температурной нестабильности характеристик источника на показания волоконно-оптического гироскопа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6 (88). С. 31–35*

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ

Львов А. Е., Салимгареев Д. Д., Лашова А. А., Корсаков А. С., Жукова Л. В.*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург
** E-mail:* l.v.zhukova@urfu.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16159

Современную оптическую промышленность невозможно представить без использования таких элементов, как линзы, окна, призмы, оптические слои и т.д. В настоящее время существует большая разновидность данных изделий, но для среднего инфракрасного (ИК) диапазона их разнообразие резко снижается. Наиболее применимыми в среднем ИК диапазоне являются изделия из селенида цинка (ZnSe), диапазон прозрачности которых составляет до 22,0 мкм. Однако диапазон работы линз, окон, призм и оптических слоев можно значительно увеличить, если изготавливать их из кристаллов на основе галогенидов серебра и одновалентного таллия. Помимо увеличенного диапазона прозрачности, данные изделия можно будет применять в условиях повышенного ионизирующего излучения, поскольку кристаллы систем $AgBr - TlBr_{0,46}I_{0,54}$ и $AgBr - TlI$ являются фото- и радиационно-устойчивыми [1].

Ранее авторами работ [2] была предложена и разработана технология изготовления оптических изделий из монокристаллических заготовок, а также из пресс-остатков, которые остаются после процесса экструзии ИК световодов. Технология реализует метод пластической деформации при повышенной температуре (метод горячего прессования). Разработанная технология значительно упрощает процесс получения оптических изделий пластичных материалов, так как образцы материала, претерпевая процесс деформации, помещают в пространство заданной геометрии, в результате чего, получаемые изделия обладают высоким качеством поверхности и необходимыми геометрическими размерами [2]. Поэтому, потребность в дополнительной оптико-механической обработке, которая требует высокой точности и специальной подготовки мастера, отпадает. Используя данную технологию, были изготовлены различные оптические изделия на основе пластичных кристаллов системы $AgBr - TlBr_{0,46}I_{0,54}$ и $AgBr - TlI$. Данные оптические изделия с успехом могут заменить оптические окна, линзы и другие изделия, получаемые из широко распространенных материалов ИК-оптики, требующих весьма длительной и трудоемкой процедуры их изготовления.

Кроме того, авторами также был предложен метод изготовления оптических изделий из однофазной поликристаллической шихты, полученной методом термозонной-кристаллизацией синтезом, путем горячего прессования (Рис. 1), из которых также можно изготавливать окна, призмы, световоды и т. д. Явным преимуществом данного метода является то, что из технологической цепочки полностью убирается процесс выращивания монокристаллов, и как следствие большие временные и электрические затраты.

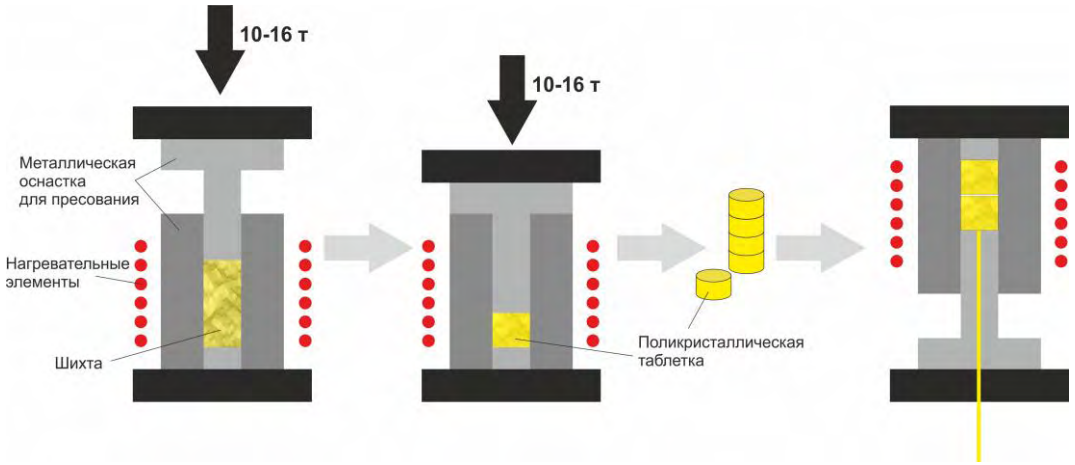


Рис. 1. Процесс изготовления поликристаллических заготовок

На рис.2 проведено сравнение спектров пропускания оптических окон толщиной 0,7 мм, изготовленных двумя вышеописанными способами.

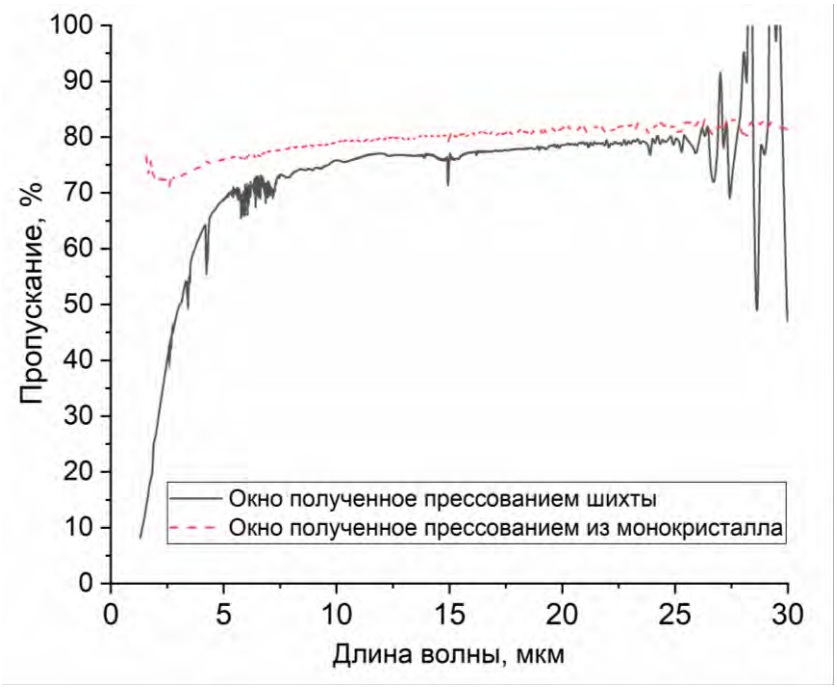


Рис. 2. Спектр пропускания оптического окна толщиной 0,7 мм

Из спектра видно, что у полученного окна наблюдается сильное падение интенсивности на длинах волн до 3 мкм. Это связано с самой методикой: в процессе прессования шихты в поликристаллических заготовках остаются микроскопические пузырьки воздуха, из-за которых происходит сильное Релеевское рассеивание. В остальном спектр пропускания окна не отличается от спектра аналогичного окна, полученного из монокристаллической заготовки.

Оптические изделия, изготавливаемые обоими вышеописанными методиками, широко используются в коллиматорах, увеличителях, радиометрах, оптических приемо-передатчиках. Кроме того, оптические изделия являются неотъемлемым элементом в лазерах для различных областей применения, в том числе медицины.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-73-10063).

Литература

1. *Zhukova L., et al, Optics and Spectroscopy 125, 933-941 (2018)*
2. *Korsakov A., et al, Applied Optics 54, 8004-8009 (2015)*

МОДЕЛЬ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ФОТОНИКИ

Киреев К.В.[1], Герасимов М.В.[1*], Пьянзин Д.В.[1], Ушаков С.Н.[1,2], Волков И.А.[1], Нищев К.Н.[1]

[1] *Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, г. Саранск*
[2] *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва*
[*] *E-mail:* gerasimov.mv12@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16160

На сегодняшний день радиофотоника является одной из самых динамично развивающихся областей науки и техники. Совместное использование средств фотоники и СВЧ-радиоэлектроники позволяет создавать устройства с уникальными техническими характеристиками. Применение фотонных технологий в радиоэлектронике привело к созданию оптоэлектронного генератора (ОЭГ) [1-4], ключевой особенностью которого является использование фотонной линии в качестве цепи обратной связи, что открыло широкие возможности для снижения его фазового шума [5].

Современные системы связи, радиолокационные системы, измерительные средства и системы испытания оборудования предъявляют повышенные требования к спектральной чистоте используемых СВЧ-сигналов. Таким образом, задача построения СВЧ-генераторов с предельно низкими фазовыми шумами представляется весьма актуальной.

Низкий уровень потерь в фотонной линии позволяет реализовать для генератора резонатор большой длины и, следовательно, высокой добротности. Ширина спектра отдельной моды обратно пропорциональна квадрату времени задержки в петли обратной связи и мощности генерации [6]. При этом спектр генерации ОЭГ представляет собой ряд равноудалённых друг от друга частот – мод, а межмодовый интервал в схеме с длинным резонатором часто оказывается значительно меньше полосы пропускания используемого полосно-пропускающего фильтра, что приводит к могомодовому режиму генерации ОЭГ [7]. Одной из основных проблем ОЭГ является проблема одномодового режима генерации. Для нахождения компромисса и использования методов селекции продольных мод в оптических резонаторах для получения одночастотного режима генерации предложено несколько решений, одним из которых является применение многоконтурной схемы ОЭГ [8].

Для эффективного проектирования радиофотонных систем необходимо проведение модельного эксперимента с применением средств вычислительной фотоники [9-11]. Программные модели позволяют имитировать условия работы устройств и изменять характеристики компонентов в очень широких пределах, что часто бывает невозможно осуществить с помощью физических моделей.

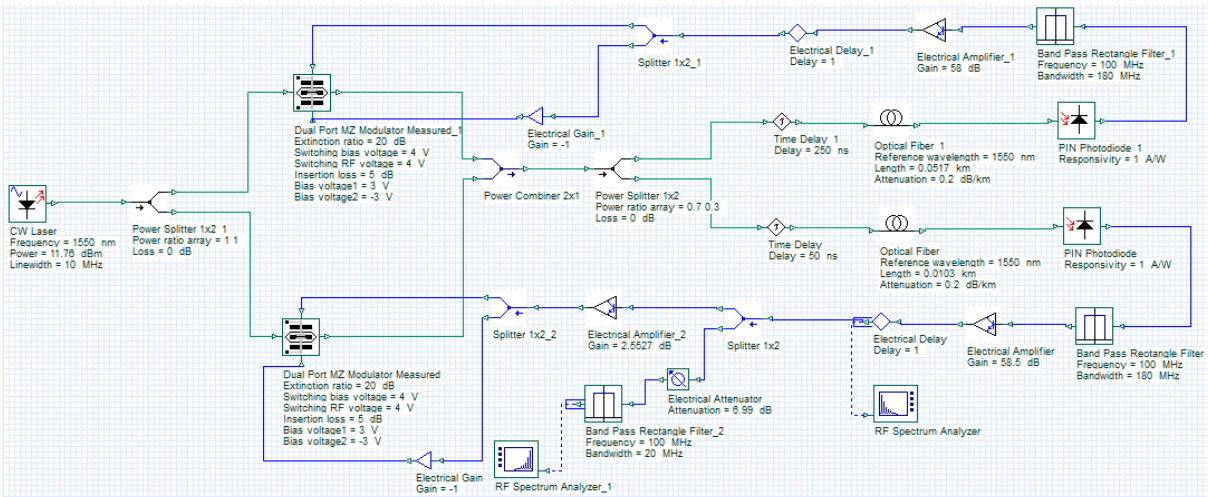


Рис. 1. Схема модели двухконтурного ОЭГ с оптическим суммированием

В настоящей работе в среде *OptiSystem* созданы модели одно-, двух- и трехконтурных ОЭГ. При этом особое внимание уделено глобальным параметрам моделирования, выбору ключевых

компонентов разрабатываемых моделей, их параметров и передаточных функций, что позволило задать частотные параметры моделирования и режимы работы каждого из компонентов.

Модель двухконтурного ОЭГ (рис. 1) включает в себя следующие компоненты: генератор оптической несущей, двухтактный модулятор Маха-Цандера (ММЦ), сумматор оптических мощностей, в котором происходит интерференция оптических сигналов, промодулированных в разных контурах, блок временной задержки, одномодовое волокно, PIN-фотодиод, полосно-пропускающий фильтр, широкополосный усилитель, элемент задержки на итерацию, делитель мощности сигнала, полосно-пропускающий фильтр (с полосой пропускания 20 МГц), анализатор спектра сигнала.

Представлена динамика перехода ОЭГ в квазистационарный режим при варьировании коэффициента усиления (рис. 2а). Обнаружено, что в режиме установления генерации уровень фазового шума ниже, чем в квазистационарном режиме, что связано с переходом ММЦ в нелинейный режим работы. Стабилизация уровня амплитуды сигнала на выходе ОЭГ обусловлена нелинейной передаточной функцией ММЦ, что позволяет использовать в модели идеальные передаточные характеристики фотодетектора и усилителя без нарушения условия физической реализуемости схемы.

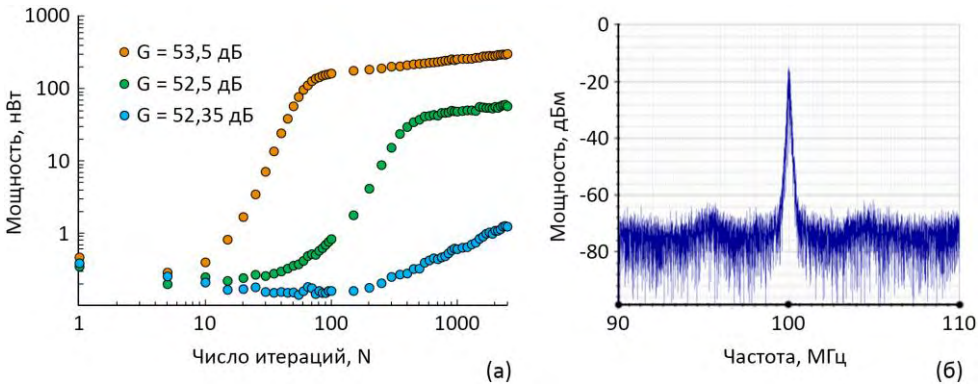


Рис. 2. (а) Временная (от цикла к циклу) эволюция мощности сигнала на выходе фотодетектора при различных коэффициентах усиления G. (б) Спектр генерации двухконтурного ОЭГ (для G = 52,5 и N = 1000) при временах задержки τ_1 = 50 нс и τ_2 = 250 нс

Поскольку ширина моды не зависит от ее частоты, то выбор моды с центральной частотой 100 МГц дал возможность повысить частотное разрешение до 3 кГц при используемых вычислительных ресурсах. Основные результаты модельных экспериментов:

- Найдены оптимальные коэффициенты усиления и представлена динамика перехода ОЭГ в квазистационарный режим.
- Использование систем связанных резонаторов (контуров) с разной добротностью позволило уменьшить ширину моды, но сохранить одномодовый режим генерации ОЭГ.
- Использование явления интерференции оптических сигналов уменьшает ширину основной моды выходного сигнала и сглаживает уровень шума в остальной части спектра генерации (рис. 2б).
- В режиме установления генерации уровень фазового шума ниже, чем в квазистационарном режиме.
- Уменьшение ширины линии излучения генератора оптической несущей снижает фазовый шум, а дисперсия оптического волокна нарушает генерацию в области высоких частот.

Полученные результаты не только качественно, но и количественно согласуются с литературными данными, в частности, по уровню мощности выходного сигнала и временной эволюции при переходе в стационарный режим генерации.

Литература

1. *Neyer A., Voges E., Appl. Phys. Lett., 40(1), 6-8 (1982)*
2. *Grigor'yants V.V. et al., Optical and Quantum Electronics, 17(4), 263-267 (1985)*
3. *Yao X.S., Maleki L., Electronics Letters, 30(18), 1525-1526 (1994)*
4. *Белкин М. Е., Лопарёв А. В., Электроника: Наука, Технология, Бизнес, №6, 62-70 (2010)*
5. *Бельчиков С. А. Компоненты и технологии, №5, 139-146 (2009)*
6. *Yao X.S., Maleki L., IEEE Journal of Quantum Electronics, 32(7), 1141-1149 (1996)*
7. *А. В. Лопарёв, М. Е. Белкин, Материалы Международной научной конференции Intermatic, 134-138 (2011)*
8. *Yao X.S., Maleki L., IEEE Journal of Quantum Electronics. 36(1), 79-84 (2000)*
9. *Levy E.C. et al., Optics Express, 18(20), 21461-21476 (2010)*
10. *Лопарев А.В. Научный вестник МИРЭА, №2(9), 41-48 (2010)*
11. *Задорин А.С., Лукина А.А. Доклады ТУСУРа, 19(4), 81-84 (2016)*

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ АНАЛИЗА КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР В ДИССИПАТИВНЫХ СИСТЕМАХ

Чеховской И.С.[1*], **Штырина О.В.**[1,2], **Федорук М.П.**[1,2], **Медведев С.Б.**[1,2], **Турицын С.К.**[1,3]

[1] *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*
[2] *Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск*
[3] *Институт фотонных технологий Астона, университет Астона, Бирмингем, Великобритания*
[*] *E-mail:* i.s.chekhovskoy@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16161

Работа посвящена новому приложению метода обратной задачи рассеяния (МОЗР), также известного как нелинейное преобразование Фурье (NFT – nonlinear Fourier transform). Захаров и Шабат показали [1], что с помощью МОЗР можно проинтегрировать одну из основных моделей нелинейной физики – нелинейное уравнение Шредингера (НУШ), для чего нужно решить так называемую спектральную задачу Захарова-Шабата (ЗЗШ). Метод по аналогии с обычным преобразованием Фурье позволяет упростить анализ и свести сложную нелинейную динамику к простой эволюции в определенном базисе – так называемом нелинейном спектре сигнала.

Применение NFT к интегрируемым Гамильтоновским уравнениям, таким как НУШ, хорошо изучено. В данной же работе на примере уравнения Гинзбурга-Ландау (УГЛ)

$$i\frac{\partial U}{\partial z} = \left(-\frac{s}{2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} - |U|^2\right)U + i\left(\sigma + \alpha\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \delta|U|^2\right)U,\ \sigma(E) = \frac{g_0}{2\left(1+\frac{E}{E_{sat}}\right)} - \frac{\Gamma}{2},\ E(z) = \int |U(z,t)|^2 dt \qquad (1)$$

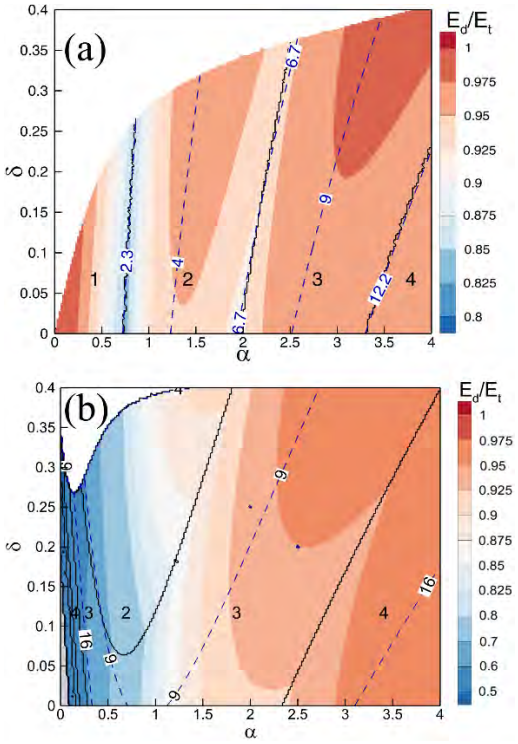


Рис. 1. Отношение энергии E_d, соответствующей дискретному спектру, к полной энергии E_t от параметров α и δ в случае аномальной дисперсии (a) и нормальной (b) дисперсии. Числами черного цвета на рисунке обозначено число дискретных уровней для соответствующих стац. решений УГЛ (2), а черными линиями разделяются зоны с различным числом собственных значений

был исследован потенциал его применения к диссипативным неинтегрируемым системам [2]. Данное уравнение, в частности, используется при описании поля кольцевого резонатора волоконного лазера с насыщающимся поглотителем. Стационарные решения уравнения (1) представляют собой семейство чирпованных солитонных решений, которые могут быть записаны в виде

$$U(z,t) = A^{1+iC}(t)\exp\{i\phi z\}, \text{где } A(t) = \frac{\sqrt{P}}{\cosh(t/\tau)}. \qquad (2)$$

Применение NFT к НУШ с аномальной дисперсией подразумевает нахождение непрерывного и дискретного спектра оператора ЗЗШ для потенциалов ψ_1 и ψ_2

$$\begin{cases}\frac{d\psi_1}{dt} = U(z,t)\psi_2 - i\zeta\psi_1 \\ \frac{d\psi_2}{dt} = -U^*(z,t)\psi_1 + i\zeta\psi_2,\end{cases} \qquad (3)$$

где $\zeta = \xi + i\eta$ является элементом спектра оператора $L = i\begin{pmatrix}\partial_t & -U(z,t)\\ -U^*(z,t) & -\partial_t\end{pmatrix}$. Решение НУШ $U(z,t)$ при всех z должно быть затухающим при $t \to \pm\infty$.

Несмотря на то, что NFT не может быть использовано для решения УГЛ (1), можно проанализировать динамику нелинейного спектра решения $U(z,t)$, считая, что в каждой точке по z поле $U(z,t)$ подчиняется НУШ с аномальной дисперсией. Более того, можно показать, что эволюция оптического сигнала, подчиняющегося УГЛ, может быть с хорошей точностью описана с помощью конечного числа переменных с использованием NFT в тех случаях, когда дискретная составляющая спектра оператора ЗЗШ для соответствующего НУШ является доминирующей. Это соответствует случаям, когда отношение энергии сигнала, связанной с дискретным спектром, к полной энергии близко к единице.

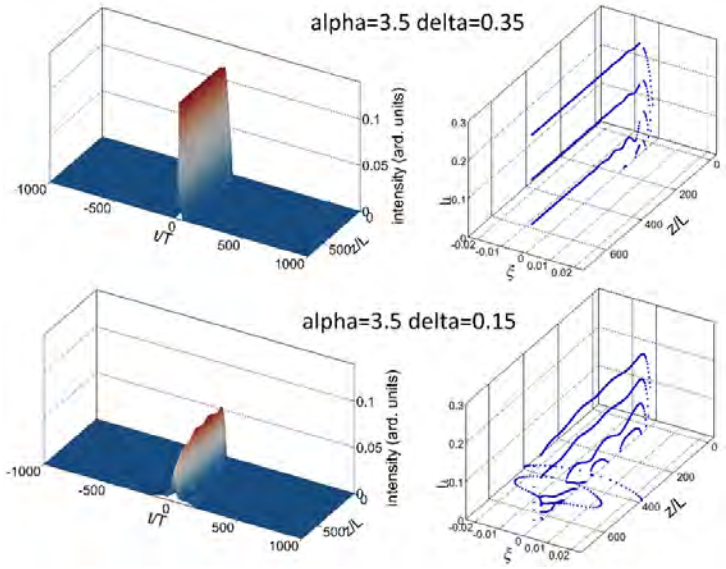


Рис. 2. Динамика интенсивности поля $U(z,t)$ и соответствующая динамика дискретных собственных значений $\zeta_n = \xi_n + i\eta_n$ для различных значений параметров α и δ в случае УГЛ (1) с аномальной дисперсией

Все представленные в работе расчеты проведены при значениях параметров $g_0 = 0.3$, $\Gamma = 0.1$, $E_{sat} = 1$. На рисунке 1 представлена зависимость отношения энергии E_d, определяемой элементами дискретного спектра, к полной энергии E_t от параметров α и δ УГЛ (1). Рассмотрены случаи аномальной ($s = 1$) и нормальной ($s = -1$) дисперсии. Для различных пар значений данных параметров численно был найден непрерывный и дискретный спектры ЗЗШ с помощью метода Боффетты-Осборна для соответствующего стационарного решения УГЛ (2). Белым цветом отмечена область, где не существуют стационарные решения. Также на рисунке 1 обозначены области параметров с различным числом собственных значений. Как можно заметить, в случае аномальной дисперсии отношение энергии дискретного спектра к общей энергии всегда достаточно высокое – более 82%. Однако, области, соответствующие решениям, содержащим 1 и 3 дискретных с. з., имеют подобласти, где отношение энергий превышает 97.5%. Это говорит о возможности с хорошей точностью описывать стационарные решения УГЛ с помощью лишь знания дискретного спектра. В случае нормальной дисперсии это также возможно при больших значениях параметра α.

Рассмотрим теперь несколько примеров динамики оптического поля, подчиняющегося УГЛ (1), и проанализируем динамику нелинейного спектра. В качестве начальных данных будем использовать солитон НУШ $U(z=0,t) = 0.2/\cosh(0.2t)$, пиковая мощность которого меньше пиковой мощности стационарных решений УГЛ (2) при рассматриваемых значениях параметров α и δ. Таким образом, начальное поле всегда имеет только дискретный спектр, состоящий из одного собственного значения, а пиковая мощность этого поля возрастает при распространении вдоль z (соответствующие стационарные решения содержат 3 дискретных уровня). На рисунке 2 приведены графики динамики вдоль z интенсивности поля и динамики дискретных собственных значений $\zeta_n = \xi_n + i\eta_n$. В случае устойчивого стационарного решения ($\alpha = 3.5, \delta = 0.35$) при больших z дискретные собственные значения приближаются к собственным значениям стационарного решения УГЛ при рассматриваемых значениях параметров. Возникающие в них поначалу осцилляции быстро затухают, а появившееся вначале четвертое собственное значение исчезает. В случае неустойчивых стационарных решений ситуация кардинально другая. При $\alpha = 3.5, \delta = 0.15$ можно наблюдать сложную динамику дискретных собственных значений: периодически возникающее 4-е собственное значение сливается со следующим по величине собственным значением, после чего данные собственные значения становятся симметричными друг другу относительно действительной оси, а направление их осцилляций меняется. Тем не менее, даже в этом случае отношение энергии, соответствующей дискретному спектру, к общей энергии довольно высоко (более 95%), что говорит о возможности описания с помощью лишь дискретного спектра даже такой неустойчивой динамики.

Таким образом показано, что NFT может выступать в качестве метода, который позволяет уменьшить количество эффективных степеней свободы, когда в динамике оптического сигнала преобладают когерентные структуры, такие как солитоны, даже когда их эволюция протекает неустойчиво. Проведен анализ стационарных решений УГЛ, представляющих собой диссипативные солитоны, и найдены области параметров данных решений, когда подход к описанию динамики на основе NFT применим.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант № 17-72-30006).

Литература

1. *V. E. Zakharov and A. B. Shabat, J. Exp. Theor. Phys. 34, 62 (1972)*
2. *I. S. Chekhovskoy, et al., Phys. Rev. Lett. 122, 153901 (2019)*

БЫСТРОЕ ИНДИКАТОРНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР И ДЕФОРМАЦИЙ МЕТОДОМ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-БРИЛЛЮЭНОВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Кривошеев А.И.[1,2,3], Носова Е.А.[1,2,3], Константинов Ю.А.[1], Барков Ф.Л.[1], Бурдин В.В.[1,2], Смирнов А.С.[1,2]

[1] Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Пермь
[2] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь
3 Пермская научно-производственная приборостроительная компания, г. Пермь
[*] *E-mail:* antokri@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16162

Бриллюэновская рефлектометрия в последние годы является одним из мощнейших направлений в тестировании волоконных линий связи, исследовании волокон и кабелей различных типов, распределенной сенсорики. Измеряемая величина – бриллюэновский сдвиг – имеет линейную связь как с механическими напряжениями (или деформациями) оптического волокна, так и с температурой. Проблеме разделения этих величин посвящено достаточно много работ [1-3]. В [2,3] описано разделение температур и деформаций методом поляризационно-бриллюэновской рефлектометрии, в котором в качестве двух независимых сенсорных волокон выступают две поляризационные оси анизотропного волоконного световода. Согласно [3], метод на практике демонстрирует разрешение около 3 микрострейн по деформациям и 0,08ºС по температурам. Очевидно, что на практике для получения таких значений на опыте со световодом с высоким модовым двулучепреломлением необходимо точное сканирование по частоте (около 0,1 МГц), что на коммерческом BOTDA-оборудовании составит десятки минут. Если речь идет о мониторинге состояния сложного устройства специального назначения или особо ответственного инженерного сооружения, такое время измерения может быть слишком длительным. В ряде задач необходимо срабатывание индикатора (объект вдобавок к деформациям начал нагреваться, или же напротив – кроме ожидаемых деформаций начали изменяться температуры). В таком случае будет уместно сканирование с большим шагом (порядка 1-5 МГц). Задача настоящего исследования – изучить возможность индикаторного разделения температур и деформаций при сканировании BOTDA спектральной области с бриллюэновским сдвигом с шагом порядка единиц МГц. На рис. 1 и 2 показан испытательный стенд и образец.

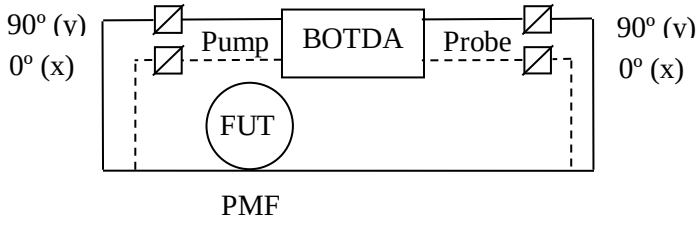


Рис.1 – Подключение образца к бриллюэновскому анализатору



Рис.2– Образец: 28 м PMF, намотанных вручную на алюминиевый цилиндр

Сначала с образца были сняты несколько витков. Они были подвержены продольному растяжению с силой до 5Н. На анализаторе Ditest STA-R 202 были зафиксированы f_x и f_y (бриллюэновские сдвиги для поляризационных осей 0º и 90º к главной оптической оси соответственно). Далее этот же образец в свободном состоянии был подвергнут термоциклированию в диапазоне от 25ºС до 60ºС с фиксацией тех же показателей. На рис. 3 представлены линейные зависимости, отображающие связь бриллюэновских сдвигов обоих поляризационных осей с температурой. Графики для деформаций (силы растяжения) имеют ту же форму. Изменения бриллюэновского сдвига при вариации температур и силы продольного натяжения для двух поляризационных осей выглядят так:

$$\Delta f_x = a_{11}\Delta t + a_{12}\Delta F\ ; \qquad (1)$$

$$\Delta f_y = a_{21}\,\Delta t + a_{22}\,\Delta F\ . \qquad (2)$$

Выражая из (1) и (2) Δt и ΔF, получаем:

$$\Delta t = (\Delta f_x\, a_{22} - \Delta f_y\, a_{12})\,(a_{11}\, a_{22} - a_{21}\, a_{12})^{-1}\ ;\ \Delta F = (\Delta f_y\, a_{11} - \Delta f_x\, a_{21})\,(a_{11}\, a_{22} - a_{21}\, a_{12})^{-1}$$

В калибровочных экспериментах выше были найдены коэффициенты a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}. Значения Δf_x и Δf_y были получены из следующего эксперимента: с образца вновь были сняты несколько витков волокна и размещены рядом с ним на подносе. Поднос с образцом и бухтой волокна были помещены в термокамеру, где подверглись испытаниям на температурах 25ºC, 30ºC, 40ºC, 50ºC, 60ºC. Итоговые изменения силы растяжения и температур отображены на Рис. 4.

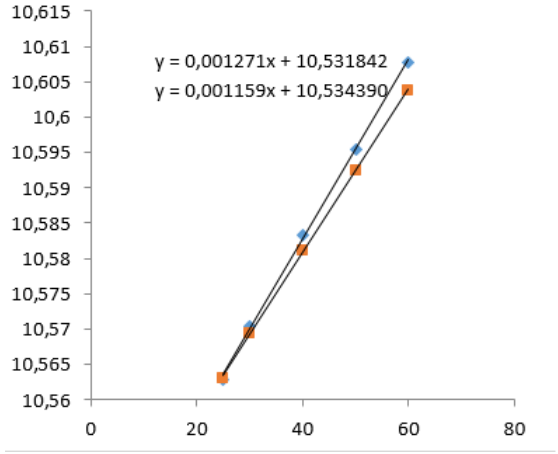


Рис.3 - Связь бриллюэновских сдвигов обеих поляризационных осей (ось ординат) с температурой (ось абсцисс)

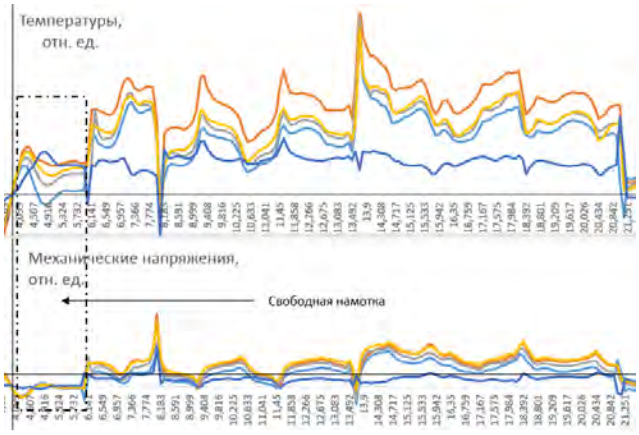


Рис. 4 - Изменения силы растяжения и температур в отн. ед. (по длине образца)

По фрагменту со свободной намоткой видно, что графики температур изменяются в значительной степени, в то время как механические напряжения пренебрежимо малы и остаются неизменными. При увеличении температур растут и значения на обеих зависимостях, что логично – при нагреве увеличивается диаметр цилиндра и обеспечивает натяжение. Индикаторная регистрация, как не сложно заметить, функционирует. Изрезанность данных объясняется неравномерной намоткой и флуктуациями показателя преломления волокна.

Необходимо отметить, что при сличении фактических температур с полученными показаниями была определена погрешность около 30-40% от измеряемой величины. Это связано с применением малого разрешения при сканировании по спектру излучения.

В дальнейшем планируется совершенствовать метод для ухода от индикаторной регистрации к полноценной измерительной системе. Предполагается, что разумный компромисс между скоростью измерения и точностью будет найден благодаря гибкому алгоритму сканирования по спектру.

Литература

1. *M.A.S. Zaghloul 1, M.Wang, G.Milione, M.-J.Li, S. Li, Yu.-K. Huang, T. Wang, K. P. Chen / Discrimination of Temperature and Strain in Brillouin Optical Time Domain Analysis Using a Multicore Optical Fiber / Sensors 2018, 18, 1176; doi:10.3390/s18041176*
2. *Разделение температуры и деформации в волокне, сохраняющем поляризацию, методом поляризационного распределенного бриллюновского анализа / А. С. Смирнов, А. И. Кривошеев, Ю. А. Константинов, Ф. Л. Барков, В. В. Бурдин // Фотон-Экспресс. - 2017. - № 6(142) : спец. вып. Фотон-Экспресс-Наука 2017 : Всерос. конф. по волокон. оптике, г. Пермь, 3-6 окт. 2017 г. - С. 183*
3. *W. Zou, Z. He, K. Hotate / Complete discrimination of strain and temperature using Brillouin frequency shift and birefringence in a polarization-maintaining fiber / Optics Express 17(3):1248-55, 2009 DOI: 10.1364/OE.17.001248*

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Салгаева У.О.[1*], Волынцев А.Б.[2]

[1] *ООО «МИП «Пермские нанотехнологии», г. Пермь*
[2] *Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь*
[*] *E-mail:* ulyanasalgaeva@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16163

Рядом исследовательских групп предполагалась возможность использования обработки монокристаллов $LiNbO_3$ в водородной плазме (Н-плазме) с целью формирования оптических волноводов. Однако, обработка Н-плазме ведет к снижению оптического пропускания, основной причиной которого авторы считали химическое восстановление $LiNbO_3$ [1 – 4]. Проведенные ранее нами эксперименты показали снижение оптического пропускания после обработки в Н-плазме других оптических материалов – натрий-кальций-силикатного стекла (НКС-стекла) и протонообменного (ПО) $LiNbO_3$ [5].

В данной работе исследованы изменения оптического пропускания НКС-стекла, $LiNbO_3$ и ПО $LiNbO_3$, впервые выявлены и описаны характерные особенности спектров приращения оптической плотности образцов, индуцированные обработкой в Н-плазме.

Обработка осуществлялась с помощью системы генерации и удержания ёмкостно-связанной плазмы. Подготовленные образцы загружались в реактор, из которого откачивался воздух до давления 0,05 Торр. Поток рабочего газа H_2 составлял (15 ± 1) см^3/мин. Для генерации плазмы на систему электродов подавалась мощность от 25 до 100 Вт с помощью генератора ОЕМ-12А при рабочей частоте 13,4 МГц. В ходе обработки осуществлялся дополнительный нагрев образца от 100 до 300 °С. Эксперименты проводились на образцах Х-среза $LiNbO_3$ (CQT, Китай) и ПО $LiNbO_3$ (протонный обмен в C_6H_5COOH при 174 °С, 120 мин; отжиг при 354 °С, 300 мин), НКС-стекла (Fisherbrand). Более подробно процесс подготовки и обработки образцов описан в [5].

После обработки в водородной плазме образцы из НКС-стекла приобретали желтоватый оттенок, образцы из $LiNbO_3$ и ПО $LiNbO_3$ приобретали оттенок от серого до черного различной степени интенсивности, зависящей от условий обработки. Мы предполагаем, что появление окраски оптических материалов после обработки в Н-плазме может происходить частично как за счет описанных ранее восстановительных процессов (в случае $LiNbO_3$ и ПО $LiNbO_3$ [1 – 4]) при участии внедренного водорода в приповерхностный слой, так и за счет процессов радиационного повреждения материалов (как НКС-стекла, так и $LiNbO_3$), образования точечных дефектов (центров окраски) при воздействии компонентов Н-плазмы (электронов, УФ-излучения, атомарного водорода, изотопов и ионов водорода).

Нами были проведены измерения оптического пропускания образцов с помощью спектрофотометра (Varian, Cary 300). Данные о характере снижения оптического пропускания вблизи края фундаментального поглощения (при $T, \% \rightarrow 0$) после обработки в Н-плазме говорят о сдвиге полосы фундаментального поглощения образцов из $LiNbO_3$, ПО $LiNbO_3$ (рисунок 1, а) в длинноволновую область до 10 нм, и, как следствие, о возможном повышении неупорядоченности структуры после обработки материалов в Н-плазме [6]. Для образцов НКС-стекла сдвиг полосы фундаментального поглощения после обработки в Н-плазме не был выявлен.

Для оценки степени «окрашивания» образцов после обработки в водородной плазме, было рассчитано приращение оптической плотности, индуцированное обработкой: $\Delta d(\lambda) = lg(T(\lambda)_{исх}/T(\lambda)_{H-плазма})$, где $T(\lambda)_{исх}$ – оптическое пропускание исходного образца, $T(\lambda)_{H-плазма}$ - оптическое пропускание образца после обработки в Н-плазме [6].

На графиках спектральной зависимости Δd образцов видно, что после обработки Н-плазме появились пики оптического поглощения (рисунок 1, б, в). На кривых приращения оптической плотности НКС-стекла наблюдаются пики поглощения при $\approx$ 4,0 эВ (0,310 мкм) и при 2,0 эВ (0,620 мкм). Согласно [6], оба этих пика принадлежат полосам поглощения атомов немостикового кислорода – основного радиационного дефекта в стеклах. Также на графиках Δd (рисунок 1, б) для НКС-стекла наблюдаются малоинтенсивные пики на $\approx$ 2,25 эВ (550 нм); 1,85 эВ (670 нм); 1,70 эВ (730 нм), природа которых нам не ясна. На графиках спектральной зависимости приращения оптической плотности образцов $LiNbO_3$ и ПО $LiNbO_3$ (рисунок 1, в) видно, что после обработки появились широкие дихроичные полосы оптического поглощения, характерные как для точечных

дефектов, индуцированных восстановительным отжигом, так и для радиационно-индуцированных дефектов в структуре $LiNbO_3$ и ПО $LiNbO_3$.

Необходимо заметить, что увеличение времени обработки в два и более раз не приводит к пропорциональному увеличению оптической плотности образца после обработки в Н-плазме. С точки зрения радиационного материаловедения это может обосновано тем, что скорость накопления центров окраски при обработке в Н-плазме постепенно уменьшается за счет снижения числа ловушек еще не заполненных носителями и конкуренции незаполненных ловушек с уже возникшими центрами окраски.

Также нами был выявлен факт релаксации окраски (повышения оптического пропускания) образцов, исследованы некоторые закономерности данного процесса при отжиге и выдержке на воздухе образцов из НКС-стекла, $LiNbO_3$, ПО $LiNbO_3$, обработанных в Н-плазме (рисунок 1, г). Наблюдается существенная релаксация наведенного поглощения после отжига образца. Выявлено, что скорость релаксации наведенного поглощения уменьшается со временем, при этом скорость релаксации на отожжённых образцах существенно меньше скорости релаксации окраски неотоженных образцов. В терминологии радиационного оптического материаловедения факт уменьшения радиационной окраски объясняется как температуронезависимой рекомбинацией дефектов (при выдержке образцов), так и рекомбинацией под действием термической стимуляции (при отжиге) (например, рекомбинацией электронов, освобождаемых из ловушек, с собственными дырочными центрами окраски).

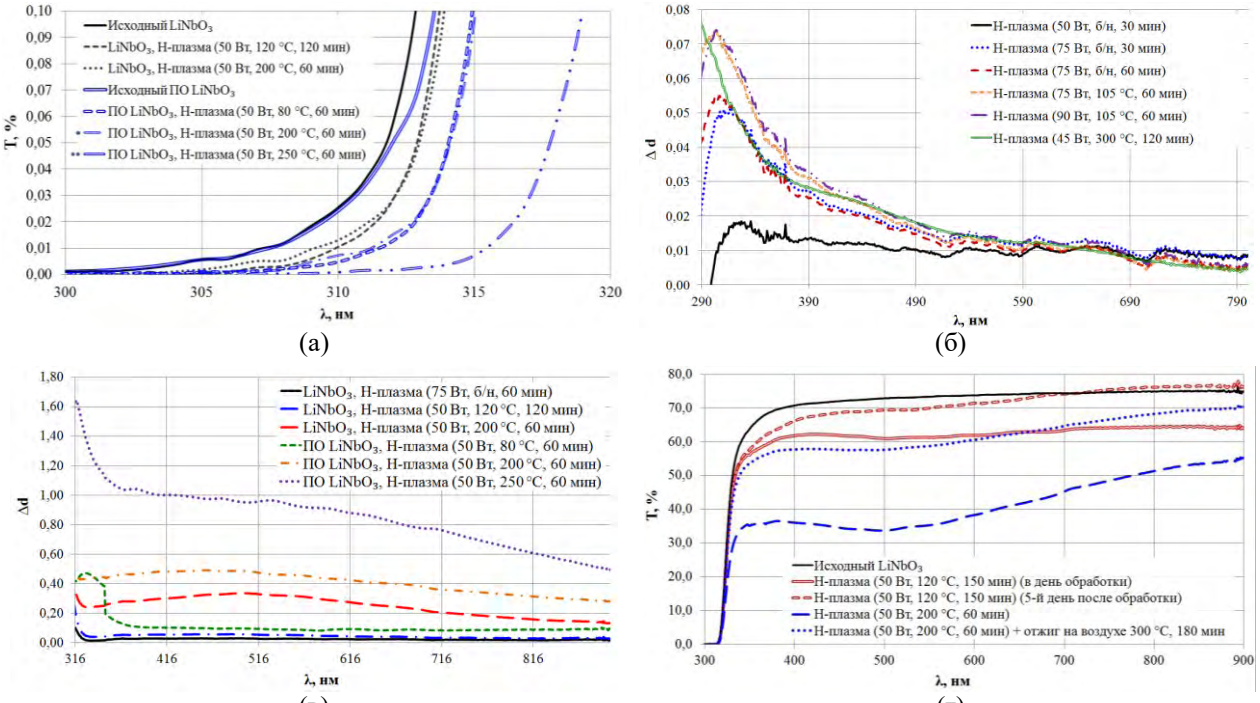


Рис. 1. Изменения оптических характеристик после обработки в Н-плазме: (а) ΔT (λ) в вблизи края фундаментального поглощения $LiNbO_3$ и ПО $LiNbO_3$; (б) Δd (λ) для образцов из НКС-стекла; (в) Δd (λ) для образцов из $LiNbO_3$ и ПО $LiNbO_3$; (г) изменения ΔT (λ) образцов из $LiNbO_3$ после выдержки и отжига

Таким образом, мы считаем, что при описании изменений структуры и свойств оптических материалов, индуцированных обработкой в Н-плазме, необходимо учитывать влияние всех компонентов плазмы, приводящих не только к изменениям химического состава материалов, но и к образованию радиационно-индуцированных дефектов.

Авторы выражают благодарность Факультету физики и астрономии Университета Луисвилля (США) и лично докторам Сергио Б. Мендесу (Sergio B. Mendes) и Гамини Суманасекера (Gamini Sumanasekera) за оказанную помощь при проведении данного исследования.

Литература

1. *Turcicova H., et al, J. Phys. D: Appl. Phys. 31, 1052-1059 (1998)*
2. *Turcicova H., et al, Surface and Interface Analysis 29, 260-261 (2000)*
3. *Ren Z., et al, Appl. Phys. Lett. 88, 142905 (2000)*
4. *Ren Z., Heard P.J., Yu S., J. Vac. Sci. Technol. B 25(4), 1161-1165 (2007)*
5. *Salgaeva U.O., Volyncev A.B., Mendes S.B. Appl. Opt. 55(3), 485-490 (2016)*
6. *Арбузов В.И. Основы радиационного материаловедения. СПб: СПбГУИТМО, 2008, 284 с*

УСТРОЙСТВО ДЛЯ АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТРАКТАХ

Бурдин В.А., Дашков М.В.*, Долгополов В.Н.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
** E-mail:* mvd.srttc@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16164

Поляризационные приборы, предназначенные для анализа и преобразования поляризованного оптического излучения, получили применение в контрольно-измерительном оборудовании, телекоммуникационных системах, волоконных лазерах, а также, в последнее время, активно используются в системах опроса волоконно-оптических датчиков, основанных на поляризационных эффектах. При этом особый интерес для полевого и индустриального применения представляют устройства, отличающиеся отсутствием подвижных элементов и простым согласованием с волоконно-оптическим трактом.

В данной работе рассматривается реализация устройства, позволяющего производить анализ состояния поляризации оптического излучения и выполнять функции преобразования поляризации по заданному закону. Основным компонентом устройства является трехэлементный волоконно-оптический контроллер поляризации. В стандартной конфигурации двулучепреломляющие элементы расположены таким образом, что оптическая ось второго каскада ориентирована относительно других элементов под углом 45^0, а величина двулучепреломления каждого каскада изменяется в соответствии с управляющим электрическим сигналом. Для реализации подобных контроллеров применяются различные технологии, основанные на основе теплового воздействия, механического воздействия и электро-оптического эффекта [1]. При этом применяется общий алгоритм управления контроллером, и основные отличия касаются параметров управляющих сигналов, а также необходимости учета индивидуальных особенностей, таких как быстродействие, наличие гистерезиса и резонансных явлений.

Структурная схема устройства приведена на рис. 1.

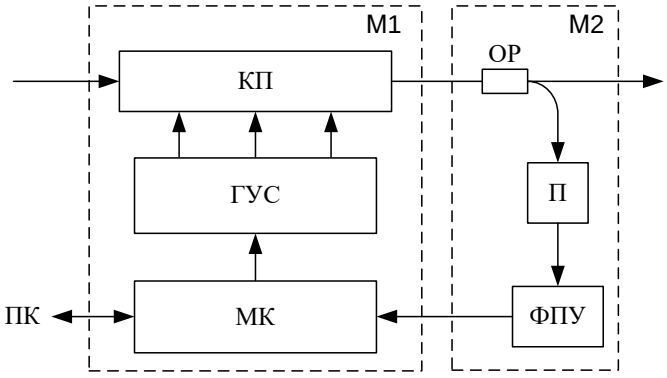


Рис. 1. Структурная схема устройства

В состав модуля 1 (M1) входят: трехэлементный волоконно-оптический контроллер поляризации (КП); генератор управляющих сигналов (ГУС), согласующий аналоговую и цифровую части устройства; микроконтроллер (МК) с интерфейсом для подключения к персональному компьютеру (ПК). Схема включения модуля выбирается в зависимости от назначения и сферы применения устройства. В приведенной конфигурации с модулем M2 устройство может выполнять функции анализа состояния поляризации оптического излучения при включении “в линию” или формирования заданного состояния поляризации. В состав модуля 2 (M2) входят: оптический разветвитель (ОР) для отвода части мощности, линейный поляризатор (П) в качестве анализатор; фотоприемное устройство (ФПУ).

Разработаны методы управления трехкаскадным контроллером для измерения компонентов вектора Стокса оптического излучения, учитывающие особенности применения в качестве отдельного

устройства, а также при совместной работе с оптическим рефлектометром. При этом были использованы математические модели устройства на основе формализма матриц Мюллера.

В общем случае мощность излучения, поступающая на фотодетектор после прохождения контроллера и поляризатора, является функцией 4-х параметров $P = f(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \theta)$, где β_i - величина фазовой задержки *i*-го элемента контроллера поляризации, определяемая управляющим сигналом; θ - ориентация оптической оси линейного поляризатора.

На этапе калибровки прибора для каждого каскада контроллера определяются зависимости величины фазовой задержки от параметров управляющих сигналов и фиксируются значения, соответствующие определенным значениям фазовой задержки $\{0;\ \pi/2\ ;\pi\ ;\ 3\pi/2\ \}$.

В процессе работы устройства в режиме анализатора выполняется последовательный перебор 8 заданных комбинаций управляющих сигналов, снимаются показания фотоприемного устройства и производятся соответствующие математические операции. В результате определяются компоненты вектора Стокса. Область применения данного устройства ограничивается контролем относительно медленно протекающих процессов.

Принцип работы устройства в режиме генерации детерминированного состояния поляризации заключается в подборе параметров управляющих сигналов на основе результатов анализа входного состояния поляризации. В итоге задача сводится к оптимизации функции трех переменных.

Для реализации поляризационного рефлектометра были разработаны схема и методика согласования устройства со стандартным оптическим рефлектометром. На основе работ [2,3] был разработан алгоритм распределенного анализа поляризационных характеристик оптического волокна и произведена апробация на математической модели.

Работа выполнена при поддержке гранта ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики».

Литература

1. *Damask J.N., Polarization Optics in Telecommunications, Springer, 520 p. (2004)*
2. *Rogers A.J., Appl. Opt. 20, 1060-1074 (1981)*
3. *Wuilpart M. et al. Proc. SPIE 4087, 396-404 (2000)*

СПЕКТРАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР НА ЭФФЕКТЕ НАВЕДЕННОЙ СВЯЗИ МОД В ДВУХСЕРДЦЕВИННОМ ВОЛОКНЕ

Симонов В.А.[1*], **Ульзутуев Б.Б.**[2]

[1] *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*
[2] *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*
[*] *E-mail:* simonovva@iae.sbras.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16165

В волоконных системах зачастую необходимо применять различные спектральные фильтры, например, для выделения слабых линий генерации и подавлении сильных линий в волоконных лазерах1, для формирования многоволновой генерации 2,3, для генерации сильночирпованных диссипативных солитонов в полностью волоконной схеме 4. Обычно для этих целей используют волоконный фильтр Лио, представляющий собой вварку волокна с сохранением поляризации с поворотом оси на 45°. Тогда исходное излучение с линейной поляризацией в вваренном сегменте приобретает круговую поляризацию, а на выходе формируется интерференционная картина, подобная интерферометру Маха-Цандера, период которой зависит от длины вваренного волокна. Хотя для фильтров с областью свободной дисперсии (ОСД) порядка 10 нм изготовление таких фильтров не представляет особых проблем, фильтры с большей ОСД требуют высокой точности подбора волокна, что сложно осуществить вручную. В качестве фильтров с большой ОСД (>100 нм) традиционно используются сплавные волоконные WDM-ответвители, но при меньших ОСД длины вытяжки (на традиционных установках с газовой горелкой) становится слишком большой, что приводит к сильному утоньшению волокон и, как следствие, к высоким потерям и разрыву волокон.

В данной работе предлагается спектральный фильтр на основе наведенной связи мод в двухсердцевинном волокне с сохранением поляризации. Принцип его работы аналогичен традиционным сплавным WDM-ответвителям, за тем исключением, что вместо сплавления двух волокон происходит утоньшение двухсердцевинного волокна (Рис. 1), что приводит к сближению световедущих сердцевин и появлению наведенной связи между ними. Ввод и вывод излучения обеспечивается с помощью приваренного к одной из сердцевин односердцевинного волокна с сохранением поляризации (PM-волокна). Принципиальным отличием предложенного фильтра является возможность точного подбора его параметров (диаметра и длины) для получения фильтрации требуемых длин волн и вариации ОСД.



Рис. 1. Принципиальная схема фильтра

Утоньшение (или вытяжка) производится с помощью установки для обработки и сварки волокон Fujikura LZM-100, в которой нагрев заготовки производится с помощью CO_2-лазера. Установка позволяет задавать как длину области связи, так и длину, и форму переходных областей, а также степень утоньшения в широких пределах, что дает возможность варьировать параметры фильтра.

Свойства фильтра в предположении что сердцевины одинаковы описываются довольно просто 5. Прошедшую мощность излучения (P_T) для двух длин волн (λ_1, λ_2) можно представить следующим образом:

$$P_{T1} \approx \cos^2(\pi L_C/L_1),\ P_{T2} \approx \cos^2(\pi L_C/L_2),$$

где L_C – длина области связи, а $L_{1,2}$ – характерная длина перекачки для излучения с $\lambda_{1,2}$, соответственно, и зависит от степени утоньшения. Тогда максимальное пропускание для излучения на длине волны λ_1 и максимальное подавление для излучения на λ_2 будет при следующем условии:

$$L_C = mL_1 = (n+1/2)L_2,$$

где m,n – целые. $L_{1,2}$ можно определить экспериментально из зависимости выходной мощности на необходимых длинах волн для разных степеней утоньшения. На Рис. 2(а) представлена зависимость отношения L_2/L_1 от степени утоньшения (для длин волн 930 нм и 1060 нм и двухредцевинного волокна производства НЦВО с диаметром оболочки 135 мкм и расстоянием между сердцевинами 17 мкм), а линиями показано отношение $m/(n+1/2)$ для $m,n<10$. Спектр пропускания фильтра с длиной области связи 16,6 мм и степенью утоньшения 0,52 показан на Рис.2(б). Модуляция в коротковолновой области спектра может быть вызвана неодномодовостью волокна для этих длин волн.

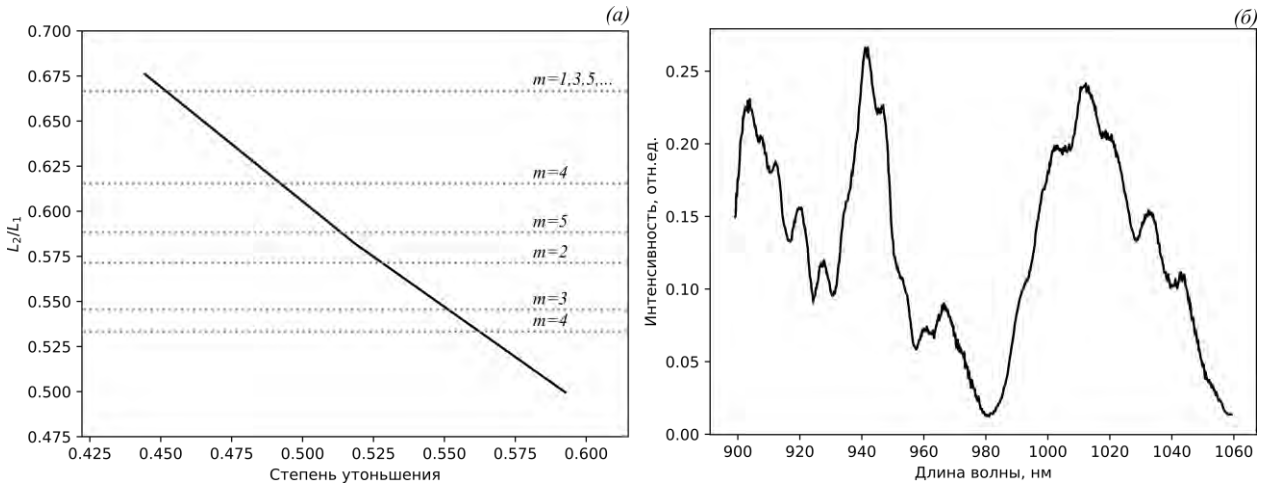


Рис. 2. (а) Зависимость отношения длин перекачки L_2/L_1 от степени утоньшения (сплошная линия) и отношения $m/(n+1/2)$ для $m,n<10$ (пунктирные линии); (б) спектр пропускания фильтра с длиной области связи 16,6 мм и степенью утоньшения 0,52

В точках пересечения на Рис. 2 выполняются условия для пропускания излучения на длине волны λ_1 и подавления для излучения на λ_2.

Минимальные вносимые потери фильтра определяются потерями на сварках с входным и выходным односердцевинными волокнами и составляют 2-3 дБ. Максимальное подавление излучения составляет 15-20 дБ. Потери в фильтре зависят от степени вытяжки и длины области связи, что ограничивает предельные параметры фильтра. Также, при малой степени утоньшения перекачка отсутствует.

Литература

1. *B. Leconte et al, Opt. Lett., 40, 4098-4101 (2015)*
2. *S. Sugavanam et al, Opt. Express, 22, 2839-2844 (2014)*
3. *J. Liu et al, IEEE Photonics Technology Letters, 16(4), 1020–1022 (2004)*
4. *D.S. Kharenko et al, Opt. Lett., 42, 3221-3224 (2017)*
5. *B. Pal, Fiber and Integrated Optics, 22(2), 97–117 (2003)*

СПЕКТРОГРАФЫ С ВЫСОКОЙ ДИСПЕРСИЕЙ ДЛЯ РАДИОФОТОННЫХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ

Муслимов Э.Р. [1,2*], **Нуреев И.И.**[1], **Морозов О.Г.**[1], **Кузнецов А.А.** [1], **Фасхутдинов Л.М.**[1], **Сахабудтинов А.Ж.**[1], **Бакшаев М.К.**[1]

[1] *Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ, г.Казань*

[2] *Aix Marseille Univ., CNRS, CNES, LAM, Marseille, France*

[*] *E-mail:* ermuslimov@kai.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16166

В настоящее время можно говорить о формировании нового класса сенсорных систем – радиофотонных. Основным таких систем являются структуры, строящиеся на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР). Благодаря присущим ВБР преимуществам, таким как малые размеры и вес, невосприимчивость к электромагнитным полям, простота мультиплексирования, определенная природой волокна, они лежат в основе измерения температуры, механических деформаций, показателя преломления как раздельно, так и комплексированно, в силу мультипликативности брэгговского отклика [1].

Общая точность измерений в подобной радиофотонной системе во зависит от разрешения при измерении спектрального отклика ВБР и, как следствие, от оптических характеристик функционального блока, обеспечивающего данное измерение. Такой блок чаще всего представляет собой специализированный спектрограф, обеспечивающий высокое спектральное разрешение в узком спектральном диапазоне. Достижение указанных характеристик при ограниченных габаритах прибора требует увеличения угловой дисперсии спектрографа.

Очевидно, что повышение дисперсии за счет увеличения частоты штрихов решетки или угла падения имеет жесткие технологические и конструктивные ограничения. Альтернативным решением является использование сложных диспергирующих устройств, включающих несколько решеток и/или призм. Наиболее перспективным в контексте решаемой задачи представляется диспергирующее устройство на базе пары объемно-фазовых голограммных решеток. Такое решение позволяет значительно увеличить дисперсию и спектральное разрешения при малых габаритах спектрографа и обеспечить высокое пропускание оптического тракта. При этом конструкция спектрографа отличается простотой, а используемые элементы высокой технологичностью [2].

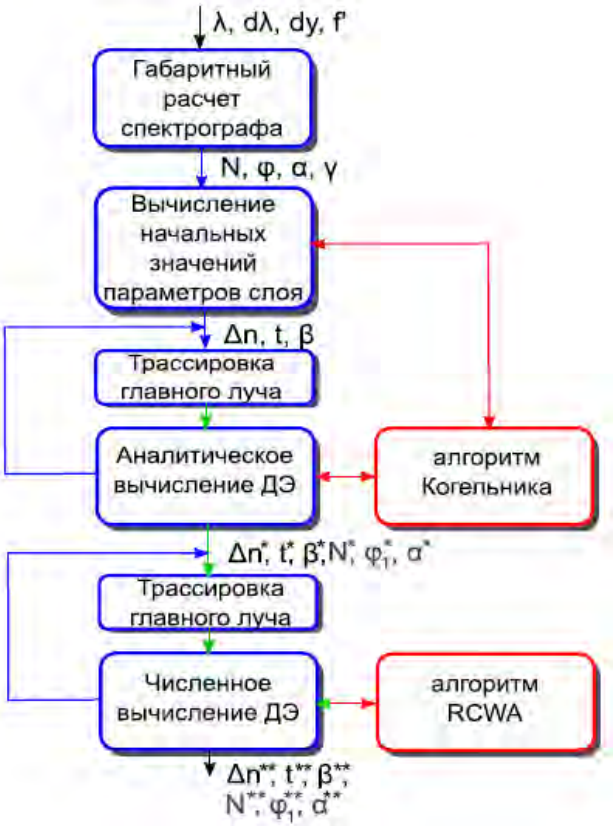


Рис. 1. Алгоритм расчета спектрографа с высокой дисперсией на базе пары объемно-фазовых решеток

Было разработано несколько вариантов схем спектрографов на базе пары объемно-фазовых решеток. В простейшем случае при расчете такой схемы параметры каждой из решеток могут определяться раздельно. В данном случае проще контролировать общую геометрию схемы, однако, как показывает моделирование, не удается обеспечить равномерность пропускания по рабочему спектральному диапазону. Данный нежелательный эффект обусловлен установкой второй решетки в диспергированном пучке. Угол падения излучения на решетку зависит от длины волны, что усиливает спектральную селективность диспергирующего узла.

Был разработан усовершенствованный вариант методики расчета, использующий трассировку главного луча при циклическом вычислении ДЭ решеток и оптимизации их параметров. Поиск в широкой области параметров выполняется с использованием соотношений теории Когельника [3], определение точных значений – с помощью метода строгого анализа связанных волн (RCWA) [4]. Соответствующий алгоритм расчета [5] представлен на Рисунке 1.

С использованием разработанных методик расчета рассчитаны схемы спектрографов с высокой дисперсией для ближнего инфракрасного (БИК) диапазона 830-870 нм. Использование простого

варианта методики расчета позволяет рассчитать схему с высоким значением максимума пропускания и обеспечить отклонение главного луча парой решеток на 180°, что позволяет упростить конструкцию прибора. Как показывает компьютерное моделирование, спектрограф может обеспечить спектральный предел разрешения от 0,011 до 0,018 нм при числовой апертуре на входе 0,14. При этом максимальная дифракционная эффективность (ДЭ) диспергирующего узла может достигать 74,8%. С помощью усовершенствованной методики разработан вариант схемы, отличающийся равномерной ДЭ диспергирующего узла. Моделирование продемонстрировало увеличение минимальной ДЭ в усовершенствованной схеме до 42,9 % при сохранении спектрального предела разрешения в диапазоне 0,010 – 0,017 нм. Для уменьшения чувствительности исходной схемы к разъюстировкам предложен вариант с соосным расположением элементов на основе пары гризм, устанавливаемых друг за другом. Показано, что в полученной схеме возможно достичь спектрального предела разрешения 0,011-0,020 нм при ДЭ диспергирующего узла, изменяющейся в диапазоне от 15,7% до 52,8% [5].

На базе первой из разработанных оптических схем создан лабораторный образец спектрографа с волоконным входом (Рисунок 2). Экспериментально подтверждена высокая дисперсия, продемонстрировано сравнительно высокое спектральное разрешение. Результаты измерений представлены в Таблице 1 (где * - данные полученные с помощью интерполяции).

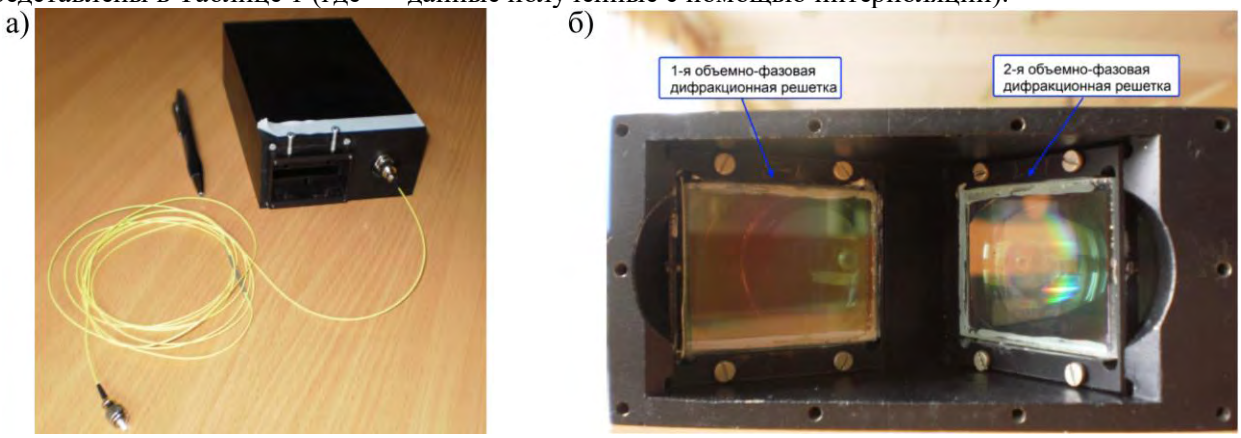


Рис. 2. Лабораторный прототип спектрографа с высокой дисперсией: а – общий вид, б – диспергирующий узел

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований

Длина волны, нм	**Спектр. предел разрешение, нм**	**Длина волны, нм**	**ДЭ 1-й решетки,%**	**ДЭ 2-й решетки,%**
838,0	0,030	823,0	55	21*
844,6	0,036	830,0	52*	39
847,6	0,029	842,0	48	47*
859,5	0,030	852,0	43*	38
869,0	0,025	860,0	37	20

Использование разработанного прототипа в составе радиофотонных систем измерения давления и температуры, разработанных на каф. РФМТ КНИТУ-КАИ и в НИИ ПРЭФЖС, продемонстрировало возможность повышения метрологических характеристик и снижения стоимости.

Литература

1. *Сахабутдинов А.Ж., Дис. д-ра техн. наук: 05.11.07. – Казань, КНИТУ-КАИ:2018*
2. *Nureev I.I. et al., Proc. SPIE 9807, 98070Y (2016)*
3. *Kogelnic H. Bell Syst. Tech. J. 48, 2909 (1969)*
4. *Moharam M. G. et al., J. Opt. Soc. Am. A. 12, 1068(1995)*
5. *Муслимов Э.Р., Дис. д-ра техн. наук: 05.11.07. – Казань, КНИТУ-КАИ:2019*

ДАТЧИК УРОВНЯ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ИЗ ДВУХ ВОЛОКОННЫХ ВСТАВОК С ТОНКОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ

Иванов О.В.[1,2,3]

[1] *Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск*
[2] *Ульяновский государственный университет, Ульяновск*
[3] *Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск*
E-mail: olegivvit@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16167

Волоконно-оптические датчики уровня жидкости представляют значение для применений в химическом производстве, в топливных системах и других областях. Волоконно-оптические датчики имеют преимущества по сравнению с электрическими и акустическими датчиками в связи с тем, что они могут работать в средах с сильными электромагнитными полями, в химически едких и взрывоопасных средах. В последние годы были представлены различные типы волоконно-оптических датчиков уровня жидкости: интерферометрические датчики, работающие в режиме отражения или пропускания, со вставками многомодовых волокон [1], волокон без сердцевины [2] или волокон с тонкой сердцевиной [3], включающие наклонные брэгговские решетки [4], утолщения [5,6] и др. [7].

В данной работе предложен волоконно-оптический датчик уровня жидкости на основе интерферометра, состоящего из двух коротких вставок волокна с тонкой сердцевиной и отрезка стандартного волокна между ними. Вставки волокна с малой сердцевиной возбуждают оболочечные моды и обеспечивают обмен энергией между различными волоконными модами, а отрезок волокна является базой интерферометра, при прохождении которого фаза мод оболочки изменяется при погружении части волокна в жидкость. Изменение уровня жидкости приводит к сдвигу спектральных пиков интерферометра.

Структура интерферометра, состоящего из двух коротких вставок волокна с тонкой сердцевиной, и ход лучей в ней показаны на Рис. 1. Длина вставок составляет от долей миллиметра до нескольких миллиметров, а длина базы интерферометра – от сантиметра до десятков сантиметров. Вставка волокна с тонкой сердцевиной имеет профиль показателя преломления существенно отличный от профиля стандартного волокна, поэтому распределения полей мод также сильно различаются, и на стыке этих двух волокон происходит передача энергии моды сердцевины одного волокна в моды оболочки второго волокна.

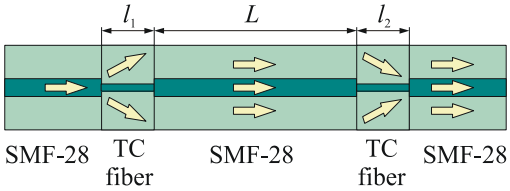


Рис. 1. Структура волоконного интерферометра и ход лучей в ней

На рисунке 2 показан спектр пропускания интерферометра со вставками волокна SM600 длиной 0.8 мм для длины базы, выполненной из отрезка стандартного волокна SMF-28 длиной 155 мм, в диапазоне длин волн 1400–1625 нм. Спектр пропускания волоконного интерферометра представляет собой осциллирующую кривую с периодом модуляции в несколько нанометров и амплитудой до 40%. Видно, что период осцилляций увеличивается с длиной волны, а их амплитуда не постоянна. В поведении кривой наблюдаются биения, возникающие, по-видимому, в результате многомодовой интерференции.

Положение пиков интерференционной спектральной кривой обусловлено фазовыми задержками, полученными оболочечными модами при прохождении длины интерферометра. Эти задержки определяются в том числе показателем преломления внешней среды. Поэтому при погружении волокна в жидкость, спектры пропускания изменяются, что позволяет использовать предложенный интерферометр в качестве датчика уровня жидкости. Для исследования чувствительности структуры к погружению в жидкость была использована установка, показанная на Рис. 3, в которой волокно закреплено на подвижной каретке, которая может перемещаться вдоль вертикальной оси и опускать волокно на фиксированную глубину.

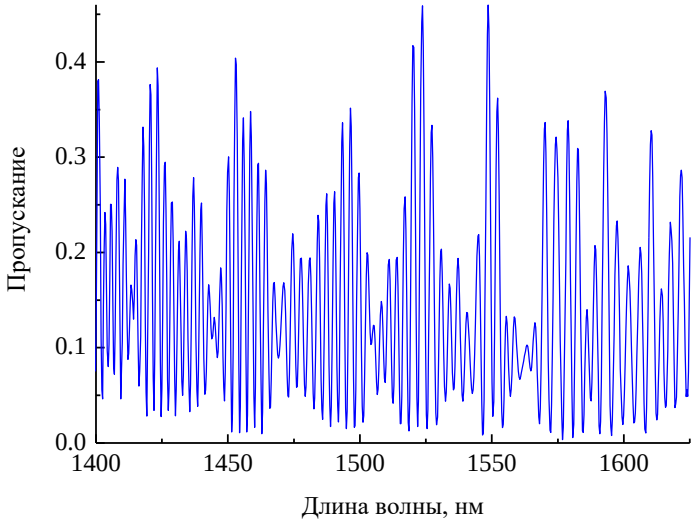


Рис. 2. Спектр пропускания интерферометра с базой 155 мм



Рис. 3. Фотография установки для погружения волокна в жидкость

Смещение одного из пиков в спектре пропускания на длине волны 1530 нм при погружении волокна на глубину от 0 до 13 см показано на Рис. 4а. Пик смещается в коротковолновую область на величину около 1.5 нм, при этом также происходит изменение амплитуды. Аналогичная зависимость наблюдается для соседних пиков, что показано на Рис. 4б для четырех пиков. Сдвиг длины волны зависит почти линейно от глубины погружения, что может быть использовано при создании датчика уровня жидкости.

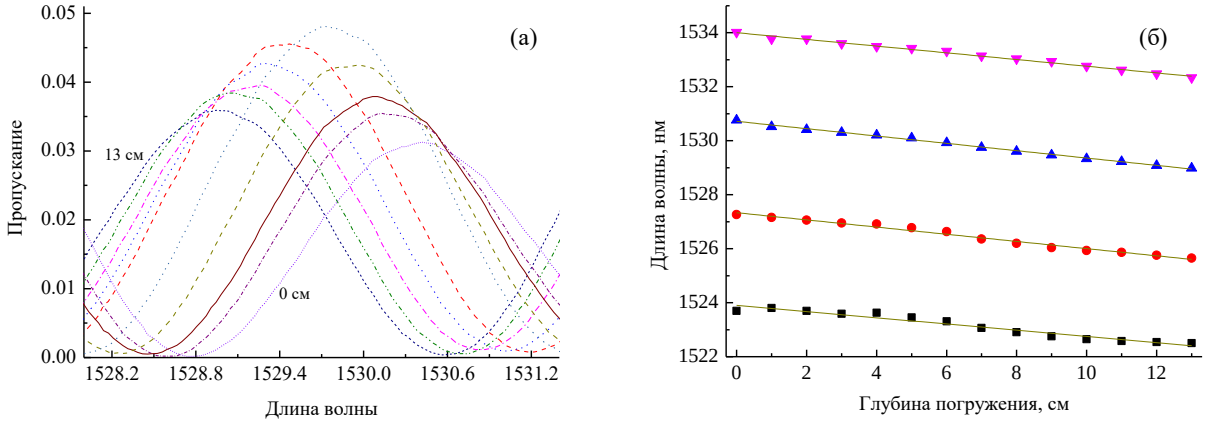


Рис. 4. Смещение спектра пропускания при погружении волокна: спектр пропускания в районе одного из пиков (а) и длины волны четырех пиков (б)

Литература

1. *Dong X., Du H., Luo Zh., et al., Jpn. J. Appl. Phys. 57, 092501 (2018)*
2. *Antonio-Lopez J.E., Sanchez-Mondragon J.J., LiKamWa P., et al, Opt. Lett. 17, 3425-3427 (2011)*
3. *Ben X.U., Jian-Qing L.I., Yi L.I., et al, Chin. Phys. Lett. 29, 104209 (2012)*
4. *Gu B, Qi W, Zhou Y, et al, Opt. Express 22, 11834-11839 (2014)*
5. *Tong Zh., Wang X., Zhang W., et al, Laser Phys. 28, 045102 (2018)*
6. *Wen X., Ning T., Li C., et al, Appl. Opt. 53, 71-75 (2014)*
7. *Nur Hidayah S., Hanim A.R, Hazura H., et al, J. Telecomm. Electron. Comp. Eng. 10, 23-27 (2018)*

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ РЕФЛЕКТОГРАММ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Шевцов Д.И.[1], Пономарев Р.С.[1], Барков Ф.Л.[2], Бочкова С.Д.[2,3], Владимирова Д.Б.[3], Константинов Ю.А.[2*]

[1] Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь
[2] Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Пермь
[3] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь
[*] E-mail: yuri.al.konstantinov@ro.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16168

Современное производство интегрально-оптических схем требует создания недеструктивного модифицированного метода высокоразрешающего распределенного рефлектометрического исследования фундаментальных процессов, протекающих в канальных волноводах различных типов, позволяющего получать объективные данные о флуктуациях показателя преломления и температурах в различных точках волновода, пригодные как для использования в качестве исходных для моделирования, так и для верификации иных моделей.

Таким образом, ставится задача – создание программно-аппаратного комплекса получения и обработки оптических рефлектограмм в частотной области. Макет, на котором проводилось исследование (рис. 1), состоит из стабилизированного узкополосного перестраивающегося с частотой порядка 10 Гц источника излучения, делителей, исследуемого образца, аналого-цифрового преобразователя и блока программной обработки. Подобные подходы достаточно хорошо описаны в литературе [4-6], данный стенд создавался с нуля для гибкой вариации параметров измерений. Исследуемый образец – интегрально-оптическая схема с отражателем внутри [1].

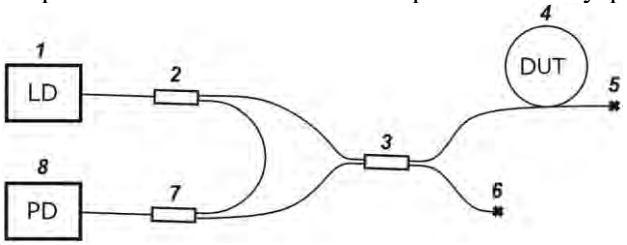


Рис.1 Макет испытательного стенда. 1 – перестраиваемый узкополосный источник излучения; 2,3,7 – делители, 4 – исследуемый образец; 5 – торцы волокна; 8 – фотоприемник

Опыт показал, что после первичных преобразований (в данном случае – преобразования Фурье) сигнал представляется достаточно защумленным. Было сделано предположение, что отражения, получаемые от элементов исследуемого образца, описываются известной функцией, зависящей от особенностей срабатывания фотодетектора, характеристик волновода и других технических и физических параметров, в то время как шумовая флуктуация формируется на стадии оцифровки и обработки сигнала. Для того, чтобы отделить полезный сигнал от шумовой компоненты, таким образом, необходима та самая функция, с которой требуется сличение полезного сигнала. На основе визуального сопоставления подобных всплесков, представленных в научной литературе [2], был выбран вейвлет Добеши [3]. Вейвлет Добеши (*db*) относится к семейству вейвлетов с компактным носителем и наибольшим числом нулевых моментов, что делает этот вейвлет применимым для анализа сигналов различной природы. Известно, что с возрастанием числа нулевых моментов возрастает гладкость вейвлета. Ортогональные вейвлеты Добеши с компактными носителями – это единственное ортогональное семейство базисных вейвлет-функций, которое имеет минимальный размер носителя при заданном числе нулевых моментов. Однако вейвлеты Добеши несимметричны относительно нуля и не имеют аналитической формы, коэффициенты этого вейвлет-преобразования рассчитываются итерационно. Именно набор весовых коэффициентов определяет разновидность вейвлет-преобразования Добеши и является его основной конечной импульсной характеристикой. Преобразование масштаба (скейлинговая функция) и непосредственно сам вейвлет Добеши определяются следующими соотношениями:

$$\varphi(t) = \sqrt{2}\sum_{k=1}^{n} h_k \varphi(2t-k),$$

$$\psi(t) = \sqrt{2}\sum_{k=1}^{n} g_k \varphi(2t-k).$$

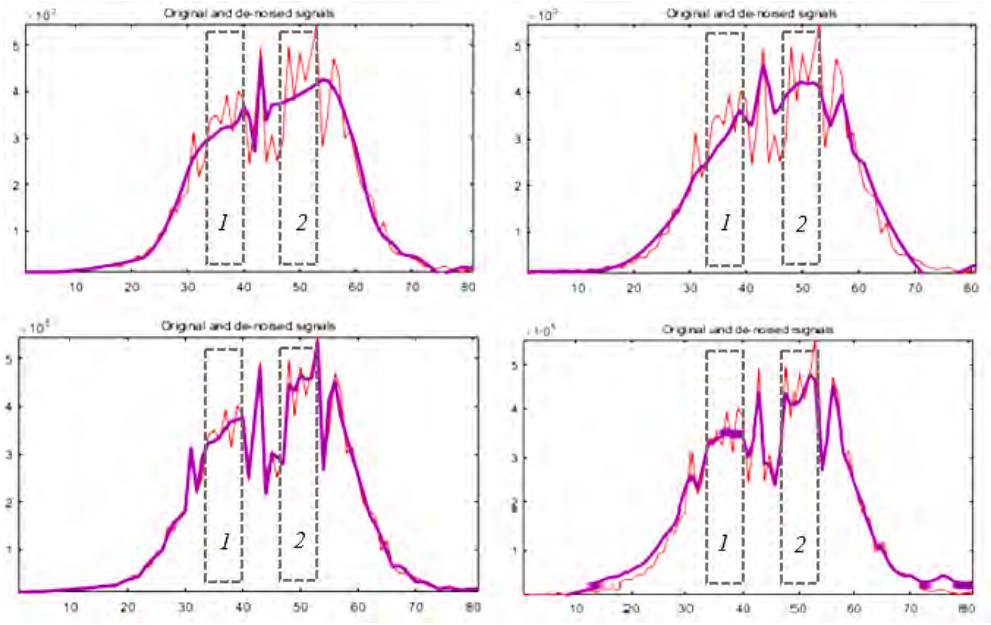


Рис.2 Полученный после БПФ (изрезанный) и отфильтрованный (сглаженный) сигналы (4 вариации)

В ходе обработки сигналов данным вейвлетом было установлено, что всплески на образце, относящиеся к шумовой флуктуации, действительно легко удаляются фильтрацией. Это видно по областям 1 и 2 на всех четырех графиках. Участки, не охваченные областями 1 и 2, менее подвержены изменению. При гибких настройках фильтра можно подавить «входные» и «выходные» пики (левый-верхний график), отвечающие за стыковку интегрально-оптической схемы с оптическим волокном, гипертрофировав отражения внутри чипа. Несмотря на то, что проверка показаний стенда на аттестованном OFDR не выявила столь крупного отражения в центре интегрально-оптической схемы, авторы склонны предполагать, что некоторый дефект все же имеет место и отчетливо просматривается только после вейвлет-обработки сигнала. Аномально нарастающая по длине оптическая мощность может свидетельствовать об особенной геометрии канала волновода. Более основательные выводы можно будет сделать только после набора статистики по данному методу.

Авторы выражают благодарность инженеру лаборатории фотоники ПФИЦ УрО РАН Клоду Д. за неоценимую помощь в проведении экспериментов и плодотворные дискуссии. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-48-590018 р_а.

Литература

1. *L. Thylén, L. Wosinski / Integrated photonics in the 21st century / Photonics Research / Vol. 2, Issue 2, pp. 75-81 (2014) https://doi.org/10.1364/PRJ.2.000075*
2. *Пономарев Р.С, Шевцов Д.И. / Опыт применения оптической рефлектометрии в производстве интегрально-оптических схем / Сб. трудов Всероссийской конференции «Оптическая рефлектометрия-2018», г. Пермь, с. 33-45*
3. *I. Daubechies / Ten Lectures on Wavelets / https://doi.org/10.1137/1.9781611970104*
4. *K. Yüksel, M.Wuilpart, V. Moeyaert, P.Megret / Optical frequency domain reflectometry: A review (INVITED) / 10.1109/ICTON.2009.5185111 / ICTON 2009: 11th International Conference on Transparent Optical Networks*
5. *B.J. Soller, D.K. Gifford, M.S. Wolfe, M.E. Froggatt / High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies / Optics Express Vol. 13, Issue 2, pp. 666-674 (2005) https://doi.org/10.1364/OPEX.13.000666*
6. *Барков Ф.Л., Константинов Ю.А., Бочкова С.Д., Смирнов А.С., Бурдин В.В., Кривошеев А.И., Носова Е.А., Сметанников О.Ю., "Моделирование метода поляризационной оптической рефлектометрии в частотной области анизотропных волоконных световодов, подверженных осевому кручению", Квантовая электроника, 49:5 (2019), 514–517 [Quantum Electron., 49:5 (2019), 514–517]*

ЛОКАЛИЗАЦИЯ «СОБЫТИЙ БЕЗ ОТРАЖЕНИЯ» НА ХАРАКТЕРИСТИКАХ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

Бурдин А.В.[1,2,3*], Бурдин В.А.[2], Дельмухаметов О.Р.[4], Евтушенко А.С.[2], Желудков М.А.[3], Зайцева Е.С.[2]

[1] ПАО ЦНПО "КАСКАД", г. Москва
[2] Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), г. Самара
[3] ООО "ЛинкИн Тех", г. Уфа
[4] Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ), г. Уфа
[*]E-mail: bourdine@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16169

На сегодняшний день известно достаточно большое число публикаций, посвященных разработке вспомогательных методов анализа характеристик обратного рассеяния с применением известных подходов теории цифровой обработки сигнала. В этом смысле наиболее популярным является использование элементов вейвлет-анализа – достаточно давно известного, популярного и эффективного инструмента для обработки временных рядов сигналов систем разного назначения [1]. В оптической рефлектометрии данный подход активно используется для подавления шума характеристики обратного рассеяния, а также для решения задачи автоматизированной локализации обрыва (конца линии) или неоднородностей с Френелевским отражением при малом динамическом диапазоне OTDR [2 – 6], в отдельных случаях – регистрации «событий без отражения» при показаниях вносимых потерь OTDR от 0.05 дБ и выше [3, 6 – 8]. Однако при этом не снимается проблема локализации качественных сварных соединений в условиях малого разброса коэффициентов обратного рассеяния соединенных оптических волокон, что нередко приводит к трудоемкому поиску такой неоднородности даже в ручном режиме непосредственно измерителем, а для ряда случаев – вообще невозможности ее локализации, обусловленной пределами разрешающей способности по уровню мощности потока обратного рассеяния самого средства измерения, который, для подавляющего большинства типовых коммерческих OTDR составляет 0.02 дБ.

В ранее опубликованной работе [9] была продемонстрирована эффективность непрерывного вейвлет анализа характеристики обратного рассеяния с применением вейвлета Хаара, который, согласно полученным данным проведенной серии экспериментальных исследований, показал возможность идентификации достаточно «малогабаритных» «событий без отражения» с показаниями OTDR в диапазоне 0.02…0.03 дБ, фактически совпадающими с собственной погрешностью самого средства измерения. Здесь же было предложено предварительно удалять Френелевское отражение на ближнем и дальнем конце, шумы на дальнем конце и LSA-тренд, после чего уже проводить непосредственно само непрерывное вейвлет-преобразование рефлектограммы. По результатам последнего осуществлялось построение полигона нормированных диаграмм пространственного распределения абсолютных значений коэффициентов вейвлета Хаара для разного скейлинга из диапазона 150…2500. При этом полагалось, что искомое «событие без отражения» зарегистрировано, если положение главного максимума данной пространственной диаграммы соответствует локации стыка, а разность между нормированными значениями главного максимума и прочих периферийных пиков диаграммы составляет не менее 0.4.

В данной работе представлены результаты исследования погрешности локализации объекта по «началу», «середине» и «конце» события (рис. 1), соответствующих сварным соединениям с разными показаниями OTDR из диапазона 0.02…0.55 дБ с помощью вейвлета Хаара для всех дискретных значений коэффициентов растяжения, выбранных из диапазона от минимального значения, при котором положение главного максимума совпадает с локаций «события», до максимально возможного, когда огибающая главного максимума позволяет выделить область местоположения исследуемой неоднородности на фрагменте рефлектограммы. На рис. 2 представлены сводные диаграммы результатов оценки абсолютной погрешности локализации сварного соединения с показаниями OTDR +0.032 дБ с помощью вейвлета Хаара в диапазоне выбора коэффициента растяжения 400…2500.

Анализ и сопоставление полученных результатов позволяет рекомендовать использовать в качестве опорного критерия локализации стыка с помощью вейвлета непосредственно «центр» этого «события». Для данного параметра характерна уменьшенная погрешность. Кроме того, при анализе

рефлектограмм с «малогабаритными» событиями, границы последних «замываются» из-за ограничений разрешающей способности OTDR: ступенька, в виде которой отображается сварное соединение на характеристикие обратного рассеяния, «растягивается», в то время как положение ее «центра» остается практически неизменным.

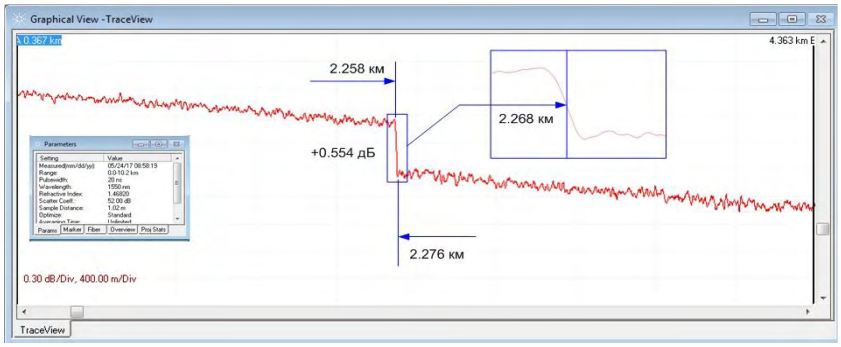


Рис. 1. Локализация начала, середины и конца искаженного, за счет неоднородности, участка рефлектограммы линии: показания OTDR +0.554, длина волны 1550 нм, длительность зондирующего импульса 20 нс

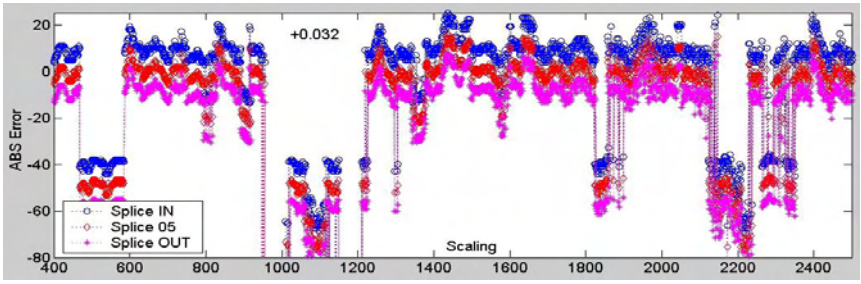


Рис. 2. Сводные диаграммы результатов оценки абсолютной погрешности локализации сварного соединения с показаниями OTDR +0.032 дБ в диапазоне выбора коэффициента растяжения вейвлета Хаара 400…2500

При переходе к анализу событий, для которых показания OTDR практически соответствуют собственной погрешности самого средства измерения, в отдельных случаях погрешность локализации может достигать неприемлемо высоких значений – вплоть до 40 м и более. Однако и здесь, даже для стыка +0.021 дБ удается подобрать соответствующие области скейлинга, в пределах которых отклонение не превышает 2 м. Это позволило выявить опорные универсальные значения коэффициентов растяжения для вейвлета Хаара, при которых обеспечивается абсолютная погрешность локализации «объекта» рефлектограммы, соответствующего сварному соединению с показаниями OTDR от 0.05 дБ и выше, не более 2.5 м.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках проекта №. 1621ГС1/24340 (код 0024340).

Литература

1. *Stark H.-G., Wavelets and signal processing. Berlin: Springer (2005)*
2. *Gu Xia, et al., Proc. of IEEE Conf. of Time-Frequency and Time-Scale Analysis, 353 – 356 (1994)*
3. *Chaoju H., et al., 2nd IEEE International Conf. on Intell. Human-Machine Syst. and Cyber., 216 – 219 (2010)*
4. *Wen-Gang H., et al., Proc. of IEEE Symposium on Photonics and Optoelectronics, 12948029-1 – 12948029 -4 (2012)*
5. *Манонина И.В., T-Comm 9, 54 – 59 (2014)*
6. *Acar H., Advanced Research in Electrical & Electronics Systems 1(1), 1 – 5 (2016)*
7. *Иванов А.Б. и др., Спецтехника и связь 2-3, 52 – 57 (2010)*
8. *Zhang X., et al., 4th IEEE International Congress on Image and Signal Processing, 2275 – 2279 (2011)*
9. *Bourdine A.V., et al., Proc. of SPIE 10774, 10774-1H-01 – 10774-1H-08 (2018)*

СВЕТОВОДЫ И СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЖГУТОВ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНЫ И НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Зубов Б.В.[1], Даниелян Г.Л.[1], Чевокин В.К.[1], Подвязников В.А.[1], Шилов И.П.[2], Кочмарев Л.П.[2], Савосин С.В.[2]

[1] Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва
[2] ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино
[*] E-mail: gldan@yandex.ru, gldan@nsc.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16170

Создание волоконных световодов различного типа для лазерных систем, ориентированных на применение в области биомедицины и в научных исследованиях привело к развитию новых направлений. Наибольшее место на рынке завоевали устройства и сенсоры с применением многоканальных световодов и жгутов [1].

В отделе лазерной физики ЦЕНИ ИОФ РАН, разработаны различные устройства с применением многоканальных волоконно-оптических жгутов (МВОЖ). С появлением мощных светодиодов (PLED) и при использовании асферической оптики и дихроичных зеркал стал возможным эффективный ввод излучения в оптические волокна и МВОЖ. Осветитель, разработанный в ИОФ РАН для биомедицинских исследований и терапии, обеспечивает ввод трех длин волн в световод [2]. Другое направление – создание осветителей на основе сочетания лазеров и МВОЖ. На рис.2 представлен созданный лазерный аппарат с суммарной мощностью более 200 мВт и тремя длинами волн, сведёнными в один оптоволоконный выход с апертурным диаметром 200мкм.





Рис. 1. Аппарат на основе PLED с МВОЖ на 3 канала Рис.2 Лазерный аппарат RGB/445/520/650nm(P_{Σ}=2W)

Разработан эффективный метод оценки основных характеристик расчёта многоканальных жгутов (МВОЖ), использующий простую модель аппроксимации излучающих (И) и приемных(П) апертур каналов многомодовых волокон заданным количеством одиночных световых лучей заполняющих заданную произвольно числовую апертуру волокон. Программа MFOBv.3.3 для оценки интенсивности передачи излучения I_0[%] от И каналов/волокон к П каналам /волокнам как функция дистанции Z - расстояния от торца МВОЖ до зеркальной поверхности может моделировать любые гексагональные укладки с количеством волокон от 2х до 631[3].

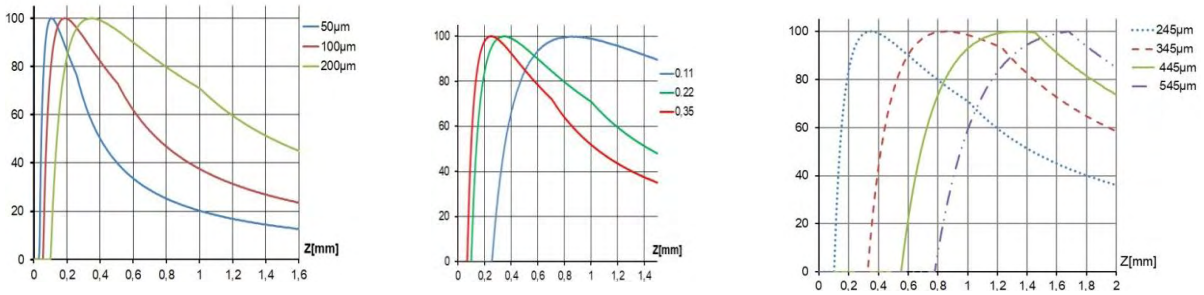


Рис. 3а,б,с Влияние параметров волокон на характеристику МВОЖ 1И+6П зонда рефлексного отражения Io[%] от основных параметров волокон: а) влияние диаметра сердцевины волокон; б) влияние утолщения оболочки волокна для МВОЖ1И+6П с сердцевиной 200мкм; с) влияние числовой апертуры NA на характеристику Io[%] для МВОЖ 1И+6П волокон 200/245 мкм

Рефлексные зонды типа МВОЖ 1И+6П , МВОЖ 7И+12П с использованием металлопокрытий многомодовых волокон (разработка НЦВО РАН) были успешно применены для разработанного совместно с ФИРЭ РАН устройства для экспресс-исследований спектрально-люминесцентных свойств металлокомплексов порфиринов (рис.4) [4,5].

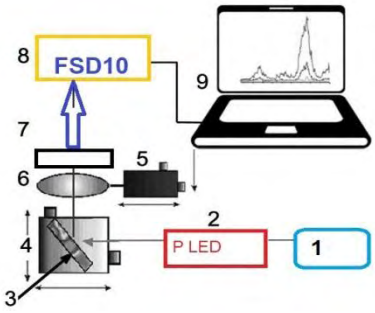
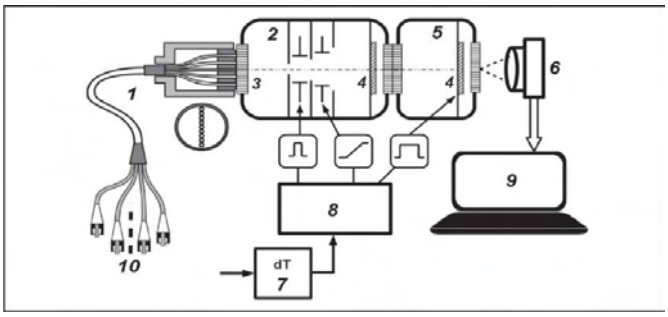


Рис. 4 Схема устройства для экспресс оценки флуоресцентных характеристик металлокомплексов порфиринов. 1-блок управления PLED 390nm, 2-PLED (300mW), 3- образец биоткани, 4- сканирующая платформа, 5- микрподвижка наведения фокуса объектива, 6 –объектив с оптическим фильтром, 7- волоконный зонд, 8- мини спектрометр с волоконным входом, 9- ПК с системой программного обеспечения FSDSoft v. 6/3

Обнаружено, что высокий уровень флюоресценции на длинах волн 500-1100нм (при возбуждении длиной волны 390-400нм) обеспечивается при концентрациях в диапазоне 10^{-4} – 10^{-6} М и таким образом показана возможность диагностики клеток, накапливающих металлокомплексы порфиринов (на основе иттербия, платины).

Применение МВОЖ для физических исследований открывает совершенно новый симбиоз сенсорных устройств. Эффективным примером применения является сенсорная камера, разработанная в отделе лазерной физики ЦЕНИ ИОФ РАН [5].



Предложен метод фото хронографической регистрации импульсного излучения объекта одновременно в нескольких точках, оптическими волокнами. В системе электронно-оптическая камера с линейной разверткой соединена и МВОЖ оптоволоконного жгута из девяти волокон. Разрешение по времени составляет 250 пс, а по торцу фотокатода - до 8-10 мм.

Рис. 5 Схема высокоскоростной камеры с МВОЖ9:1-узел стыковки камеры с МВОЖ9, 2-ЭОП, 3-волоконный диск фотокатода, 4- микроканальная пластина, 5- усилитель яркости изображения, 6-камера экспресс оценки , 7-линия задержки запуска, 8- импульсные генераторы синхронизации, 9-ПК с программой регистрации изображения , 10 – 9 оптических коннекторов свободных концов МВОЖ9

Полученные результаты показали, что система удобна в эксплуатации и позволяет одновременно наблюдать динамику развития процессов излучения в различных точках исследуемого объекта (например процесса возникновения и генерации излучения на п/п структурах и в кристаллах), а также использовать один или несколько волоконных каналов для спектральных измерений.

Работа выполнена по теме 2019г. ИОФ РАН «Применение лазеров в физических экспериментах» (п.8. Лазерные технологии дистанционной диагностики физических параметров; п.9 Лазерная сенсорика).

Литература

1. *Danielyan G. Multichannel Fiber Optic Bundles and Sensors for Biomedical Applications- Proc. SPIE v.5566, pp198-203(2002)*
2. *Зубов Б.В., Пашинин А.Д. ,Жидкова М.Б. Описание полезной модели к патенту RU № 38565U1 Устройство для световой терапии, БИ (2004)*
3. *Явелов И.С., Каплунов С.М., Даниелян Г.Л. ,книга «Волоконно-оптические измерительные системы», М-Ижевск, 304с., с35-40 (2011)*
4. *Шилов И.П, Кочмарев Л.Ю., Даниелян Г.Л., Зубов Б.В., Устройство для экспресс-исследований спектрально-люминесцентных свойств металлокомплексов порфиринов, ж. Радиоэлектроника ,(2019)*
5. *Semjonov S., Bogatyrev V., Malinin A., Hermetically metal coated specialty optical fibers, , Proc. of SPIE Vol. 7839, 783912 , https://doi.org/10.1117/12.867097*
6. *Баграмов В.Г., Даниелян Г.Л., Морозова Е.Э., Насибов А.С.,Подвязников В.А.,Сладкова Е.С., Тасмагулов И.Д. Чевокин В.К., Высокоскоростная многоточечная фото хронографическая система, Инженерная физика,2 (2019)*

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ СЕНСОР КОНТРОЛЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ В СТЕНДАХ ГАЗОТУРБИННЫХ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ

Даниелян Г.Л.[1*], Иванов С.В.[2], Молокович И.Н.[2], Стешаков Е.Г.[2], Иванов Н.А.[1], Вихрова О.В.[1]

[1] Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва
[2] ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, г. Москва
[*] E-mail: gldan@yandex.ru, gldan@nsc.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16171

Для исследования характеристик авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) последние годы ведётся активный поиск различных сенсоров способных определять параметры и режимы работы, причём все большее внимание привлекают разработки на основе волоконных сенсоров, отличающиеся высокой степенью защиты от электромагнитных полей и взрывозащищённостью[1-3].

В ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова с 2016 года проводятся исследования и разработка простых и надёжных волоконно-оптических сенсоров. Основная цель разработки создание сенсоров с относительно низкой себестоимостью для многоточёчного контроля положения лопаток и их временных параметров с реально заданным режимом эксплуатации.

Основу сенсора составляют передающее излучение светодиода и принимающее отражённый оптический сигнал пара многомодовых кварцевых волокон. Крайне актуальным является правильный выбор параметров и основных характеристик волокон. Для работы в режиме температур до $+750^0$ С и при наличии относительно химически активных паров газо-масляной смеси выбраны кварцевые многомодовые волокна с металлическим защитным покрытием (разработанные в НЦВО РАН) [4]. Однако алюминиевое покрытие не может находиться в температурном поле свыше $+400^0$ С и последний участок волокна без алюминиевого покрытия защищен специально разработанным керамо-клеевым составом.

Оптимизация оптического сигнала и выбор типа волокна проведен на основе расчета влияния основных параметров на расчетную форму зависимости относительной интенсивности света I_0 [%]. Применение для моделирования разработанной простой программы MFOB v/3.2 позволяет без проведения экспериментов определить характер основной зависимости сенсора рефлексного типа[4].

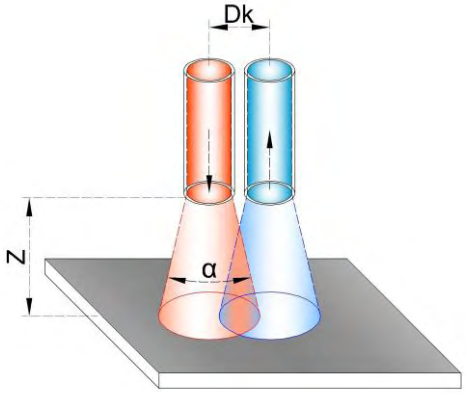


Рис.1 Упрощенная модель сенсора для программы интенсивности эффективного светового потока

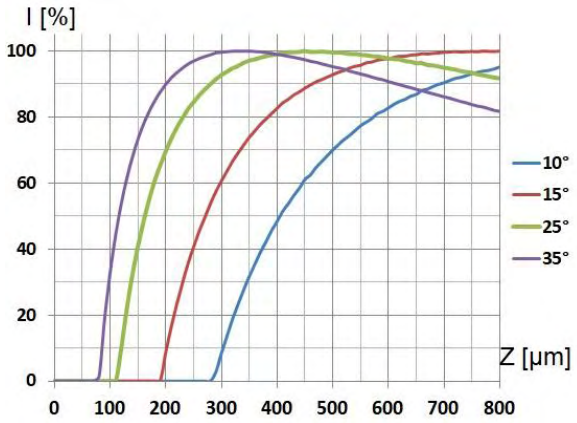


Рис.2 Характеристика зависимости I_0 от дистанции Z (волокно ОКМ400/440/520М, Dk=450мкм,$\alpha=10^0$ -35^0) 25

Основной оптимальной характеристикой (по диапазону сочетанию крутизны характеристики и ее значения по Z) являются характеристики рефлексного отражения с апертурами 25и 35 градусов (числовые апертуры NA=0.22-0.3). Для выбранной конфигурации, согласно расчетным характеристикам, определен оптимальный диапазон Z_0 = 150- 350 мкм установки начального зазора между торцом сенсора и торцом вращающихся турбинных лопаток.

Разработанная в ЦИАМ им. П.И. Баранова конструкция сенсора и контрольно-измерительной аппаратуры обеспечила возможность измерения радиальных зазоров в компрессоре высокого давления при испытаниях в рабочих условиях, советующих работе в составе ГТД (см. рис.3,4).

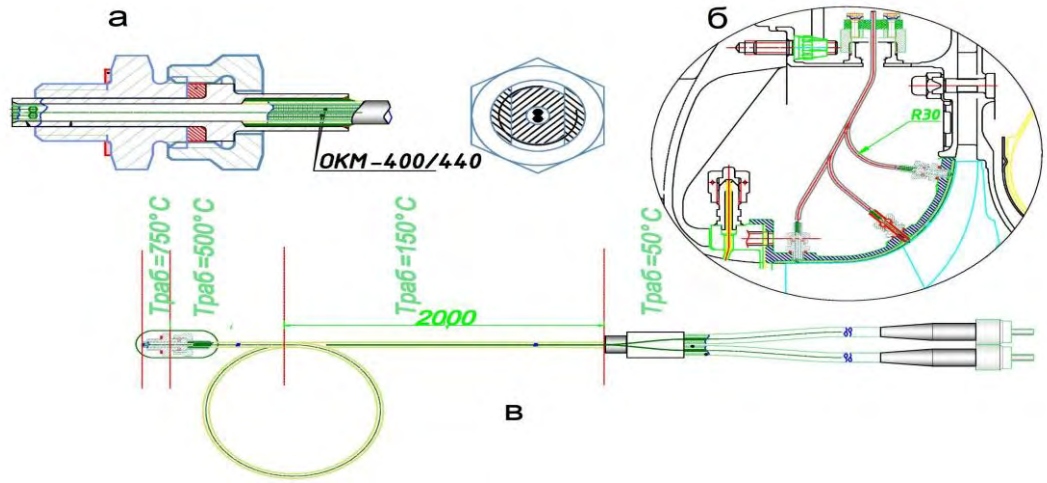
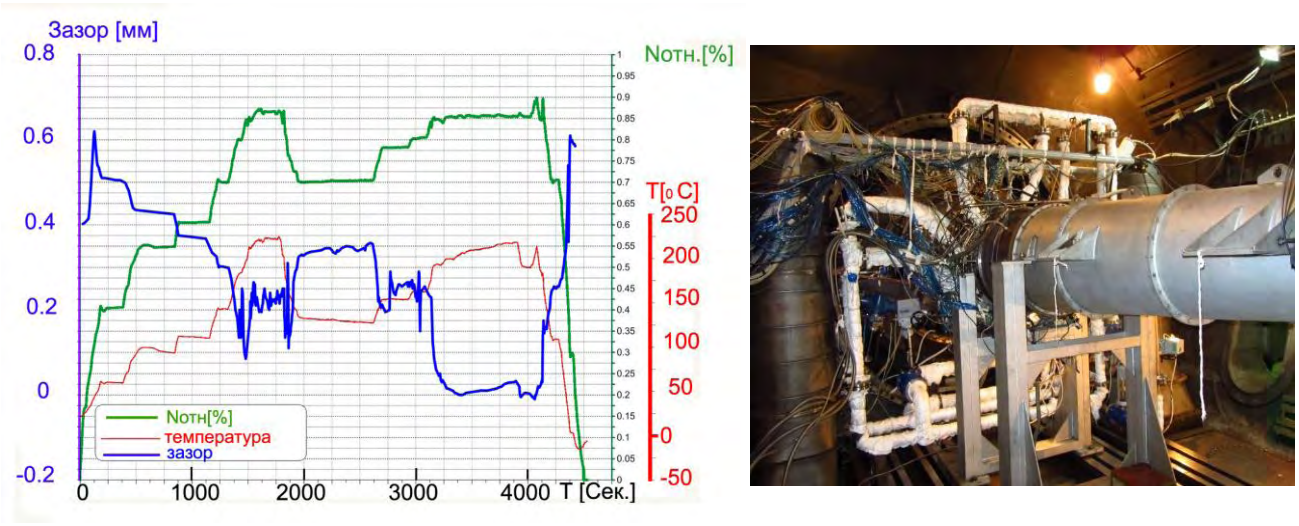


Рис.3 Конструкция сенсора: а) сенсорная головка из жаропрочной стали с металлизированными волокнами, б) - пример установки системы сенсоров на герметизирующий кожух стендового компрессора ГТД, в) -общий вид сенсора с распределёнными зонами рабочей температуры среды



а) **б)**

Рис.4 Экспериментальные результаты измерений с использование оптоволоконных датчиков. а) график изменения радиального зазора во второй ступени компрессора высокого давления при испытаниях на стенде ЦИАМ; б) фотография компрессора ГТД на стенде при испытаниях

Литература

1. *García et all., Review Optical Fiber Sensors for Aircraft Structural Health Monitoring, E-journal Sensor , v.15,(2015), http//doi.org:10.3390/s150715494*
2. *Honglei Guo et all. , Review Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Air Platforms¸ E-J. Sensor, v.11, 3687-3705(2011) , doi:10.3390/s110403687*
3. *У.В. Бояркина, А.А. Грецков, С.А. Данилин, Е.Е. Дудкина, Комбинированные преобразователи для мониторинга параметров крутильных колебаний лопаток турбогенераторов, Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 20, № 4, с111-116 (2018)*
4. *Semjonov S., Bogatyrev V., Malinin A., Hermetically metal coated specialty optical fibers, , Proc. of SPIE Vol. 7839, 783912 ,https://doi.org/10.1117/12.867097*
5. *Явелов И.С., Каплунов С.М., Даниелян Г.Л., книга «Волоконно-оптические измерительные системы», М-Ижевск, 304с., с35-40 (2011)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИППС СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННОГО ИСТОЧНИКА ЧИРПИРОВАННЫХ ДИССИПАТИВНЫХ СОЛИТОНОВ

Кузнецов А.Г.[1], Харенко Д.С.[1,2], Бронников К.А.[1,2], Достовалов А.В.[1], Бабин С.А.[1,2]

[1] Институт автоматики и электрометрии СО РАН 630090, г. Новосибирск
[2] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16172

Лазерное структурирование материалов для изменения или придания новых свойств их поверхности бурно развивается в последнее десятилетие [1]. Так было показано изменение смачиваемости поверхности [2], структурной окраски [3], увеличение биосовместимости титановых имплантов [4] и др. С практической точки зрения для дальнейшего развития данных технологий требуется разработать технологию относительно дешевого структурирования поверхности на сравнительно больших площадях. Процесс образования лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИПСС) может оказаться эффективным решением данной задачи, поскольку образование периодических структур (с периодом $\Lambda < \lambda$, где λ - длина волны лазерного излучения) происходит в области фокусировки лазерного излучения за счет механизма самоорганизации при существенно большем по сравнению с периодом структур диаметре пучка. Основная гипотеза, объясняющая формирование ЛИПСС, основывается на интерференции падающего излучения и излучения, рассеянного от поверхности материала или возбужденного поверхностного плазмона, в результате чего на поверхности материала формируется периодическая модуляция интенсивности излучения, в максимумах которой при превышении определенного порогового значения происходит процесс абляции материала [5]. При этом периодическая структура имеет, как правило, выделенное направление – перпендикулярно направлению поляризации падающего излучения. В [6] было продемонстрировано формирование нового типа ЛИППС – термохимических, которые формируются не за счет абляции, а вследствие окисления металла, поэтому в данном случае происходит рост рельефа в высоту и структуры не загрязняются продуктами абляции, что важно для многих практических применений. Другие особенности данного типа структур состоят в следующем: высокая степень упорядоченности структур, ориентация параллельно поляризации падающего излучения, зависимость периода структур не только от длины волны излучения, но и толщины металлической пленки.

В данной работе проводится исследование возможности создания термохимических ЛИППС структур с помощью волоконного лазерного источника, генерирующего чирпированные солитоны. Задающий лазер с синхронизацией мод выполнен в кольцевой схеме, состоящей из двух функциональных частей: короткого участка из стандартного одномодового волокна, в котором происходит синхронизация мод за счёт эффекта нелинейного вращения поляризации, и длинного участка из волокна с сохранением состояния поляризации, в котором формируется диссипативный солитон [7]. Генерируемые импульсы растягиваются в отрезке PM-волокна длиной ~200 м и направляются на вход тейпера [8]. Легированное ионами Yb^{3+} тейперное волокно представляет собой конусообразный световод с двойной оболочкой длиной 6 метров с диаметром сердцевины 15 мкм на его входе и 100 мкм на выходе. С узкой стороны мощность накачки составляла 25 Вт, а с широкого конца мощность варьировалась от 0 до 70 Вт. Усиленный полезный сигнал с выхода тейпера направляется дихроичным зеркалом на двухпроходной компрессор с парой дифракционных решеток (1500 штрихов/мм) и сжатый импульс анализируется с помощью системы FROG [9]. Задающий осциллятор генерировал последовательность сильно-чирпованных импульсов длительностью 10 пс с частотой повторения 13 МГц. Средняя мощность задающего лазера составила 20 мВт, центральная длина волны 1053 нм, а ширина спектра излучения ~13 нм. При мощности накачки усиливающего тейпера с широкого конца 40 Вт выходная мощность полезного сигнала составила ~20 Вт, что соответствует пиковой мощности несжатого импульса 150 кВт (энергия импульса 1.5 мкДж). Длительность сжатого импульса при 10 Вт выходной мощности составила 827 фс, т.о. максимальная пиковая мощность достигала 1.8 МВт.

С помощью разработанного волоконного источника ультракоротких импульсов были изучены особенности формирования высокоупорядоченных оксидных периодических структур на поверхности металлов и полупроводников при различных условиях облучения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-32-00459.

Литература

1. *A. Y. Vorobyev and C. Guo, "Direct femtosecond laser surface nano/microstructuring and its applications," Laser Photon. Rev., vol. 7, no. 3, pp. 385–407, May 2012*
2. *P. Bizi-Bandoki, S. Benayoun, S. Valette, B. Beaugiraud, and E. Audouard, "Modifications of roughness and wettability properties of metals induced by femtosecond laser treatment," Appl. Surf. Sci., vol. 257, no. 12, pp. 5213–5218, 2011*
3. *A. Y. Vorobyev and C. Guo, "Colorizing metals with femtosecond laser pulses," Appl. Phys. Lett., vol. 92, no. 4, pp. 041914–3, 2008*
4. *E. Fadeeva, S. Schlie, J. Koch, and B. N. Chichkov, "Selective Cell Control by Surface Structuring for Orthopedic Applications," J. Adhes. Sci. Technol., vol. 24, no. 13–14, pp. 2257–2270, Jan. 2010*
5. *J. Sipe, J. Young, J. Preston, and H. Van Driel, "Laser-induced periodic surface structure. I. Theory," Phys. Rev. B, vol. 27, no. 2, pp. 1141–1154, 1983*
6. *B. Öktem, I. Pavlov, S. Ilday, H. Kalaycıoğlu, A. Rybak, S. Yavaş, M. Erdoğan, and F. Ö. Ilday, "Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses," Nat. Photonics, vol. 7, no. 11, pp. 897–901, Oct. 2013*
7. *D. S. Kharenko, E. V Podivilov, A. A. Apolonski, and S. A. Babin, "20 nJ 200 fs all-fiber highly chirped dissipative soliton oscillator," Opt. Lett., 37 (19), 4104–4106 (2012)*
8. *V. Filippov, Y. Chamorovskii, J. Kerttula, K. Golant, M. Pessa, and O. G. Okhotnikov, "Double clad tapered fiber for high power applications," Opt. Express, 16 (3), 1929 (2008)*
9. *D. S. Kharenko, A. E. Bednyakova, E. V Podivilov, M. P. Fedoruk, A. Apolonski, and S. A. Babin, "Feedback-controlled Raman dissipative solitons in a fiber laser.," Opt. Express, 23 (2), 1857–62 (2015)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ФИЛЬТРА ФАБРИ-ПЕРО В УСЛОВИЯХ ЧАСТОТНОГО СКАНИРОВАНИЯ В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ

Белокрылов М.Е.[1,2*], **Оглезнев А.А.**[3], **Константинов Ю.А.**[1]

[1] *Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Пермь*
[2] *Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь*
[3] *ООО «Инверсия-Сенсор», г. Пермь*
[*] *E-mail:* belokrylovme@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16173

Перестраиваемые интерферометры Фабри-Перо (ПИФП) нашли широкое применение в источниках излучения и системах спектрального уплотнения каналов (WDM) для телекоммуникаций [1-3]. Однако применение ПИФП в нестандартных условиях и специфичных системах требует отдельного рассмотрения их характеристик в рамках поставленных задач.

Для исследования перестраиваемого фильтра был построен стенд, представленный на рисунке ниже.

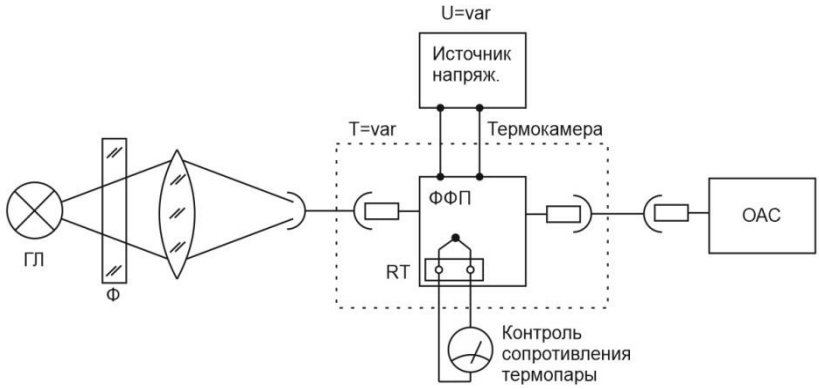


Рис. 1. Стенд для исследования перестраиваемого фильтра Фабри-Перо

Как известно, спектр интерферометра Фабри-Перо представляет собой ряд узких пиков, разделенных между собой фоновым шумом. Расстояния между пиками характеризуется величиной *FSR* (область свободной дисперсии). Важным является тот факт, что величина *FSR* зависит как от рабочей длины волны λ, размера интерференционной полости d, так и от порядка интерференционного максимума n.

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2nd}$$

При фиксированном значении d, высшие порядки интерференции лежат в области более коротких длин волн. С увеличением температуры, вследствие температурного расширения, интерференционный пик *n-1* смещается в сторону пика *n,* пик *n* в свою очередь смещается в сторону пика *n+1;* λ_{n-1} к λ_n, λ_n к λ_{n+1} - в сторону бóльших длин волн. Аналогичным путем происходит смещение интерференционных пиков при приложении напряжения к пьезоэлементу. Таким образом, при работе перестраиваемого фильтра в условиях повышенных температур, в область рабочих длин волн приходят спектральные пики высших интерференционных порядков, расстояния между которыми характеризуются меньшими значениями *FSR.* В случае пониженных температур наблюдается обратная зависимость смещения интерференционных пиков. В рабочую область приходят пики с более низкими порядками интерференции и значение *FSR* увеличивается. Однако в таком случае для удержания спектрального пика в области рабочих длин волн необходимо прикладывать бóльшие напряжения к пьезоэлементу, что вообще говоря нежелательно, а в отдельных случаях попросту невозможно.

В зависимости от особенностей конструкции и качества изготовления конкретного фильтра, такие изменения положений рабочих пиков могут в значительной мере влиять на характеристики *FSR* и диапазон напряжения перестройки в области свободной дисперсии, указанных в спецификации.

В ходе работы было замечено, что начальное положение спектральной картины изменяется от измерения к измерению. Возможность наличия остаточного заряда на пьезоэлементе исключалась прямым замыканием контактов. Причины такого поведения фильтра остаются непонятными.

Практическое применение перестраиваемых фильтров Фабри-Перо зачастую связано со сканированием некой области длин волн, меньшей по размеру, чем *FSR*, выбранным рабочим пиком. При динамической работе такого устройства под влиянием изменяющихся температур образуется «мертвая зона», в том случае, когда начальное положение рабочего пика при *U=0* находится выше нижней границы рабочей области, либо когда в рабочую область при *U=0* попадает рабочий спектральный пик порядка *n*.

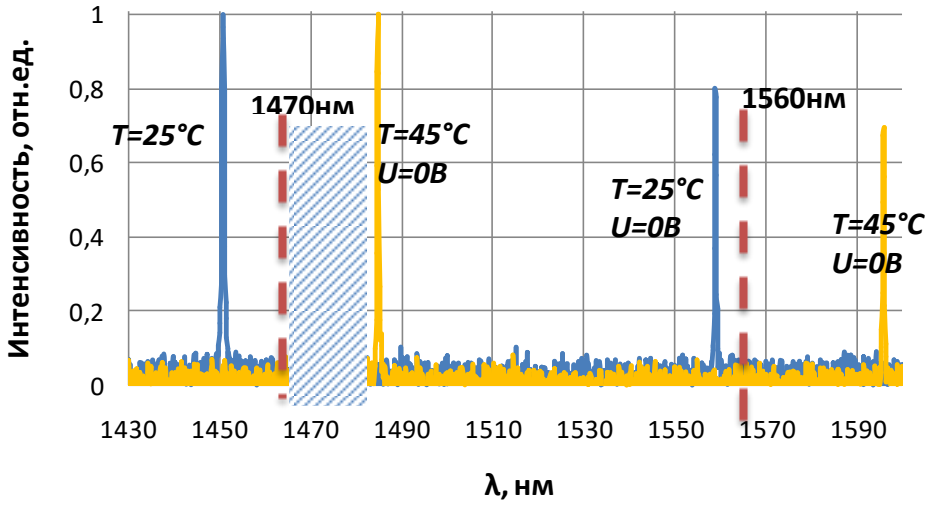


Рис. 2. Положение спектральной картины при различных температурах. Пунктирные линии – рабочая область 1470-1560нм. Заштрихована область «мертвой зоны»

Проблему возникновения «мертвой зоны» возможно решить путем смены рабочего пика на пик порядка *n-1* или *n+1*. Однако, с учетом того, что перестраиваемый фильтр имеет ограничения на прикладываемое напряжение примерно на *U=0÷70B,* при широком диапазоне изменения температуры, решение проблемы «мертвых зон» может стать принципиально невозможным для данного компонента в системе в выбранном рабочем диапазоне. Вдобавок, смена используемых пиков при работе фильтра в динамике может отрицательно повлиять на стабильность всей системы.

В ходе опытных работ было установлено, что значение *FSR*, указанное в спецификациях устройства является лишь ориентировочным значением при работе фильтра в условиях изменяющихся температурных режимов. Это связано не с тем, что данный параметр компонентов не соответствует спецификации, а с необходимостью выявления особенностей поведения компонентов системы, в частности перестраиваемого фильтра Фабри-Перо, в условиях, при которых их характеристики ничем не нормированы.

Коллектив авторов выражает благодарность инженеру ПФИЦ УрО РАН Клоду Д. за неоценимую помощь в проведении экспериментов.

Литература

1. *Sadot, D., & Boimovich, E. (1998). Tunable optical filters for dense WDM networks. IEEE Communications Magazine, 36(12), 50–55. doi:10.1109/35.735877*
2. *Li, Y., Zhou, B., Zhang, L., & He, S. (2015). Tunable Fabry–Perot filter in cobalt doped fiber formed by optically heated fiber Bragg gratings pair. Optics Communications, 344, 156–160. doi:10.1016/j.optcom.2015.01.041*
3. *Mallinson, S. R. (1987). Wavelength-selective filters for single-mode fiber WDM systems using Fabry-Perot interferometers. Applied Optics, 26(3), 430. doi:10.1364/ao.26.000430*

ВАРИАЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ТОКА НА СВЕТОВОДАХ ТИПА TWIST И SPUN

Ловчий И.Л.

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения
г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.
E-mail: lovchy@niioep.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16174

В волоконно-оптических датчиках тока (ВОДТ) используются специальные световоды типа *twist* и *spun*, отличающиеся поляризационными параметрами [1]. Оба световода характеризуются очень сильными внутренними двулучепреломлениями (ДЛП): первый – циркулярным, второй – линейным, со спиралевидной структурой. Наличие сильного упорядоченного ДЛП нивелирует влияние внешних упруго-оптических эффектов на проявление эффекта Фарадея – физического механизма измерения тока, однако ограничивает чувствительность датчика относительно чувствительности датчика с идеальным изотропным световодом, в котором имеет место только фарадеевское ДЛП.

Для моделирования параметров датчиков использовался формализм сферы Пуанкаре. Моделирование проводилось на основе анализа траектории изменения состояния поляризации (СП) света, распространяющегося вдоль чувствительного волоконного контура, при варьировании параметров световода, геометрии контура, величины магнитооптического (МО) эффекта [2, 3]. Волоконный световод представлялся в виде чередующейся совокупности предельно тонких сегментов - линейных (обусловленных встроенным или наведенными внешне упруго-оптическими эффектами) и циркулярных (обусловленных оптической активностью закрученного вокруг оси волокна или МО эффектом) фазовых пластин. Изменение СП после прохождения фазовых пластин определялось вращением на сфере начального положения поляризации на угол двулучепреломления, равный углу сдвига фаз ортогонально поляризованных компонент, вокруг быстрой оси двулучепреломления (оптической оси фазовой пластины). С выхода волокна излучение с измененным в соответствии с МО и упруго-оптическими эффектами состоянием поляризации умозрительно делилось анализатором – поляризационным делителем на две составляющие, обработка интенсивностей которых по определенному алгоритму позволяла оценить параметры чувствительности реального датчика. При численных расчетах использовалась среда графического программирования LabVIEW.

Поляризационные параметры *twist* световода определяются относительной величиной τ закрутки волокна вокруг оси и радиусом R изгиба волокна в контуре. Наиболее простая для реализации схема датчика – с однократным обходом светом чувствительного контура. Траектория изменения СП вдоль световода представляется на сфере Пуанкаре окружностью, пересекающейся или касающейся с экватором [4]. При этом диапазон изменения широты СП зависит от ориентации плоскости волоконных витков в пространстве относительно направления поляризации света на входе волокна и составляет от $-\nu \div +\nu$ до $0 \div \pm 2\nu$, где угол ν определяется выражением:

$$\nu = \tan^{-1}(\beta_R/2\rho). \quad (1)$$

Здесь ρ - наведенная оптическая активность закрученного волокна, β_R – разность фаз ортогонально поляризованных компонент линейного ДЛП, вызванного изгибом стекловолокна в пространстве при формировании чувствительного контура датчика ($\rho \approx 0{,}079\tau$ [5], $\beta_R \approx 0{,}005/R$ [6] – здесь и далее анализируется кварцевое волокно диаметром 125 мкм на длине волны света 0,66 мкм).

Результаты моделирования показали, что при небольших МО углах поворота средняя чувствительность $\bar{\eta}$ ВОДТ с *twist* световодом определяется выражением:

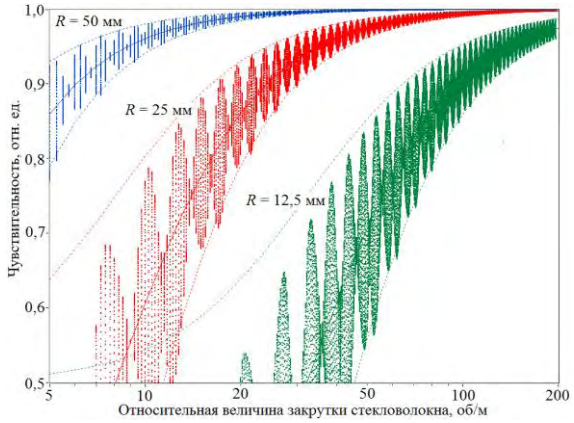
$$\bar{\eta} = \cos^2(\tan^{-1}(\beta_R/2\rho)), \quad (2)$$

При вращении плоскости чувствительного контура ВОДТ в пространстве вариации чувствительности относительно среднего значения лежат в диапазоне $\pm \Delta\eta$:

$$\Delta\eta = 0{,}5\,\bar{\eta}\,(\beta_R/2\rho)^2. \quad (3)$$

На рис. 1 представлены результаты моделирования чувствительности ВОДТ (вертикальные массивы точек) при вращении световодных витков в пространстве и расчета чувствительности по формулам (2) и (3) (сплошные и пунктирные кривые) в зависимости от величины закрутки стекловолокна. Диапазон вращения витков в пространстве при моделировании - $0 \div 90°$ через 1°, шаг изменения закрутки волокна – четверть оборота на метр.

Анализ рисунка показывает, что при $2\rho \geq \beta_R/2$ результаты расчета по формулам (3) и (4) полностью соответствуют вариациям чувствительности исходя из моделирования и анализа СП света на выходе волокна.



Поляризационные параметры *spun* световода определяются периодом биений L_β встроенного линейного ДЛП и периодом вращения L_τ его оси, а также радиусом изгиба волокна в контуре. При начальном положении оси ДЛП волокна $\pm \pi/4$ СП отклоняется от экватора сферы Пуанкаре на угол $\pm \chi$:

$$\chi = \tan^{-1}(L_\tau/2L_\beta), \quad (4)$$

с периодом колебаний T, достаточно точно удовлетворяющим эмпирическому выражению:

$$T = \pi \tan\chi \sin\chi (\cos\chi)^{1/2}. \quad (5)$$

При ином начальном положении оси ДЛП колебательная кривая («змейка») искажается по форме и смещается от экватора к одному из полюсов сферы.

Для стабилизации рабочей точки поляриметрический датчик тока на *spun* световоде принципиально строится по двухпроходной схеме. Один из вариантов схемы подробно описан в [3]. Моделирование показывает, что средняя чувствительность ВОДТ в такой схеме определяется выражением:

$$\overline{\eta} = \cos^2\chi = \cos^2(\tan^{-1}(L_\tau/2L_\beta)), \quad (6)$$

с диапазоном вариаций при вращении чувствительного контура в пространстве $\pm \Delta\eta$:

$$\Delta\eta = 2\overline{\eta}\, L_\beta/L_R = 2\overline{\eta}\, \beta_R/\beta. \quad (7)$$

Здесь β - разность фаз встроенного ДЛП, L_R – длина биений ДЛП, наведенного изгибами волокна.

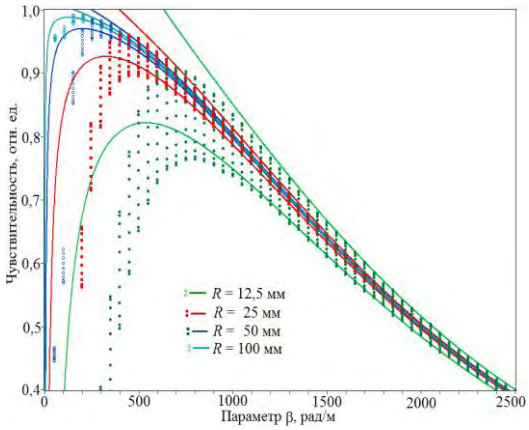


Рис. 2. Чувствительность ВОДТ со spun световодом

На рис. 2 для нескольких радиусов измерительного контура представлены результаты моделирования чувствительности датчика (точки) и расчета диапазонов возможных колебаний чувствительности по формулам (6) и (7) (кривые линии по границам диапазонов) при значении параметра $\gamma = 2\pi/L_\tau = 1000$ рад/м и варьировании параметра β. Вертикальные группы точек соответствуют вариациям чувствительности при вращении плоскости волоконных витков в пространстве в диапазоне $0 \div 90°$ с шагом 9°, шаг изменения параметра β при моделировании – 50 рад/м.

Анализ рисунка показывает, что при выполнении условия $\beta^2 > 20\gamma\beta_R R$ результаты расчета и моделирования практически совпадают. Теоретические результаты хорошо коррелируют с результатами экспериментов на макетном образце ВОДТ [3].

Литература

1. *Ulrich R., Simon A. Appl. Opt. 18, 2241-2251 (1979)*
2. *Lovchii I.L. J. Opt. Technol. 77, 376-386 (2010)*
3. *Lovchii I.L. J. Opt. Technol. 77, 755-761 (2010)*
4. *Rashleigh S.C., Ulrich R. Appl. Phys. Lett. 34, 768-770 (1979)*
5. *Smith A.M. Appl. Opt. 19, 2606-2611 (1980)*
6. *Ulrich R., Rashleigh S.C., Eickhoff W. Opt. Lett. 5, 273-275 (1980)*

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО

Фадеев К. М.[1*], Минкин А. М.[1], Ларионов Д.Д.[1], Созонов Н. С.[2]

[1] *Пермская научно-производственная приборостроительная компания, г. Пермь*
[2] *ООО «Инверсия-Сенсор», г. Пермь*
[*] *E-mail:* constantinefadeev@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16175

В современной технике широко распространены датчики давления, они активно применяются как в медицине, так и в аэрокосмической сфере. В большинстве применений используются электрические датчики. Однако в областях с жесткими условиями внешней среды, где невозможно использовать электрические датчики, применяются преимущественно волоконно-оптические датчик, благодаря невосприимчивости к электромагнитному излучению, малым размерам, пожаро- и взрывобезопасности и т.д. Датчики на базе интерферометров отличаются высоким разрешением и большим динамическим диапазоном. Интерферометр Фабри-Перо является наиболее привлекательным для создания датчика давления из-за его простоты, компактности и чувствительности.

Интерференционная картина создается от двух обратных отражений, например, от торца оптического волокна и мембраны. Такой интерферометр Фабри-Перо может быть описан уравнением двухлучевой интерференции:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\left(\frac{4\pi n L}{\lambda} + \varphi_0\right),$$

где, I – интенсивность интерференции, I_1 и I_2 – интенсивности отраженных лучей от двух поверхностей, φ_0 – начальная фаза интерференции, L – длина полости, n_0 – показатель преломления среды, заполняющей полость, λ – длина волны.

В работе демонстрируется волоконно-оптический датчик давления на основе интерферометра Фабри-Перо. Известны датчики, где мембрана формируется из оптического волокна [1, 2]. Такая технология позволяет создать датчик диаметром немного большим, чем диаметр оптического волокна, что привлекательно для медицинских измерений. Однако такая конструкция датчика не позволяет оптимизировать чувствительность датчика за счет вариации диаметра упругой мембраны, который влияет на максимально допустимое давление. Конструкция нашего датчика представлена на рис. 1, *а*. Чувствительным элементом датчика является мембрана из кварцевого стекла толщиной около 50 мкм и диаметром 600 мкм. Она присоединена к ферруле из кварцевого стекла, внутри которой закреплено оптическое волокно также из кварцевого стекла. Достоинством такой конструкции является согласование деталей по коэффициенту теплового расширения, термостойкость, химическая стойкость и возможность настроить упругий элемент на заданный диапазон давлений. Два обратных отражения происходят от границ сред оптическое волокно-воздух и воздух-мембрана. Мембрана с внутренней стороны покрыта слоем золота толщиной около 100 нм. Напыление позволяет улучшить видимость интерференционной картины, а также исключить вклад третьего обратного отражения от границы сред кварц-среда измеряемого давления. Под действием давления среды происходит прогиб мембраны, что приводит к изменению длины воздушной полости интерферометра. В связи с этим происходит изменение периода интерференционной картины на рис. 1, *б*.

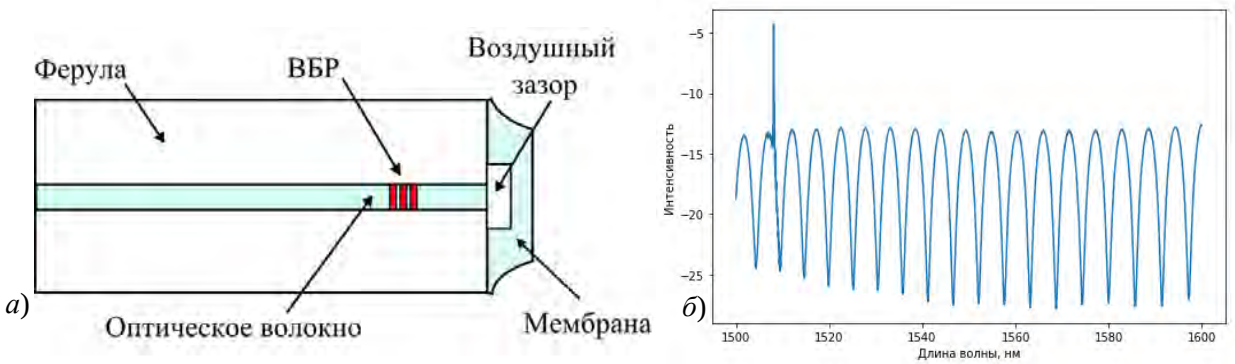


Рис. 1. а) Схема конструкции волоконно-оптического датчика давления;
б) Спектр волоконно-оптического датчика давления с датчиком температуры на базе ВБР

Датчик реагирует также и на температуру. Для исключения температурной чувствительности используется волоконная брэгговская решетка в качестве датчика температуры для термокомпенсации датчика давления, на рис. 1, *б* виден характерный пик, положение которого связано с температурой.

Во время эксперимента датчик погружался в герметичную барокамеру и подключался к источнику излучению и приемнику. Тестирование датчиков на давление проводилось в установке гидравлического нагружения с рабочей жидкостью этиленгликоль. Схема эксперимента представлена ниже (рис. 2).

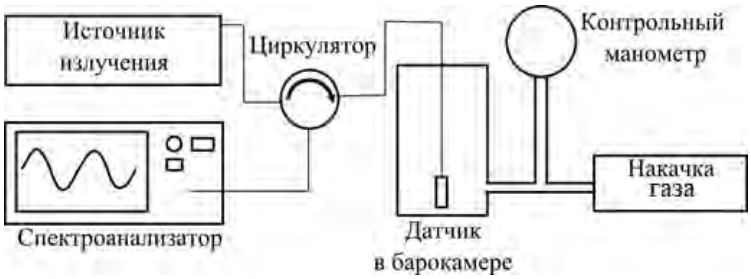


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

В результате эксперимента датчик выдержал нагрузку в 475 бар. При повышении давления произошло разрушение мембраны. Чувствительность мембраны (преобразователь внешнего давления в изменение длины зазора) составила 12 нм/бар. Чувствительность датчика можно определить и смещению интерференционной картины (преобразователь внешнего давления в оптический сигнал). При таком методе, чувствительность составляет 90 пм/бар. Стоит отметить, что чувствительность датчика регулируема – можно подобрать необходимое значение по чувствительности или максимальному давлению за счет выбора толщины и диаметра упругой мембраны.

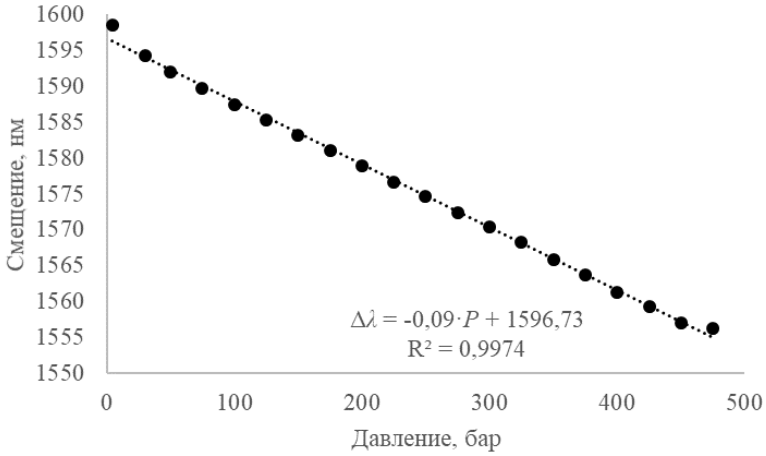


Рис. 3. Зависимость смещения спектра интерференционной картины от давления

Датчик способен выдержать высокие температурные нагрузки. Такой датчик потенциально может быть применен в авиационной и химической отраслях, например, как датчик давления топлива, воздуха для регулировки внутренних систем в газотурбинном двигателе или химическом реакторе.

Литература

1. *Donlagić D., et al, OPTICS EXPRESS 17 (2009)*
2. *Xiao H., et al, OPTICS LETTERS 38, 4609-4612 (2013)*

МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В СВЕТОВОДЕ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ЗАВИСИМОСТИ ДИСПЕРСИИ ОТ ДЛИНЫ

Золотовский И.О., Лапин В.А., Семенцов Д.И.

Ульяновский государственный университет Научно-технологический институт им. С.П. Капицы
E-mail: LVA2013@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16176

Модуляционная неустойчивость (МН) – рост малых гармонических возмущений непрерывной волны – эффект, характерный для многих нелинейных систем, поддерживающих распространение локализованных волн, природа которого связана с совместным действием нелинейных и дисперсионных эффектов [1].

В настоящей работе исследуются условия возникновения и существования модуляционной неустойчивости волновых пакетов, распространяющихся в нелинейном световоде с аномальной дисперсией групповых скоростей, зависящей от длины световода [2, 3], а так же в каскадных таких световодов. Исследованы условия возникновения, область существования, и другие характеристики модуляционной неустойчивости волновых пакетов, распространяющихся в нелинейной среде.

Показана возможность распада квазинепрерывного волнового пакета на последовательность ультракоротких импульсов с меньшей длительностью и большей амплитудой по сравнению с нелинейными световодами, в которых дисперсия не зависит от длины.

Динамика временной огибающей волнового пакета с учетом нелинейности среды керровского типа и зависимости дисперсии от длины волокна z в бегущей системе координат описывается следующим уравнением для амплитуды огибающей:

$$i\frac{\partial A}{\partial z}-\frac{d_2(z)}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2}+iR|A|^2A=0 \qquad (1)$$

где $\tau=t-z/v_g$ – время в бегущей системе координат, $v_g=(\partial\omega/\partial\beta)_{\omega_0}$ – групповая скорость волнового пакета, $d_2=\left(d^2\beta/d\omega^2\right)$ – параметр дисперсии групповых скоростей, R – параметр нелинейности.

В настоящей работе рассматривался двухсекционный одномодовый световод, состоящий из световода с постоянной дисперсией длиной z_0 и световода с экспоненциальным распределением по его длине ДГС, последовательно соединенных таким образом, что бы обеспечивалась непрерывное распределение ДГС:

$$d_2=d_{20}\cdot\begin{cases}1, & z<z_0\\ f(z), & z\ge z_0\end{cases}, \qquad (2)$$

На рис. 1 представлены рассматриваемые в работе зависимости дисперсии от длины рис. (a, b) и максимумы временных профилей модулированной волны, распространяющейся в световодах рассматриваемых в работе. Представленные на рисунках c и d энергетические максимумы временных профилей модулированной волны получены при помощи численного решения методом пошаговых преобразований Фурье [1] уравнения (1), определяющего динамику распространения в неоднородном световоде модулированного сигнала вида:

$$A(0,\tau)=\sqrt{P_0}\left[1+a_m\cos(\Omega_{\text{mod}}\tau)\right] \qquad (3)$$

при следующих значениях параметров световода: глубине модуляции $a_m=0.01$, начальных значениях ДГС $d_{20}=-10^{-26}$ с^2/м и мощности $P_0=1$ Вт, параметре нелинейности $R=10^{-2}$ (Вт·м)$^{-1}$, длине однородной секции $z_0=(0;500)$ м – рис. (a, c; b, d) и частоте модуляции $\Omega_{\text{mod}}=\sqrt{2RP_0/|d_{20}|}$, $f(z)=\left\{\exp\left(-b_e(z-z_0)\right)\quad\left(1-b_l(z-z_0)\right)\quad\left(1+b_h(z-z_0)\right)^{-1}\quad\exp\left(-b_g(z-z_0)^2\right)\right\}$ – кривые (1;2;3;4). Параметр неоднородности b для всех типов неоднородности выбирался таким, чтобы удовлетворять условию $d_2(L)=0.1d_{20}$, в котором L полная длина световода, включающая однородную и неоднородную части. Зависимости, представленные на рис. 1, показывают что при соответствующем

выборе профиля ДГС каскадное соединение световода с постоянной аномальной дисперсией со световодом с неоднородным распределением ДГС обеспечивает устойчивую генерацию последовательностей ультракоротких импульсов с большими пиковыми мощностями по сравнению с одиночным неоднородным световодом соответствующей длины. При этом можно заметить, что при рассматриваемых параметрах, в случае одиночного неоднородного световода наибольшие пиковые мощности достигаются в случаях ДГС, имеющей плавный характер убывания по модулю, (линейная и гауссова зависимости), в то время как в каскадном световоде – в случаях ДГС с более резким убыванием по модулю (экспоненциальная и гиперболическая зависимости). Это связано с тем, что в каскадном световоде в неоднородный сегмент попадает последовательность импульсов уже обладающая небольшой степенью сжатия, в то время как в случае одиночного неоднородного световода происходит взаимодействие исходной модулированной волны с убывающей по модулю дисперсией.

В ходе проведенного в работе анализа было продемонстрировано, что в световодах с каскадной зависимостью ДГС от продольной координаты z генерируемые ультракороткие импульсы достигают более высоких степеней сжатия по сравнению с одиночными неоднородными световодами, при этом в работе рассмотрены различные зависимости дисперсии от координаты и показано при каких зависимостях возможно достижение максимальных пиковых мощностей генерируемых последовательностей ультракоротких импульсов в одиночных неоднородных и каскадных световодах.

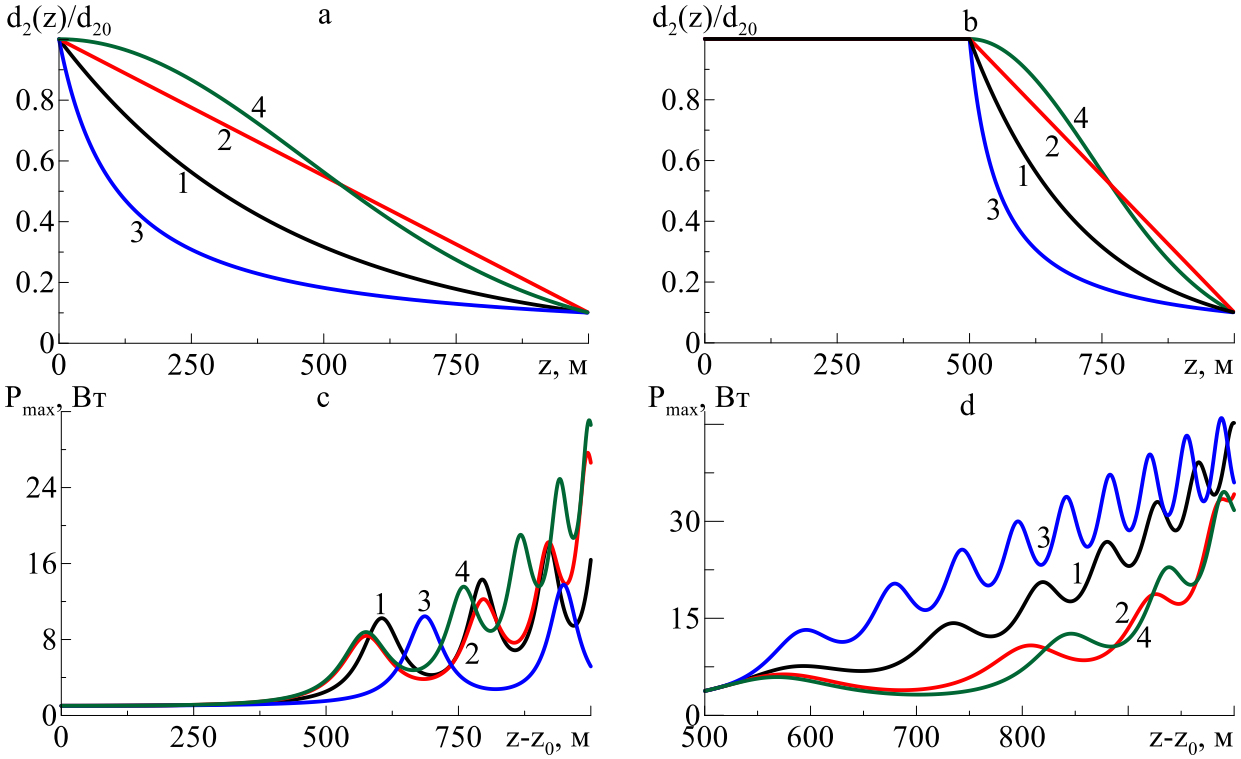


Рис. 1. Зависимости ДГС световода (a и b) и максимальной мощности модулированной волны (c и d) от продольной координаты z для экспоненциального, линейного, гиперболического и гауссового профилей ДГС – кривые (1;2;3;4)

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (в рамках Государственного задания) и РФФИ (проект 18-32-00957).

Литература

1. *Agrawal G. Nonlinear fiber optics (Springer, 2007)*
2. *У. Г. Ахметшин, В. А. Богатырев, А. К. Сенаторов, А. А. Сысолятин, М. Г. Шалыгин// Квантовая электроника, Т. 33, № 3, С. 265–267, 2003*
3. *Zolotovskii I.O., Lapin V.A., Sementsov D.I., Fotiadi A.A., Popov S. V.// Opt. Commun. 426, p. 333-340, 2018*

ФОТОННАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОБРАТНО РАССЕЯННЫХ И ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ

Кутлуяров Р.В.*, Любопытов В.С., Фатхиев Д.М., Султанов А.Х.

Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет, г. Уфа
** E-mail:* kutluyarov.rv@net.ugatu.su

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16177

Развитие технологий разработки и создания фотонных интегральных схем (ФИС) позволяет добиться существенной миниатюризации и стабилизации параметров многих типовых схем обработки и преобразования оптических сигналов. Широкие возможности создания интегральных интерферометров позволяют осуществить реализацию оптической схемы обработки сигналов для оптической когерентной томографии, в частности, для её разновидности с модуляцией по частоте (ЧМ-ОКТ) [1]. Практический интерес представляют как схемы, работающие на длине волны 1,32 мкм, так и в диапазоне 1,55 мкм [2].

В данной работе представлены результаты разработки и моделирования ФИС, на которой реализуется интерферометрическая обработка ЧМ-сигнала от внешнего источника с обратно рассеянным и внеосевым отраженным сигналами от исследуемого образца, находящегося вне ФИС (см. Рис.1).

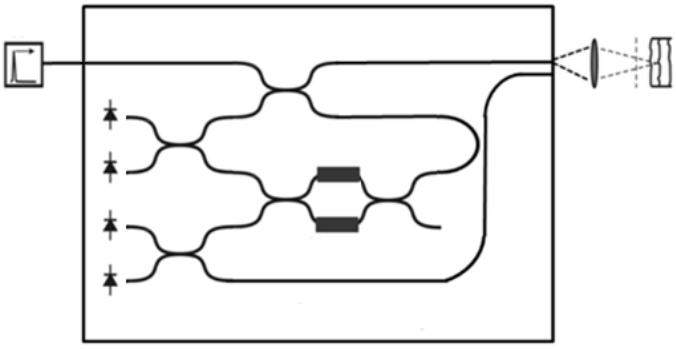


Рис. 1. Схема разработанной ФИС ЧМ-ОКТ

Реализация ФИС предусматривается на кремний-германиевой платформе для работы в диапазоне 1,55 мкм, что позволяет получить устройство сверхвысокой компактности (0,9x1,4 мм) с учетом интеграции широкополосных балансных аналоговых фотодетекторов.

Исходный сигнал внешнего источника, частота которого от времени зависит в виде пилообразной функции с кусочно-линейными участками, вводится в ФИС через торцевой согласователь, затем на первом направленном разветвителе делится поровну между ветвями анализа и сравнения. Волновод ветви анализа выводит излучение из торца ФИС, которое затем с помощью внешней линзы фокусируется в области анализа исследуемого образца. Для ввода излучения, содержащего информацию о структуре образца, обратно в ФИС, используются два волновода: обратно рассеянный свет вводится в тот же волновод ветви анализа, из которого был излучен, а внеосевой отраженный сигнал собирается и вводится в рядом расположенный волновод сбора отраженного сигнала. С помощью пары направленных разветвителей сигнал из ветви сравнения смешивается с обратно рассеянным и отраженным сигналами, и результат интерференции подается на две пары балансных фотодетекторов. При этом мощность сигнала сравнения может быть перераспределена между указанными разветвителями с помощью модулятора Маха-Цендера, в плечи которого встроены термооптические фазовращатели.

Компьютерное моделирование представленной схемы было проведено с помощью программного пакета Lumerical Interconnect. По результатам моделирования показано, что частота сигнала на выходе фотодетекторов прямо пропорциональна удалению точки отражения сигнала от торца ФИС. При этом определена точка нулевой задержки, которая находится на расстоянии 7,5 мм от торца ФИС. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что разработанная ФИС функционирует должным образом при работе в режиме обработки обратно рассеянного света и внеосевого отраженного света.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-49-04112).

Литература

1. *Nguyen A., et al, Opt. Lett. 37, 4820-4822 (2012)*
2. *Drexler W., Fujimoto J.G. Eds., Optical Coherence Tomography. Technology and Applications, 2 ed., Springer, 2015, 2571*

АКТИВНЫЙ И ПАССИВНЫЙ АНИЗОТРОПНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ ДЛЯ ВОГ

Цибиногина М.К.[1,2*], Осипчук М.К.[1,2], Шарипов Я.М.[1,3], Кель О.Л.[1], Джанджгава Н.Т.[1,2], Пищальников К.Д.[1], Гагарина К.И.[2], Перетрухина И.А.[1]

[1] Пермская научно-производственная приборостроительная компания, г. Пермь
[2] Пермский научно-исследовательский политехнический университет, г. Пермь
[3]Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь
[*]E-mail: marina.tsibinogina@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16178

Известно, что использование схем волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) на поляризованном излучении позволяет повысить точность ВОГ за счет сохранения поляризации излучения во всем оптическом тракте [1]. Предлагается применение активных и пассивных волоконных световодов (ВС) с сохранением поляризации типа “Панда” для работы ВОГ в диапазоне температур от минус 50 ^{0}C до +60 ^{0}C. В области отрицательных температур активный анизотропный ВС с выбранным составом сердцевины на основе алюмоэрбиевогерманосиликатного стекла повысит стабильность параметров широкополосного световолоконного источника излучения, пассивный анизотропный ВС с улучшенной анизотропной конструкцией уменьшит h-параметр и изгибные потери для применения в контуре элемента чувствительного ВОГ.

Цель настоящей работы заключается в создании анизотропии с помощью конструкции типа “Панда” [2] в активных и пассивных волоконных световодах для ВОГ, отличающихся оптической устойчивостью в диапазоне температур от минус 50 ^{0}C до +60 ^{0}C.

Заготовки активных и пассивных световодов изготавливали MCVD технологией. Сердцевины образцов заготовок активных волоконных световодов отличались концентрациями оксидов алюминия и германия на 1 моль %. Вытянутые образцы ВС подвергли циклическому воздействию температур от минус 50 до плюс 60°C и получили в ВС с большим содержанием оксидов алюминия и германия (6 моль % Al_2O_3, 4 моль % GeO_2) ширину спектра не менее 7,3 нм на отрицательных температурах. Созданное наведенное двулучепреломление в активных световодах составило $4{,}4*10^{-4}$.

Конструкции пассивных световодов отличались приближением к сердцевине нагружающих стержней – концентричностью [3]. Образцы ВС подвергли циклическому воздействию температур от минус 60 до плюс 60°C и получили в образцах с меньшей концентричностью и одинаковой числовой апертурой снижение h-параметра с $0{,}5*10^{-5}$ 1/м до $0{,}1*10^{-5}$ 1/м во всем температурном диапазоне, снижение изгибных потерь в 2 раза. Наведенное двулучепреломление в образцах пассивных световодов составило $7*10^{-4}$.

Таким образом, созданы оптически устойчивые в температурном диапазоне работы ВОГ активные анизотропные световоды на основе алюмоэрбиевогерманосиликатного стекла с двулучепреломлением $4{,}4*10^{-4}$, позволяющие повысить широкополосность световолоконного источника излучения - не менее 7,3 нм и пассивные анизотропные световоды с двулучепреломлением $7*10^{-4}$, позволяющие снизить в 5 раз h-параметр и в 2 раза изгибные потери.

Авторы выражают признательность инженеру - технологу MCVD процесса М. Э. Алимбаеву и инженеру-технологу вытяжки световодов Димаковой Т. В. за проделанную работу.

Литература

1. *М.И. Коптенков и др., Лесной вестник, 3, 57-62 (2015)*
2. *M. Alam, et al, Proc. SPIE, 5272 (2003)*
3. *А.Г. Андреев и др., Фотон-Экспресс-Тезисы докладов ВКВО 2017, 142, 276-277 (2017)*

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ОБРАСТАЮЩИХ КОРНЕЙ РАСТЕНИЙ

Ременникова М.В.[1], Бочкова С.Д.[1,2], Константинов Ю.А.[1*]

[1] Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Пермь
[2] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь
[*] E-mail: yuri.al.konstantinov@ro.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16179

Одним из главных вызовов современного человечества является необходимость обеспечения продовольствием растущее население Земли, прибегая ко всем возможным и разумным мерам по повышению урожайности сельскохозяйственных культур. Обеспечивая всестороннее выполнение условий созревания их плодов, зачастую агрономы забывают о факторе, который присутствует почти везде и всегда – это вибрации (колебания, связанные с деятельностью человека, созданных им устройств и объектов, животных, геофизическими процессами). До недавнего времени было принято считать, что данный фактор либо не оказывает существенного воздействия на флору, либо дает незначительный негативный эффект. Однако существуют исследования, описывающие как отрицательное влияние вибраций на растения, так и дающие положительный эффект (увеличение урожайности на 30-40%) [1]. Отмечено, что возможно сформировать плоскую форму корневой системы у рассады в процессе ее роста с преимущественным развитием обрастающих корней за счет воздействия механической вибрации. При этом наверняка не выяснено, каким образом прикладывать вибрации, в каком спектре и т.д., и как избежать негативного влияния последних, которое наблюдается при воздействии, например, оживленной трассы. Для того, чтобы объяснить с фундаментальной точки зрения те или иные процессы в растениях, подверженных вибрационным воздействиям как в лабораторных, так и полевых условиях, необходима разработка гибкого малоинвазивного инструмента, позволяющего регистрировать полную акустическую картину в зоне высадки растений.

Авторы настоящей работы предлагают использовать метод DAS [2], но с применением повышенной поляризационной чувствительности. Предполагается, что благодаря этому снизится порог амплитуд колебаний акустических частот, регистрируемых системой. В основе метода быстрого распределенного анализа поляризационных свойств оптических волокон лежит автоматизированная схема зондирования волоконных световодов высококогерентными импульсами в разных состояниях поляризации (Рис.1).

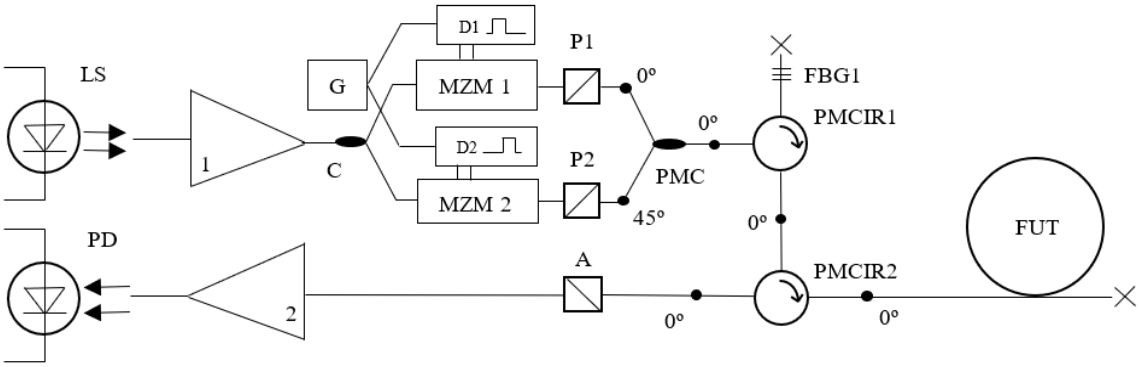


Рис.1 Предлагаемая упрощенная конфигурация системы

Совместная обработка откликов рассеяния в анизотропном волоконном световоде от таких импульсов позволит получить функцию, линейно связанную с коэффициентом взаимодействия мод в заданной точке волокна. Принципиальную возможность такого подхода была продемонстрирована членами коллектива в работе [3]. В данный момент интересна схема, в которой высококогерентное излучение источника делится на две равные по мощности части и в каждой из ветвей разветвителя проходит амплитудную модуляцию и линейно поляризуется с высоким коэффициентом поляризационной экстинкции. Далее сигналы снова объединяются сохраняющим поляризацию объединителем, но таким образом, что из одного плеча излучение вводится по медленной оси, а из другого – строго между поляризационными осями. Импульсы заданной формы и скважности

формируются в плечах делителя строго попеременно и через сохраняющий состояние поляризации вводимого излучения циркулятор посылаются в исследуемый световод. Экспериментально установлено [3], что импульсы, введенные под 45 градусов к медленной оси, в меньшей степени подвержены изменению общей мощности на дефектах анизотропии, в то время как импульсы, вводимые строго в медленную ось, описывают перекачку более выражено [4]. Очевидно, что искомой величиной в таком случае станет разность рефлектограмм, полученных по двум последовательно идущим импульсам. Предыдущие реализации таких схем, выполненные авторами ранее, требовали длительного накопления данных – по обоим типам импульсов. Возможны также вариации с углами ввода – эти работы были начаты также в [4] и требуют продолжения в связи с появлением новых рефлектометрических методик. В частности, предполагается, что сужением спектра источника удастся повысить скорость работы, перейдя к когерентной рефлектометрии. На данном же этапе проведены исследования на низкокогерентном источнике – чтобы проанализировать отдельно влияние поляризационной чувствительности. Рефлектограммы, полученные при зондировании под углами 0 и 45 градусов к медленной оси, представлены на рис. 2.

Математическая разница рефлектограмм, представленных на рисунке (которая, как видно из полученных зависимостей, достаточно адекватно регистрируется), характеризует перекачку мод и, как следствие, становится некоторым образом чувствительной к температурам и деформациям. Этот факт частично подтверждает гипотезу о том, что чувствительность DAS к вибрации после применения такой модификации возрастет. Точнее, снизится порог амплитуд колебаний акустических частот, регистрируемых системой. Известно также, что растения чувствительны не только в частоте, но и форме сигнала. Скажем, сигналы, представляющие собой искаженные (срезанные) гармонические функции, свойственные экстремальным музыкальным стилям, по некоторым данным оказывают на растение негативные эффекты, что требует всестороннего исследования. Для изучения таких сигналов, таким образом, нужно высокое разрешение как по частоте, так и самой измеряемой величине, что является великолепным вызовом для современной агробиофотоники и достойным продолжением работ по только начинающему развитие направлению «Вибрационная экология» [5-8].

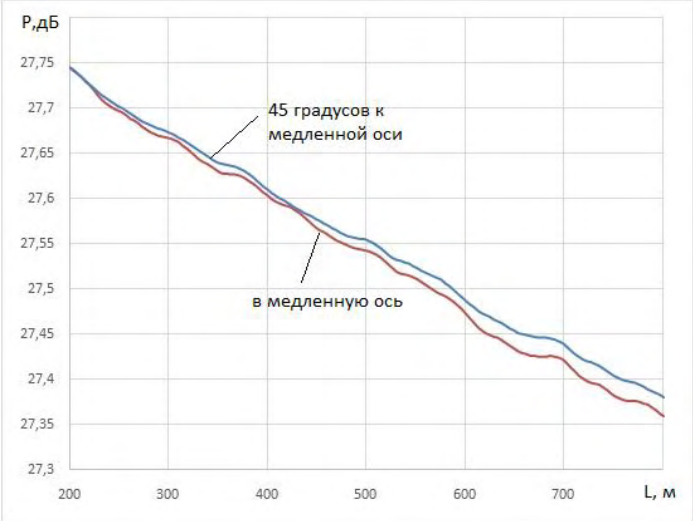


Рис.2 Рефлектограммы, полученные при зондировании под углами 0 и 45 градусов к медленной оси на «некогерентной» версии макета

Литература

1. *http://www.findpatent.ru/patent/260/2603589.html*
2. *X. Liu, C. Wang, Y. Shang / Distributed acoustic sensing with Michelson interferometer demodulation / Photonic Sensors 2016 DOI: 10.1007/s13320-017-0363-y*
3. *Burdin,V V et al., A technique for detecting and locating polarisation nonuniformities in an anisotropic optical fibre, Quantum Electronics(2013),43(6):531, http://dx.doi.org/10.1070/QE2013v043n06ABEH014995*
4. *Konstantinov, Yu. A. et al. Quantum Electronics(2009),39(11):1068 http://dx.doi.org/10.1070/QE2009v039n11ABEH014171*
5. *М. В. Нецветов / Вибрационная экология леса / Екологія та ноосферологія. 2008. Т. 19, № 3–4, сс. 40-50*
6. *Нецветов М. В., Суслова Е. П., Вибрации деревьев, индуцированные движением трамваев (Netsvetov M.V., Suslova O.P. TREES VIBRATIONS INDUCED BY TRAM TRAFFIC / Donetsk botanical garden of the National Academy of Sciences of Ukraine), Вісник Запорізького національного університету № 2, 2008, сс. 152-157*
7. *Lacusic S. Impact of tram traffic on noise and vibrations // Electronic Journal «Technical Acoustics». <http://www.ejta.org> – 2006, 13*
8. *Беркович Ю.А., Большакова Л.С., Давыдова Н.В., Делоне Н.Л., Зимина Н.В., Смолянина С.О., Соловьёв А.А./ Стимуляция роста у пшеницы под воздействием вибрации / Доклады Академии наук / 2010 / http://naukarus.com/stimulyatsiya-rosta-u-pshenitsy-pod-vozdeystviem-vibratsii*

ВОЛОКОННЫЕ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ ДЛЯ ДОЗИМЕТРИИ

Алексеев А.С.*, Приходько В.В., Трегубов А.В.

НИТИ им. С.П.Капицы УлГУ, г.Ульяновск
* *E-mail:* granik@ya.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16180

На сегодняшний день сохраняет актуальность разработка новых и модернизация существующих систем мониторинга безопасности объектов атомной энергетики. Одним из перспективных направлений является создание распределенных измерительных систем и комплексов на основе оптического волокна. Ранее авторами рассматривались дозиметрические системы и волоконные сенсорные элементы на базе сцинтилляционных и спектросмещающих волокон [1-2]. Однако, особый интерес представляет эффект вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ): использование технологии детектирования и анализа ВРМБ в известных промышленных датчиках позволяет осуществлять измерения температуры и механического напряжения вдоль протяженного участка волоконно-оптического кабеля, обеспечивая высокое разрешение по координате и температуре, стабильность измерений во времени и возможность непрерывного автоматического мониторинга.

С другой стороны, известным методом измерения как активности источника, так и дозы ионизирующего излучения является калориметрический метод, основанный на изменении температуры детектора, взаимодействующего с ионизирующим излучением. Преимуществом калориметрических детекторов является независимость от энергии частиц, простота конструкции и надежность. Совмещение двух упомянутых выше методов измерения позволяет провести разработку распределенного дозиметрического сенсорного элемента с улучшенными эксплуатационными свойствами. Преимущество такого подхода заключается в возможности разработки распределенного волоконного дозиметра с использованием всего лишь одной протяженной волоконной линии. Основной целью данной работы является разработка и численное решение физических моделей элементов калориметрического волоконного сенсора с целью оценки его эффективности и чувствительности.

На рисунке 1 представлена структурная схема такой распределенной волоконной калориметрической дозиметрической системы. В системе присутствуют *n* волоконных калориметрических сенсорных элементов, которые находятся в активной зоне под действием источников радиационного излучения. Показания с сенсорных элементов снимаются рефлектометрическим способом на основе детектирования и анализа ВРМБ с помощью рефлектометра 3 и чувствительного волокна 2.

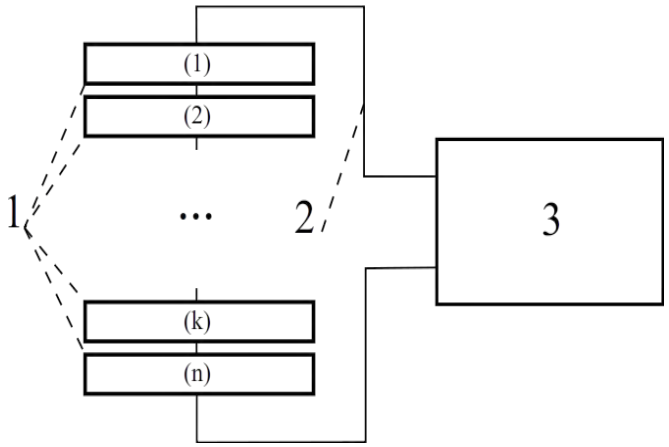
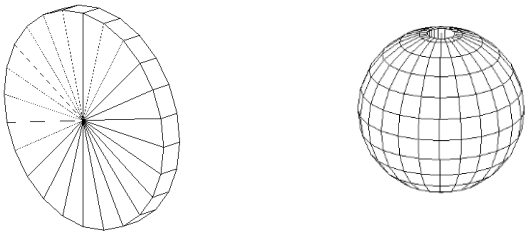


Рис. 1 – Структурная схема распределенной волоконной калориметрической дозиметрической системы

Волоконный калориметрический сенсорный элемент представляет собой бриллюэновский сенсор температуры для регистрации мощности дозы ионизирующего излучения благодаря специальным насадкам на волокно (детекторам), работающим на основе калориметрического эффекта.

Для такой системы предложено несколько вариантов геометрии детекторов (см. рис. 2):



а) б)

Рис. 2 – Варианты геометрии детекторов: (а)цилиндрическая и (б) сферическая

1. детектор в виде цилиндра из материала с высоким коэффициентом поглощения ионизирующего излучения, на боковой поверхности которого витками фиксируется оптическое волокно. Для компенсации тепловых потерь цилиндр размещен внутри теплоизолирующего кожуха, выполненного из высоко-прозрачного для гамма-квантов материала. Высота цилиндра оптимизируется в соответствии с расчетными данными. Такая конструкция позволяет максимально увеличить площадь детектирующей области и таким образом повысить геометрическую эффективность детектора, а также позволяет увеличить площадь контакта между детектором и волокном для повышения эффективности теплопереноса между детектором и волокном, но одновременно обладает следующими недостатками: анизотропность детектора, зависимость эффективности детектора от его ориентации относительно источника, справедливость калибровки только для определенной ориентации детектора;
2. детектор сферической формы с цилиндрическим отверстием, проходящим через центр сферы, с диаметром, равным диаметру транспортного волокна. Детектор фиксируется на волокне при помощи теплопроводящего клеющего состава. Преимуществом такого подхода является возможность разработки миниатюрных детекторов, которые могут располагаться с определённым шагом по всей длине волокна, позволяя проводить распределенные измерения мощности дозы радиационного излучения, также такие детекторы изотропны и просты в калибровке. К их недостаткам относятся: меньшая (по сравнению с цилиндрической) объемная эффективность и меньшая площадь контакта с оптическим волокном.

В качестве материалов для детекторов выбраны свинец, медь и алюминий исходя из высоких показателей их теплопроводности, что имеет значение для повышения эффективности теплопереноса внутри тела детектора. Было проведено численное моделирование взаимодействия ионизирующего излучения с веществом детектора методом Монте-Карло, реализованном в Geant4, которое показало высокую эффективность данных материалов при поглощении энергии радиационного излучения. В результате моделирования получены распределения поглощенной энергии в теле детектора в зависимости от его толщины с использованием алюминия, меди и свинца для радиационного источника на основе ^{60}Co. Детектор на основе свинца наиболее эффективен, при этом максимум поглощенной энергии приходится на внешний слой толщиной до 10 мм.

Для разработанной дозиметрической системы предложено два способа измерения мощности дозы излучения: 1) оценка динамики приращения температуры детектора – для случая быстропротекающих процессов; и 2) оценка мощности теплопотерь при достижении термодинамического равновесия – для случая статичного поля; последний способ позволяет производить многократные измерения, увеличивая тем самым точность результата. Проведенная экспериментальная оценка погрешности измерения температуры двумя методами показала, что для бриллюэновского распределенного датчика температуры минимальная погрешность измерения составляет 10%, что при комнатной температуре соответствует 2,5 °C.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области (грант 18-48-730038).

Литература

1. *Пат. RU167517U1 Российская Федерация, Оптоволоконная бета и гамма дозиметрическая система : /Новиков С.Г. Черторийский А.А. Беринцев А.В. Алексеев А.С. Светухин В.В. Приходько В.В.; 2016*
2. *Simulation and experimental study of a scintillation fiber detector of the activities of 63Ni-, 89Sr- and 90Sr-based radiation sources / Viacheslav Svetukhin, Victor V. Prikhodko, Sergey G. Novikov et al. // Advanced Engineering Technology II.— Vol. 835 of Applied Mechanics and Materials.— Trans Tech Publications, 2016.—6.— P. 626–631*

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ СУПЕРКОНТИНУУМА В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ НАКАЧКА-ЗОНДИРОВАНИЕ

Жукова М.О.*, Мельник М.В., Путилин С.Э., Цыпкин А.Н.

Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург
* *E-mail:* mozhukova@itmo.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16181

Экспериментальные и теоретические исследования явления генерации спектрального суперконтинуума (ССК) при взаимодействии интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов с оптически прозрачной средой ведутся последние 50 лет [1-3]. Спектральный суперконтинуум, генерируемый в поле импульсов с разными исходными центральными длинами волн в газообразных, жидких и твердых средах, со спектральными диапазонами, простирающимися от УФ до дальнего ИК, нашел широкое применение в реализации устройств и экспериментальных схем для исследования свойств материалов. ССК используются в качестве широкополосной накачки для спектроскопии поглощения, спектроскопии накачка-зондирование «pump-probe» [4], накачки параметрических генераторов, рамановского рассеяния и других вынужденных нелинейных процессов [5], генерации фемто- и аттосекундных импульсов [6], имаджинга и микроскопии.

Сам процесс генерации ССК вызван протекающими в среде нелинейными процессами вследствие ее взаимодействия с высокоинтенсивным излучением. Для импульсов с центральной длиной волны, попадающей в область нормальной дисперсии групповой скорости среды основополагающим эффектом, приводящим к генерации ССК является фазовая самомодуляция излучения [7]. В области нулевой и аномальной дисперсии групповой скорости среды на процесс генерации ССК кроме фазовой самомодуляции влияют и другие эффекты, такие как четырехволновое смешение, формирование солитонов и др.

Микроструктурированные волокна являются самой широко распространённой средой генерации низкоэнергетического ССК. Сильное уширение спектра в микроструктурированном волокне, связано с увеличением эффективной нелинейности благодаря малому размеру сердцевины (1–3 мкм), а волноводный эффект вносит существенный вклад в хроматическую дисперсию, которая сдвигает длину волны нулевой дисперсии групповой скорости в рабочий диапазон ИК лазеров сверхкоротких импульсов [8].

Однако, генерация спектрального суперконтинуума с высокой энергией в твердом теле ограничена его необратимым разрушением при достижении мощности оптического пробоя среды. Это обычно обусловлено появлением оптического филамента - феномена, который возникает как следствие динамического равновесия между процессами керровской самофокусировки излучения и его дефокусировки в электронной плазме, вызванной многофотонной ионизацией вещества. Использование в качестве среды генерации жидкости, помещенной в кювету, позволяет повысить порог повреждения среды и, как следствие, увеличить энергию генерируемого ССК. Но фокусировка высокоинтенсивного излучения в кювету с жидкостью малого размера приведет к разрушению кварцевых окон кюветы при достижении уровня энергии сотен мкДж, что ограничивает возможности получения ССК с высокой энергией.

Использование струи жидкости в качестве среды генерации (см. рис. 1) позволяет значительно увеличить порог повреждения благодаря отсутствию кюветы, а также тому факту, что каждый следующий импульс взаимодействует со своей областью среды (при надлежащей скорости течения), что не приводит к эффекту накопления. В данной работе будут рассмотрены особенности генерации суперконтинуума в твердых телах, волокнах и жидкостях, а также возможность применения для спектроскопии накачка-зондирование. В качестве примера будет рассмотрена реализация схемы спектроскопии накачка зондирование с использованием излучения суперконтинуума в качестве зондирующего излучения для исследования нелинейного пропускания и динамики возбуждения носителей в кристаллах селенида цинка.

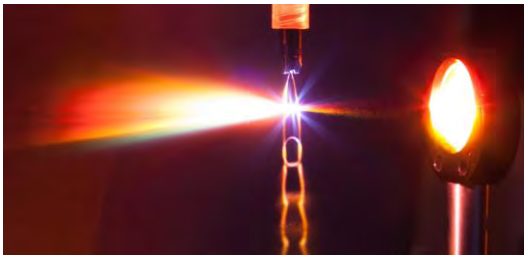


Рис. 1. Генерация суперконтинуума в плоской струе воды

Нелинейная спектроскопия позволяет получать данные о дисперсии нелинейного отклика вещества, о структуре и положении спектральных линий, что позволяет извлечь разнообразную

информацию о строении молекул. Использование фемтосекундных импульсов позволяет наблюдать сверхбыстрые процессы в веществах и получать сведения о внутримолекулярной динамике различных процессов. Фемтосекундные импульсы обладают большей пиковой мощностью, что способствует многофотонному возбуждению в веществе без его разрушения.

Фемтосекундные импульсы используются для исследования внутримолекулярной динамики в методе спектроскопии накачки-зонирования или «pump-probe» спектроскопии [9]. В методе используется два фемтосекундных лазерных импульса. Первый – импульс накачки, падает на объект и вызывает в нем возмущения, а через определённое время задержки второй - зондирующий, проходит через возбужденный образец и фиксирует изменения состояния вещества. Действие импульса накачки анализируется либо с помощью сравнения характеристик зондирующего импульса до и после возбуждения образца, либо рассматриваются только изменения характеристик зондирующего пучка после прохождения через возбужденный образец.

Используя импульсы фемтосекундного спектрального суперконтинуума и варьируя время задержки относительно импульса накачки, в методе спектроскопии накачка-зондирование мы получаем спектр поглощения исследуемого образца в возбужденном состоянии и его релаксационные характеристики, которые являются уникальным для каждого конкретного вещества.

На рисунке 2 представлена схема спектроскопии накачка-зондирование использованием суперконтинуума, полученного из тонкой струи воды, в качестве зондирующего излучения с диапазоном генерируемых частот 300 - 1400 нм. В качестве накачки использовалось излучение от фемтосекундной системы на кристаллах титан-сапфира, на основе генеративного усилителя (Regulas 35f-1k, Авеста-Проект) со следующим параметрами: длительность импульса 30 фс, энергия до 2,3 мДж, частота повторения до 1 кГц. Плотность мощности накачки перед падением на образец составляла порядка 10 ГВт/см^2, спектрального суперконтинуума – 3 ГВт/см^2. Излучение ССК, прошедшего через исследуемый образец, регистрировалось на спектрометре. Опорный спектрометр использовался для отслеживания стабильности генерируемого суперконтинуума.

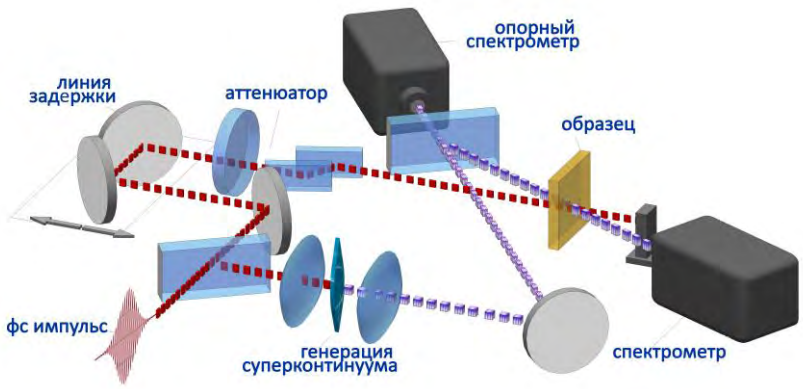


Рис. 2. Схема спектроскопии накачка-зондирование использованием суперконтинуума в качестве зондирующего излучения

Показано, что для достижения более интенсивного и стабильного при длительных экспериментах ССК падающая плоская струя воды является более оптимальным источником, нежели твердые тела и волокна.

Литература

1. *Alfano R.R., Shapiro S.L., Phys. Rev. Lett. 24, 592 (1970)*
2. *Dudley J.M., Genty G., Coen S., Rev. Mod. Phys. 78, 1135 (2006)*
3. *Dubietis A., et al., LITH J PHYS 57, 113–157 (2017)*
4. *Dobryakov A.L., et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 113106 (2010)*
5. *Krylov V., et al., Opt. Lett. 21, 2005-2007 (1996)*
6. *Bespalov V.G., et al., J. Opt. Technol. 65, 823-825 (1998)*
7. *Кандидов В.П., Голубцов И.С., Косарева О.Г., Квантовая электроника 34, 348–354 (2004)*
8. *Skryabin D.V., Gorbach A.V., Rev. Mod. Phys. 82, 1287–1299 (2010)*
9. *Rulliere C. Springer Science+ Business Media (2005)*

РАЗРАБОТКА МОЛЕКУЛЯРНЫХ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ФИТОПАТОГЕНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЛУОРЕСЦЕНТНО-МЕЧЕНЫХ ОЛИГОНУКЛЕОТИДОВ

Максимов А.Ю.[1*], Шилова А.В.[2], Варушкина А.М.[2]

[1] *Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН, г.Пермь*
[2] *Пермский федеральный научный центр УрО РАН, г. Пермь*
[*] *E-mail:* almaks1@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-1610182

Разработка и использование методов молекулярных исследований с применением флуоресцентных меток является важным направлением биофотоники. Бурное развитие флуоресцентных методов в сопряжении с микрочиповыми технологиями, достижениями в области микрофлюидики, микроэлектроники и других направлений привело к новому этапу развития и автоматизации молекулярно-биологических исследований, появлению omics-направлений, таких, как геномика, протеомика, метаболомика и т.д. В частности, совершенствуются методы и аппараты для полимеразной цепной реакции в реальном времени, гибридизации нуклеиновых кислот, высокопроизводительного секвенирования, флуоресцентного иммуноанализа и др. Важным приложением данных методов является генетический анализ и выявление патогенов с использованием флуоресцентно-меченых олигонуклеотидных зондов.

Инфекционные заболевания являются одной из основных угроз в процессах выращивания и хранения продуктов сельского хозяйства. В частности, они наносят значительный экономический ущерб картофелеводству. Своевременное выявление фитопатогенов особенно важно в процессах селекции новых сортов растений и поддержания семенного фонда.

В настоящее время в России разработаны диагностические системы для выявления большого количества вирусных и бактериальных заболеваний картофеля (www.syntol.ru/catalog/nabory-reagentov-dlya-ptsr-v-realnom-vremeni/dlya-vyyavleniya-fitopatogenov.html). Диагностикумы к другим возбудителям, таким как фитоплазмы картофеля, находятся в стадии разработки. При этом неохваченными являются такие важные, распространенные в средней полосе России и наносящие огромный ущерб фитопатогены, как грибы-микромицеты и другие инфекционные эукариотические микроорганизмы , ранее относимые к грибам (в частности, виды *Phoma exiqua, Fusarium oxysporum* и *Phytophthora infestans*). В то же время их диагностика по морфологическим признакам возможна лишь на поздних стадиях заражения, что сопряжено с быстрым распространением этих патогенов.

Для разработки диагностической системы получены изоляты фитопатогенных микроорганизмов методом прямого высева на селективные среды из клубней картофеля с признаками характерных заболеваний - фитофтороза, фомоза, фузариоза. Образцы зараженных клубней картофеля были отобраны ранее в ходе многолетнего мониторинга в хозяйстве ООО «Труженик» Краснокамского района и других агрофирмах Пермского края. Для выделения культур были использованы две основные среды – картофельный агар и среда Чапека, а также селективные среды для исследуемых возбудителей. Идентификация изолятов проводилась методами полифазной таксономии по культурально-морфологическим, хемотаксономическим, биохимическим признакам. Основными критериями для первичной идентификации фитопатогенных грибов являлось определение морфологических признаков, в т.ч. особенностей конидиогенеза.

Проведена разработка методологии детекции исследуемых фитопатогенов, в том числе ПЦР-анализ по генам рибосомальных РНК, в частности, 18S РНК, для плесневых грибов.

Проведен анализ и тестирование методов ПЦР-детекции исследуемых фитопатогенов. Выбраны ПЦР-системы, эффективные для обнаружения исследуемых фитопатогенов. В настоящее время существует большое количество ПЦР-систем для диагностики фитофторозов [1-5].

Для конструкирования праймеров и флуоресцентных зондов из базы данных GenBank (сайт Национального центра биотехнологической информации – NCBI) выбирали последовательности ДНК, включающие ген 18S рРНК, внутренний транскрибируемый спейсер 1, ген 5,8S рРНК и внутренний транскрибируемый спейсер 2 в кластере генов рРНК видов Fusarium oxysporum, Phoma exiqua, Phytophthora infestans, а также других видов и представителей близких родов. Для сравнения брали последовательности размером 1000 - 1900 п.н. Проводили множественное выравнивание, сравнивали и анализировали последовательности с помощью интерфейса ClustalW и программ

VectorNTI 11.5. Таким образом, выявляли генетические полиморфизмы, отличающие исследуемые виды.

В качестве исходных для конструирования праймеров брали последовательности длиной до 40 п.н., которые отличались на 1 или несколько нуклеотидов с 3’ конца. Выбранный участок ДНК проверяли на специфичность с помощью онлайн-сервиса BLAST nucleotide. Исходя из результатов анализа в этой программы было видно, на сколько выбранные олигонуклеотиды специфичны к выявляемой последовательности.

Для определения температурных параметров праймера, использовали программный пакет Vector NTI 11.5. На основе проанализированных последовательностей выбраны группы олигонуклеотидов, содержащие полиморфизмы на 3'-концах и выявляющие межвидовые различия.

Синтез олигонуклеотидов проводили на установке ASM-2000 (Биоссет, Новосибирск). Все олигонуклеотиды в виде пар были исследованы на специфичность и отсутствие неспецифического связывания в полимеразной цепной реакции. Выбраны олигонуклеотиды, показывающие наиболее стабильные результаты без появления неспецифических продуктов.

Таким образом, на основе специфичных олигонуклеотидов, комплементарных к последовательностям кластера генов рибосомальных РНК разработаны методы ПЦР и ДНК-гибридизации для выявления эукариотических фитопатогенов картофеля.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-45-590657.

Литература

1. *A’Hara D., et al. Methods Mol Biol. 1302, 17-27 (2015)*
2. *Barrera V., et al. Revista Argentina de microbiología 45(4):277-281 (2013)*
3. *Hussain T., et al. Saudi J Biol Sci. 21(4), 380-386 (2014)*
4. *Hussain T., et al. Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi 4(1) 63–69 (2016)*
5. *Xu R., et al. Lett Appl Microbiol. 62(2), 153-159 (2016)*

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ БИОФОТОНИКИ НА БАЗЕ НАУЧНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ ПЕРМИ

Максимов А.Ю.[1,2*], **Луговская Н.П.**[3]

[1] *Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь*
[2] *Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь*
[3] *Пермский федеральный научный центр УрО РАН, г. Пермь*
[*] *E-mail:* almaks1@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16183

Проблемы влияния света на живые объекты естественным образом интересует человечество с глубокой древности, но лишь в 20-м веке в связи с развитием методологии и приборной базы возникла фотобиология, как отдельное направление биофизики.

Биофотоника, изучающая эффекты взаимодействия биологических систем и объектов с различными видами электромагнитного излучения, является быстро развивающимся направлением научных исследований. Ускорение работ в данной области связано с развитием оптоволоконной и светодиодной техники, оптроники, методов молекулярной биологии и биохимии.

Лидерами в данной области в Пермском крае являются Пермский федеральный научный центр УрО РАН (ПФИЦ УрО РАН), при котором в текущем году создана молодежная Лаборатория агробиофотоники, его филиал – Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН (ИЭГМ УрО РАН) и Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ) в сотрудничестве с ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (ПНППК).

На базе пермских учреждений развиваются несколько основных направлений биофотоники. Это разработка методов молекулярно-генетических и биохимических исследований с использованием флуоресцентных инструментов детекции. В частности, разработка, совершенствование и применение методов ПЦР в реальном времени, гибридизационных и иммунофлуоресцентных методов для детекции различных биологических мишеней. Такие методы являются центральными в современных биологических, агробиологических, медицинских и экологических исследованиях. Данное направление развивается на базе ИЭГМ УрО РАН, лаборатории Агробиофотоники и ПГНИУ.

Интересным направлением является использование средств биофотоники в биокатализе и биофотокаталитические технологии для химического синтеза, фармакологии и биодеградации органических соединений.

В настоящее время инициировано развитие новых направлений:

Агробиофотоника, разработка методов и аппаратуры для досветки при выращивании растений в искусственных условиях (тепличные хозяйства, гидропоника, аэропоника). Применение когерентных источников для стимуляции роста сельскохозяйственных растений. Применение лазерных источников для селекции микроорганизмов-продуцентов для биотехнологии, сельскохозяйственных растений, а также для технологии клеточных культур.

Исследование влияния когерентного излучения на биологические объекты. Разработка фотодинамической и термотерапии различных заболеваний (в том числе онкологических и сосудистых) с использованием лазеров.

Разработка источников и систем детекции флуоресценции для использования в биофлуоресцентных методах; флуоресцентно-меченных частиц микронного и субмикронного размера для стандартизации микробиологических исследований объектов окружающей среды, медицинских образцов и биотехнологических процессов. Разработка датчиков, биомедицинкого, сельскохозяйственного и экологического применения.

Важной и стремительно развивающейся в мире методологией является разработка, датчиков и узлов приборов для биологического и медицинского приборостроения. Эти методы и узлы аппаратуры лежат в основе современных систем для проточной цитофлуорометрии и цитофотометрии, автоматического биохимического анализа, секвенирования нового поколения, микрочиповых аппаратов и др., которые в настоящее время не производятся в России.

Развитие данных направлений позволит вывести приборостроение для биологических, медицинских, агробиологических и экологических исследований на новый технологический уровень.

ДАТЧИК ДЕФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ –ПЕРО, СФОРМИРОВАННОГО В СЕРДЦЕВИНЕ КОМПОЗИТНОГО ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА

Егорова О.Н. [1*], **Лихачев И.Г.** [1], **Васильев С.А.** [2], **Сверчков С.Е.** [1], **Галаган Б.И.** [1], **Денкер Б.И.** [1], **Семенов С.Л.** [2], **Пустовой В.И.** [1]

[1] *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва*
[2] *Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва*
* *E-mail: egorova@nsc.gpi.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16184

Волоконно-оптические датчики на основе интерферометра Фабри-Перо являются компактными и надежными устройствами, позволяющими проводить измерение различных физических величин. Одним из видов волоконного интерферометра Фабри-Перо является устройство, непосредственно интегрированное в структуру световода, и представляющее собой полость внутри оптического волокна. Предложены различные техники создание таких полостей, например, с использованием фемтосекундного лазерного излучения [1, 2], микроструктурированных дырчатых световодов [3, 4, 5, 6], а также процесса сварки обычных оптических волокон [7, 8, 9] и волокна с высоким содержанием оксида алюминия в сердцевине [10].

В настоящей работе представлен новый простой метод формирования интерферометра Фабри-Перо, представляющего собой микрополость внутри оптического волокна, основанный на сварке в электрическом разряде обычного и композитного волокна, изготовленного с помощью плавления фосфатного стекла в трубке из кварцевого стекла [11]. Для создания интерферометра использовался световод с сердцевиной диаметром 10 мкм и концентрацией оксида фосфора в сердцевине около 35 мол.%. На рисунке 1a представлена фотография полученной микрополости 1 при сварке на сварочном аппарате Fujikura FSM80 при мощности дуги 50 единиц (производитель сварочного аппарата предоставляет только относительные значения) и длительности разряда 300 мс. Механизм образования микрополости, по-видимому, обусловлен как испарением части стекла сердцевины, так и релаксацией напряжений в сердцевине (возникающих при вытяжке за счет высокой разности КТР стекла сердцевины и оболочки композитного световода) за счет нагрева торца световода в начале процесса сварки. В результате этих процессов в области сердцевины на поверхности торца световода образуется углубление, которое затем, при сплавлении торцов световодов в процессе сварки, преобразуется в микрополость.

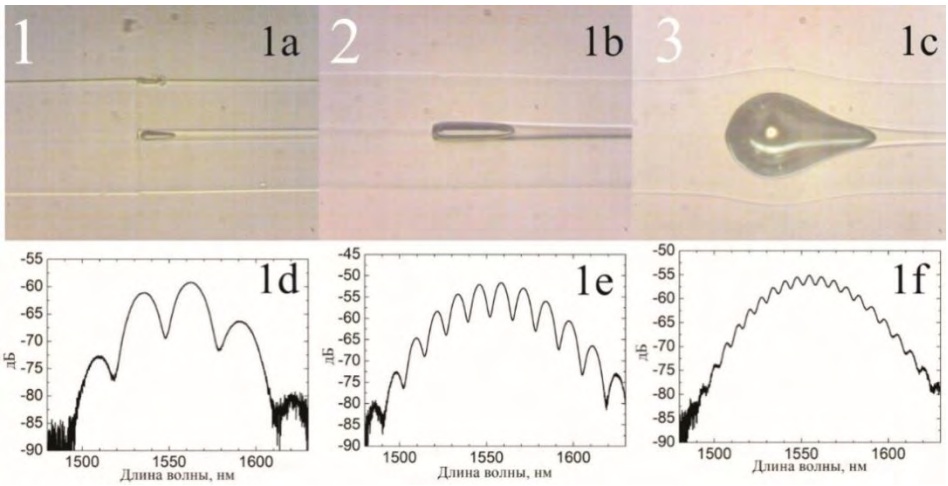


Рисунок 1. Фотографии микрополостей в сердцевине световода: 1a – исходной (длительность дуги 300 мс), 1b и 1c – полученные из исходной после прогрева дополнительной дугой, длительностью 600 и 2300 мс соответственно; 1d, 1e и 1f – спектры отражения интерферометров

На рисунке 1b и 1c представлены фотографии микрополостей 2 и 3, полученных прогревом исходной микрополости 1 дополнительной дугой длительностью 600 мс и 2300 мс соответственно. Как видно, под действием давления паров стекла сердцевины, испаряемого в результате данного прогрева, объем микрополости увеличивается в длину вдоль легкоплавкой сердцевины, а при более длительных нагревах и в поперечном направлении расширяя более тугоплавкую кварцевую оболочку.

Таким образом, контролируемый нагрев интерферометра при относительно небольших температурах может быть использован для подстройки фазы интерферометра и его периода.

На рисунках 1d-1f представлены спектры отражения интерферометров Фабри-Перо, образованных двумя границами газ-стекло, как показано на рисунке 2a. Рассчитанные по периоду интерференции отраженного сигнала длины интерферометров 1, 2 и 3 составляют 40 мкм, 93 мкм и 172 мкм соответственно. Добротность интерферометра снижается с ростом длины интерферометра, что связано, очевидно, с ростом оптических потерь внутри микрополости.

Отметим, что процесс формирования микрополостей в такой комбинации волокон имеет хорошую воспроизводимость. Так, при одинаковых параметрах электрической дуги вариации длины микрополости не превышали 5%.

Для полученных интерферометров Фабри-Перо исследовалось влияние относительного удлинения световода и температуры на спектр отражения. В качестве источника излучения использовался суперлюминесцентный полупроводниковый диод в окрестности длины волны 1550 нм с шириной спектра 50 нм (SLD), регистрация отраженного сигнала проводилась с помощью оптического анализатора спектров (OSA) (рис. 2a). К участку световода с интерферометром в точках 1 и 2, расстояние между которыми составляло около 30-50 см, прикладывалось растягивающее усилие, которое обеспечивало относительное удлинение оптического волокна. Зависимость сдвига минимума сигнала в окрестности длины волны 1550 нм в спектре отражения интерферометров 1, 2 и 3 от относительного удлинения световода представлено на рисунке 2b. Чувствительность датчика на основе интерферометров 1 и 2 составила около 1,7 пм/(мкм/м). Чувствительность интерферометра 3 была немного выше – 2,3 пм/(мкм/м).

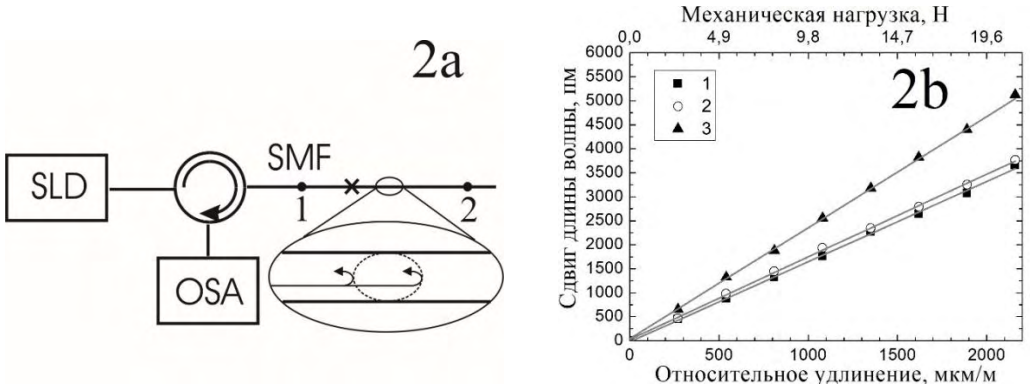


Рисунок 2. 2a – схема установки. 2b – зависимость сдвига длины волны одного из минимумов в спектре отражения интерферометров 1, 2 и 3 от относительного удлинения световода

Для изучения температурной чувствительности полученные интерферометры помещались в трубчатую печь, где производился их нагрев от комнатной температуры до температуры 500 °C с шагом 50 °C. Температурная чувствительность полученных образцов составляет достаточно низкую величину - в среднем 1 пм/°C, что хорошо согласуется с данными полученными в других работах [3-8]. Столь низкая температурная чувствительность обусловлена низким КТР кварцевого стекла и позволяет не прибегать к дополнительной температурной компенсации показаний датчика.

Таким образом, нами предложен и исследован новый вариант волоконного интерферометра Фабри-Перо, который может быть относительно легко изготовлен путем сплавления стандартного и композитного световодов, и является перспективным в качестве датчика деформации с низкой температурной чувствительностью.

Литература

1. *Rao Y.J., et al, Optics Express, 15, 14123-14128 (2007)*
2. *Wei T., et al, Optics Letters, 33, 536-538 (2008)*
3. *Li E., et al, Appl. Phys. Lett., 92, 101117 (2008)*
4. *Villatoro J., et al, Optics Letters, 34, 2441-2443 (2009)*
5. *Ferreira M. S.,et al, Optics Express, 20, 21946-21952 (2012)*
6. *Favero, F. C., et al, Optics Express, 20, 7112-7118 (2012)*
7. *Liu S., et al, Optics Letters, 39, 2121-2124 (2014)*
8. *Duan D.W., et al, Applied Optics, 51, 1033-1036 (2012)*
9. *Machavaram V.R., et al, Sensors and Actuators A 138, 248-260 (2007)*
10. *Ma Z., et al, Conference on Optical Fiber Sensors, WF48 (2018)*
11. *Egorova O.N., et al, Opt. Express 22, 7632 (2014)*

РАСШИРЕННЫЕ ФОРМАТЫ МОДУЛЯЦИИ ДВУХЭЛЕКТРОДНОГО МОДУЛЯТОРА МАХА-ЦЕНДЕРА

Щербаков В.В.[1*], **Солодков А.Ф.**[1], **А.А. Задерновский**[2]

[1] *АО «Центр волоконно-оптических систем передачи информации», г. Москва*
[2] *МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), г. Москва*
[*] *E-mail:* vospi@bk.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16185

Введение

Основным недостатком протяженных аналоговых волоконно-оптических систем передачи информации является неравномерность передаточной частотной характеристики. При определенных частотах происходит практически полное подавление сигнала модуляции интенсивности света. Оно обусловлено хроматической дисперсией групповой скорости электромагнитных волн в волокне. Детектируемый сигнал интенсивности света на частоте модуляции формируется, в первом приближении, как результат интерференции двух волн, возникающих при биении боковых спектральных компонент первого и минус первого порядка с несущей электромагнитной волной. Из-за дисперсии, указанные волны биений приобретают на выходе из волокна неодинаковые фазовые сдвиги, величина которых зависит от частоты модуляции. В частности, при определенных частотах модуляции эти волны оказываются в противофазе, что и приводит к подавлению выходного сигнала.

Для преодоления дисперсионной деградации мощности используется специальный формат модуляции, обеспечивающий генерирование однополосного оптического сигнала, содержащего только одну из двух боковых спектральных компонент вблизи частоты несущей. В отсутствие второй боковой компоненты, имеющейся единственной электромагнитной волне биений просто не с чем интерферировать. Другая возможность это использование формата модуляции с двумя боковыми спектральными полосами и подавленной несущей. В этом случае нет двух волн биений боковых спектральных полос с несущей электромагнитной волной, ввиду отсутствия последней. Соответственно, в оптоволокне формируется одна волна биений между верхней и нижней боковыми полосами. Частота этой волны равна удвоенной частоте модуляции. Из-за отсутствия парной волны деструктивная интерференция, ответственная за дисперсионную деградацию мощности сигнала, оказывается невозможной. В данной работе наглядно продемонстрирована передача таких сигналов по оптоволокну без амплитудных дисперсионных искажений. Обсуждаются возможные фазовые искажения этих сигналов. Представлено семейство новых форматов однополосной модуляции двухэлектродного модулятора Маха-Цендера.

Форматы однополосной модуляции

Стандартный способ получения однополосного оптического сигнала модуляции интенсивности состоит в использовании двухэлектродного модулятора Маха-Цендера, на управляющие электроды которого подаются модулирующие сигналы напряжений с одинаковыми частотами и амплитудами, но сдвинутые на $\pi/2$ по фазе. При этом, в качестве рабочей выбирается квадратурная точка передаточной функции модулятора.

Пусть на сигнальные электроды подаются модулирующие напряжения $U_1 = U_0 \cos(\omega_m t + \varphi_{m1})$ и $U_2 = U_0 \cos(\omega_m t + \varphi_{m2})$ с частотой ω_m, амплитудой U_0 и начальными фазами φ_{m1} и φ_{m2}. Выбор рабочей точки модулятора осуществляется посредством приложения к электродам одинакового постоянного напряжения смещения U_b с противоположной полярностью. Такое напряжение вносит одинаковые по модулю, но противоположные по знаку сдвиги фаз в каждое плечо интерферометра.

Спектральное представление электромагнитной волны на выходе из модулятора можно записать в виде суммы

$$E = E_0 e^{i(\omega_0 t + \varphi_0)} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \, e^{in(\omega_m t + \frac{\varphi_{m1} + \varphi_{m2}}{2})} \qquad (1)$$

с коэффициентами

$$C_n = i^n J_n(\pi u_0/2) \cos\left(\frac{\pi u_b}{2} + n\frac{\varphi_{m1} - \varphi_{m2}}{2}\right), \qquad (2)$$

где введены нормированные переменные $u_{\text{b}} = U_{\text{b}}/U_{\pi}$ и $u_0 = U_0/U_{\pi}$ и J_n это функция Бесселя первого рода порядка n. Соответственно, спектральное представление сигнала модуляции интенсивности света на выходе из модулятора имеет вид

$$P_{\text{out}} = \frac{P_0}{2}\left[1 + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} i^n J_n\left(\pi u_0 \sin\frac{\varphi_{\text{m1}} - \varphi_{\text{m2}}}{2}\right)\cos\left(\pi u_{\text{b}} + n\frac{\pi}{2}\right)e^{in\left(\omega_{\text{m}}t + \frac{\varphi_{\text{m1}}+\varphi_{\text{m2}}}{2}\right)}\right] \quad (3)$$

Условие того, что в спектре электромагнитной волны пропадает полоса n=± 1 выглядит как

$$\left|u_{\text{b}} \pm \frac{\varphi_{m1} - \varphi_{m2}}{\pi}\right| = 1. \quad (4)$$

В таблице 1 представлены примеры однополосных форматов модуляции. Некоторые из них хорошо известны. Так, формат с u_{b}= ± 1/2, $(\varphi_{\text{m1}} - \varphi_{\text{m2}})/\pi$ = ± 1/2 исторически был первым предложенным однополосным оптическим форматом модуляции [1]. Другой формат с u_{b}= ± 1/3, $(\varphi_{\text{m1}} - \varphi_{\text{m2}})/\pi$ = ± 2/3 был предложен относительно недавно [2].

Таблица 1. Примеры форматов модуляции

Номер гармоники с амплитудой равной нулю n	Нормированное напряжение смещения $u_{\text{b}} = U_{\text{b}}/U_{\pi}$	Нормированная разница фаз модулирующих напряжений $(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})/\pi$
$n = -1$	$\pm 1/2$	$\mp 1/2$
	$\pm 1/3$	$\mp 2/3$
	$\pm 2/3$	$\mp 1/3$
$n = +1$	$\pm 1/2$	$\pm 1/2$
	$\pm 1/3$	$\pm 2/3$
	$\pm 2/3$	$\pm 1/3$

Не все форматы, включенные семейство (4) являются равноценными. Из (3), например, видно, что выбор квадратурной рабочей точки с $u_{\text{b}} = \pm 1/2$ приводит к подавлению всех четных гармоник сигнала модуляции интенсивности. Тем самым, нелинейные искажения сигнала на выходе из модулятора оказываются минимальными. Другим интересным примером [2] служит формат $u_{\text{b}} = -1/3$, $(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})/\pi = +2/3$ или $u_{\text{b}} = +1/3$, $(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})/\pi = -2/3$, при котором в электромагнитной волне пропадает не только полоса $n = -1$, но и $n = +2$. А при выборе следующих параметров модуляции $u_{\text{b}} = -1/3$, $(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})/\pi = -2/3$ или $u_{\text{b}} = +1/3$, $(\varphi_{m1} - \varphi_{m2})/\pi = +2/3$ пропадают одновременно полосы $n = +1$ и $n = -2$. Видно, что в этом случае модуляция становится «однополосной» не только по основной, но и по второй гармонике. В результате, следует ожидать уменьшения нелинейных искажений сигнала при его транспортировке по оптоволокну.

Рассмотрим, например, формат $\varphi_{\text{m1}} = \varphi_{\text{m}}$, $\varphi_{\text{m2}} = \varphi_{\text{m}} + 2\pi/3$ $u_{\text{b}} = \pm 1/3$. Сигнал модуляции интенсивности (3) на выходе из модулятора (на входе в оптоволокно) принимает форму

$$P_{\text{out}} = \frac{3P_0}{4}\left[1 \mp \frac{\pi u_0}{2}\cos\left(\omega_{\text{m}}t + \varphi_m - \frac{\pi}{6}\right)\right], \quad (5)$$

а на выходе из волокна длиной L [3]

$$P_{\text{s}} = \frac{3P_0}{4}\left\{1 \mp \frac{\pi u_0}{2}\cos[\omega_{\text{m}}(t - L/u) + \varphi_{\text{m}} - \frac{\pi}{6} \pm \theta]\right\}, \quad (6)$$

где u - групповая скорость сигнала в оптоволокне и $\theta = \pi c(\omega_{\text{m}}/\omega_0)^2 DL$ - параметр транспортировки сигнала по волокну с коэффициентом дисперсии D. Видно, что передаваемый оптический сигнал модуляции интенсивности света не испытывает амплитудных искажений. Соответствующие сигналы на входе и на выходе из оптоволокна отличаются только фазой.

Форматы модуляции с подавленной несущей

Если в качестве рабочей использовать точку минимума передаточной функции модулятора, то при различных фазах управляющих напряжений модулятора получаем семейство форматов амплитудной модуляции с подавленной несущей. Так, при выборе рабочих точек с $u_{\text{b}} = \pm 1$ амплитуда

C_0, согласно (2), оказывается равной нулю, а оптический сигнал модуляции интенсивности (3) содержит только четные гармоники и при малой глубине модуляции $\pi u_0 < 1$ принимает вид

$$P_{\text{out}} = \frac{P_0}{2}\left(\frac{\pi u_0}{2}\right)^2 \sin^2\frac{(\varphi_{\text{m1}} - \varphi_{\text{m2}})}{2}\left[1 - \cos 2\left(\omega_{\text{m}} t + \frac{\varphi_{\text{m1}} + \varphi_{\text{m2}}}{2}\right)\right]. \quad (7)$$

В качестве примера рассмотрим формат модуляции $\varphi_{\text{m1}} = \varphi_{\text{m}}$, $\varphi_{\text{m2}} = \varphi_{\text{m}} \pm \pi$, $u_{\text{b}} = \pm 1$. В этом случае двухэлектродный модулятор работает в режиме балансного, а спектр соответствующей электромагнитной волны (1) с коэффициентами (2) содержит только нечетные гармоники. На выходе из модулятора (на входе в оптоволокно) получаем следующий сигнал модуляции интенсивности света

$$P_{\text{out}} = \frac{P_0}{2}\left(\frac{\pi u_0}{2}\right)^2 \left[1 + \cos 2\left(\omega_{\text{m}} t + \varphi_{\text{m}}\right)\right], \quad (8).$$

а на выходе из волокна [3]

$$P_{\text{s}} = \frac{P_0}{2}\left(\frac{\pi u_0}{2}\right)^2 \left\{1 + \cos 2\left[\omega_{\text{m}}(t - L/u) + \varphi_m\right]\right\}. \quad (9)$$

Сравнение сигналов и на входе (8) и на выходе (9) из волокна говорит о том, что оптические сигналы с подавленной несущей передаются без амплитудных искажений. Более того, выходной сигнал (9) не зависит от параметра транспортировки θ, то есть от дисперсионных свойств оптоволокна.

Заключение

В статье рассмотрены специальные форматы модуляции интенсивности света двухэлектродного модулятора Маха-Цендера, устойчивые к дисперсионной деградации мощности. Среди них форматы оптической однополосной модуляции и форматы модуляции с подавленной оптической несущей. Установлено семейство новых форматов однополосной модуляции двухэлектродного модулятора Маха-Цендера. На нескольких примерах обсуждается сравнительная ценность различных форматов модуляции этого семейства. Получены явные выражения для оптических сигналов однополосной модуляции и сигналов модуляции с подавленной несущей. Наглядно продемонстрирована передача таких сигналов без дисперсионной деградации мощности. Спектральные амплитуды этих сигналов на входе и на выходе из оптоволокна одинаковы по величине (без учета затухания в волокне). Другими словами показано, что сигналы однополосной модуляции и сигналы модуляции с подавленной несущей устойчивы к амплитудным искажениям. Что касается фазовых искажений, то указанные сигналы ведут себя по-разному.

Сигналы однополосной модуляции на входе (5) и на выходе (6) из волокна отличаются друг от друга по фазе на величину, содержащую параметр транспортировки θ. Так как этот параметр является квадратичной функцией частоты модуляции, то фазо-частотная характеристика волоконно-оптической линии связи оказывается нелинейной. Это приводит к нарушению фазовых соотношений между спектральными компонентами передаваемого сигнала и его искажению на выходе из волокна.

Выходной оптический сигнал модуляции с подавленной несущей (9) не зависит от параметра транспортировки θ. Поэтому такой сигнал оказывается устойчивым не только к амплитудным, но и к фазовым искажениям. При этом, использование такого формата модуляции сопровождается удвоением частоты при конверсии электрического сигнала в оптический.

Литература

1. *Smith G., Novak D., Ahmed Z., IEEE Transactions on microwave theory and techniques 45(8), 1410-1415 (1997)*
2. *Min Xue, Shilong Pan, Yongjiu Zhao, Journal of lightwave technology 32(19), 3317-3323 (2014)*
3. *Щербаков В.В., Солодков А.Ф., Задерновский А.А., РЭНСИТ 11(2), 161-176 (2019)*

АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМИ ИМПУЛЬСОВ С ТЕРАГЕРЦОВОЙ ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ

Мельник М.В.*, Цыпкин А.Н., Путилин С.Э., КозловС.А.

Международная Лаборатория Фемтосекундной Оптики и Фемтотехнологий, Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург
* *E-mail:* maxim.melnick@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16186

Перспективным методом повышения скорости и объема передаваемой информации является объединение генерации частотных гребенок и создание временной последовательности сверхкоротких субимпульсов, позволяющие создать взаимосвязь между этими двумя структурами [1]. Важным параметром для создания квазидискретных временных структур является значение коэффициента квадратичной фазовой (или линейной частотной) модуляции. Его увеличение приводит к увеличению частоты следования субимпульсов в квазидискретной временной структуре при интерференции двух фазовомодулированных импульсов. Однако, исследований прямой зависимости генерации квазидискретных временных и спектральных структур, а также их соответствия друг другу в зависимости от значения фазовой модуляции не проводилось.

Квадратическая модуляция фазы сверхкороткого импульса (линейная частотная модуляция) возникает при его прохождении через диспергирующую среду, что приводит к увеличению длительности. Для высокоинтенсивных импульсов имеет место явление фазовой самомодуляции, что приводит к сильной частотной модуляции во временной структуре. Эта частотная модуляция может быть описана линейной функцией [2]. Линейно-чирпированный импульс можно представить в виде:

$$\boldsymbol{E(t) = E_0 \exp\left(-2\frac{t^2}{{\tau_p}^2}\right) \sin\left(\omega_0\left(1+\frac{\alpha_0}{\tau_p}t\right)t\right)} \quad (1)$$

где $\boldsymbol{E_0}$ – амплитуда импульса, $\boldsymbol{\tau_p}$ – его длительность, $\boldsymbol{\omega_0}$ – его центральная частота, $\boldsymbol{\alpha_0}$ – коэффициент линейной частотной модуляции. Интерференция двух такихимпульсов, сдвинутых на временную задержку $\boldsymbol{\Delta\tau}$ много меньшую длительности отдельного импульса $\boldsymbol{\tau_p}$, может быть представлена в виде:

$$\boldsymbol{E = E_0 \times \exp\left(-2\frac{t^2}{\tau_p^2}\right) \times \left[2\sin\left[(\omega_0+\omega_{mod})t+\frac{\alpha_0}{\tau_p}\omega_0 t^2+\varphi_0\right]\times\cos(\omega_{mod}+\varphi_0)\right]} \quad (2)$$

где $\boldsymbol{\varphi_0 = \frac{\omega_0\Delta\tau}{2}\left(1+\frac{\alpha_0}{\tau_p}\Delta\tau\right)}$ – начальная фаза, $\boldsymbol{\omega_{mod} = \frac{\alpha_0}{\tau_p}\omega_0\Delta\tau}$ – частота модуляции интерференционного поля.

В то же время, согласно теореме смещения Фурье, спектр такой интерференции может быть представлен в виде:

$$\boldsymbol{|G_s(\omega)|^2 = 2|G(\omega)|^2 \times [1+cos(2\pi\omega\Delta\tau)]} \quad (3)$$

где:

$$\boldsymbol{G(\omega) = \frac{1}{2i}\sqrt{\frac{\pi}{\frac{2}{\tau_p^2}-i\omega_0\frac{\alpha_0}{\tau_p}}}\times exp\left(\frac{-(\omega-\omega_0)^2}{4\left(\frac{2}{\tau_p^2}-i\omega_0\frac{\alpha_0}{\tau_p}\right)}\right) - \frac{1}{2i}\sqrt{\frac{\pi}{\frac{2}{\tau_p^2}+i\omega_0\frac{\alpha_0}{\tau_p}}}\times exp\left(\frac{-(\omega+\omega_0)^2}{4\left(\frac{2}{\tau_p^2}+i\omega_0\frac{\alpha_0}{\tau_p}\right)}\right)} \quad (4)$$

Положение отдельного пикаквазидискретного спектра можно рассчитать из формулы (2) как $\omega_i = \omega_0 \pm i\delta\omega$, где $\delta\omega = \frac{1}{\Delta\tau}$ – период частотных пиков. В то же время положение отдельного пика временной последовательности возможно представить из формулы (1) в виде$\omega_i = \omega_0 \pm \frac{i}{\delta\tau} \pm \omega_{\Delta\tau}$ где $\frac{1}{\delta\tau} = \omega_{mod}$, $\omega_{\Delta\tau} = 2\frac{\alpha_0}{\tau_p}\omega_0\Delta\tau = 2\omega_{mod}$. Таким образом, $2\omega_{mod}$ - частотная надбавка из-за отличия временной ширины результата интерференции двух импульсов, сдвинутых на временную задержку $\Delta\tau$, и временной ширины каждого импульса в отдельности.Наличие этого дополнительного слагаемого приводит к несоответствию между интерференционными временными и спектральными структурами. Пример такого несоответствия при кодировании квазидискретной временной последовательности представлен на рисунке 1.Видно, что сдвиг минимума после вырезания одного из пиков составляет порядка 0,1 от нормированной частоты. Если мы рассчитаем значение надбавки, полученной аналитически, то получим$2\omega_{mod} = 2\frac{\alpha_0}{\tau_p}\omega_0\Delta\tau = 0{,}1\omega_0$.

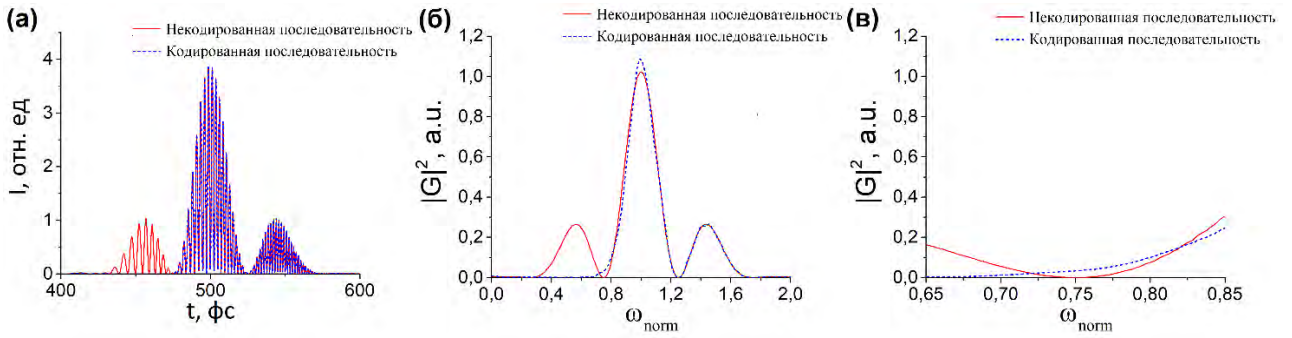


Рисунок 1 - Результат вырезания одного из пиков во временной области для $\Delta\tau = 10$ фс

Основываясь на полученных результатах, возможно генерировать и управлять последовательностями с любой частотой следования и длительности при учете коэффициента несоответствия. На рисунке 2 приведен пример численного моделирования управления последовательностью с частотой следования от 0.2 до 0.4 ТГц для чирпированного импульса длительностью 100 пс и коэффициентом фазовой модуляции 0.015. Частота следования изменялась путем изменения временной задержки между интерферирующими импульсами от 1.5 до 3 пс.

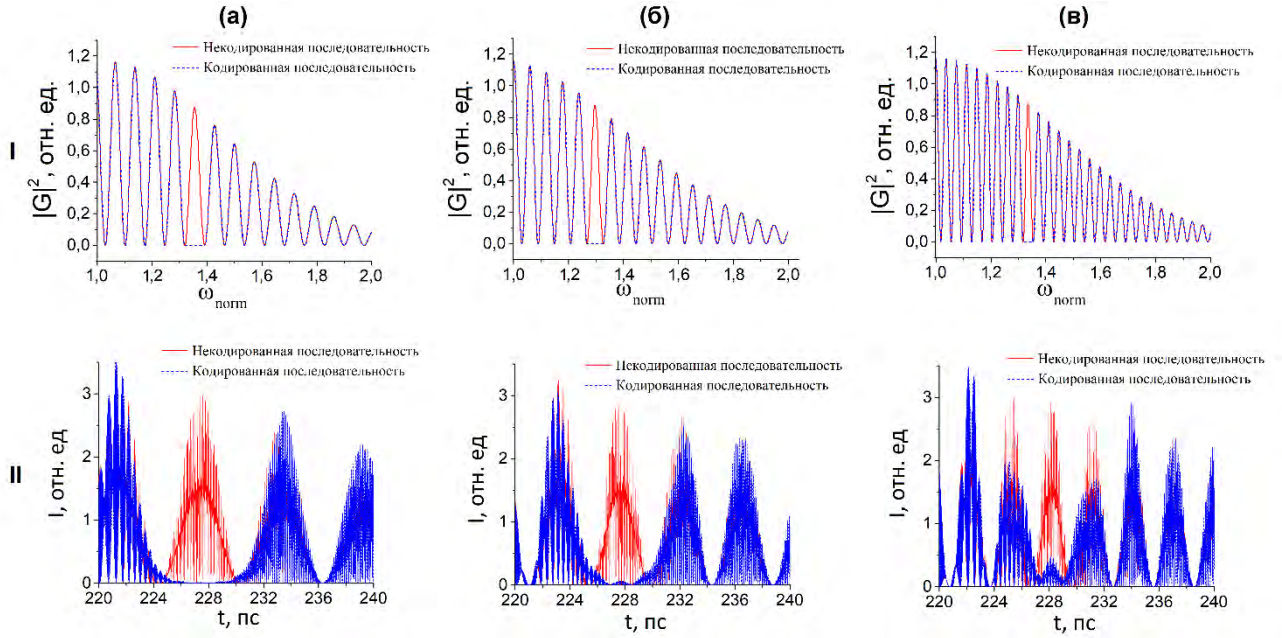


Рисунок 2 - Результат численного моделирования кодирования временной последовательности путем вырезания спектральных компонентов для импульса длительностью 100 пс, частотой следования (а) 0.2 ТГц, (б) 0.25 ТГц, (в) 0.4 ТГц. Красные кривые – исходный квазидискретный спектр (I) и исходная последовательность субимпульсов (II), синие кривые – кодированные

В результате кодирования информации для частоты следования 0.4 ТГц происходит искажение временной последовательности (Рисунок 2(в-II)), которое связано с тем, что временной смещение (37) для данного случая в 2,4 раза больше, чем длительность одного субимпульса, что приводит к формированию остаточного интерференционного члена. В настоящей работе приведено аналитическое исследование возможности управления последовательностью субимпульсов любой длительности с терагерцовой частотой следования, формируемой при интерференции двух фемтосекундных фазовомодулированных импульсов, сдвинутых на временную задержку при учете коэффициента несоответствия. Коэффициент несоответствия между центральной частотой субимпульсов в квазидискретной временной структуре и центральной частотой спектральных линий в квазидискретной спектральной структуре определен аналитически для фемтосекундных импульсов с линейной частотной модуляцией. Существование этого коэффициента подтверждено экспериментально и методами численного моделирования. Продемонстрировано его влияние на искажение закодированной последовательности. Показано, что при учете этого несоответствия возможно генерировать последовательности с любой длительностью и частотой повторения.

Литература

1. *Tcypkin A. N., Putilin S. E.Appl. Phys. B123, 44 (2017)*
2. *Belashenkov N. R. et al. J. Opt. Technol.75, 611-614 (2008)*

ГЕНЕРАЦИЯ ШУМОВЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРАХ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

Комаров А.К.[1*], Комаров К.П.[1], Терентьев В.С.[1], Ли Л.[2], Чжао Л.М.[2]

[1] Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[2] Цзясунская ключевая лаборатория передовых лазерных материалов и устройств, Совместный инновационный центр передовых лазерных технологий и промышленных разработок, Школа физики и электронной техники, Университет Цзянсу, г. Сюйчжоу, Китай
[*] E-mail:komarov@iae.nsk.su

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16187

Дан анализ динамики генерации шумовых импульсов, состоящих из стохастически меняющихся диссипативных солитонов. Установлен механизм пространственно-временной локализации таких импульсов, препятствующий их распаду на отдельные независимые солитоны. Полученные результаты могут представлять интерес для разработки и создания волоконных лазеров высокоэнергетических импульсов с широким спектром излучения, превышающим ширину полосы усиления активной среды [1].

Для анализа используется безразмерное комплексное уравнение с нелинейностью потерь и показателя преломления 3-5-ой степени, которое описывает эволюцию поля в однонаправленном кольцевом лазере с равномерно распределенной внутрирезонаторной средой [2, 3]:

$$\frac{\partial E}{\partial \zeta} = (D_r + iD_i)\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \left(\frac{1+a}{1+b\int |E|^2 dz} - 1 - \sigma + (iq + p)I + (iq_2 - p_2)I^2 \right) E, \qquad (1)$$

где $E(\zeta, \tau)$ – амплитуда электрического поля, τ – временная переменная в единицах $\delta t = \sqrt{|\beta_2| L/2}$ – дисперсия групповой скорости второго порядка для внутрирезонаторной среды и L – длина резонатора), ζ – нормированное расстояние, пройденное полем (число проходов излучения через лазерный резонатор), D_r и D_i – частотные дисперсии усиления и показателя преломления, соответственно, q и q_2 – нелинейности показателя преломления 3-го и 5-го порядков, p и p_2 – нелинейности потерь 3-го и 5-го порядков. $I = |E|^2$ – интенсивность излучения, a – параметр накачки, b – параметр насыщения усиления. Параметр $p > 0$ определяет нелинейные потери, формирующие импульс. Параметр $p_2 > 0$ определяет нелинейные потери, ограничивающие пиковую интенсивность формируемого импульса. σ – полные линейные резонаторные потери. Выбор численных значений параметров уравнения (1) для проведения компьютерного моделирования генерационной динамики определялся требованием наиболее близкого соответствия реальным волоконным лазерам, работающим в режиме шумовых импульсов [1, 4].

Рисунок 1 демонстрирует переходной процесс, длящийся около 10 проходов поля через лазерный резонатор, и установившийся режим генерации шумового импульса. Начальное распределение интенсивности описывается гауссовой функцией. Как показывает численное моделирование, шумовой импульс является весьма устойчивым образованием несмотря на постоянное хаотическое движение и изменение формирующих его солитонов.

Рисунок 2 позволяет проследить эволюцию одиночного уединенного солитона $(270 < \tau < 295)$ и шумового импульса с небольшим числом солитонов $(295 < \tau < 370)$, оказавшихся вне основного шумового импульса в результате интенсивного хаотического движения и взаимодействия внутриимпульсных солитонов. После нескольких колебаний энергия уединенного солитона уменьшилась, и он исчез из генерации. Как и в случае уединенного солитона, малый шумовой импульс также не выдерживает конкуренции с основным шумовым импульсом и вытесняется из генерации.

Причина такой конкуренции заключается в следующем. Для уединенных солитонов частотные чирпы для правой и левой половин солитона имеют разные знаки и равны по величине. Для таких солитонов чирп накапливается с ростом числа проходов поля через резонатор и принимает значительную величину, что снижает эффективность их усиления из-за частотной дисперсии усиления и резонаторных потерь. Этот механизм уменьшения усиления значительно ослаблен для солитонов, находящихся в основном шумовом импульсе, поскольку они формируются из шумовой составляющей поля, из его фрагментов, которые имеют наиболее подходящую фазовую модуляцию

для такого формирования. Кроме того, стохастическое взаимодействие солитонов друг с другом в основном шумовом импульсе также ослабляет формирование частотного чирпа и повышает эффективность усиления солитонов. Этим объясняется преимущество в конкуренции шумового импульса по сравнению с одиночным солитоном и с шумовым импульсом, состоящим из небольшого числа солитонов. В результате этого преимущества, все полевые структуры, отделившиеся от основного шумового импульса, вытесняются из генерации. Как следствие, шумовой импульс имеет хорошую пространственно-временную локализацию и является устойчивым образованием, несмотря на неустойчивость солитонов, из которых он состоит.

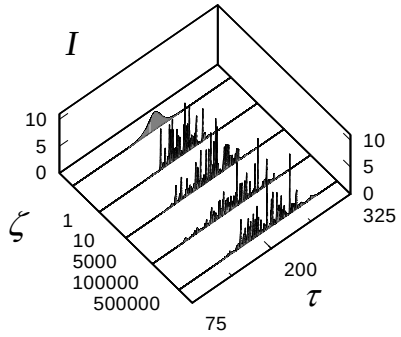


Рис. 1. Временно́е распределение интенсивности $I(\tau)$ ***в зависимости от числа проходов поля через лазерный резонатор*** ζ

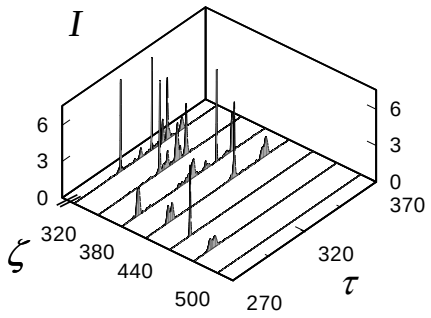


Рис. 2. Эволюция уединенного солитона $(270 < \tau < 295)$ ***и малого шумового импульса*** $(295 < \tau < 370)$***, оказавшихся вне основного шумового импульса***

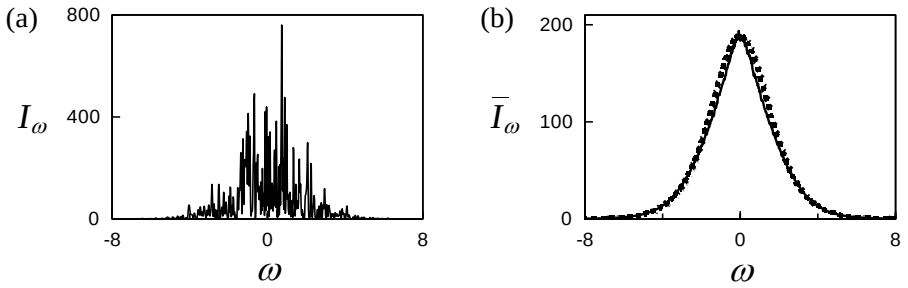


Рис. 3. (a) Мгновенное спектральное распределение шумового импульса и (b) усредненное спектральное распределение $\bar{I}_\omega$ ***(сплошная линия) при*** $\zeta = 10^5$***. Интервал усреднения составляет*** $\delta\zeta = 10^4$***. Пунктирная кривая на рис. (b) описывает зависимость*** $\bar{I}_\omega = 190/\cosh^2(0.5\omega)$

Рисунок 3 демонстрирует спектральные характеристики шумового импульса. Усредненный спектр такого импульса хорошо аппроксимируется функцией в виде квадрата гиперболического секанса.

Режим шумовых импульсов наблюдался как для случая аномальной $D_i > 0$, так и нормальной дисперсии $D_i < 0$. При этом в обоих случаях при реализации режима шумовых импульсов выполнялось условие: $D_i q_2 > 0$.

Волоконные лазеры, работающие в режиме шумовых импульсов, представляют интерес как источники высокоэнергетических импульсов с широким спектром излучения, ширина которого может превышать спектральную ширину полосы усиления. Такие лазеры имеют потенциальное применение в оптической когерентной томографии, оптических когерентных радарах и оптоволоконных сенсорных системах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта №19-52-53002, а также проектов №11911530083 и № 11674133.

Литература

1. *Zhao L., et al, Opt. Comm. 281, 157-161 (2008)*
2. *Thual O. and Fauve S., J. Phys. France 49, 1829-1833 (1988)*
3. *Komarov A., et al, Phys. Rev. A 96, 033820 (2017)*
4. *Soto-Crespo J.M., Grelu Ph., and Akhmediev N., Phys. Rev. E 84, 016604 (2011)*

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАРЦЕВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА С РАССЕИВАЮЩЕЙ СВЕТООТРАЖАЮЩЕЙ ОБОЛОЧКОЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИМЕРА

Маковецкий А.А.*, Замятин А.А., Ряховский Д.В.

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино Московской обл.
**E-mail: maz226@ms.ire.rssi.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16188

Многомодовые оптические волокна (ОВ) со световедущей сердцевиной из чистого кварцевого стекла диаметром 200–600 мкм и светоотражающей оболочкой из кремнийорганического полимера широко используются в лазерной медицине [1]. Поверх отражающей оболочки на волокно наносят защитное покрытие, как правило, из термопластичного полимера.

Фильерный способ нанесения покрытий из расплавов термопластичных полимеров позволяет наносить покрытия на вытягиваемое “голое” (без буферного слоя) кварцевое волокно непосредственно во время вытяжки [2]. Если в качестве термопласта использовать фторированные термопластичные полимеры (т. е полимеры с высоким содержанием фтора), имеющие показатель преломления меньший, чем у кварцевого стекла, то указанным способом можно изготовить многомодовые кварц-полимерные ОВ, в которых отражающая оболочка одновременно является и защитной.

Целью данной работы является исследование оптических свойств одного из представителей таких ОВ – кварц-полимерного оптического волокна с отражающей оболочкой из сополимера тетрафторэтилена с этиленом марки *Tefzel*.

Для исследований были изготовлены образцы ОВ с диаметром световедущей сердцевины 400 мкм, толщиной отражающей оболочки 70–80 мкм и длиной до 50 м. Оптические потери в них составили 75–150 дБ/км (рис. 1)), числовая апертура – от 0.425 до 0.25 (в зависимости от длины ОВ и апертуры возбуждающего излучения).

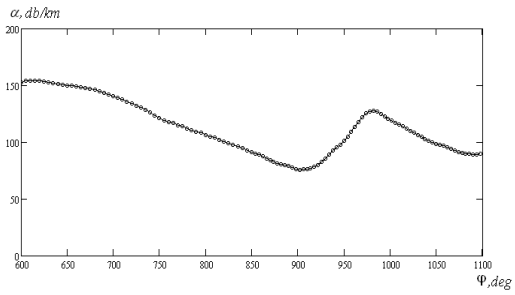


Рис. 1. Спектральная зависимость оптических потерь в кварц-полимерном ОВ с покрытием Tefzel, диаметр световедущей сердцевины – 400 мкм, толщина покрытия – 70 мкм

При распространении света по исследованным ОВ наблюдалось сильное его рассеяние светоотражающей оболочкой *Tefzel*, видное под любым углом наблюдения к оси ОВ (рис.2). Оно связано с кристалличностью полимера, т. е. наличием в материале кристаллической и аморфной фаз, имеющих различные значения показателя преломления (для *Tefzel* степень кристалличности составляет 40 – 60 % [3]). Рассеиваются эванесцентные части мод ОВ, распространяющихся в светоотражающей оболочке на глубине порядка длины волны от границы раздела сердцевина-оболочка.

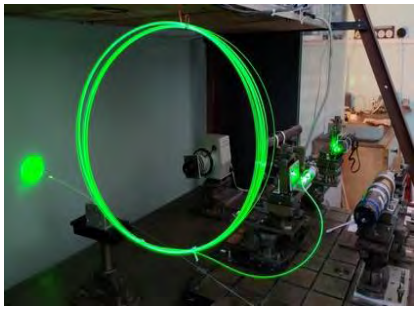


Рис.2. Фотография бухты ОВ длиной 20 м (диаметр бухты – 220 мм) при его засветке поляризованным излучением лазера LG Laser 303 (длина волны излучения – 532 нм). Ввод излучения в волокно – через объектив 10*. 0.4

Результаты измерения индикатрисы рассеяния излучения (λ = 0.63 мкм) участком оболочки ОВ длиной l = 10 мм приведены на рис. 3.

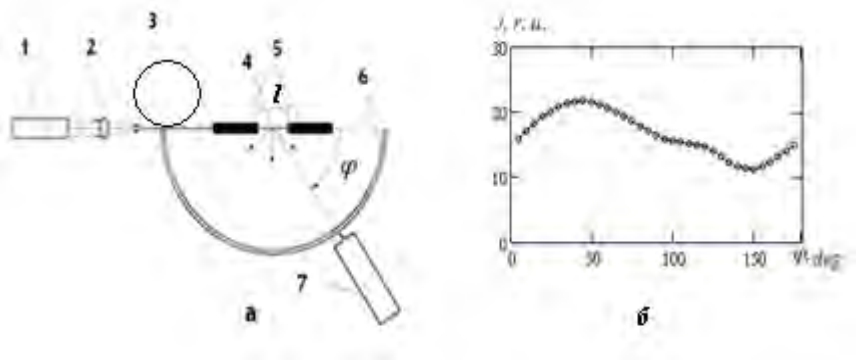


Рис. 3. Схема измерения индикатрисы рассеяния (а) и измеренная индикатриса рассеяния (б). На схеме обозначено: 1 – He-Ne лазер, 2 – объектив 10*, 0.4, 3 – исследуемое ОВ, 4 – открытый участок ОВ длиной 10 мм, 5 – экранирующие трубочки на ОВ, 6 – гониометр, 7 – ФЭУ-51

Для выявления относительных вкладов поглощения и рассеяния в суммарные оптические потери ОВ были проведены измерения интенсивностей коллинеарно (в пределах малого телесного угла) прошедшего через пленку *Tefzel* толщиной h = 1 мм излучения *He-Ne*-лазера $I_1 \approx I_0 \cdot exp(-(\alpha_a + \alpha_s)h)$ и суммарного рассеянного ею излучения $I_2 \approx I_0(1- exp(-\alpha_s h))$; здесь I_0 – падающее излучение, α_a и α_s – показатели поглощения и рассеяния соответственно. Величина I_1 была измерена непосредственно, величина I_2 – интегрированием (суммированием) индикатрисы рассеяния пленки в пределах телесного угла, дополнительного к коллинеарному углу. Эти величины связаны соотношением:

$$\exp(-\alpha_r h) = 1 - (I_2 / I_1)\exp(-(\alpha_a + \alpha_r)h) \qquad (1)$$

Подставив в (1) $\exp(-(\alpha_a + \alpha_s)h) = 0{,}27$ и $I_1/I_2 \approx 2{,}48$, получим $\exp(-\alpha_s h) = 0{,}33$. Для показателей поглощения α_a и рассеяния a_s отсюда следуют значения $\alpha_a = 0{,}20$ мм$^{-1}$ и $\alpha_s = 1{,}11$ мм$^{-1}$, т. е. главным вкладом отражающей оболочки *Tefzel* в оптические потери ОВ являются потери на рассеяние в ней**.**

В работе также было проведено сравнение коэффициентов рассеяния покрытий *Tefzel* и кремнийорганического эластомера марки СИЭЛ-159-305, широко используемого в качестве светоотражающей оболочки в кварц-полимерных ОВ. Зафиксировав угол наблюдения $\varphi = 90^0$ в схеме рис. 3, измеряли интенсивность рассеянного оболочками *Tefzel* и СИЭЛ-159-305 излучения λ = 0.63 мкм для ОВ с диаметром кварцевой сердцевины 400 мкм. Рассеяние СИЭЛ-159-305 было в 3 – 5 раз меньше, чем *Tefzel.*

Несмотря на наличие дополнительных оптических потерь за счет рассеяния света светоотражающей оболочкой, образцы исследованных ОВ с покрытием *Tefzel* длиной 3 – 5 м вполне пригодны к использованию в лазерной медицине.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

Литература

1. *Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. М: Физматлит, 2010, 488 с.*
2. *Замятин А.А., Г.А. Иванов, Маковецкий А.А., Шилов И.П. Патент РФ № 2402497. 2010*
3. *Энциклопедия полимеров. Том 3. М: Советская энциклопедия, 1977, 1152 с.*
4. *Маковецкий А.А., Замятин А.А., Аксёнов В.А. Технология изготовления и оптические свойства кварцевых оптических волокон с отражающей оболочкой из термопластичного полимера // Оптический журнал, 2019, Т. 86, № 3, С. 78-83*

РАДИАЦИОННО НАВЕДЕННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В СВЕТОВОДАХ С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ НЕЛЕГИРОВАННОГО КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА В БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ: ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВЫТЯЖКИ

Кашайкин П.Ф.[1], Томашук А.Л.[1], Салганский М.Ю.[2], Вечканов Н.Н.[2], Гурьянов А.Н.[2], Косолапов А.Ф.[1], Семёнов С.Л.[1]

[1] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[2] Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН, Нижний Новгород
[*] E-mail: kpf@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16189

Применение волоконных световодов в условиях повышенного уровня радиации приводит к возникновению в них радиационных дефектов (радиационных центров окраски, РЦО), поглощающих световой сигнал, который распространяется по световоду. Это явление известно, как радиационно наведенное поглощение (РНП) света. Для многих применений эффект РНП должен быть минимизирован, т.е. ВС должны быть радиационно-стойкими. Известно, что световоды с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и фторсиликатной светоотражающей оболочкой являются одними из наиболее радиационно-стойких в ближнем ИК-диапазоне. Основными РЦО, ограничивающими радиационную стойкость в них, являются самозахваченные дырки (STH-self-trapped holes) [1]. Предшественниками STH могут являться различного рода напряжения и деформации сетки стекла световода, которые вмораживаются в процессе его вытяжки из преформы из-за разности физико-химических свойств (КТР, температура стеклования, вязкость) сердцевины и оболочки, а также из-за закалочных условий (происходит быстрое охлаждение ВС от температуры Т~2000 °С до комнатной) при вытяжке. Стоит отметить, что в литературе приведены достаточно противоречивые данные о зависимости РНП световодов от параметров вытяжки [2-4]. В работе [2] было показано, что основным параметром, влияющим на РНП является натяжение при вытяжке. Однако, в работах [3,4] не было установлено однозначной корреляции между условиями вытяжки и радиационной стойкостью световодов.

В предыдущих исследованиях [5,6] путем оптимизации расходов реагентов в парогазовой смеси при синтезе сердцевины в MCVD-процессе нам удалось добиться значительного снижения РНП в световодах с нелегированной сердцевиной из кварцевого стекла. Следующим шагом увеличения радиационной стойкости была оптимизация условий при вытяжке световода.

Таблица 1. Исследуемые ВС и основные параметры их вытяжки

Название Преформы	Номер режима	Температура, °С	Натяжение, г	Скорость, м/мин
F1	M1	1880	38	35
	M2	1900	26	33
	M3	1920	21	33
F2	M1	1840	43	36
	M2	1860	38	38
	M3	1890	28	38
F3	M1	1815	30	13
	M2		50	26
	M3		70	42
F4	M1	1805	19	10
	M2		27	14
	M3		50	30
F5	M1	1780	85	35
	M2	1800	30	20
F6	M1	1790	60	40
F7	M1	1790	51	37

F8	M1	1700	100	12

Таким образом, в данной работе исследовалась зависимость РНП световодов с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла от условий при вытяжке: температуры, натяжения, скорости с целью максимального снижения РНП.

Для этого были изготовлены восемь аналогичных преформ с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и фторированной оболочкой с Δn~0.01. Из преформ были вытянуты световоды с внешним диаметром 125 мкм при различных режимах вытяжки. Варьировались температура, скорость и натяжение (табл. 1). Для обозначения световода, вытянутого в определенном режиме, далее по тексту используется обозначение *«FyMx»*, где *y*- номер преформы, *x*-номер режима при вытяжке.

Все ВС были облучены в «НИЦ Курчатовский институт» на установке ГУТ-200М с активным источником ^{60}Co со средней энергией гамма квантов 1,2 МэВ. В процессе (180 мин.) и после (30 мин.) γ-облучения происходила регистрация спектров РНП в спектральном диапазоне 900-1700 нм при помощи спектрометра на линейке диодов InGaAs NIR512 фирмы Ocean Optics. Максимальная поглощенная доза (SiO_2) составила 82 кГр при мощности дозы 7.6 Гр/с. Облучение проводилось при комнатной температуре.

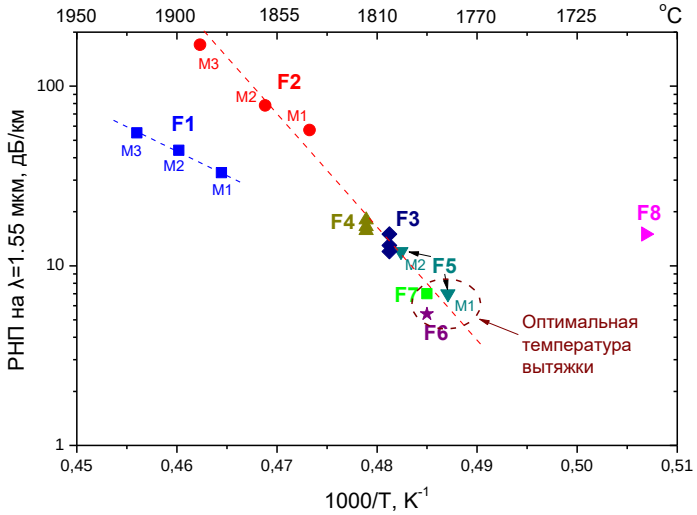


Рис. 1. Зависимость РНП при поглощенной дозе 2.5 кГр (мощность дозы 7.6 Гр/с) на длине волны 1550 нм от обратной температуры печи при вытяжке ВС

На рис. 1 представлена зависимость РНП при поглощенной дозе 2.5 кГр на длине волны λ=1550 нм от обратной температуры. Видно, зависимость РНП близка к экспоненциальной (рис. 1) в температурном интервале 1780-1880 °С, отклонение от которой можно связать с различными натяжением и скоростью, которые также влияют на РНП, однако в гораздо меньшей степени. При увеличении натяжения и скорости при фиксированной температуре (световоды *F4Mx* и *F5Mx*) происходит увеличение РНП всего на 15-20 %, а уменьшение температуры вытяжки с 1890 до 1780 °С приводит к снижению РНП более чем на порядок величины. Дальнейшее понижение температуры до Т=1700 °С вызывает рост РНП, что, по-видимому, связано уже с большим натяжением – 100 г (табл.1).

Отметим зависимость РНП от температуры при вытяжке для световода *F1Mx*, которая располагается ниже, чем для ВС *F2Mx* несмотря на то, что температура вытяжки для *F1M1* и *F1M2* больше, чем для *F2M3* (рис. 1). Очевидно, что это связано с большим содержанием ОН-групп в ВС *F1Mx* (3-4 ppm), что, как известно, способствует подавлению поглощения от STH.

Литература

1. *D. L. Griscom, J. Non. Cryst. Solids 149, 137 (1992)*
2. *Aikawa K. et al., US Patent 7440673 B2, 21.10.2008*
3. *Girard S. et al., J. Non. Cryst. Solids 352, 2637 (2006)*
4. *Alessi A. et al., Journal of Lightwave Technology, 30,1726-1732, (2012)*
5. *Tomashuk A.L. et al., Journal of Lightwave Technology, 32, 213-219, (2014)*
6. *Kashaykin P.F. et al., Journal of Lightwave Technology, 33, 1788-1793 (2015)*

ГЕНЕРАЦИЯ СУПЕРКОНТИНУУМА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСИЛЕННЫХ ШУМОПОДОБНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Волков И.А.[1] *, Ушаков С.Н.[1,2], Нищев К.Н.[1], Камынин В.А.[2], Цветков В.Б.[2], Лихачев М.Е.[3], Салганский М.Ю.[4]

[1] Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, Саранск, Россия
[2] Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Москва, Россия
[3] Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия
[4] Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН, Н.Новгород, Россия
**e-mail address: emofan_80@mail.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16190

В настоящее время генерация суперконтинуума (СК) привлекает к себе значительное внимание благодаря различным практическим применениям в лазерной метрологии частоты [1], высокоскоростной оптической связи [2] и оптической когерентной томографии (ОКТ) [3]. Типичный метод генерации суперконтинуума основан на нелинейном уширении спектра ультракоротких импульсов при распространении в оптических волокнах. В зависимости от характеристик импульсов, таких как длительность и длина волны относительно точки нулевой дисперсии волокна, процесс генерации суперконтинуума включает нескольких нелинейных процессов, таких как фазовая самомодуляция (ФСМ), четырехволновое смешивание (ЧВС), вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), рамановский сдвиг частоты (РСЧ), генерация дисперсионных волн (ГДВ). В последнее время предложены шумоподобные импульсы, генерируемые волоконно-кольцевыми лазерами, для генерации бесструктурных широких спектров, покрывающих от десятков до сотен нанометров [4,5].

В данной работе продемонстрирована генерация СК в оптических волокнах с использованием шумоподобных импульсов, полученных на выходе волоконного лазера, работающего в режиме синхронизации мод за счет нелинейного вращения плоскости поляризации (НВПП). Схема лазера и генерации СК представлены на рис. 1. Полностью волоконный лазер генерировал шумоподобные импульсы со спектральной шириной на уровне -3 дБ 15нм, частотой повторения 1,1МГц и энергией в импульсе 6 нДж. Мощность импульса увеличивалась за счет внешнего волоконного усилителя на основе солегированного Er/Yb волокна до 307 мВт. Затем усиленный импульс запускался в оптическое волокно длиной 3м.

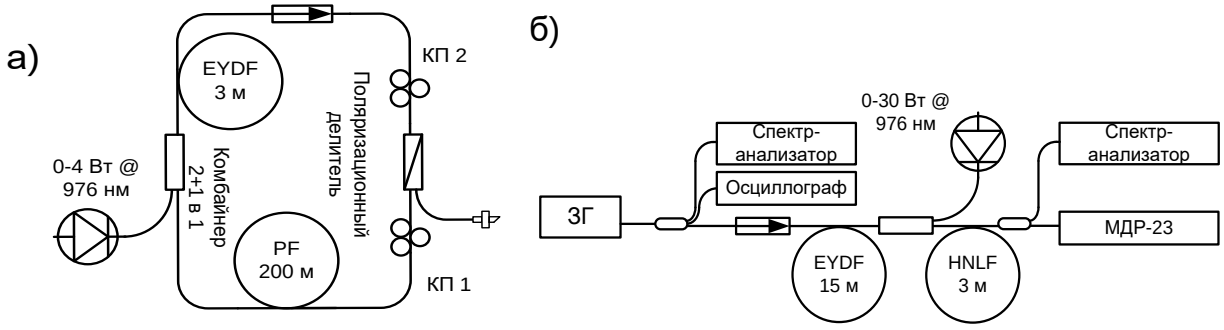


Рис. 1. а) Схема лазера; б) схема генерации СК

В качестве оптических волокон были использованы волокна легированные оксидом германия GeO_2 с разной длинной нулевой дисперсии (НЦВО «ФОТОНИКА»), а также волокно марки LEAF фирмы Corning. В таблице 1 приведены обозначения и характеристики волокон:

Таблица 1. Характеристики оптических волокон

Марка волокна	γ, $Вт^{-1}км^{-1}$	β_2, $пс^2/км$ (1,56мкм)	Длина волны нулевой дисперсии λ_{zwd}, мкм
Ge1	17,3	-3,6	1,48
Ge2	17,3	-0,58	1,55
Ge3	17,3	0,21	1,565
Ge4	17,3	47,8	2,3
Leaf	1,5	-7	1,3

Для волокон Leaf и Ge4 наблюдалось незначительное уширение спектра в основном в длинноволновой части за счет рамановского сдвига частоты. С увеличением мощности у волокна Ge4 наблюдается пик в области 1,7 мкм, а у волокна Leaf наоборот – появляется частотная компонента в коротковолновой области спектра. Значительное уширение оптического спектра наблюдалось для волокон марок Ge1-3. При минимальной входной мощности импульса 55 мВт уширение оптического спектра составляло более 250 нм. Спектр уширялся одновременно как в коротковолновую, так и в длинноволновую части спектра из-за комбинированных нелинейных эффектов, таких как ФСМ, ЧВС и РСЧ. На рис. 2 (а) представлена зависимость спектральной ширины оптического спектра на уровне -20 дБ для волокон Ge1-3 от мощности входного импульса. На рис. 2 (б) приведены оптические спектры при входной мощности импульсов 307 мВт.

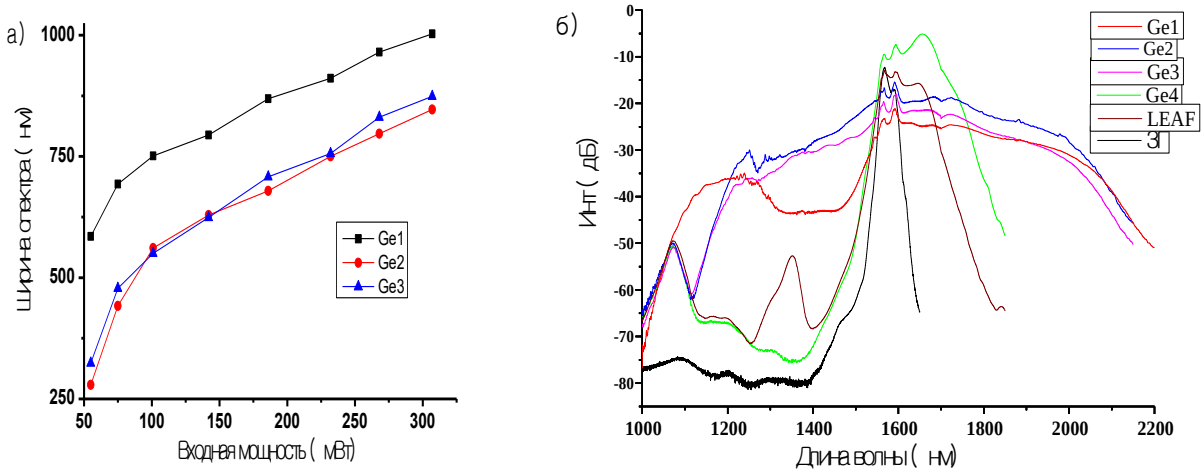


Рис. 2. а) зависимость ширины спектра на уровне 20дБ от мощности входного импульса; б) оптические спектры при мощности входного импульса 307 мВт.

В результате работы была получена генерация СК в оптических волокнах с использованием усиленных шумоподобных импульсов в спектральном интервале от 1050 до 2200 нм. Наибольшая ширина спектра СК на уровне 20 дБ получена в волокне марки Ge1 и равнялась 1мкм.

Литература

1. *M. Bellini, T.W. Hänsch, Opt. Lett., 25, 1049–1051 (2000)*
2. *H. Takara, et al, Electron. Lett., 36, 2089–2090 (2000)*
3. *N. Nishizawa, et al, Opt. Lett., 29, 2846–2848 (2004)*
4. *H. Xia, et al, App. Opt., Vol. 54, 9379-9378 (2015)*
5. *S.-S. Lin, S.-K. Hwang, J.-M. Liu, Opt. Exp., 22, 4152–4160 (2014)*

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ТЕЛЛУРОМ

Алышев С.В.[1], Харахордин А.В.[1], Фирстов С.В.[1,3*], Хопин В.Ф.[2], Фирстова Е.Г.[1], Мелькумов М.А.[1], Гурьянов А.Н.[2]

[1] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[2] Институт химии высокочистых веществ РАН, г. Нижний Новгород
[3] МГУ им. Н. П. Огарева, г. Саранск
[*] E-mail: fir@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16191

Разработка и исследование свойств световодов, легированных новыми активными элементами, является актуальной задачей, имеющей научную и практическую значимость. К элементам такого типа можно отнести p-элементы (Te, Pb, Bi), введение которых в стеклянную матрицу позволяет получить полосы широкополосной люминесценции в ближнем ИК диапазоне. Наибольший прогресс был достигнут в области изготовления и исследования висмутовых волоконных световодов, которые теперь можно использовать для получения эффективной лазерной генерации в спектральном диапазоне от 1140 до 1775 нм [1, 2]. Однако следует отметить, что на основе световода, легированного теллуром, также удалось получить лазерную генерацию в области 1550 нм при накачке на длине волны 1085 нм и T=77 K [3]. Эффективность теллурового волоконного лазера была крайне низкой (<1%). Причины этого остаются неизученными.

В данной работе будут приведены результаты исследования оптических свойств Te-легированного световода при низких температурах, нацеленного на выявление процессов, приводящих к диссипации энергии возбуждающего излучения и, как следствие, снижению эффективности лазеров.

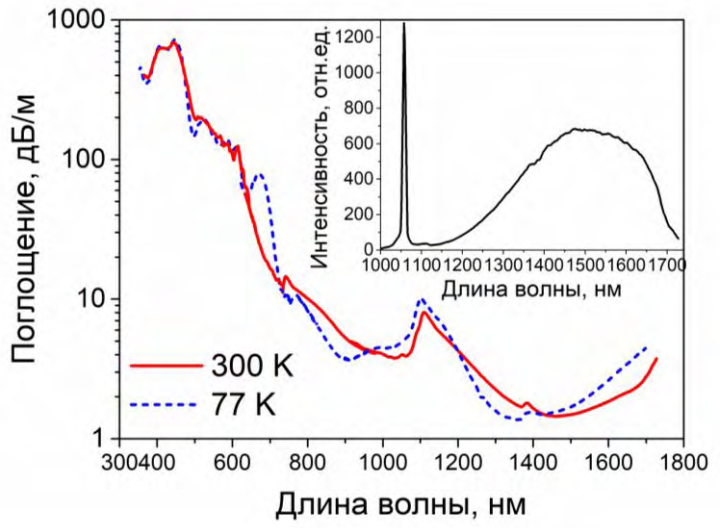


Рис. 1. Спектры поглощения Te-легированного световода при T=77 и 300 K. Типичный спектр люминесценции световода при возбуждении на длине волны 1058 нм при комнатной температуре (вставка)[3]

В качестве объекта исследования был выбран аналог волоконного световода, изготовленного по MCVD-технологии, который использовался для получения лазерной генерации в работе [3]. Сердцевина исследуемого световода имела следующий химический состав Te:94SiO_2–6GeO_2. Теллур вводился методом пропитки, остекловывание пористого слоя осуществлялось в атмосфере кислорода. Концентрация Te была ниже 0.02 ат.%.

На Рис. 1 показаны спектры поглощения исследуемого световода при 300 и 77 K. Основное заметное различие полученных спектров заключается в появлении (при температуре 77 K) полосы поглощения в области 700 нм. В остальных областях заметных изменений не наблюдается. В целом, типичный спектр поглощения такого световода состоит из широких взаимно перекрывающихся полос в области 1000, 800, 600 и 400 нм. Узкий пик в области 1100 нм связан с длиной волны отсечки второй моды. При возбуждении в полосу 1000 нм наблюдается интенсивная ИК люминесценция в области 1500 нм при комнатной температуре (Рис. 1, вставка). Помимо ИК люминесценции возбуждение в указанном диапазоне приводит к возникновению коротковолновой полосы люминесценции с максимумом около 740 нм (Рис. 2, а). Следует отметить, что данная люминесценция наблюдается исключительно при T=77 K. Использование ступенчатого возбуждения излучением на двух длинах волн позволило определить спектральную зависимость интенсивности люминесценции на 740 нм от длины волны поглощения активными центрами, находящимися в возбужденном состоянии. Полученные экспериментальные

результаты показаны символами на Рис. 2, б. Видно, что данная полоса люминесценции появляется при поглощении квантов с длинами волн 1060 нм и 1100-1300 нм.

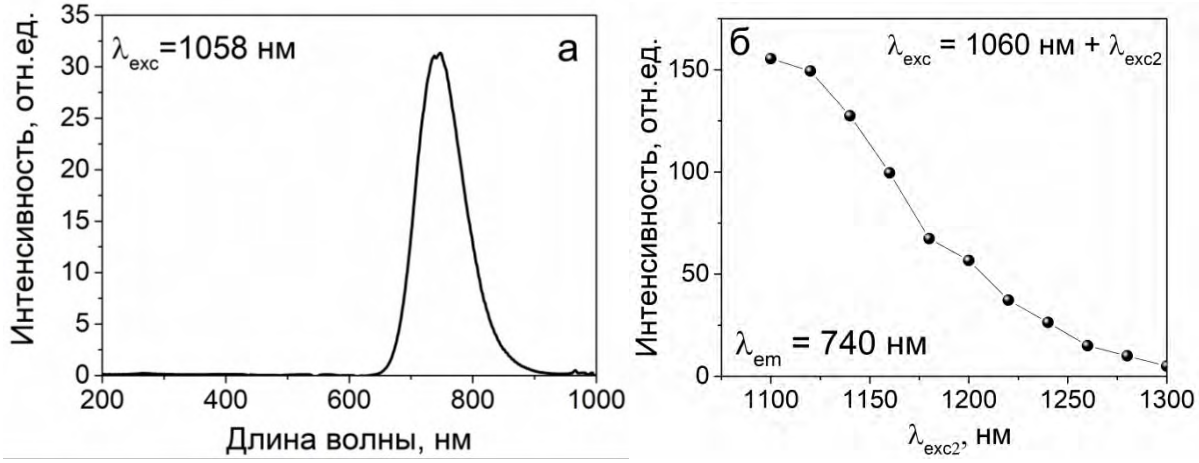


Рис. 2. а) Спектр антистоксовой люминесценции Te-легированного световода при T=77 K; б) Зависимость интенсивности антистоксовой люминесценции исследуемого световода от λ_{exc2} при одновременном возбуждении излучением на двух длинах волн (1060 нм + λ_{exc2})

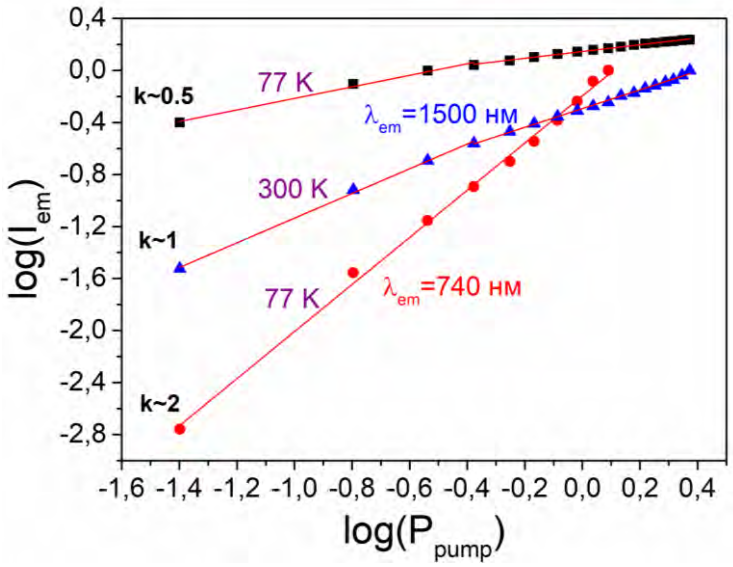


Рис. 3. Зависимости интенсивности стоксовой и антистоксовой люминесценции Te-легированного световода при T=77 и 300 K от мощности накачки на длине волны 1058 нм (двойной логарифмический масштаб). Около каждой кривой приведен угловой коэффициент линейной аппроксимации экспериментальных данных (для начального участка)

На Рис. 3 в двойном логарифмическом масштабе приведены зависимости интенсивности стоксовой и антистоксовой люминесценции Te-легированного световода при T=77 и 300 K от мощности накачки на длине волны 1058 нм. Зависимость антистоксовой люминесценция от мощности накачки имеет нелинейный характер. Изменение углового коэффициента для стоксовой люминесценции, который снижается с 1 при T=300 K до 0.5 при T=77 K обусловлено наличием интенсивных процессов поглощения квантов излучения накачки активными центрами, находящимися в возбужденном состоянии, и как следствие появлением антистоксовой люминесценции. Кроме того, следует отметить, что в отличие от стоксовой люминесценции, для которой наклонный коэффициент уменьшается с ростом мощности накачки, поведение антистоксовой люминесценции описывается квадратичной функцией во всем диапазоне исследуемых мощностей. Это, по-видимому, указывает на тот факт, что поглощение из возбужденного состояния происходит не с метастабильного, а вышерасположенного энергетического уровня. Полученные результаты позволяют построить схему энергетических уровней теллуровых центров, которая будет представлена непосредственно на предстоящей Всероссийской конференции по волоконной оптике (ВКВО 2019).

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (№18-32-00148).

Литература

1. *Bufetov I. A., et al, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 20, 0903815 (2014)*
2. *Firstov S. V., et al, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 24, 0902415 (2018)*
3. *Alyshev S. V., et al, Quantum. Electron. 44, 95 (2014)*

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ РАДИАЦИОННО-СТОЙКОГО АНИЗОТРОПНОГО ЭРБИЕВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В ПАО ПНППК

Вахрушев А.С.[1], Нурмухаметов Д.И.[1], Вохмянина О.Л.[1], Азанова И.С.[1], Димакова Т.В.[1], Рогожников П.Ю.[1], Яшков М.В.[2]

[1]Пермская научно-производственная приборостроительная компания, г. Пермь
[2] Институт химии высокочистых веществ РАН, г. Нижний Новгород

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16192

Использование волоконных систем является неотъемлемой частью современного мира. При этом с каждым годом требования по эксплуатации к таким системам возрастают, вследствие чего появляется потребность в оптических волокнах (ОВ) с широким спектром возможностей.

В продолжение работ по разработке изотропных эрбиевых радиационно-стойких оптических волокон (РС ОВ) [1], ПАО ПНППК совместно с НЦВО РАН и ИХВВ РАН разработано, изготовлено и испытано анизотропное эрбиевое РС ОВ типа «Панда». В работе проведено исследование характеристик анизотропного эрбиевого радиационно-стойкого оптического волокна в сравнении с аналогичным изотропным ОВ. Данное оптическое волокно предназначено для использования в волоконно-оптических гироскопах [2], лазерных системах, в телекоммуникации в условиях с высоким уровнем радиации.

Эрбиевая сердцевина анизотропного активного РС ОВ была дополнительно легирована ионами церия для повышения радиационной-стойкости, а также алюминием для лучшего растворения редкоземельных элементов (РЗЭ). Для выяснения влияния анизотропии на свойства волокна из преформы изготовлено одномодовое анизотропное ОВ типа «Панда» и изотропное ОВ. Поглощение для обоих типов волокон составило на длине волны 1,53 мкм от 18 до 24 дБ/км.

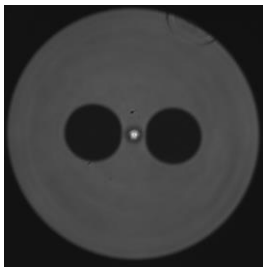


Рисунок 1 - Фотография торца активного радиационно-стойкого оптического волокна

Полученная величина двулучепреломления анизотропного ОВ составила – $6 \cdot 10^{-4}$, что больше зарубежных аналогов (заявленное двулучепреломление волокна IXF-EDF-FGL-PM компании IXBlue имеет двулучепреломление $2 \cdot 10^{-4}$ [3]). На рисунке 1 изображен торец изготовленного анизотропного РС ОВ. Поскольку преформы изотропного и анизотропного РС ОВ имеют одинаковые генерационные характеристики, провели сравнение спектров люминесценции. Оба типа волокна были 8 метров, с похожим поглощением на длине волны 1530 нм, накачка волокна осуществлялась с одинаковой мощностью лазерного диода. На рис. 2 спектры с пиком мощности на длине волны 1,53 мкм равным 0,12 условных единиц (у.е.) относятся к изотропному оптическому волокну, а при мощности равной 0,6-0,4 у.е. к анизотропному оптическому волокну. Нагружающие стержни из боросиликатного стекла повлияли на характеристики выходного излучения, понизив пик на длине волны 1,53 мкм в 2 раза и повысив пик на длине волны 1,56 мкм в 1,5 раза.

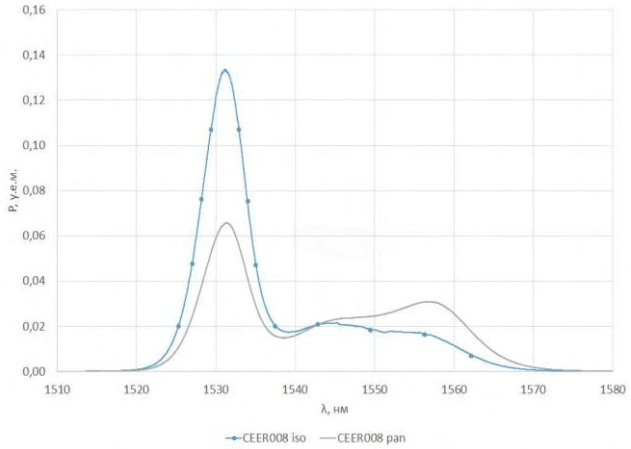


Рисунок 2 – Сравнение спектров анизотропного и изотропного ОВ; график с точками – изотропное ОВ, без точек – анизотропное ОВ

Для определения степени сохранения поляризации в анизотропном ОВ, собрана схема усилителя с использованием компонентов, сохраняющих состояние поляризации (рис. 3). Выяснилось, что при включении в схему изотропного волокна сохранение состояния поляризации не происходит. Тогда, как с анизотропным ОВ длиной 8 м уровень экстинкции падает не ниже 22 дБ (Произошло падение экстинкции на 10%. На выходе с изолятора значение экстинкции выходного излучения составляло 24 дБ).

Для прогнозирования срока службы в местах с высоким фоном гамма изучения,

проведены испытания обоих типов волокон на радиационную стойкость в схеме супер-люминесцентного волоконного источника.

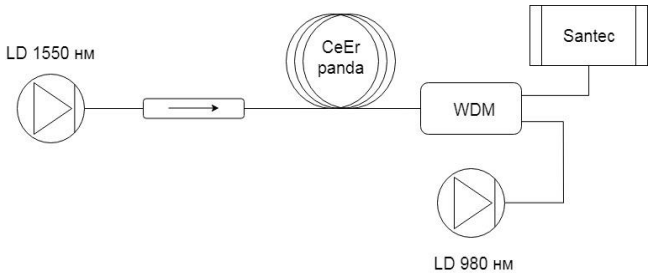


Рисунок 3 – Принципиальная схема волоконного усилителя

Результаты испытаний изотропного и анизотропного волокон при воздействии непрерывного гамма облучения от источника облучения ^{60}Co при поглощенной дозе в 1 кГр[1] с мощностью дозы 1,31 Гр/с при T=25°C приведены на рис. 4. Получено, что анизотропное ОВ является более стойким к ионизирующему излучению по сравнению с аналогичным изотропным ОВ. При одинаковых параметрах накачки, анизотропное РС ОВ имеет меньшую начальную мощность по сравнению с изотропным, но при этом в конце облучения его выходная мощность выше, чем у изотропного РС ОВ (процент падения выходной мощности анизотропное ОВ типа «Панда» составил ~40%, а для изотропного ОВ составил ~50%).

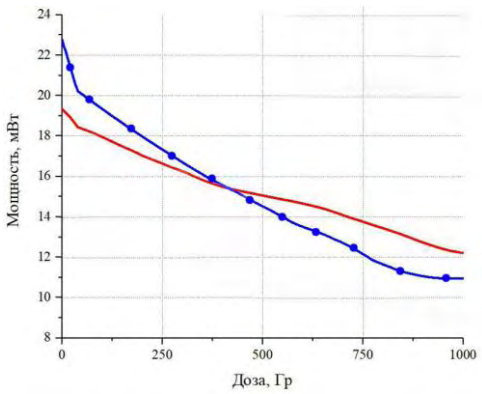


Рисунок 4 – Зависимость оптической мощности СВИ от дозы облучения активного волокна, источник облучения 60Co, мощность дозы 1,31 Гр/с, общая доза 1000 Гр, при T = 25°C. График с точками – изотропное ОВ, график без точек – анизотропное ОВ

Таким образом, анизотропное эрбиевое РС ОВ разработки ПАО ПНППК продемонстрировало высокую радиационную стойкость достаточную для использования не только в условиях космоса, но и повышенной мощности дозы, например, для нужд атомной промышленности.

Литература

1. *Поносова А.А. и др. Фотон Экспресс 6, 45-46 (2017)*
2. *Лихачев М.Е. и др. Фотон Экспресс 6, 17-18 (2009)*
3. *Спецификация оптического волокна IXF-EDF-FGL-PM компании IXBlue [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://photonics.ixblue.com/product/fibers/ixf-edf-fgl-pm, свободный - (27.05.2019)*

ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ МУЛЛИТОВОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ, АКТИВИРОВАННОЙ ХРОМОМ

Абрамов А.Н. [1]*, Плехович А.Д. [1], Яшков М.В. [1], Гурьянов А.Н. [1], Раевский А.С. [2]

[1] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН, г. Нижний Новгород, Тропинина, 49
[2] НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24
E-mail: abramov@ihps.nnov.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16193

Проведено исследование по формированию кристаллической фазы муллит (3Al2O3·2SiO2) в сердцевине алюмосиликатных световодов, легированных хромом. Добавка Cr выполняет роль активного центра для получения люминесценции в неохваченном волоконными лазерами диапазоне 600-900 нм. А кристаллическая составляющая сердцевины, образованная после термической обработки, позволит увеличить квантовую эффективность хрома относительно ее величины в стекле.

Отметим, что согласно проведенным нами термодинамическим расчетам [1], образование фазы муллита возможно уже на стадии изготовления преформ волоконных световодов.

Исследование проводилось как на образцах волоконных световодов, так и на образцах заготовок волоконных световодов на основе плавленого кварца, легированных хромом и оксидом алюминия, концентрация которого варьируется в пределах от 6,5 мол.% до 29 мол.%. Концентрация хрома оценивается как 10^{-3}-10^{-2} масс.%.

Для установления параметров термообработки образцов волоконных световодов проведен дифференциально-термический анализ стекла сердцевины заготовок. Для образцов стекла с концентрацией оксида алюминия больше 16 мол.% зарегистрирован экзоэффект при температуре 988 ºС. С помощью рентгенофазового анализа (рис. 1.) подтверждено образование фазы муллит. Показано, что интенсивность пиков фазы муллита увеличивается с ростом концентрации Al_2O_3 в стекле.

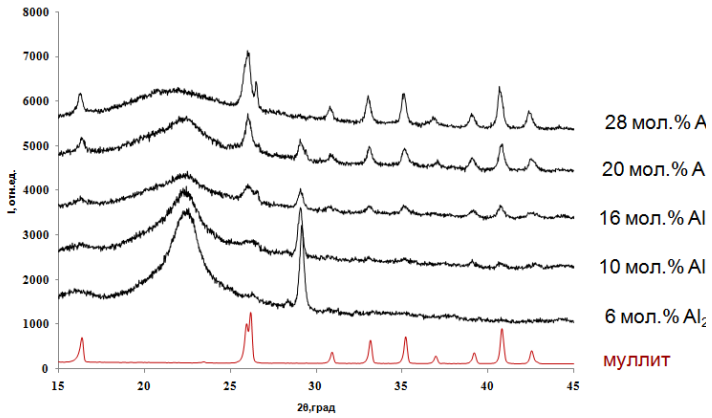


Рис. 1. Рентгенограмма образцов заготовок волоконных световодов после ДСК, а также порошка муллита, синтезированного золь-гель методом

Проведена контролируемая кристаллизация фазы муллит в сердцевине волоконных световодов.

В процессе высокотемпературной обработки световодов регистрировались спектры оптического пропускания для контроля изменения оптического поглощения в них. Благодаря этому исследована зависимость изменения спектров поглощения, как от температуры, так и от времени отжига. Для исследования зависимости люминесцентных свойств световодов с сердцевиной из муллитовой стеклокерамики, активированной Cr^{3+} от параметров термообработки была разработана методика измерения эффективности люминесценции непосредственно в процессе отжига образцов. Показано, что отжиг приводит к увеличению люминесценции на 2-3 порядка.

В результате исследований подобраны температурно-временные режимы отжига образцов, а также установлен диапазон концентраций оксида алюминия необходимый для эффективного выделения фазы муллит в стекле сердцевины волоконного световода.

Работа выполнена в рамках госзадания ИХВВ РАН и программы Президиума РАН №13.

Литература

1. *А. Н. Абрамов и др., Неорг. матер. 54, № 9, 1–10 (2018)*

ОПТИМАЛЬНОЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ВЫТЯЖКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В УСЛОВИЯХ НЕИЗОТЕРМИЧНОСТИ

Первадчук В.П.[*], **Владимирова Д.Б., Гордеева И.В.**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь
[*] *E-mail:* boxofemails123@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16194

В работе рассмотрена задача оптимального стабилизирующего управления процессом вытяжки оптического волокна. Математическая модель, описывающая данный процесс, является системой дифференциальных уравнений в частных производных относительно функций радиуса волокна, его скорости и температуры. В целях оптимизации производственного процесса вытяжки важно и актуально осуществлять управление рядом параметров в режиме реального времени. К числу таких параметров можно отнести температуру печи и скорость намотки готового волокна. При этом важно, чтобы другие параметры процесса (например, его геометрические характеристики) были стабильными.

Сформулируем задачу оптимального стабилизирующего управления процессом вытяжки. При этом функцией управления является отклонение скорости намотки готового волокна, а наблюдением – отклонение радиуса волокна от его стационарного (программного) состояния по всей длине рассматриваемого участка вытяжки. Линеаризованная одномерная система дифференциальных уравнений для функций $\tilde{R}(t,z)$, $\tilde{V}(t,z)$, $\tilde{T}(t,z)$, $\tilde{u}(t)\in L_2(\Omega)$, $\Omega=[0;L]\times[0;\tau]$, $z\in[0;L]$, $t\in[0;\tau]$ [1] и целевой функционал задачи оптимизации имеют вид:

$$\begin{cases} -\dfrac{\partial\tilde{R}}{\partial t}=V_{st}\dfrac{\partial\tilde{R}}{\partial z}+\dfrac{V_{st}}{2}\dfrac{\partial\tilde{V}}{\partial z}, \\ \dfrac{\partial\tilde{V}}{\partial t}=\dfrac{3\mu_0}{Re}\dfrac{\partial^2\tilde{V}}{\partial z^2}+\beta_1(z)\dfrac{\partial\tilde{V}}{\partial z}+\beta_2(z)\tilde{V}+\alpha_1(z)\dfrac{\partial\tilde{R}}{\partial z}+\alpha_2(z)\tilde{R}+\varphi_1(z)\dfrac{\partial\tilde{T}}{\partial z}+\varphi_2(z)\tilde{T}, \\ \dfrac{\partial\tilde{T}}{\partial t}=\dfrac{\lambda}{Pe}\dfrac{\partial^2\tilde{T}}{\partial z^2}+\varphi_3(z)\dfrac{\partial\tilde{T}}{\partial z}+\varphi_4(z)\tilde{T}+\alpha_3(z)\dfrac{\partial\tilde{R}}{\partial z}+\alpha_4(z)\tilde{R}+\beta_3(z)\tilde{V}, \\ \tilde{R}|_{t=0}=R_s(z),\ \tilde{R}|_{z=0}=R_0(t), \\ \tilde{V}|_{t=0}=V_s(z),\ \tilde{V}|_{z=0}=V_0(t),\ \tilde{V}|_{z=L}=\tilde{u}(t), \\ \tilde{T}|_{t=0}=T_s(z),\ \tilde{T}|_{z=0}=T_0(t),\ \tilde{T}|_{z=L}=T_L(t), \end{cases}$$

$$F(\tilde{u})=\int_0^{\tau}\int_0^{L}(R_{st}(L)\tilde{R}(t,L))^2\,dzdt+\alpha\int_0^{\tau}\tilde{u}^2(t,L)dt\to\min.$$

Здесь коэффициенты $\alpha_1(z)$, $\alpha_2(z)$, $\alpha_3(z)$, $\beta_1(z)$, $\beta_2(z)$, $\beta_3(z)$, $\varphi_1(z)$, $\varphi_2(z)$, $\varphi_3(z)$, $\varphi_4(z)$ зависят от стационарных решений $R_{st}(z)$, $V_{st}(z)$, $T_{st}(z)$; μ_0 - постоянная вязкости расплава; λ - коэффициент теплопроводности кварца; Re, Pe - числа Рейнольдса и Пекле соответственно; $z\in[0;L]$, $t\in[0;\tau]$, параметр $\alpha>0$.

Используя вариационный метод, аналогичный методу Лагранжа, описанный в [2], получим систему оптимальности в следующем виде:

$$
\begin{cases}
-\dfrac{\partial \tilde{R}}{\partial t} = V_{st}\dfrac{\partial \tilde{R}}{\partial z} + \dfrac{V_{st}}{2}\dfrac{\partial \tilde{V}}{\partial z}, \\
\tilde{R}\big|_{t=0} = R_s(z),\ \tilde{R}\big|_{z=0} = R_0(t), \\
\dfrac{\partial \tilde{V}}{\partial t} = \dfrac{3\mu_0}{Re}\dfrac{\partial^2 \tilde{V}}{\partial z^2} + \beta_1(z)\dfrac{\partial \tilde{V}}{\partial z} + \beta_2(z)\tilde{V} + \alpha_1(z)\dfrac{\partial \tilde{R}}{\partial z} + \alpha_2(z)\tilde{R} + \varphi_1(z)\dfrac{\partial \tilde{T}}{\partial z} + \varphi_2(z)\tilde{T}, \\
\tilde{V}\big|_{t=0} = V_s(z),\ \tilde{V}\big|_{z=0} = V_0(t),\ \tilde{V}\big|_{z=L} = \dfrac{3\mu_0}{\alpha Re}\dfrac{\partial p}{\partial z}, \\
\dfrac{\partial \tilde{T}}{\partial t} = \dfrac{\lambda}{Pe}\dfrac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial z^2} + \varphi_3(z)\dfrac{\partial \tilde{T}}{\partial z} + \varphi_4(z)\tilde{T} + \alpha_3(z)\dfrac{\partial \tilde{R}}{\partial z} + \alpha_4(z)\tilde{R} + \beta_3(z)\tilde{V}, \\
\tilde{T}\big|_{t=0} = T_s(z),\ \tilde{T}\big|_{z=0} = T_0(t),\ \tilde{T}\big|_{z=L} = T_L(t), \\
\dfrac{\partial q}{\partial t} + \dfrac{\partial}{\partial z}\left(V_{st}q + \alpha_1(z)p + \alpha_3(z)s\right) - \alpha_2(z)p - \alpha_4(z)s = R_{st}^2\tilde{R}, \\
q\big|_{t=\tau} = 0,\ q\big|_{z=L} = 0, \\
-\dfrac{\partial p}{\partial t} - \dfrac{3\mu_0}{\rho}\dfrac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{V_{st}}{2}q + \beta_1(z)p\right) - \beta_2(z)p - \beta_3(z)s = 0, \\
p\big|_{t=\tau} = 0,\ p\big|_{z=0} = 0,\ p\big|_{z=L} = 0, \\
-\dfrac{\partial s}{\partial t} - \dfrac{\lambda}{Pe}\dfrac{\partial^2 s}{\partial z^2} + \dfrac{\partial}{\partial z}\left(\varphi_1(z)p + \varphi_3(z)s\right) - \varphi_2(z)p - \varphi_4(z)s = 0, \\
s\big|_{t=\tau} = 0,\ s\big|_{z=0} = 0,\ s\big|_{z=L} = 0,
\end{cases}
$$

где $q(t,z), p(t,z), s(t,z) \in L_2(\Omega)$ некоторые вспомогательные функции (функции сопряженного состояния) и функция оптимального управления $\tilde{u}_0(t) = \dfrac{3\mu_0}{\alpha Re}\dfrac{\partial p}{\partial z}\Big|_{z=L}$.

Литература

1. *Васильев В.Н., Дульнев Г.Н, Наумчик Е.Д., Инж.-физ. журнал 55(2), 284-292 (1988)*
2. *Pervadchuk V.P., Vladimirova D.B., Gordeeva I.V., et al, AIP Conference Proceedings 1926, 020036 (2018)*

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МНОГОМОДОВОГО ВОЛОКНА С ВЫСОКИМИ ОПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В СОЧЕТАНИИ С РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТЬЮ

Рахматуллина А.Р., Мальцев И.А.*, Азанова И.С., Вохмянина О.Л., Кашина Р.Р.

Пермская научно-производственная приборостроительная кампания, г. Пермь
**E-mail: MaltsevIA@pnppk.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16195

При эксплуатации в условиях ионизирующего излучения, оптические волокна с сердцевиной из чистого кварца имеют значительные преимущества перед волокном с германатной сердцевиной, поскольку при воздействии ионизирующего излучения в образцах, легированых оксидом германия GeO_2 возникают точечные дефекты (радиационные центры окраски), вызывающие высокие радиационно-наведённые потери (РНП). Для повышения стойкости к ионизирующему излучению сердцевина должна изготавливаться из чистого кварцевого стекла, или иметь в сердцевине добавки фтора [1] или азота [2].

В линиях связи небольшой протяжённости имеет смысл использовать многомодовое волокна. Для получения радиационной стойкости многомогодового волокна используются те же методы, что и для одномодового, но основной проблемой при изготовлении такого волокна является получение оптических характеристик уровня германатного волокна. Основным методом на пути достижения высоких оптических характеристик является соответствие профиля показателя преломления (ППП) α-профилю. В случае максимального соответствия можно получить полосу пропускания, не уступающую полосе германатного световода, что в сочетании с допустимым значением затухания может стать залогом получения среды для передачи информации высокого качества.

Рис. 2. Сравнение ППП преформы с α -профилем



На оптические характеристики также оказывают влияние локальные флук-туации ППП [3]. В случае изготовления преформы методом MCVD от этого дефекта избавиться невозможно. Для того чтобы устранить его было решено использовать в качестве источника тепла индукционную печь (технология furnace vapor chemical deposition (FCVD)). Используя данный способ изготовления были получены преформы, ППП которых приближен к α-профилю. Получилось избавиться от такого негативного эффекта как локальные флуктуации ППП в волокне. Несмотря на это толщина депрессированной оболочки в полученном волокне недостаточна для достижения минимальных оптических потерь. Главной проблемой в случае изготовления многомодового волокна с депрессированной светоотражающей оболочкой методом MCVD является малая разность показателей преломления оболочки и сердцевины из-за ограничения внедрения фтора в кварцевое стекло, в связи с чем числовая апертура не достигает значений германатного световода. В работе [4] была получена максимально возможная разница показателей преломлений - 0,0115, что соответствует апертуре ~0,185 (минимальному значению апертуры для стандарта ОМ2). Для получения волокон с высокими оптическими характеристиками будут вестись работы по увеличению разницы показателей преломления между сердцевиной и светоотражающей оболочкой, а также увеличению толщины депрессированной оболочки для уменьшения величины оптических потерь.

Литература

1. *А.Л. Томашук и др. Вестник МГТУ им. Баумана.* ***5,*** *111-124 (2016)*
2. *Томашук А.Л., Голант К.М., Забежайлов М.О. Волоконно-оптические технологии, материалы и устройства.* ***4,*** *52. (2001)*
3. *Бурдин А.В., Яблочкин К.А. Инфокоммуникационные технологии. 2, 22-27 (2010)*
4. *S.L. Semjonov, V.F. et al. Laser Science to Photonic Applications (2010)*

СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ И ВЫТЯЖКА ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ДВУХВАЛЕНТНОГО ОЛОВА

Вельмискин В.В.[1], Галаган Б.И.[2], Денкер Б.И.[2], Сверчков С.Е.[2*]

[1] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[2] Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, г. Москва
[*] E-mail: glasser@Lst.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16196

Оксид SnO, аналогично PbO, обладает высоким парциальным показателем преломления и, подобно PbO, может входить в высоких концентрациях во все «классические» (силикатные, фосфатные, боратные, германатные) оксидные стекла. Это обстоятельство, с учетом его меньшей токсичности, делает SnO привлекательным компонентом для высокопреломляющих оптических стекол. Тем не менее, попытки использования SnO в качестве компонента оптических стекол редки. Причиной, затрудняющей его использование в тугоплавких оптические стеклах на силикатной основе, является склонность SnO к частичному диспропорционированию по схеме $2SnO \leftrightarrow SnO_2+Sn$. Как металлическое олово, так и его двуокись практически нерастворимы в стекле, что приводит к появлению включений в его объеме.

Ранее [1,2] мы синтезировали пригодные для люминесцентных исследований образцы оловосодержащих стекол различных составов. При этом обнаружилось, что во многих образцах, синтезированных в восстановительных условиях, наблюдается фотолюминесценция, подобная той, что имеет место в активированных висмутом стеклах, но имеющая намного большую ширину полосы, простирающуюся от ~1100 до ~1900 нм. Это делает оловосодержащие стекла привлекательными с точки зрения их возможного применения в лазерной волоконной технике.

Цель настоящей работы - создание лабораторной методики синтеза оловосодержащих стекол оптического качества и изготовление из них волоконных световодов. Методика синтеза таких стекол имеет определенную специфику. Прежде всего, это необходимость вести синтез в бескислородной атмосфере во избежание окисления SnO до SnO_2. Мы использовали для этой цели сухой азот, получаемый испарением сжиженного. Исходная шихта готовилась на основе оксалата олова (II), легко разлагающегося при нагреве согласно уравнению $SnC_2O_4 \rightarrow SnO+CO\uparrow+CO_2\uparrow$. При этом выделяющийся угарный газ попутно обеспечивал восстановительные условия в варочной камере. В качестве тигельного материалов использовался стекрит (керамика на основе окристаллизованного кварцевого стекла производства АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»). Тигель с шихтой помещался в закрытый индукционно-нагреваемый стакан из упрочненного графита. В поисках не склонных к диспропорционированию составов мы обратились к системе $SnO\text{-}GeO_2$. Имеющиеся данные [3] показывают, что область стеклования в системе $SnO\text{-}GeO_2$ включает составы от $30SnO\text{-}70GeO_2$ до $60SnO\text{-}40GeO_2$. В наших экспериментах было обнаружено, что плавка смеси оксидов $SnO\text{-}GeO_2$, в отличие от смеси $SnO\text{-}SiO_2$, к диспропорционированию олова не приводит. Однородные стекла получались в диапазоне концентраций SnO (по синтезу) от 15% до 50% мол. При концентрации SnO, большей 50%, стекло частично кристаллизовалось, при концентрации, меньшей 15%, стекло получалось рассеивающим. Цвет стекол варьировался от ярко-оранжевого (при высокой концентрации олова) до бледно-желтого. Исследования показали, что при варке смеси оксидов $SnO\text{-}GeO_2$ в тиглях из стекрита расплав существенно обогащается двуокисью кремния. Несмотря на большое содержание кремния, диспропорционированием олова синтез не сопровождается. Таким образом удается получать однородные стекла в системе $SnO\text{-}GeO_2\text{-}SiO_2$. В качестве стартового материала для сердцевины использовалось стекло синтетического состава $50SnO\text{-}50GeO_2$, имевшее состав по анализу $38SnO\text{-}37GeO_2\text{-}25SiO_2$. В качестве стекол для оболочек исследовались кварцевое стекло Suprasil F300 и более легкоплавкое (T_g=790°C) алюмосиликатное стекло Schott 8253.

Волокно в кварцевой оболочке. Изготовленные из оловосодержащего стекла стержни диаметром 2 мм и длиной 25 мм стравливались плавиковой кислотой до диаметра 1,8 мм. Затем стержни помещались в канал трубы из стекла Suprasil F300 длиной 100 мм, с внешним и внутренним диаметрами 8,5 и 2 мм соответственно. На первом этапе производилось вытягивание промежуточных стержней из собранной конструкции при температуре 1780°C в атмосфере особочистого сухого аргона. Длина полученных стержней составляла около 400 мм, диаметр варьировался от 0,5 до 1 мм. На втором этапе на наиболее качественный участок стержня длиной 150 мм при температуре 1920°C нахлопывалась оболочка из кварцевого стекла. Из полученной заготовки при температуре 1820°C

вытягивалось волокно в полимерном защитном покрытии с внешним диаметром 120 мкм. Из данных электронной микроскопии и рентгенолюминесцентного микроанализа (Рис.1А) видно, что в волокне сформировалась круглая, правильной формы сердцевина диаметром около 10 мкм. Обращает на себя внимание отсутствие четкой границы между сердцевиной и оболочкой - в результате взаимодиффузии материалов оболочки и сердцевины последняя сильно обогатилась кремнием, а содержание олова в ней упало в несколько раз.

Волокно в алюмосиликатной оболочке. Для изготовления данного волокна из стеклянной трубы марки Schott 8253 был изготовлен капилляр с внешним диаметром 6 мм и диаметром канала около 1 мм. Протравленные стержни из материала сердцевины диаметром несколько менее 1 мм помещались в канал капилляра последовательно один за другим на всю его длину, причем зазор между стенками и стержнями оставался минимальным. Вытяжка до диаметра около 400 мкм производилась при температуре 1080°С в сухом особочистого аргоне. После вытяжки на участок световода длиной 150 мм при температуре 1100°С нахлопывался капилляр из стекла Schott 8253. После повторной вытяжки получился волоконный световод с диаметром оболочки 230-250 мкм и сердцевины 70-125 мкм. Как можно видеть из Рис. 1Б, взаимодиффузия материалов сердцевины и оболочки в данном случае выражена слабо, а содержание олова в сердцевине сопоставимо с таковым в исходном материале.

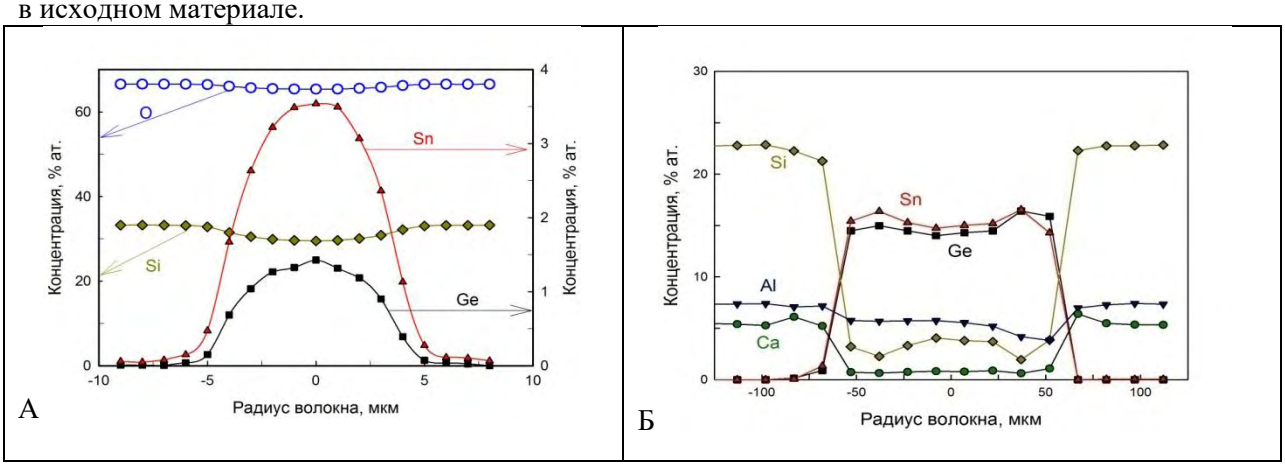


Рис.1. Результаты микроанализа волокон в кварцевой (А) и алюмосиликатной (Б) оболочках

Оптические потери в обоих световодах в области 1-1,7 мкм составили 1-1.5 дБ/м. Такой уровень потерь определяется суммарной концентрацией примесей в шихте и материале тиглей, и типичен для стекол, синтезируемых тигельным методом. Для стекол же, синтезированных в восстановительных условиях, достигнутый уровень потерь следует считать неплохим. Оба световода были существенно многомодовыми, при этом числовая апертура волокна №1 составила 0,48, а волокна №2 – до 0,50. Приблизительное совпадение значений числовой апертуры в световодах с существенно разными концентрациями олова и германия в сердцевине связано с тем, что различие показателей преломления сердцевин компенсируется различием показателей преломления оболочек (n_{SiO2}~1.458, n_{Schott}~1.547).

Литература

1. *Denker B. et al, Appl.* Phys. *B, 120, 13-15 (2015.)*
2. *Chernov A.et al, Appl. Phys. B, 122, 243(2016)*
3. *Holland D. et al, J. of Non-Cryst. Solids, 293-295, 175-181(2001)*

АКТИВИРОВАННЫЕ РЕДКИМИ ЗЕМЛЯМИ КАЛЬЦИЙ-АЛЮМИНАТНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СТЕКЛА И ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА НА ИХ ОСНОВЕ

Вельмискин В.В.[2], Галаган Б.И.[1], Денкер Б.И.[1], Колташев В.В.[2], Сверчков С.Е.[1]

[1] *Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, г. Москва*

[2] *Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва*

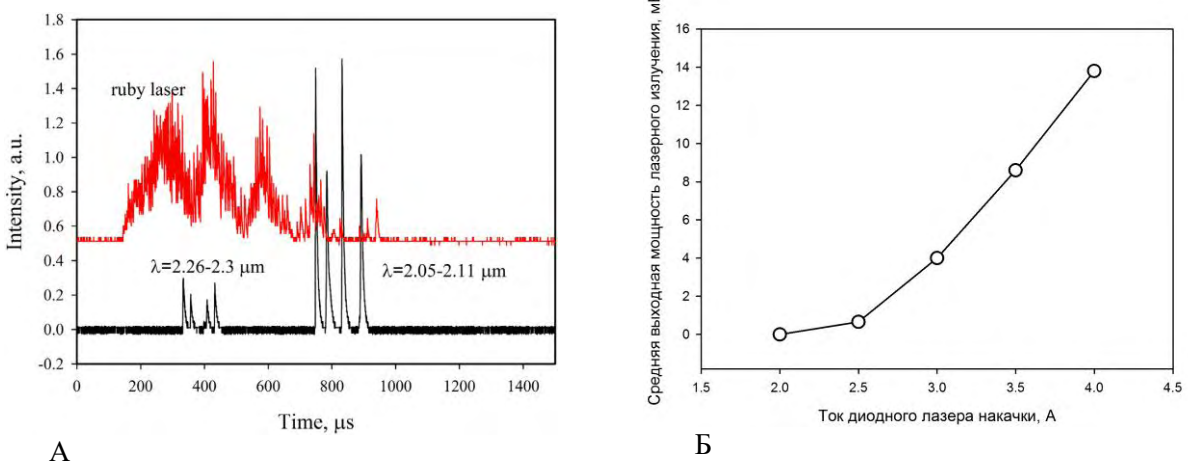
[*] *E-mail:* galagan@ran.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16197

Многокомпонентные кальций-алюминатные стекла могут быть относительно устойчивы к кристаллизации и допускают синтез в объёмах до нескольких килограмм. Они привлекательны высокой прозрачностью в ИК области до 5-6 мкм в совокупности с прекрасными механическими свойствами и теплопроводностью, превосходящими характеристики плавленого кварца. Кроме того данные стекла допускают введение в состав до 3-5 мол.% оксидов редких земель. Однако спектроскопические свойства активированных стекол являются малоизученными.

Для исследований был выбран следующий базовый состав 46CaO, $5CaF_2$, $36Al_2O_3$, 6MgO, 6 SrO, $1Ln_2O_3$, где Ln обозначает ту или иную комбинацию редкоземельных элементов La, Tm, Ho, Er, Yb, Dy. Учитывая, что применение активных сред в ИК области требуют высокой степени их обезвоженности, была разработана специальная методика синтеза стекол в объёме около 30 грамм, которая обеспечивала коэффициент поглощения гидроксильной группы вблизи 3 мкм не более 0.01 $см^{-1}$.

Люминесцентные исследования образцов активированных стекол показали, что из-за сильного кристаллического поля вблизи редкоземельного иона и соответственно заметного штарковского расщепления соответствующих электронных уровней, наблюдается значительный стоксов сдвиг в спектрах люминесценции. Это, в частности, позволило реализовать на активированном тулием стекле каскадную лазерную генерацию на длинах волн 2.3 и 2.1 мкм, которые недоступны одновременно для других типов стекол. Примеры характеристик лазеров на объёмных элементах приведены на Рис.1.



А Б

Рис.1. Осциллограмма импульса накачки и генерации на двух длинах волн (А)при накачке рубиновым лазером и зависимость выходной мощности генерации на 2.1 мкм при диодной накачке

Сложность работы с кальций-алюминатными стеклами по сравнению, например, с силикатными связана с очень крутой зависимостью вязкости от температуры и склонностью стекол к расстекловыванию (кристаллизации). В тоже время благодаря химической совместимости состава с плавленым кварцем есть возможность получения оптических волокон с сердцевиной близкой по составу к кальций-алюминатному стеклу без каких-либо нежелательных проявлений типа ликвации или кристаллизации. При этом может быть обеспечена относительно высокая концентрации редкоземельных элементов в сердцевине волокна. Методом “штапик в трубке” был изготовлен композитный волоконный световод с сердцевиной кальций-алюминатного стекла, актированного диспрозием, и кварцевой оболочкой. Диспрозий имеет широкую полосу люминесценции около 575 нм и большое время жизни верхнего лазерного уровня $^4F_{9/2}$ (измеренные значения приведены на Рис.2).

В качестве источника накачки для диспрозиевых лазеров подходят ставшие коммерчески доступными и относительно дешевыми синие диодные лазеры на основе нитрида галлия. Длина волны генерации таких лазеров находится вблизи 450 нм и хорошо согласуется с полосой поглощения иона диспрозия.

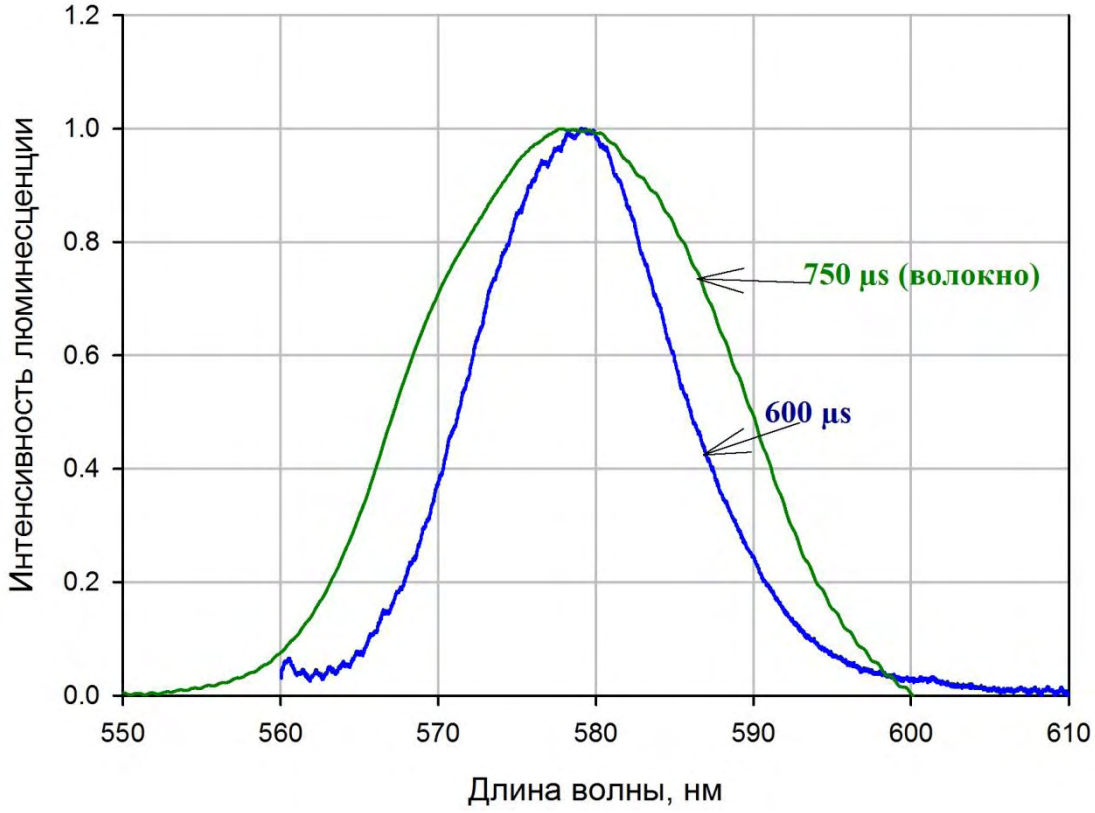


Рис.2.Спектры люминесценции образца стекла с диспрозием и композитного волокна на его основе

Разбавление оксидом кремния при изготовлении волокна с алюминатной сердцевиной для спектрально-люминесцентных свойств диспрозия, в отличие от иона тулия, не является принципиальным.

Настоящая работа поддерживалась в части создания и исследования активированных РЗИ волокон грантом РФФИ № 18-29-20079, а в части изучения генерационных свойств кальций – алюминатных стекол грантом РФФИ № 17-02-00369.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСИЛЕНИЯ СИГНАЛА В ИТТЕРБИЕВОМ ВОЛОКНЕ

Штырина О.В.[1,2*], Кохановский А.Ю.[1], Иваненко А.В.[1], Ефремов С.А.[1] Яруткина И.А.[1], Скидин А.С.[1], Чеховской И.С.[1], Федорук М.П.[1,2]

[1] *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*
[2] *Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск*
[*] *E-mail:* olya.shtyrina@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16198

Волоконные лазеры широко используют активные усиливающие среды с целью получения устойчивой импульсной генерации. В данной работе была предложена экспериментальная схема усиления сигнала в иттербиевом волокне с нормальной дисперсией. Также был предложен теоретический метод оценки коэффициента усиления по малому сигналу и мощности насыщения через характеристики экспериментальной установки. Данный метод может быть использован при моделировании и оптимизации длинных волоконных лазеров с нормальной дисперсией, а также волоконных лазеров с распределенным усилением.

Схема измерения усиления в иттербиевом волокне приведена на рис. 1. Она состоит из 2.3 м иттербиевого волокна (Liekki Yb1200-6/125DC-PM), непрерывного лазерного источника, переменного аттенюатора, мультиплексора, диода накачки и спектрометра. Обычно для измерения характеристик усиления для малого входного сигнала в пределах 1-10 мкВт необходимо использовать дополнительные устройства, такие как дополнительные ответвители [1]. Для оценки свойств иттербиевого волокна мы предлагаем метод получения коэффициентов усиления без использования дополнительных экспериментальных измерений.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Усиление сигнала в иттербиевом волокне может быть аналитически описано при помощи двухуровневой модели усиления [2], но главным недостатком данной модели является то, что в ней не учитываются потери внутри волокна, либо она не интегрируема при их учете. Альтернативным методом описания усиления сигнала является использование простой модели усиления на основе нелинейного уравнения Шредингера:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - i\gamma |A|^2 A + \frac{g}{1+P(z)/P_{sat}}A - \alpha A \quad (1)$$

Здесь β_2 и γ – соответственно коэффициенты дисперсии и нелинейности волокна, g – коэффициент усиления малого сигнала, $P(z)$ – средняя мощность в заданной точке внутри активного волокна, P_{sat} – насыщение усиления, α – потери внутри волокна. Чтобы применять уравнение (1), необходимо знать значения мощности насыщения P_{sat} и коэффициента усиления малого сигнала g. Значения данных величин могут быть определены по результатам экспериментальных измерений, т.е. по экспериментально определённым коэффициентам усиления, полученным для различных входных мощностей, мощностей накачки и длин активного волокна. В предложенном теоретическом методе сначала при помощи простой модели усиления из экспериментальных данных вычисляется коэффициент усиления малого сигнала, а затем его значение корректируется при помощи более точной модели и значений мощности насыщения.

На рис. 2а показаны теоретические и экспериментальные результаты: пунктирная линия соответствует теоретической аппроксимации, а точками показаны экспериментальные данные.

Приближенные теоретические формулы для оценки параметров волокна (мощности насыщения и коэффициента усиления малого сигнала) имеют следующий вид:

$$g[1/м] = 2 + 0.5P_{pump}[Bm] - 0.85/\left(P_{pump}[Bm] + 0.01\right)$$

$$P_{sat}[Bm] = -0.002 + 0.015P_{pump}[Bm] + 0.0035(P_{pump}[Bm])^2$$

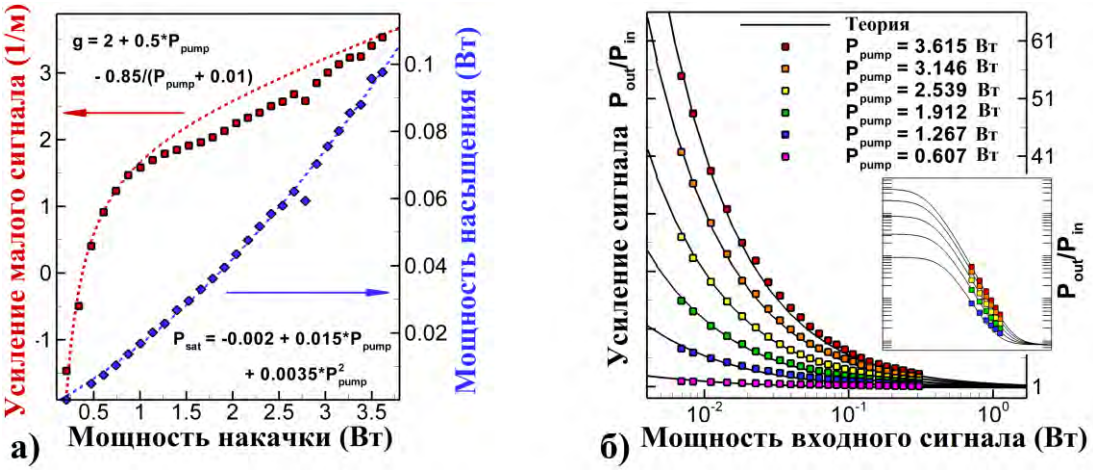


Рис.2. а) Теоретическая (пунктирная линия) и экспериментальная (точки) зависимость коэффициента усиления малого сигнала и мощности насыщения от мощности накачки; б) Зависимость усиления сигнала от мощности входного сигнала; на вставке показана зависимость усиления сигнала от мощности в логарифмической шкале

На рис. 2б показано сравнение экспериментальной (точки) и теоретической (черные линии) зависимости усиления сигнала от входного сигнала для различных мощностей накачки и выбранной длины активного волокна. Для построения теоретических зависимостей использовались приближенные формулы, полученные выше. Как можно видеть, наблюдается хорошее соответствие между теорией и экспериментом, причём в широком диапазоне мощностей входного сигнала и мощностей накачки.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-31-20027).

Литература

1. *Shtyrina O.V., et al, J. Opt. Soc. Am. B, 34, 227-231 (2017)*
2. *Pfeiffer T., et al, IEEE Photon. Technol. Lett., 4, 449-451 (1992)*

ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ЭРБИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ПУТЕМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОТ КАЛИБРОВОЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

Летов Д.А.[1*], Ременникова М.В.[2]

[1]Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь
[2]ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь
[*]Permoffender@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16199

Эрбиевый суперлюминесцентный волоконный источник оптического излучения (ЭСВИОИ) является неотъемлемой частью волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), от параметров которого напрямую зависят параметры всего изделия. Применение источников с определенным набором требований позволяет улучшить точностные и эксплуатационные характеристики ВОГ разного класса точности.

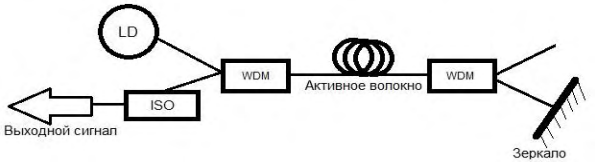


Рис. 1. Двухпроходная схема

Высокая стабильность спектра такого источника излучения позволяет уменьшить погрешность масштабного коэффициента гироскопа в широком диапазоне рабочих температур [1].

К настоящему времени разработано большое количество схем ЭСВИОИ. Их можно разделить по способу накачки активного волокна: сонаправленно и противонаправленно. В таких схемах накачка осуществляется в прямом и обратном направлении по отношению к выходному сигналу. По количеству проходов активного контура: однопроходная и двупроходная. В данной работе использовались две схемы: двухпроходная схема с сонаправленной накачкой (рис. 1) и однопроходная схема с противонаправленной накачкой (рис. 2).



Целью работы было исследование повторяемости зависимости значений средневзвешенной длины волны от температуры в диапазоне рабочих температур при повторных испытаниях ЭСВИОИ, изготовленных по двум различным оптическим схемам.

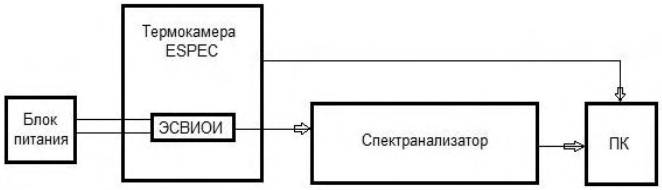


Рис. 3. Схема рабочего места

Испытания проводились на рабочем месте, схема которого приведена на рис. 1. В термокамере был задан термоцикл с выдержкой на стационарных температурах -50 °С, -10 °С, +60 °С, +20 °С. В результате испытаний были получены массивы данных с цифрового блока управления ЭСВИОИ, спектроанализатора, термокамеры при помощи специализированного программного обеспечения. Из всего объема данных нас интересовали оптические параметры ЭСВИОИ и температура корпуса изделия. Испытания одного прибора неоднократно повторялись.

После первого испытания вычислялась температурная зависимость средневзвешенной длины волны и представлялась в виде полинома второго порядка по которому рассчитывались его коэффициенты.

В настоящем исследовании для анализа были взяты два массива значений – это средневзвешенная длина волны и температура. Обработка данных была выполнена с использованием среды Microsoft Office Excel. По графикам зависимости средневзвешенной длины волны от температуры строилась аппроксимирующая кривая второй степени (полином) и получено уравнение этой кривой вида: $y = k_1 \cdot x^2 + k_2 \cdot x + k_3$. Таким образом, были найдены коэффициенты (k_i) для калибровочного полинома.

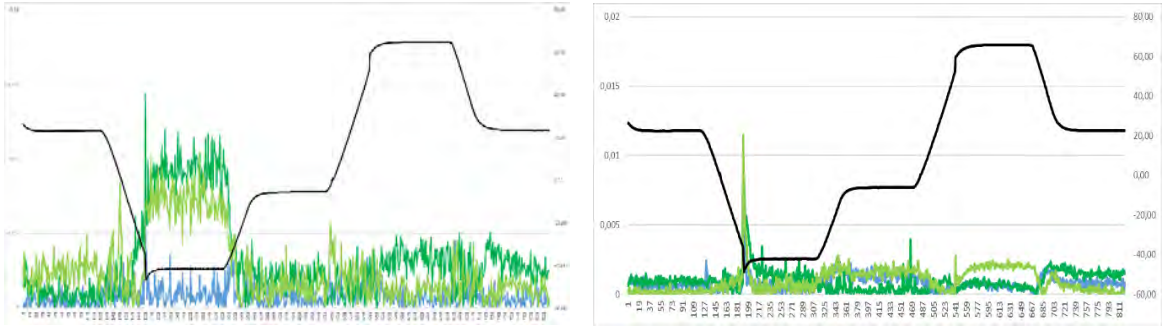
В полученное уравнение вместо переменной «x» подставлялось значение температуры, которое показывал термодатчик, расположенный в ЭСВИОИ. Затем рассчитывалось полиномиальное значение длины волны для каждого i-го значения температуры.

Отклонение калибровочного полинома определялось по формуле $\Delta = \frac{|\lambda_1 - \lambda_2|}{\lambda_2} \cdot 10^6\ (ppm)$, где λ_1 – экспериментальное значение средневзвешенной длины волны, λ_2 – значение средневзвешенной длины волны, полученное после решения полинома.

Спустя некоторое время проводилось повторное испытание исследуемого источника излучения. Необходимо было подставить новые значения температуры в уравнение, полученное при калибровочном испытании. И также по формуле определили отклонение калибровочного полинома для каждого i-го значения.

По результатам выполненной работы получили два массива данных Δ1 и Δn. Δ1 – отклонение калибровочного полинома для контрольного измерения, Δn – отклонение калибровочного полинома для повторного измерения.

Чтобы оценить отклонение от калибровочного полинома, построили график для Δ1 и Δn.



(a) ***(b)***

Рис. 4. Графическое сравнение отклонения от калибровочного полинома калибровочного и повторного испытаний для двух схем источников излучения на примере двух изделий. Синим цветом – калибровочное испытание, зеленым – проверочное, черным – температурный цикл. (a – однопроходная схема, b – двухпроходная)

Таблица 1. Численное сравнение отклонения от калибровочного полинома калибровочного и повторного испытаний

№ ЭСВИОИ	Отклонение, ppm		№ ЭСВИОИ	Отклонение, ppm	
	Контрольное	Повторное		Контрольное	Повторное
1 (однопроходная)	32,85	38,86	8 (однопроходная)	30,33	110,48
2 (однопроходная)	47,4	128,84	9 (однопроходная)	61,16	160,16
3 (однопроходная)	37,29	58,19	10 (однопроходная)	41,7	77,47
4 (однопроходная)	48,49	65,34	11 (двухпроходная)	18,34	29,06
5 (однопроходная)	37,01	108,99	12 (двухпроходная)	25,69	52,82
6 (однопроходная)	36,7	46,94	13 (двухпроходная)	24,24	43,55
7 (однопроходная)	45,13	120,1	14 (двухпроходная)	22,48	42,16

Выполнив анализ значений из таблицы 1, был сделан вывод, что источники излучения с двухпроходной схемой дают лучшую повторяемость значений средневзвешенной длины волны в диапазоне рабочих температур, по сравнению с однопроходной схемой. Также необходимо отметить, что разброс значений между контрольным и повторным испытаниями меньше у двухпроходной схемы, а значит она стабильнее и наиболее оптимальна для точных ВОГ.

Литература

1. *Алейник А.С., Кикилич Н.Е., Козлов В.Н., Власов А.А., Никитенко А.Н. Методы построения высокостабильных эрбиевых суперлюминесцентных волоконных источников оптического излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 4. С. 593–607*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ В ГЕРМЕТИЧНОМ УГЛЕРОДНОМ ПОКРЫТИИ К ПРОНИКНОВЕНИЮ ВОДОРОДА

Саранова И.Д.[1*], Булатов М.И.[1], Трутнев К.С.[1], Косолапов А.Ф.[2], Азанова И.С.[1]

[1] Пермская научно-производственная приборостроительная компания, г. Пермь
[2] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[*]E-mail: saranovairina93@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16200

В настоящее время при применении волоконных световодов в нефтяной, газовой и энергетической сферах промышленности для мониторинга состояния скважин и ядерных реакторов разрабатываются специальные волоконные световоды. К данным световодам предъявляются особые требования, а именно, они должны быть устойчивы к высоким температурам и диффузии водорода. Поэтому задачи изготовления и испытания термостойких герметичных волокон являются актуальными.

Молекулы водорода, проникая в сердцевину негерметичного световода, приводят к значительному росту оптических потерь, что в дальнейшем является причиной повреждения волоконно-оптических схем. Растворенный в стекле молекулярный водород проявляется в виде характерного набора полос поглощения в диапазоне длин волн 1.07 – 1.25 мкм, кроме того водород химически связывается с сеткой стекла и вызывает рост полос поглощения ОН - групп [1]. Для защиты волоконного световода от негативного воздействия водорода на световод наносят герметичное углеродное покрытие [2]. В данной работе исследованы образцы волоконных световодов в углеродном покрытии, нанесенном при различных условиях на стойкость к диффузии водорода.

Для осаждения углеродного покрытия на поверхность волоконного световода башня вытяжки была оснащена специальным реактором. Волокно поступает в реактор, в который осуществляется подача смеси аргона и паров углеводородов. На поверхности волокна при высокой температуре идет реакция разложения углеводородов. Образующийся углерод осаждается в виде аморфного слоя на поверхности световода [3], а водород и легкие углеводороды уносятся из зоны реакции потоком аргона. В процессе вытяжки менялось соотношение углеводородов в парогазовой смеси для оценки влияния на герметичность к водороду. Поверх углеродного покрытия наносился слой полиимидного покрытия для обеспечения термостойкости волокна в диапазоне от минус 55 до +300 °С.

Для экспериментального подтверждения герметичности волокна использовалась установка, схема которой представлена на рисунке 1.

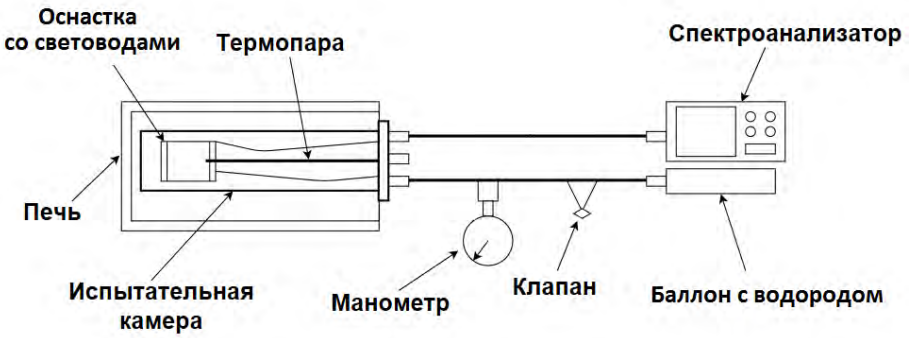


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для проведения испытаний на герметичность к водороду

Исследование на герметичность к водороду оптического волокна проводилось в испытательной камере, которая помещалась в печь. Камера оборудована герметичными вводами для концов световода, термопарой и системой для закачки газообразного водорода. Перед тестированием световоды длиной не менее 200 метров наматывались на металлические катушки диаметром 100 мм,

которые затем помещались в испытательную камеру. Оба конца световодов выводились через металлические трубки наружу. Камера проверялась на герметичность и помещалась в печь. Один конец каждого испытываемого волокна подключали к спектроанализатору для регистрации исходного спектра, второй конец к источнику белого света. Через трубку в установку закачивался газообразный водород под давлением 10 атм, которое контролировалось манометром. Затем нагревали до температуры 100 °С и выдерживали в данных условиях 40 часов.

Спектр оптических потерь снимался до, во время и после испытаний. Ввиду того, что во время вытяжки менялось соотношение углеводородов в парогазовой смеси, были получены как герметичные, так и негерметичные образцы волокон. На рисунке 2 представлены спектры оптических потерь для двух исследуемых образцов: негерметичного (Рис. 2 а) и герметичного к водороду (Рис. 2 б).

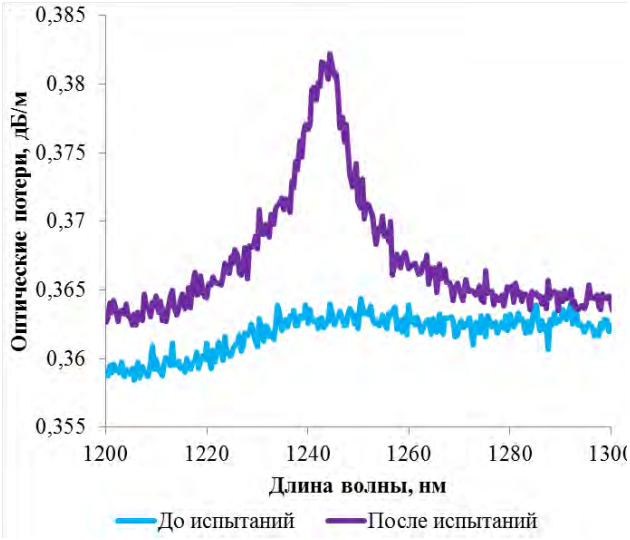


Рис. 2 а. Спектр оптических потерь негерметичного образца

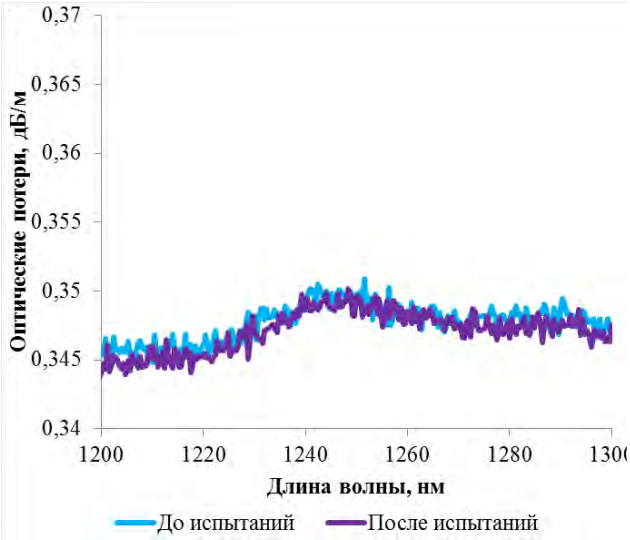


Рис. 2 б. Спектр оптических потерь герметичного образца

В результате проведенного авторами исследования было показано, что применяемая экспериментальная методика позволяет оценить герметичность волокна с нанесенным углеродным покрытием к проникновению молекулярного водорода.

Литература

1. *P.J. Lemaire, Opt. Eng. 6, 780-789 (1991)*
2. *Eric A., et al, International Wire & Cable Symposium Proceedings 672-679 (1999)*
3. *Aikawa H, et al, International Wire & Cable Symposium Proceedings 374-380 (1993)*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫТЯЖКИ КВАРЦЕВЫХ КАПИЛЛЯРОВ В УСЛОВИЯХ МАЛЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Деревянкина А.Л.*, Первадчук В.П., Владимирова Д.Б.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
** E-mail:* anechka-d11@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16201

Вытяжка волокна является важным промышленным процессом. Однако, как и любое реальное явление, данный процесс подвержен флуктуациям, которые могут негативно повлиять на качество готового продукта.

Целью настоящей работы является оценивание зависимости реакции характеристик волокна от колебаний на границах.

Рассмотрим изотермический процесс вытяжки полого кварцевого волокна.

В безразмерном виде исследуемая система имеет следующий вид [2]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial R_1^{\,2}}{\partial t}+\dfrac{\partial (VR_1^{\,2})}{\partial x}=\dfrac{LaR_1^{\,2}R_2^{\,2}-\dfrac{1}{Ma}R_1R_2(R_1+R_2)}{(R_2^{\,2}-R_1^{\,2})}, \\ \dfrac{\partial R_2^{\,2}}{\partial t}+\dfrac{\partial (VR_2^{\,2})}{\partial x}=\dfrac{LaR_1^{\,2}R_2^{\,2}-\dfrac{1}{Ma}R_1R_2(R_1+R_2)}{(R_2^{\,2}-R_1^{\,2})} \\ (R_2^{\,2}-R_1^{\,2})\left(\dfrac{\partial V}{\partial t}+V\dfrac{\partial V}{\partial x}\right)=\dfrac{3}{\mathrm{Re}}\cdot\dfrac{\partial}{\partial x}\left((R_2^{\,2}-R_1^{\,2})\dfrac{\partial V}{\partial x}\right)+\dfrac{(R_2^{\,2}-R_1^{\,2})}{\mathrm{Fr}}+\dfrac{1}{\mathrm{We}}\cdot\dfrac{\partial (R_1+R_2)}{\partial x} \end{cases}$$

Система уравнений (1) решается с начальными и граничными условиями

$$V(t,0)=\frac{V_0}{V_L}=\frac{1}{E},V(t,\frac{L}{L})=1,R_2(t,0)=\frac{R_{2pref}}{L}=R_{20},R_1(t,0)=\frac{R_{1pref}}{L}=R_{10},V(0,x)=V_{st}(x),R_2(0,x)=R_{2st}(x),R_1(0,x)=R_{1st}(x)$$

где Re - число Рейнольдса, ρ, μ - плотность и вязкость кварцевого расплава соответственно, Fr число Фруда, We - число Вебера, La - число Лапласа, Ma - число Марангони. V_0 - скорость подачи преформы, L - длина исследуемого участка расплава кварца, R_{1pref}, R_{2pref} - внутренний и внешний радиусы заготовки, E – кратность вытяжки (отношение скорости наматывания волокна V_L к скорости подачи заготовки V_0). Состояния системы $V(t,x),R_2(t,x),R_1(t,x)$ - безразмерные внутренний и внешний радиусы и продольная скорость соответственно. Продольная координата x направлена по ходу движения волокна, в размерном виде $x\in[0,L]$, t - время, $t\in[0,\tau]$. Отметим, что все величины приведены в безразмерном виде.

В работе [3] на основе данной одномерной модели была получена область параметров, при которой процесс устойчив, т.е. возможно непрерывное формирование волокна.

Для получения более развернутых результатов решалась прямая нелинейная задача (1). Значения пар параметров выбирались как из полученных областей устойчивости, так и из областей неустойчивости процесса вытяжки. При этом в систему (1) искусственно вносились малые возмущения для значений радиуса преформы и скоростей вытяжки на входе/выходе [1]:

$$V(t,0)=\frac{1}{E}(1+\gamma),V(t,\frac{L}{L})=(1+\gamma),R_2(t,0)=R_{20}(1+\gamma),R_1(t,0)=R_{10}(1+\gamma),\gamma=A\sin(2\pi\omega t),\omega=25\ A=0.05$$

Также оценивалось влияние данных колебаний на характеристики готового волокна, в виде относительных параметров: $\Delta R_1(t,x)=\dfrac{R_1^{*}(t,x)-R_1(t,x)}{R1(x,t)}$, $\Delta R_2(t,x)=\dfrac{R_2^{*}(t,x)-R_2(t,x)}{R_2(t,x)}$, где $R_1(t,x),R_2(t,x)$ - решение исходной задачи, $R_1^{*}(t,x),R_2^{*}(t,x)$ - решение, полученное после внесения возмущений. Расчеты проводились в системе мультифизического моделирования Comsol Multiphysics.

Проводилось моделирование вытяжки с параметрами $\mathrm{Re}=15.2\cdot10^{-5},Fr=3.4\cdot10^{-5},We=0.22,La=0,Ma=1446.62$ для заготовки с радиусами $R_{1pref}=0.01,R_{2pref}=0.025$.

На первом этапе выбиралось E= 20, что соответствует устойчивому состоянию.

На рис. 1 представлены полученные расчетные значения относительных величин - $\Delta R_1(t,1)$ в

зависимости от времени $t \in [0,100]$ для различных возмущающих воздействий.

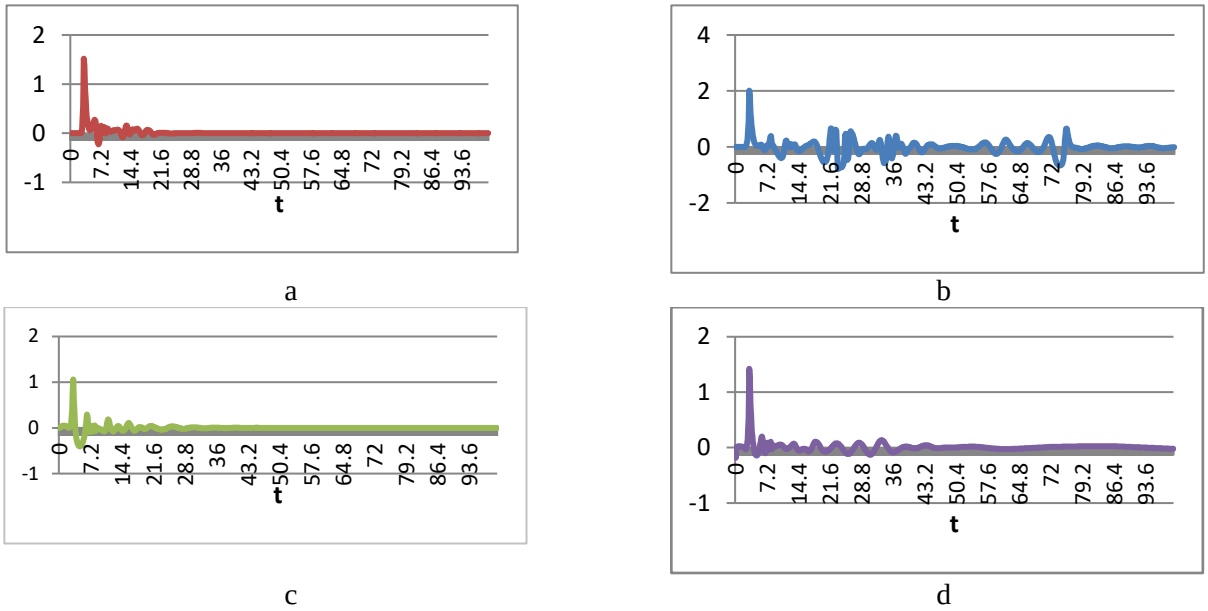


Рис. 1 Значения $\Delta R_1(t,1)$ ***при возмущающих воздействиях на:***
a-внутренний радиус преформы $R_1(t,0)$ ***; b- внешний радиус преформы*** $R_2(t,0)$ ***; c- скорость вытяжки готового волокна*** $V(t,L)$ ***; d- скорость преформы*** $V(t,0)$

Отметим, что процесс наиболее чувствителен к флуктуации внешнего радиуса заготовки.

Форма решений, представленных на рис. 3, позволяет судить о затухании во времени внесенных колебаний и не оказании ими существенного негативного влияния на геометрию струи. Тем самым получено подтверждение стабильности процесса вытяжки.

Далее было рассмотрено поведение системы, когда кратность вытяжки больше, чем критическая (E=90)- модельное неустойчивое состояние.

Стоит отметить, что при данных условиях система (1) не решается числено при $t \to \infty$. Поэтому рассматривалось состояние процесса при $t \in [0,10]$. Как видно из рис.2, в данном случае возникают колебания радиуса струю, что свидетельствует о неустойчивости процесса.

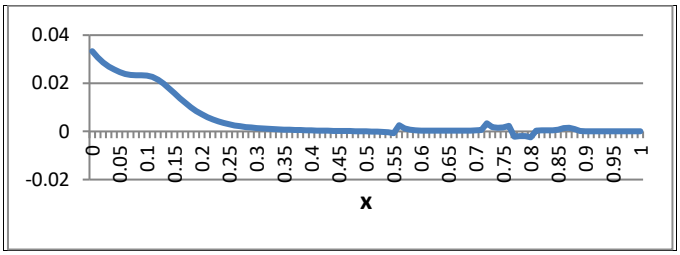


Рис. 2 Радиус $R_1(10,x)$

В работе рассмотрена одномерная модель вытяжки полых кварцевых оптических волокон, решена задача устойчивости процесса, выполнены два численных эксперимента, демонстрирующих состояния устойчивости или неустойчивости в зависимости от величин малых гармонических колебаний, вносимых в систему, а также от кратности вытяжки. Полученные результаты подтверждают результаты более раннего исследования [3]. Также показано, что процесс наиболее чувствителен к возмущениям радиуса заготовки.

Литература

1. *Forest M G, Zhou H, Euro. Jnl of Applied Mathematics* ***12,*** *479-496 (2001)*
2. *Voyce C. J., Fitt A. D., Monro T. M., J Eng Math* ***60****, 69-87 (2007)*
3. *Первадчук В.П., Владимирова Д.Б., Деревянкина А.Л.Прикладная фотоника* ***2****, 246-256 (2015)*

РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНОГО ГОЛЬМИЕВОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ХИРУРГИИ

Селезнев Д.А. [1,2], **Ременникова М.В.** [2,3], **Кашина Р.Р.** [1,4], **Рыбалтовский А.А.** [5], **Рогожников П.Ю.** [1]

[1] *ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь*
[2] *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь*
[3] *Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Пермь*
[4] *Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь*
[5] *Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино*
**E-mail:* vex20092009@yandex.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16202

Гольмиевые волоконные лазеры представляют большой интерес для медицины, поскольку генерируемое ими излучение с длиной волны ~ 2 мкм хорошо поглощается водой и биотканями, а также безопасно для глаз [1]. Преимущество волоконных перед твердотельными лазерами заключается в простоте и надежности архитектуры. Волоконные лазеры гораздо компактнее, не требуют юстировки оптических элементов и поэтому они могут быть легко перемещены без риска ухудшения выходных параметров. Кроме того, в отличие от твердотельных, волоконные лазеры не требуют отдельного водяного охлаждения и потребляют гораздо меньше энергии [2].

Представленный в настоящей работе гольмиевый лазер излучал на длине волны 2050 нм и работал при этом в импульсном режиме генерации. Принципиальная схема этого лазера показана на рис.1. Данный лазер состоял из трёх взаимосвязанных узлов: диодной накачки с длиной волны 976 нм, волоконного иттербиевого лазера с длиной волны генерации 1125 нм и выходного каскада для генерации излучения 2050 нм, реализованного на отрезке гольмиевого волокна.

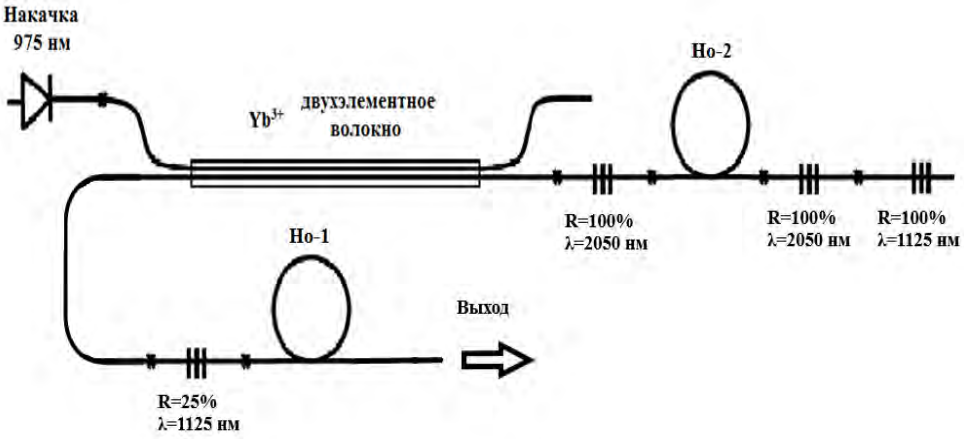


Рис. 1. Схема гольмиевого волоконного импульсного лазера

Источником накачки иттербиевого лазера выступал лазерный диод марки BWT, генерирующий излучение на длине волны 976 нм с максимальной мощностью 25,5 Вт. В качестве источника накачки гольмиевого световода был использован иттербиевый лазер с длиной волны генерации 1125 нм и дифференциальной эффективностью 18 %. Резонатор иттербиевого лазера был сформирован двухэлементным иттербиевым волокном и двумя волоконными брэгговскими решетками (ВБР), имеющих максимумы отражения на длине волны 1125 нм, и коэффициенты отражения 99,9 % и 25 % соответственно. Для генерации двухмикронного излучения использовался резонатор, образованный отрезком гольмиевого световода, одной ВБР на 2050 нм с коэффициентом отражения 99 %, а вместо выходной ВБР использовалось отражение от торца волокна, равное по величине 4 % [3]. Для реализации импульсного режима использовался пассивный оптический затвор. Он представляет собой гольмиевое волокно Но-2 производства ПАО «ПНППК» и две высоко отражающие ВБР на 2050 нм.

В качестве активной среды гольмиевого лазера использовалось волокно Но-1, также производства ПАО «ПНППК», эффективная длина активного волокна, исходя из формулы, составила 6 м.

$$L_k = \frac{10 * l * lg\frac{P_2}{P_1}}{x}$$

где l – длина волокна, на котором снимался спектр, $\frac{P_2}{P_1}$ – остаточная оптическая мощность от накачки, x – оптические потери на длине волны 2050 нм.

В ходе проведения исследований удалось получить устойчивый импульсный режим генерации с характерным временным спектром, представленным на рис. 2.



Рис. 2. Импульсный режим гольмиевого лазера

Период следования импульсов составил 40 мкс (соответствует частоте повторения импульсов – 25 кГц), при этом ширина каждого отдельно взятого импульса составила 180 нс. Пиковая мощность данного лазера, измеренная на длине волны 2050 нм при мощности диода накачки 4,5 Вт, оказалась равна 44,4 Вт. Данный лазер обладает более высокой эффективностью, по сравнению со своими аналогами [4].

Продемонстрированные выходные характеристики лазера открывают хорошие перспективы для его будущего применения в хирургии, в особенности - методах, базирующихся на облучении жидких сред в организме человека (удаление камней в мочевом пузыре, почках, удаление злокачественных опухолей в печени). Поэтому следующим этапом исследований станут испытания лазера на живой биоткани и моделирование воздействия данного излучения на биоткани.

Литература

1. *Филатова С.А., Волоконные лазеры двухмикронного диапазона для медицинского применения, Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, 161 (2019)*
2. *Филатова С.А., Цветков В.Б., Курков А.С., Импульсный гольмиевый волоконный лазер с длиной волны излучения 2,1 мкм для медицинского применения, Прикладная фотоника, 130-139 (2014)*
3. *Буряк В.П., Полимерные оптические волокна, №05, 16-24 (2007)*
4. *Merseburger A.S., Lasers and laser technologies, 21-27 (2011)*

МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ С БОЛЬШИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ ДИАПАЗОНОМ ОДНОМОДОВОГО РЕЖИМА

Денисов А.Н.[*], **Семенов С.Л.**

Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[*] *E-mail:* denisov@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16203

Микроструктурированные волоконные световоды (МВС) из чистого кварцевого стекла с сердцевиной диаметром несколько микрон и оболочкой с относительно большими отверстиями обладают высокой нелинейностью и имеют большой потенциал для многих научных и прикладных применений, таких как генерация суперконтинуума и четырехволновое смешение. Для большого числа задач необходимо также хорошее качество светового пучка, которое может быть обеспечено одномодовыми световодами. МВС с классической гексагональной структурой отверстий потенциально позволяют получить “бесконечный” по спектру одномодовый режим, однако для этого необходимо, чтобы диаметры их отверстий d и расстояния между их центрами Λ удовлетворяли условию $d/\Lambda < 0{,}41$ [1]. При этом для обеспечения малых потерь на вытекание число слоев отверстий должно быть достаточно большим (например, МВС SC-5.0-1040 фирмы NKT имеет 11 слоев отверстий).

Мы предлагаем новый дизайн МВС, содержащий три слоя одинаковых отверстий вокруг сердцевины, причем третий слой неполный, так что общее число отверстий МВС равно 30 (рис. 1).

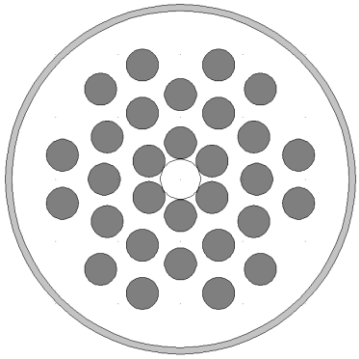


Рис. 1. MBC_088: $d/\Lambda_1 = 0{,}88$

Отверстия первого слоя находятся на расстоянии Λ_1 друг от друга, отверстия второго слоя находятся на расстоянии $\Lambda_2 > \Lambda_1$ от ближайших отверстий первого слоя, а отверстия третьего слоя находятся на расстоянии Λ_3 от ближайших отверстий второго слоя (на первом этапе мы выбрали $\Lambda_3 = \Lambda_2$). Такой дизайн по существу является МВС с каналами вытекания [2], при этом он дает дополнительные возможности варьирования параметров МВС путем выбора различных соотношений d/Λ_1 и d/Λ_2.

В данной работе приведены результаты численных расчетов характеристик предложенных структур МВС, которые мы проводили с использованием метода конечных элементов (FEM) с цилиндрическим PML (perfectly matched layer) слоем (светло-серое кольцо на рис. 1) с помощью программного пакета COMSOL 3.5. Расчеты проводились для МВС с сердцевиной диаметром 3,27 мкм.

Для каждого из выбранных значений d/Λ_1 мы определяли величину d/Λ_2, которая обеспечивала потери на вытекание для основной моды 0,2 дБ/м ±0,1% на длине волны 2,4 мкм. Это давало малые потери на вытекание для основной моды (< 0,1 дБ/м) в диапазоне длин волн до 2,3 мкм. Затем проводили расчеты потерь на вытекание для четырех кольцевых высших мод (условно обозначенных цифрами от 3 до 6 в порядке убывания их эффективного показателя преломления) и определяли спектральную границу одномодового режима (потери на вытекание для высших мод > 1,0 дБ/м).

На рис. 2 приведены спектральные зависимости потерь на вытекание для высших мод (общий минимум для всех четырех) для различных значений отношения d/Λ_1. Немонотонное поведение графиков для значений $d/\Lambda_1 = 0{,}87$ и $d/\Lambda_1 = 0{,}88$ поясняется на рис. 3, где приведены спектральные зависимости потерь на вытекание для трех высших мод (потери для мод 4 и 5 практически совпадают) при $d/\Lambda_1 = 0{,}88$. Также на рис. 3 приведена спектральная зависимость потерь на вытекание для основной моды 1 (совпадает с потерями основной моды 2, имеющей ортогональную поляризацию). Интересно отметить, что для остальных соотношений d/Λ_1 минимальное значение потерь на вытекание во всем спектральном диапазоне имеет мода 3. Причиной некоторого резонансного по виду роста потерь в области длин волн 1,0 – 1,2 мкм для мод 3 и 4 является, по-видимому, взаимодействие этих мод с сильно вытекающей модой, имеющей близкое значение эффективного показателя преломления. Эта мода локализована в основном в промежутке между первым и вторым слоями отверстий, но имеет также кольцевую компоненту в сердцевине МВС.

На рис. 4 приведена зависимость границы одномодового режима λ_{SM} от соотношения d/Λ_1.

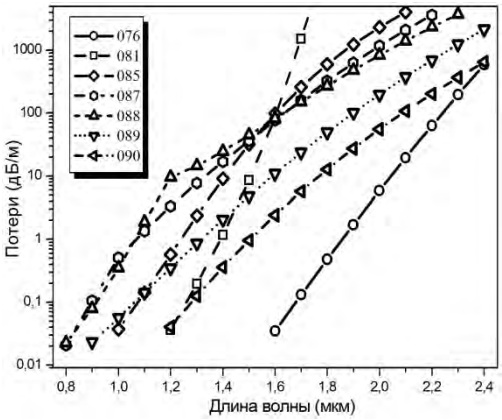


Рис. 2. Спектральные зависимости потерь на вытекание для высших мод для различных значений d/Λ_1

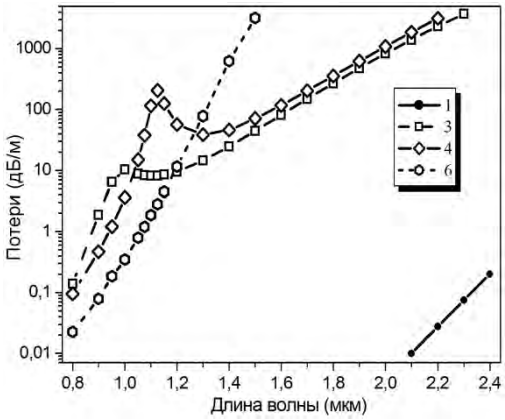


Рис. 3. Спектральные зависимости потерь на вытекание для основной и трех высших мод при $d/\Lambda_1 = 0{,}88$

Как видно из рис. 4, для выбранных параметров МВС (диаметр сердцевины, выбранные значения уровней потерь на вытекание и длинноволновой границы малых потерь для основной моды) существует оптимальное значение параметра $d/\Lambda_1 = 0{,}88$, при котором достигается максимальный диапазон одномодового режима, коротковолновая граница которого равна ~1,06 мкм.

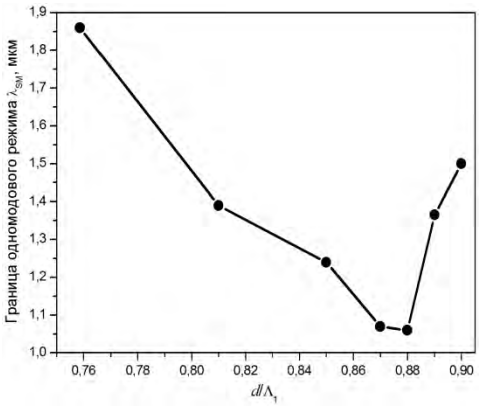


Рис. 4. Зависимость границы одномодового режима λ_{SM} от

Отметим, что для гексагональной структуры ($d/\Lambda_1 = d/\Lambda_2$) выбранный уровень потерь для основной моды получается при значении $d/\Lambda_1 \approx 0{,}76$. Как видно из рис. 4, для нее диапазон одномодового режима существенно меньше: $\lambda_{SM} \approx 1{,}86$ мкм.

На следующем этапе планируется провести дополнительные расчеты с варьированием также значений d/Λ_3 с целью поиска вариантов МВС с более широким диапазоном одномодового режима.

Поскольку предложенный дизайн МВС практически невозможно изготовить методом сборки заготовки для него из капилляров и стержней, для его изготовления планируется использовать технологию высверливания отверстий в заготовке из кварцевого стекла с последующим ее вытягиванием в волоконный световод. При этом достаточно легко изготовить двулучепреломляющий МВС (ДМВС) [3], что позволит использовать его для генерации поляризованного суперконтинуума.

Вариант дизайна такого ДМВС представлен на рис. 5, причем для начала было выбрано соотношение $d/\Lambda_1 = 0{,}88$, для которого были определены значения $d/\Lambda_2 = d/\Lambda_3 \approx 0{,}72$. Для этого ДМВС была выбрана сердцевина диаметром $D_y = 3{,}45$ мкм с эллиптичностью $e = 0{,}9$, которая при двух увеличенных до определенной величины зазорах (см. [3]) между отверстиями первого слоя обеспечивает практически круглое поле моды. Длина волны нулевой дисперсии для этого ДМВС примерно равна длине волны нулевой дисперсии для МВС с диаметром сердцевины 3,27 мкм и составляет около 0,925 мкм.

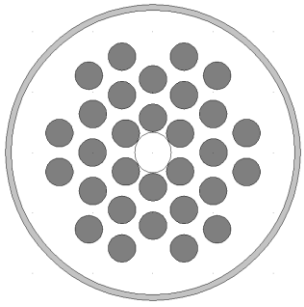


Рис. 5. ДМВС_62: $d/\Lambda_1 = 0{,}88$; $d/\Lambda_2 = d/\Lambda_3 \approx 0{,}72$

При выбранных параметрах ДМВС величина его двулучепреломления на длине волны 1,5 мкм равна $\sim 6\times10^{-4}$, а коротковолновая граница одномодового режима $\lambda_{SM} \approx 1{,}22$ мкм.

В дальнейшем планируется провести дополнительные расчеты с варьированием параметров d/Λ_1, d/Λ_2 и d/Λ_3 для поиска вариантов ДМВС с более широким диапазоном одномодового режима.

Литература

1. *A. Mortensen, et al, Opt. Lett. 28, 1879-1881 (2003)*
2. *W. S. Wong, et al, Opt. Lett. 30, 2855–2857 (2005)*
3. *A. N. Denisov, et al, J. Lightwave Technol. 33, 5184–5194 (2015)*

ВЫЖИГАНИЕ ДЫР В СПЕКТРЕ НЕОДИМОВОГО ВОЛОКОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Содномай А.Б.[1,2], **Лобач И.А.**[1,2*], **Каблуков С.И.**[1,2]

[1] *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*
[2] *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*
[*] *E-mail:* lobach@iae.nsk.su

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16204

Насыщение усиления является важной характеристикой оптических усилителей. Кроме мощностных характеристик процесс также имеет спектральную зависимость. Так для иттербиевых волоконных усилителей наблюдается однородное по спектру насыщение, а для эрбиевых – неоднородное. Активные среды с неоднородным насыщением удобно использовать для получения многоволновой генерации, что было продемонстрировано на примере эрбиевых волоконных лазеров с малым расстоянием между генерируемыми линиями [1]. В иттербиевых лазерах, напротив, из-за большой величины однородного уширения при комнатной температуре получение многоволновой генерации затруднено. Исследование эффекта спектрального выжигания дыр (СВД) проводилось в основном для эрбиевых волокон из-за потребности в многоканальных усилителях для телекоммуникаций [2]. СВД в неодимовых усилителях исследовалось существенно меньше. В основном применяются непрямые методы, например, измерение спектра резонансной флюоресценции [3].

Неоднородное насыщение усиления положительно сказывается при создании многоволновых лазерных источников, но может также приводить к отрицательным последствиям при проектировании обычных усилителей, поскольку за пределами линии однородного уширения наблюдается рост усиленного спонтанного излучения. Последний эффект может проявляться и в лазерах с самоиндуцированным сканированием (самосканированием) частоты [4]. Так в иттербиевом лазере эффект самосканирования может наблюдаться как для резонаторов с широкополосными, так и для с узкополосными зеркалами [4], а в неодимовом лазере в первом случае эффект не наблюдается [5]. В представляемом докладе мы производим сравнение спектров насыщения для усилителей на базе иттербиевого и неодимового волокон с двойной оболочкой и с сохранением поляризации. Для этого нами была реализована схема измерения спектра усиления активного волокна методом пробного поля.

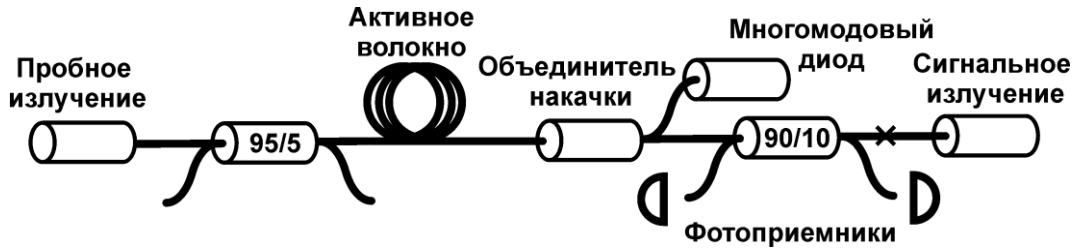


Рис. 1. Схема измерения спектрального контура усиления в волоконном усилители в присутствии насыщающей волны

Схема эксперимента представлена на Рис.1. В качестве источника пробного излучения используется иттербиевый лазер с самосканированием с диапазоном перестройки от 1055 до 1075 нм. В качестве сигнального источника используется одночастотный лазер Nd:YAG с длиной волны 1064 нм, направленный навстречу пробному излучению. Встречное направление источников излучения позволяет эффективно разделять пробную и сигнальную волны. Мощность пробной волны выбиралась меньше, чем мощность насыщения усиления. Это означает, что само пробное излучение не влияет на свойства усилителя. В работе исследовались усилители на основе волокна, легированного неодимом (PM-NDF-5/125) и иттербием (PM-YDF-5/130-VIII), и оптической накачки в виде многомодовых лазерных диодов с длинами волн волны 805 и 975 нм соответственно. Для исключения различных поляризационных эффектов все элементы схемы были выполнены на основе волокна с сохранением поляризации, а сигнальный и пробный источники генерировали линейно-поляризованное излучение. Стоит отметить, что все эксперименты были проведены при нормальных комнатных условиях, что полезно для сравнения с областью самоиндуцированного сканирования длины волны в Nd^{3+} волоконном лазере [5]. Анализировался сигнал усиленной пробной волны при различных мощностях сигнального излучения и при различных длинах волн из области

сканирования пробного лазера. Для наглядности спектры усиления нормировались на спектр усиления слабого сигнала (т.е. в отсутствии сигнального излучения), Рис.2. Было установлено, что спектр усиления иттербиевого усилителя имеет однородный характер (Рис.2а) – спектр усиления насыщается с увеличением мощности сигнальной волны как целое. Несколько иной поведение наблюдается для неодимового усилителя (Рис.2б). Помимо однородной составляющей также наблюдается спектральная дыра на длине волны сигнальной волны. Ширина спектральной дыры можно оценить как 4-6 нм. Учитывая тот факт, что диапазон сканирования для неодимового волокна существенно меньше, чем для иттербиевого можно сделать вывод о корреляции между характером усиления и диапазоном сканирования.

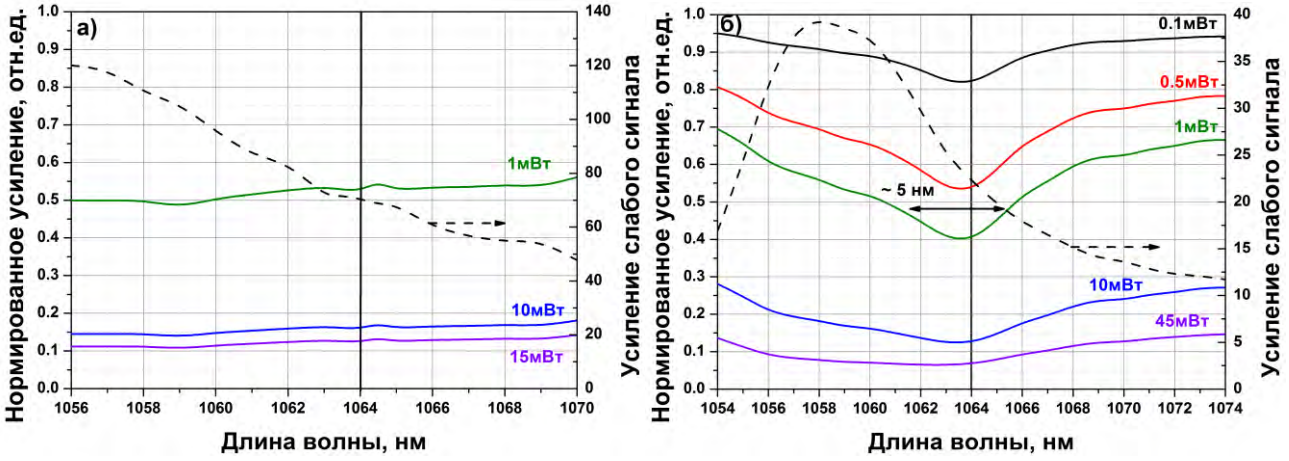


Рис. 2. Спектральная зависимость абсолютного усиления (правая ось) и нормированного на спектр усиления слабого сигнала в отсутствие сигнальной волны (левая ось) при различных мощностях сигнальной волны для иттербиевого (а) и неодимового (б) волоконных усилителей

Более детальное описание эксперимента по измерению спектральной зависимости усиления в различных волоконных усилителя, а также ее связи с диапазоном сканирования будут представлены в докладе.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАиЭ СО РАН (№ 0254-2019-0001).

Литература

1. *Mao Q., et al, J. Lightwave Technology, 21, 160-169, (2003)*
2. *Peretti R., et al, J. Lightwave Technol. 29, 1445-1452, (2011)*
3. *Digonnet M. J. F., ed., Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers, Marcel Dekker Inc., (2001) p. 792*
4. *Lobach I.A., et al, Optics Express 19, 17632-17640 (2011)*
5. *Kashirina E.K., et al, Opt. Lett. 44, 2252-2255 (2019)*

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ РЕЗОНАТОРА НА ГАРМОНИЧЕСКУЮ СИНХРОНИЗАЦИЮ МОД В ЭРБИЕВОМ ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ

Парфентьева В.Б.[1], Камынин В.А.[2], Трикшев А.И.[2], Цветков В.Б.[1,2]

[1] *Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия*
[2] *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16205

Лазеры ультракоротких импульсов (УКИ) с высокой частотой повторения импульсов являются неотъемлемой частью современной оптической метрологии и молекулярной спектроскопии. Высокостабильные лазерные системы УКИ позволяют получать данные с улучшенным отношением сигнал-шум, подходят для систем навигации, где требуются высокоточные стандарты частоты, и для системы высокоскоростной передачи данных.

Существует несколько способов создания таких лазерных систем: использование твердотельных или полупроводниковых лазеров с коротким резонатором [1], использование микрорезонаторов или эталонов [2], а также использование лазерных систем с гармонической синхронизацией мод. Последний метод позволяет не только реализовать высокую частоту следования импульсов, но и возможность ее перестройки.

В данной работе исследованы режимы генерации импульсного кольцевого волоконного лазера, работающего в режиме пассивной гармонической синхронизации мод на основе эффекта нелинейного вращения плоскости поляризации. В качестве активной среды использовалось эрбиевое волокно длиной 4 метра, накачка осуществлялась лазерным диодом с длиной волны 976 нм. Мощность диода накачки варьировалась в диапазоне от 30 до 540 мВт. Общая длина резонатора варьировалась за счет изменения линии задержки на SMF-волокне и составляла от 5 до 25 метров. Гармоническая синхронизация мод достигалась путём тщательной подстройки контроллеров поляризации и мощности накачки.

На рисунке 1 представлена интерферометрическая автокорреляционная функция импульса и спектр при работе лазера с длиной резонатора 12,5 м на основной частоте. Длительность импульса составила 320 фс ширина спектра по уровню -3 дБ была равна 10 нм.

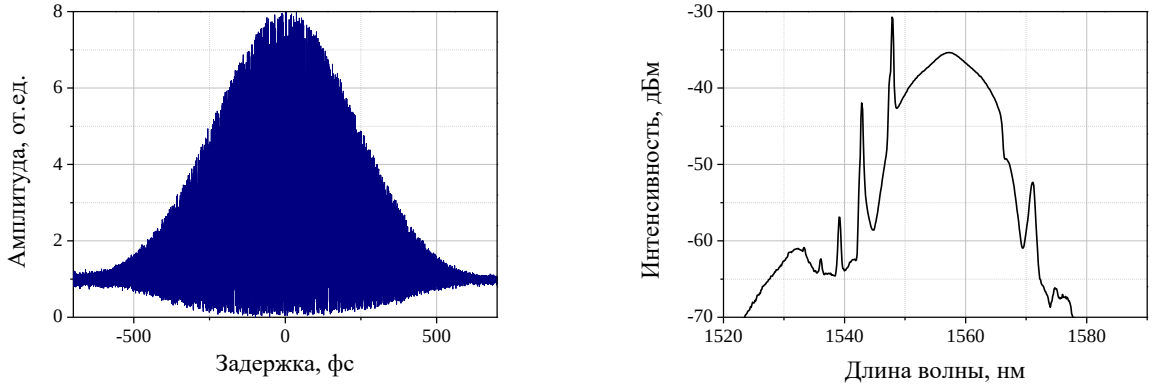


Рис. 1. Автокорреляционная функция и спектр лазера на основной гармонике (длина резонатора 12,5 м)

Для данной длины резонатора была получена 19-я гармоника. Для сравнения на рисунке 2 представлена последовательность импульсов на основной частоте (слева) и на 19-й гармонике (справа), что соответствует частоте следования импульсов 236 МГц.

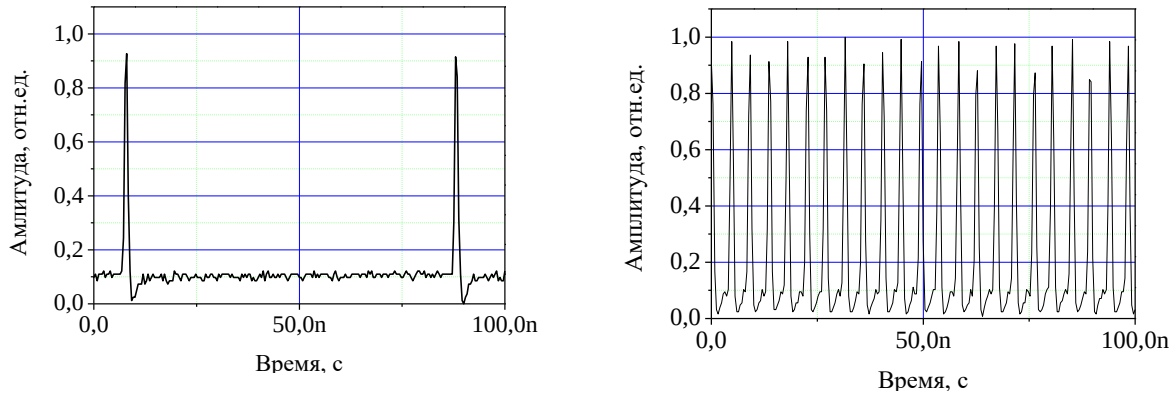


Рис. 2. Последовательность импульсов на основной частоте (слева) и на 19-й гармонике (справа)

В ходе данной работы продемонстрировано, что для получения частот следования импульсов близких или более 1 ГГц возможно использовать лазеры длиной более 10 метров. Кроме того, большая длина резонатора позволяет получить импульсы меньшей длительности.

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН № 5 "Фотонные технологии в зондировании неоднородных сред и биообъектов".

Литература

1. *Bandelow, U., et al., Opt Quant Electron 38: 495 (2006)*
2. *Kippenberg, T.J., R et al., Science: 332 (6029), pp. 555-559 (2011)*
3. *Sotor, J., et al., Laser Phys. Lett., 11,055102 (2014)*
4. *Peng, J., et al. J. Lightw. Technol., 31, 3009–3014. (2013)*
5. *Chen, H.R., et al. Opt. Lett., 38, 845–847, 2013*

ПОЛУЧЕНИЕ ОСОБО ЧИСТЫХ СТЕКОЛ СИСТЕМЫ Ge – Ga – S(Se), ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, ДЛЯ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Вельмужов А.П., Суханов М.В.

Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН, г. Нижний Новгород
* *E-mail:* velmuzhov.ichps@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16206

Стекла систем Ga – Ge – S и Ga – Ge – Se, легированные редкоземельными элементами (РЗЭ), являются перспективными материалами для создания волоконных лазеров и усилителей среднего ИК-диапазона [1]. Они обладают высокой оптической прозрачностью в спектральной области, соответствующей люминесценции РЗЭ (1-8 мкм); меньшей энергией фононов, по сравнению с оксидными и галогенидными стеклами; относительно высокими температурами стеклования (280-320); низкой токсичностью по сравнению с сульфидно-мышьяковыми стеклами [2]. Основными недостатками этих материалов являются склонность к кристаллизации большинства составов и достаточно высокое содержание оптически-активных примесей. К наиболее характерным примесям для стекол на основе халькогенидов германия и галлия относятся: водород в форме SH- и SeH-групп (максимум поглощения на 3.96 и 4.54 мкм соответственно), молекулярная вода (2.79, 2.86 и 6.16 мкм), OH-группы (2.92 мкм); углерод в форме CO_2 (4.33 мкм), COS (4.95 мкм) и CS_2 (4.65 мкм); кислород, химически связанный с германием (7.8 мкм) [3]. Склонность к кристаллизации и присутствие поглощающих примесей существенно ухудшают оптические характеристики этих стекол и ограничивают их практическое применение. Задачи поиска оптимальных составов стекол систем Ga – Ge – S и Ga – Ge – Se, по совокупности свойств наиболее подходящих для изготовления волоконных световодов, и снижения содержания в них поглощающих примесей являются актуальными.

Объектами исследования были стекла составов $Ga_xGe_{41-x}S_{59}$ и $Ga_xGe_{41-x}Se_{59}$ (x = 1-5), легированные тулием, празеодимом и тербием в концентрационном диапазоне $1\cdot10^{19}$ – $1\cdot10^{20}$ ат·см$^{-3}$. Стекла получали плавлением компонентов шихты в форме простых особо чистых веществ в вакуумированных кварцевых ампулах при температуре 800°C с последующей закалкой расплава. Для снижения содержания поглощающих примесей халькогены коммерческих марок были дополнительно очищены. Серу подвергали многократной вакуумной дистилляции, совмещенной с химико-термической обработкой паров. Селен плавили с добавкой оксида селена(IV) для удаления примеси водорода и углерода и дистиллировали. Загрузку серы и селена в реактор проводили из кварцевых ампул, оснащенных разбивающейся перегородкой, что исключало контакт халькогена с воздухом. Германий предварительно прокаливали в вакууме при 700–750 для удаления примеси оксида германия(IV), адсорбированного на поверхности гранул. Были получены образцы стекол диаметром 10 мм и длиной до 60 мм. Содержание примеси водорода в форме SH- и SeH-групп в образцах составило 0.1–0.2 ppm(at). К настоящему времени это лучший результат для стекол на основе халькогенидов германия и галлия. Показано, что добавление галлия в стекла приводит к существенному снижению интенсивности полосы поглощения в области 7.8 мкм, соответствующей примеси кислорода в форме связей Ge–O. Это обусловлено преимущественным связыванием кислорода атомами галлия с образованием связей Ga-O, поглощение которых находится вне области прозрачности стекол (15-18 мкм). Наилучшую стеклообразующую способность среди исследованных составов проявил образец $Ga_5Ge_{36}S_{59}$. Из этого образца впервые был изготовлен бесструктурный волоконный световод.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-20079).

Литература

1. *Seddon A.B., et al, Opt. Express. 18, 26704-26721 (2010)*
2. *Heo J.,, Chung W.J., Chalcogenide glasses. Preparation, Properties and Applications, 381-410 (2014)*
3. *Snopatin G.E., et al, Inorg. Mat. 45, 1439-1460 (2009)*

УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХОДИМОСТИ СИСТЕМЫ КОГЕРЕНТНОГО СЛОЖЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СЕМИКАНАЛЬНОГО ОПТОВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

Козлова Т.И.[*], **Коновальцов М.И., Течко О.Л., Тютин С.В., Хохлов С.В.**

Российский Федеральный Ядерный Центр

Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Экспериментальной Физики, г. Саров

[*]

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16207

В настоящее время волоконные лазеры широко применяются в таких технологических процессах как, например, лазерная резка, сварка [1]. Однако, при отдалении обрабатываемого объекта, интенсивность осевого воздействия значительно ослабляется [1]. Одной из причин является высокая расходимость излучения современных мощных лазерных систем, которые в большинстве своём являются многомодовыми. Одномодовые излучатели имеют лучшее качество лазерного пучка и могли бы решить проблему доставки лазерного излучения на удалённый объект. Однако при прохождении лазерным пучком протяженной атмосферной трассы фаза излучения в каждой точке его апертуры произвольным образом меняется. Происходит это из-за турбулентных завихрений воздуха, меняющих показатель преломления среды.

Одним из решений данной проблемы является создание систем на основе фазового сложения многоканального лазерного излучения [2-3]. Осевая сила света фазируемого излучения напрямую зависит от коэффициента заполнения суммарной апертуры [4]. Кроме того, размер дифракционного максимума суммарного излучения определяется только длиной волны и расстоянием между субапертурами. Наиболее оптимальным является гексагональное расположение лазерных источников, число которых может быть 7, 19, 37 и т.д. В результате такого расположения возможно повышение осевой интенсивности на удаленном расстоянии ввиду малой расходимости сфазированного излучения.

Регулировка фаз в каждом канале может осуществляться методом итерационного стохастического параллельного градиентного (СПГ) алгоритма [2,3] за счет подачи управляющих напряжений на модуляторы. При использовании модуляторов на основе пьезокерамических элементов, частота работы системы не превышает 5 кГц. Такое ограничение вызвано их механической природой и возникающим явлением резонанса. Другой тип корректирующих фазу устройств – электрооптические модуляторы, которые могут быть либо быть внешними, либо встроенными в волоконную лазерную систему. В случае внешних модуляторов, например, на основе кристаллов $LiNbO_3$, предельная частота работы СПГ-алгоритма составляет 14кГц [2]. Ограничение обусловлено временем переходных процессов в системе управления из-за значительной амплитуды подаваемых на модуляторы напряжений (около 0,7 кВ). Кроме того система не является цельноволоконной, требуется дополнительная юстировка, а также возможны потери излучения на границе двух сред воздух-кристалл. Встроенные волоконные фазовые модуляторы, (напр., на основе $LiNbO_3$), лишены вышеприведенных ограничений. В них явление резонанса наступает при ГГц-частотах, амплитуда управляющего напряжения не превышает нескольких вольт, что значительно сокращает время переходных процессов, и упрощает систему управления.

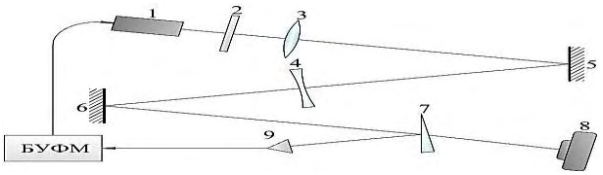


Рис. 1. Схема эксперимента 1 – волоконный лазер со встроенными фазовыми модуляторами, 2 – сборка из 7 собирающих линз, 3 – собирающая линза, 4 – рассеивающая линза, 5, 6 – глухие зеркала, 7 – оптический клин, 8 – CCD-камера, 9 – фотодиод, БУФМ – блок управления фазовыми модуляторами

Целью данной работы является создание системы фазового сложения для случая семиканального лазерного излучения с помощью СПГ-алгоритма, используя для управления фазой электрооптические волоконные модуляторы на основе $LiNbO_3$, что позволит повысить быстродействие системы и уменьшить полное время фазирования. На рис.1 приведена схема эксперимента. Для фазирования была создана одночастотная оптоволоконная восьмиканальная лазерная система (1) YFL-SF-1064-2-8Ch с поляризованным излучением, устройство которой приведено на рис. 2. Для сохранения поляризации лазерная система была собрана на «polarization mounted» волокне. Излучение, выходящее из патчкордов, попадало на семь гексагонально расположенных собирающих линз, закрепленных в оправе (2), геометрия которой приведена на рис. 3. Сколлимированное излучение проходило через двухлинзовую систему, состоящую из собирающей (3) и рассеивающей (4) линз. Данные линзы были установленные так, чтобы на дистанции около 7 м

сформировать эквивалентный фокус 100 м. Затем излучение для визуализации поступало на CDD-камеру (8), отраженное от оптического клина (7) – фотодиод (9), расположенные в фокальной плоскости двухлинзовой системы. Фотодиод (9) измерял осевую интенсивность, которая является целевой функцией для СПГ-алгоритма, по изменению которой блок управления БУФМ осуществлял корректировку фаз в каналах, подавая на встроенные в лазерную систему электрооптические фазовые модуляторы волновые напряжения.

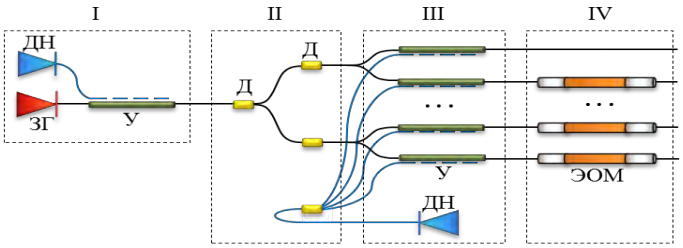


Рис. 2. Устройство лазерной системы (1)
I –система предусиления, II – система деления,
III – система усиления, IV – система управления,
ЗГ – задающий генератор, ДН – диоды накачки, У – усилители,
Д – делители, ЭОМ – электрооптические модуляторы

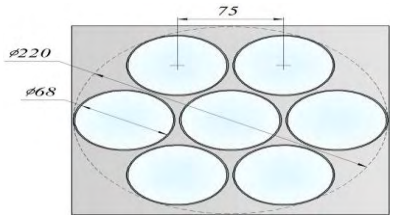


Рис. 3. Геометрия сборки (2)

Линейно поляризованное лазерное излучение со степенью поляризации 0,99 имело ширину линии генерации менее 10 кГц, что соответствует длине когерентности 30 км. Максимальная мощность излучения на выходе каждого из каналов составила 100 мВт. Результирующая апертура лазера составила D = 220 мм (см. рис.3), состоящая из субапертур размером d = 68 мм. Коэффициент заполнения апертуры определяется, как отношение площади, занимаемой субапертурами, к площади результирующей апертуры: $7\left(\frac{d}{D}\right)^2$, и равен 0,67. Изображение в случае когерентного сложения семиканального излучения в дальней зоне приведено на рис.4. Были исследованы пространственные характеристики сфазированного излучения. С помощью CCD-камеры (8) экспериментально определена расходимость излучения $1{,}3\cdot10^{-5}$ рад, что составляет 1,03 от значения дифракционной расходимости.

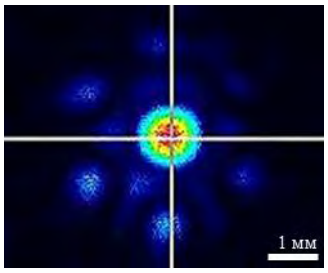


Рис. 4. Сфазированное излучение в дальней зоне

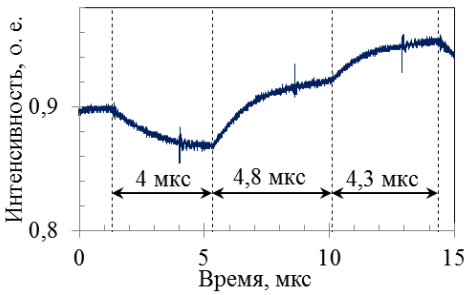


Рис. 5. Длительность итераций

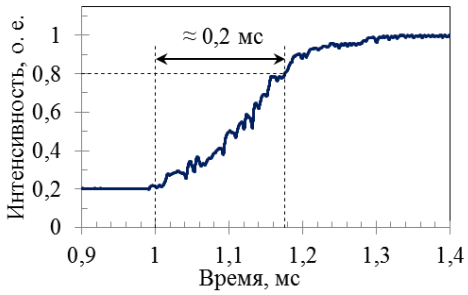


Рис. 6. Время фазирования

За счет использования специального блока управления фазовыми модуляторами достигнуто значительное увеличение частоты работы системы. Были измерены волновые напряжения для электрооптических модуляторов, значения которых равны 2 В. Согласно рис. 5 длительность одной итерации 4,4 мкс, соответствующая частота 227 кГц. Полное время фазирования, оправляемое согласно критерию Марешаля по уровню 0,8 [5], равно 0,2 мс (см. рис. 6). Таким образом, значение было уменьшено в 15 раз по сравнению с полученным ранее значением 3 мс [2].

В ходе работы продемонстрировано когерентное сложение семиканального излучения с расходимостью, близкой к дифракционной. Впервые в России зафиксирована частота работы системы фазирования, многократно превышающая полученные ранее значения. Ожидается, что такой частоты будет достаточно, чтобы корректировать атмосферные изменения на протяженной воздушной трассе.

Литература

1. *Зайцев А.В. и др., Квантовая Электроника, 37, №9, 891-892 (2007)*
2. *Волков В.А. и др., Квантовая Электроника, 44, №11, 1039–1042 (2014)*
3. *Волков В.А. и др., Квантовая Электроника, 43, №9, 852–856 (2013)*
4. *Волков В.А. и др., Квантовая Электроника, 45, №12, 1125–1131 (2015)*
5. *Марешаль А., Франсон М., Структура оптического изображения, Москва: Мир, с.295 (1964)*

МЕТОД ПРЕЦИЗИОННОГО ВЫРАВНИВАНИЯ ДЛИНЫ ОПТОВОЛОКОННЫХ КАНАЛОВ С ПОСЛЕДУЮЩИМ КОГЕРЕНТНЫМ СЛОЖЕНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ

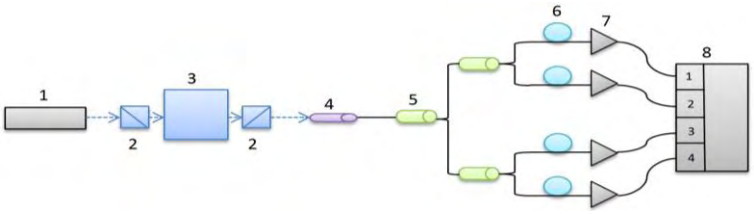
Тютин С.В.*, Коженкова Т.Ю., Течко О.Л., Хохлов С.В., Коновальцов М.И.

Российский Федеральный Ядерный Центр
Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Экспериментальной Физики, г. Саров
**E-mail: oefimova@otd13.vniief.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16208

Основным препятствием для достижения высоких значений мощности излучения одномодовых оптоволоконных лазеров является возникновение в оптоволокне различных нелинейных эффектов, которые приводят к разрушению волокна и ограничивают предельную выходную мощность. В одночастотных лазерах с узкой шириной спектра при достижении определённой плотности излучения основную роль в расчёте пороговой мощности начинает играть вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна. Для увеличения порогового значения возникновения ВРМБ необходимо увеличивать ширину линии генерации лазерного излучения, что в свою очередь сказывается на уменьшении длины когерентности и в конечном итоге приводит к значительным трудностям в выравнивании оптического пути лазерного излучения при создании многоканальных оптоволоконных систем с когерентным сложением излучения [1].

В данной работе реализован метод для прецизионного выравнивания длины оптоволоконных каналов, проводящих лазерное излучение с малой длиной когерентности при помощи быстродействующего оптического затвора на основе ячейки Поккельса со световой апертурой 15x15 мм^2. При помощи данного метода удалось получить на выходе многоканальной оптоволоконной системы взаимно когерентное лазерное излучение, а применение специально разработанного итерационного подхода на основе СПГ алгоритма позволило реализовать когерентное фазовое сложение многоканального лазерного излучения [2, 3].

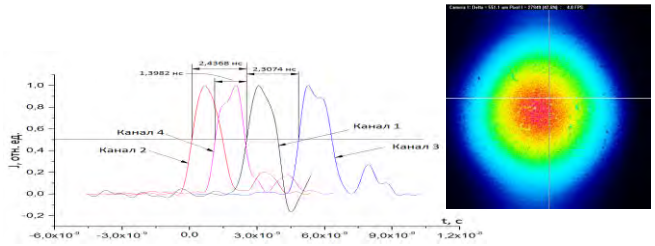


1 - лазер, 2 - призма Глана; 3 - ячейка Поккельса;
4 - коллиматор, с волоконным выходом; 5 - система деления;
6 - пьезокерамические модуляторы фазы;
7 - фотоприемник; 8 - осциллограф

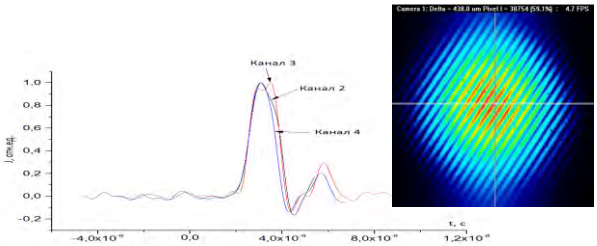
Рис.1. Схема измерения оптических задержек

В данной работе предлагается метод, позволяющий с точностью до 1 см, выровнять длины оптоволоконных каналов длиной 20 м. Измерения задержки между световыми импульсами, сформированными быстродействующим электрооптическим затвором на основе ячейки Поккельса и прошедшими через всю оптоволоконную систему позволяют рассчитать разницу длин независимых оптоволоконных каналов. Схема измерения представлена на рисунке 1.

В экспериментах применялся непрерывный ИК-лазер (длина волны 1,056 мкм). Ширина линии излучения лазера была измерена интерферометром Майкельсона и равна 30,93 ГГц (длина когерентности 0,97 см, $\Delta\lambda$=0,115 нм). Излучение непрерывного лазера, прошедшее через электрооптический затвор Поккельса световой апертурой 15x15 мм, заводилось в коллиматор с волоконным выходом. На ячейку, находящуюся между двумя скрещенными призмами Глана, подавалось управляющее полуволновое напряжение. Длительность переднего фронта окна открывания затвора по уровню 0,5 порядка 0,5 нс.



до выравнивания длины каналов

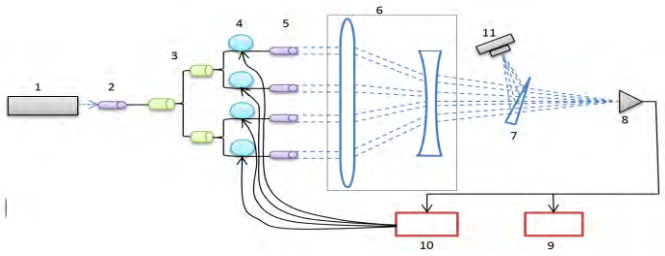


после выравнивания длины каналов

Рис. 2. Окна пропускания быстродействующего затвора Поккельса для 4-х каналов

Результаты проведенных измерений с помощью данной ячейки, приведены на рисунке 2 в виде осциллограмм окна открывания ячейки. Выравнивание длины оптоволоконных каналов позволило получить на выходе лазерной системы когерентное 4 канальное излучение, для которого возможно применить разработанный нами способ фазового сложения.

Для проведения эксперимента по фазировке 4-канального оптоволоконного лазера, с применением пьезокерамических катушек в качестве фазовых модуляторов, применялась оптическая схема, представленная на рисунке 3. Для регистрации изменения целевой функции СПГ алгоритма часть излучения, отраженная от клина поступала на фотодиод, расположенный в фокальной плоскости двухлинзовой системы.



1-ЗГ, 2-коллиматор, 3-система деления излучения, 4-пьезокерамические катушки, 5-коллиматоры, 6-двухлинзовая система, 7-клин, 8-фотодиод, 9-осциллограф, 10-блок управления пьезо-керамическими катушками, 11-CCD-камера

Рис. 3. Принципиальная схема эксперимента по фазировке 4-канального оптоволоконного лазера

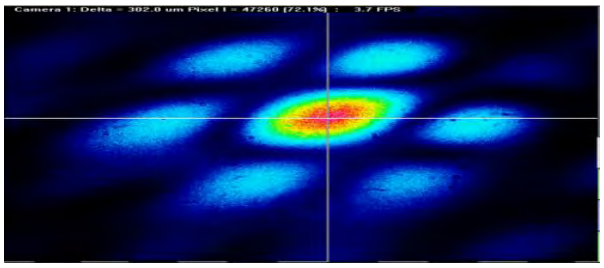


Рис.4. Зависимость выходного сигнала фотодиода от времени при включении/выключении обратной связи

При включении обратной связи в системе фазировки фотодиод, расположенный на оптической оси в фокусе двухлинзовой системы, регистрировал значение мощности излучения, прошедшего через диафрагму расположенную на оптической оси, и передавал этот сигнал на блок управления, который оценивая изменения сигнала, подавал на пьезокерамические модуляторы фазы требуемые значения напряжения в соответствии с СПГ алгоритмом. Используя значение мощности в малом телесном угле в качестве целевой функции, система фазировки, обеспечивала постоянную синфазность излучения всех лазерных каналов вне зависимости от исходных значений фазы в них.

b c

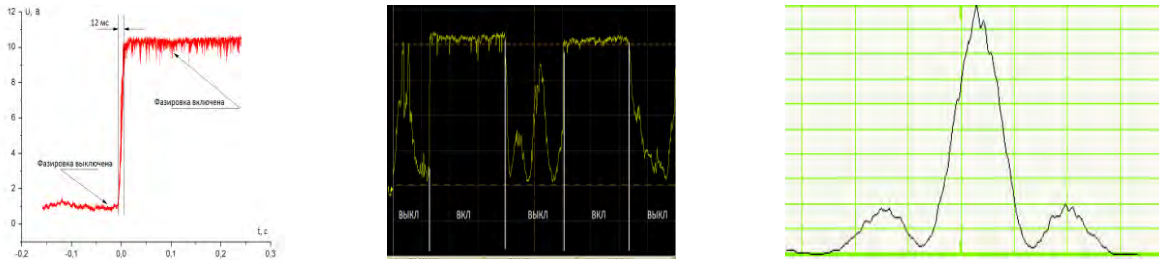


Рис.5. a - распределение интенсивности сфазированных каналов в дальней зоне; b - пропись по координате y; c - процесс фазировки регистрируемый фотодиодом

В ходе работы получены следующие результаты:

С помощью интерферометра Майкельсона измерены длина когерентности и ширина спектра оптоволоконного иттербиевого лазера. Проведены расчёты порогового значения возникновения ВРМБ для выбранного типа оптоволокна. Проведено деление излучения в несколько оптоволоконных каналов. С помощью быстродействующего оптического затвора измерены длины оптоволоконных каналов с последующим их выравниванием. С помощью модуляторов фазы, управляемых специально разработанным блоком, выдающим команды на основе двухэтапного СПГ алгоритма, реализовано когерентное фазовое сложение многоканального лазерного излучения с шириной полосы 60 кГц.

Литература

1. *Weyrauch T. et al, Optics Letters. 41, 840–843 (2016)*
2. *Волков В.А. и др. Квантовая электроника 43, 333-335 (2013)*
3. *Волков В.А. и др., Квантовая Электроника, 44, №11, 1039–1042 (2014)*

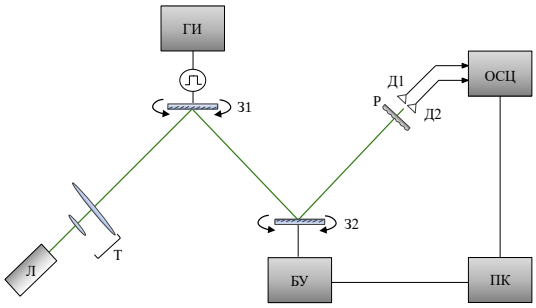
МЕТОД КОРРЕКТИРОВКИ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Козлова Т.И., Коновальцов М.И., Лебедев Р.С., Течко О.Л.*, Тютин С.В., Цыкин В.С.

Российский Федеральный Ядерный Центр
Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Экспериментальной Физики, г. Саров
** E-mail: oefimova@otd13.vniief.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16209

При прохождении лазерного излучения через протяжённую оптически нестабильную трассу возникают хаотические изменения направления распространения пучка [1,2]. В настоящее время одним из существующих методов поддержания узконаправленности лазерного излучения является метод стабилизации, который основан на определении геометрического центра масс пучка в пространстве с помощью анализатора. Однако такая схема является громоздкой, т.к. необходимо использовать анализаторы на каждом канале, медленной из-за частотного ограничения камеры и времени обработки изображения, а также нестабильной из-за возможности рассогласования положений оптических осей, определяемых камерами. Таким образом, разработка быстродействующей и стабильной системы корректировки положения лазерного пучка является актуальной задачей. Цель работы является стабилизация положения пучка в заданной точке. В работе предложен метод, позволяющий в режиме реального времени корректировать направление пучка в пространстве с помощью корректора угловых перемещений (плоское зеркало, закреплённое на подвижной платфор-ме с пьезоэлектрическими толкателями). Система корректировки направления распространения лазер-ного излучения работает в режиме замкнутого цикла с обратной связью, принимая сигналы с четырёх фотодетекторов расположенных вокруг оптической оси лазерного пучка.



Л – непрерывный лазер, Т – расширяющий телескоп, 31, 32 – подвижные зеркала, ГИ – генератор импульсов, БУ – блок управления, Р – рассеиватель, Д1, Д2 – фотодетекторы, ОСЦ – осциллограф, ПК – персональный компьютер

Рис. 1. Оптическая схема эксперимента

Эксперименты по корректировке отклонения пучка лазерного излучения проводились по схеме, представленной на рисунке 1. Приведенная схема соответствует одномерной стабилизации. В случае двумерной – в схему дополнительно добавлялись два фотодетектора, размещение которых определялось аналогично описанному ниже алгоритму.

Рассмотрим случай стабилизации по горизонтальной оси OX. В работе применялся непрерывный лазер Л с длиной волны 532 нм. Согласно рис. 1 лазерное излучение проходило через расширяющий телескоп Т, после попадало на подвижное зеркало З1, управляемое генератором импульсов ГИ, имитирующее смещение пучка в атмосфере. Затем пучок отражался от подвижного зеркала З2, регулируемого блоком управления БУ, и корректирующего положения пучка. Зеркало З2 представляет собой корректор угловых перемещений, состоящий из плоского зеркала закреплённого на подвижной платформе с пьезоэлектрическими приводами. Значение интенсивности регистрировали два фотодетектора Д1 и Д2, при помощи осциллографа ОСЦ, расположенные с двух противоположных сторон от оптической оси пучка. Расположение фотодетекторов Д1 и Д2 относительно пучка в случае одномерной стабилизации показано на рис. 2. Сигнал с фотодетекторов поступал на специально разработанный четырехканальный блок управления, тем самым замыкая обратную связь системы. Заклон подвижной платформы осуществлялся путём подачи на него рабочего напряжения в диапазоне $\Delta U = -20 \div 120$ В. Был определён предельный угол отклонения α зеркала З2, который составил 2,4 мрад. Соответственно максимальная амплитуда отклонения пучка зеркалом З1 подбиралась в диапазоне $\pm\alpha/2$.

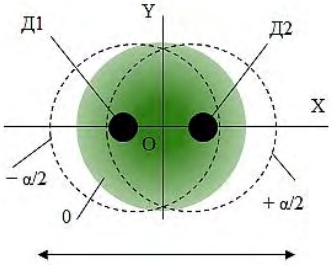


Рис. 2. Расположение фотодетекторов Д1 и Д2

При подаче напряжения на З2 из ΔU-диапазона минимального до максимального значения происходи отклонение пучка. В результате такого отклонения фор сигналов на Д1 и Д2 имела пилообразный вид в соответствии рис. 3. Алгоритм корректировки положения пучка лазерно излучения включает в себя два этапа: «статика» и «динамика». этапе «статика» проводилась самоподстройка системы. Эт «статика» являлся подготовительной частью, которая заключала в нахождении связи переводного коэффициента K, определяемо как отношение сигналов фотодетектора с подаваемым напряжением на подвижное зеркало З2, то есть K(U). При изменении напряжения в ΔU-диапазоне пучок лазерного излучения перемещался между положениями ±α/2. В ходе выполнения таких отклонений с помощью осциллографа были получены значения интенсивностей пятна на каждом из фотодетекторов $I_{Д1}$ и $I_{Д2}$ соответственно. Поскольку чувствительность фотодетекторов Д1 и Д2 различна, было проведено нормирование получаемых с них сигналов, результат которого показан на рис. 5. Место пересечения двух сигналов, изображенное на рис. 4, соответствует такому положению пучка лазерного излучения, максимум интенсивности $I_{макс}$ которого приходится по центру между фотодетекторами Д1 и Д2. Затем было определено отношение значений интенсивностей $I_{Д2}/I_{Д1}$ полученных сигналов на фотодетекторах, результат показан на рис. 5. Таким образом, была получена зависимость переводного коэффициента K от напряжения U на зеркале З2, кроме того найдено напряжения U_0 при $K_0 = 1$, соответствующее заданному положению 0 (см. рис. 2).

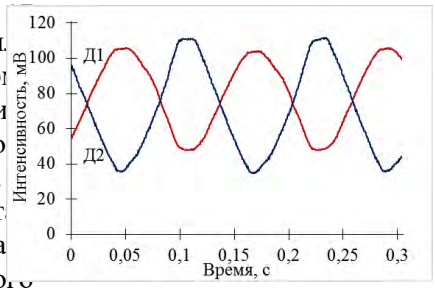


Рис. 3. Интенсивность с фотодетекторов Д1 и Д2

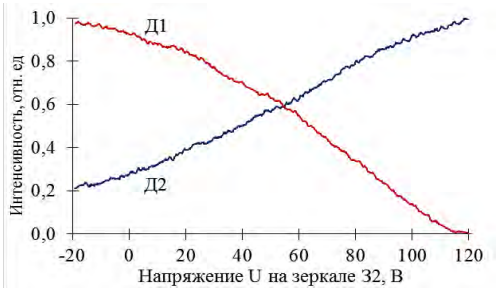


Рис. 4. Нормированная интенсивность с фотодетекторов Д1 и Д2

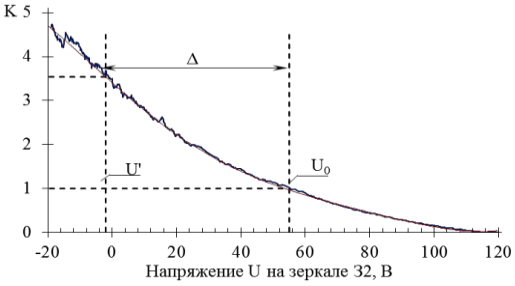
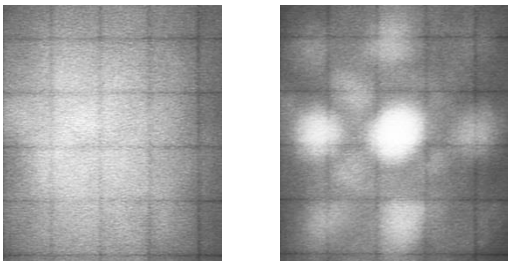


Рис. 5. Зависимость переводного коэффициента K от напряжения U на зеркале З2

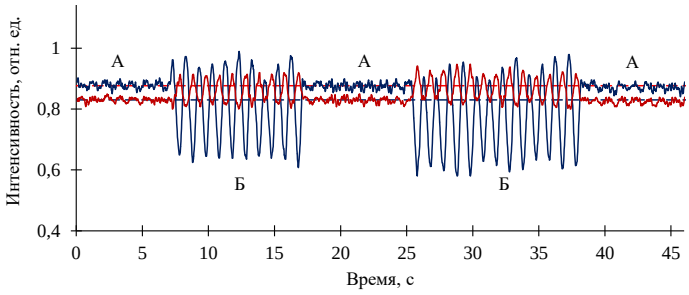
Этап «динамика» в свою очередь имитировал произвольно блуждающий вдоль горизонтальной оси OX пучок (в случае одномерной стабилизации) либо в плоскости XOY (в случае двумерной стабилизации), то есть зеркало З1 совершало колебания. На рис.6 и рис.7 показаны результаты, наблюдаемые при включении и выключении корректировки.



А *Б*

А - корректор выкл, Б - корректор вкл

Рис. 6. Изображение суммы 120 кадров



А - корректор выкл, Б - корректор вкл

Рис. 7. Интенсивность на фотодетекторах

В ходе данной работы был разработан метод стабилизации, который позволяет в режиме реального времени корректировать направление пучка по горизонтальной и вертикальной осям с помощью корректора угловых наклонов. Приведены основные принципы работы алгоритма корректировки пучка лазерного излучения с обратной связью. Продемонстрирована устойчивая работа системы корректировки в режиме реального времени. Определены граничные значения работы подвижного зеркала по углу (±2,4 мрад) и по частоте (150 Гц).

Литература

1. *Зуев В.Е., «Распространение лазерного излучения в атмосфере»: Радио и связь, с. 288 (1981)*
2. *Милгетин Е.Р., Вестник связи, №2, 89-90 (2008)*

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЛОКОННОГО ИТТЕРБИЕВОГО УСИЛИТЕЛЯ. УРАВНЕНИЯ БАЛАНСА

Слобожанина М.Г.*, Бочков А.В., Лукин А.В., Слобожанин А.Н.

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Технической Физики имени академика Е.И. Забабахина»
** E-mail:* dep5@vniitf.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16210

Теоретические исследования в области волоконных лазеров являются важным аспектом научно-исследовательской деятельности в данной области знания. Несмотря на большое количество работ [1-3], и схожих подходов при физико-математическом описании, на данный момент отсутствует замкнутая в одном подходе (физических приближениях и предпосылках) модель волоконного усилителя/лазера. Общепринятые дифференциальные уравнения для описания изменения мощности оптического излучения в активных оптических волокнах имеют вид уравнений переноса, однако ни в одной работе не указаны границы применимости данного подхода и не проведен последовательный вывод данных уравнений. В данной работе в рамках общего подхода теории переноса [4,5] – переноса излучения и тепла, - сформулирована замкнутая физико-математическая модель волоконного усилителя.

Руководствуясь принципами балансовых уравнений, основанных на балансе числа частиц, находящихся в различных энергетических состояниях, и балансе энергии оптического излучения, были записаны кинетические уравнения для изменения населенностей ионов по энергетическим состояниям, и приведен вывод уравнений распределения и взаимодействия оптического излучения в сердцевине активного волокна. Указаны физические ограничения данного подхода.

Показано, что существующая модель волоконного усилителя на основе волокна с двойной оболочкой [2,3], является частным случаем представленной модели, как для излучения сигнальной волны, так и для излучения накачки, однако, с небольшими поправками.

В работе приведено описание изменения температуры активного волокна в рамках теории теплообмена [6]. Этот подход является общепринятым [7,8] и в данной работе он полностью вписывается и не нарушает общности подхода к описанию работы волоконного усилителя. В отличие от используемых в теории волоконных лазеров уравнений теплообмена, нами был учтен вклад внешнего воздействия на волокно, за счет наличия в наших уравнениях слагаемого, описывающего работу внешних сил. Данное слагаемое просто необходимо, когда мы описываем работу реальных усилителей, которые всегда подвержены внешним воздействиям, а также, если мы хотим прогнозировать изменения свойств активной среды при контролируемом внешнем воздействии, в частности, при сжатии волокна.

Литература

1. *Paschotta R., et al, IEEE J. Quantum Electron. 33(7), 1049 (1997)*
2. *Digonnet M.J.F., SPIE Fiber Laser Sources and Amplifiers 1171, 8 (1989)*
3. *Giles C.R., et al, J. Lightwave Technol. 9(2), 271 (1991)*
4. *Иванов В.В., Перенос излучения и спектры небесных тел., М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1969, 472*
5. *Микаэлян А.Л. и др., Оптические генераторы на твердом теле., М.: Советское радио, 1967, 384*
6. *Кутателадзе С.С., Основы теории теплообмена. 5-е издание, М.: Атомиздат, 1979, 416*
7. *Zenteno L., J. Lightwave Technol. 11(9), 1435 (1993)*
8. *Brown D.C., et al, IEEE J. Quantum Electron. 37(2), 207 (2001)*

РАЗРАБОТКА ТИПОВОГО ЛАЗЕРНОГО КАНАЛА ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОГЕРЕНТНОГО СЛОЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Бочков А.В., Слобожанин А.Н.*, Слобожанина М.Г.

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Технической Физики имени академика Е.И. Забабахина»
** E-mail:* dep5@vniitf.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16211

Увеличение мощности без ухудшения пространственного качества лазерного излучения волоконных лазеров возможно несколькими путями: увеличение размера одномодовой активной сердцевины волокна (одноканальное исполнение) и когерентное или спектральное сложение излучения одномодовых узкополосных лазеров (многоканальное исполнение). Первый путь имеет технические ограничения, а для реализации когерентного сложения необходимо получение генерации с шириной спектральной линии (0,5÷1,5) ГГц. Данная работа направлена на разработку типового канала для лазерной системы с использованием когерентного сложения лазерного излучения.

В работе [1] был продемонстрирован лазер с вводом излучения накачки в направлении распространения сигнала, выходная мощность такого лазера составила ~150 Вт. Дальнейшее увеличение выходной мощности излучения приводило к быстрому искажению (зашумлению) спектральной линии. В представленной работе теоретически и экспериментально продемонстрировано, что изготовление лазера с вводом излучения накачки в направлении противоположном сигнальному излучению, приводит к подавлению шумов на частотах отличных от сигнальной, возникающих за счет усиления спонтанного излучения. Таким образом, сменой направления ввода излучения накачки становится возможным повысить уровень мощности выходного излучения без искажения спектральной линии.

Еще одним паразитным явлением в таких системах является вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ). В сочетании с пассивным повышением порога ВРМБ, за счет постепенного увеличения диаметра активной сердцевины, применялся и активный – пространственное разделение акустической моды и моды лазерного излучения [2,3], что достигалось двумя способами: создание механического напряжения в волокне усилительного канала и реализация градиента температуры в активном волокне.

Таким образом, создан типовой лазерный канал с шириной спектральной линии ~ 800 МГц и выходной мощностью ~400 Вт (длина волны сигнального излучения $\lambda = 1081{,}1 \pm 0{,}1$ нм).

Литература

1. *Bochkov A.V., et al, Proc. ICLO 2018 8435845,.42 (2018)*
2. *Shi J., et al, Appl. Phys. B 108, 717-720 (2012)*
3. *Rowell N.L., Appl. Phys. Lett. 34(2), 139-141 (1979)*

ИЗМЕРЕНИЕ ДИСПЕРСИИ И МОЩНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНЫХ ЭРБИЕВЫХ СВЕТОВОДОВ

Мишевский М.С.[1,2], Жданов И.С.[1,2], Харенко Д.С.[1,2,*]

[1] *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*
[2] *Новосибирский Государственный Университет, г. Новосибирск*
[*] *E-mail:* kharenko@iae.nsk.su

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16212

На сегодняшний день широкое распространение получили волоконные источники фемтосекундных импульсов. Создание такого лазера представляет собой нетривиальную задачу, где важно понимание свойств каждого используемого компонента. При конструировании и моделировании фемтосекундных волоконных лазеров критически важным является знание о дисперсии и мощностных характеристиках активного световода, и, как следствие, возникает необходимость их измерения. Сложность заключается в том, что далеко не все методы измерения подходят для характеризации каждого конкретного класса волокон. Так стандартный метод определения величины дисперсии при помощи измерения времени задержки распространения импульсов на разных длинах волн неприменим из-за малой длины активного световода, а использование метода, основанного на спектральной интерферометрии белого света [1] осложнено высокими потерями в эрбии на рабочей длине волны. Таким образом, задача данной работы состояла в экспериментальном измерении таких параметров как: величина насыщаемых и не насыщаемых потерь, мощностей насыщения на длинах волн накачки и сигнала и дисперсии.

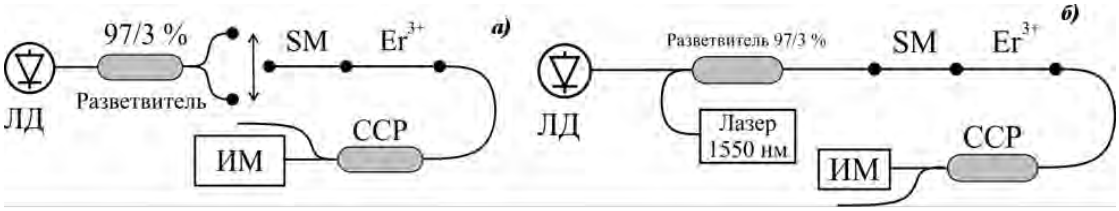


Рис. 3 Схема проведения экспериментов по измерению потерь (а) и коэффициента усиления (б)

Измерения мощностных характеристик производились на основании квазидвухуровневой модели, применимой к эрбиевому световоду в случае накачки на длине волны 1480 нм [2] с учетом ненасыщаемых потерь [3]. В первом эксперименте (рис. 1а) производилось измерение зависимости $P_{out}(P_{in})$. Согласно приближениям из [4] значимыми являются два предельных случая: $P>>P_s$ (насыщенные потери) и $P<<P_s$ (ненасыщенные потери). Для получения малых мощностей, использовался 3% выход волоконного разветвителя. Полученная кривая аппроксимируется методом наименьших квадратов, откуда извлекаются величины ненасыщающихся потерь (α_p*) и насыщающихся потерь (α_p), а также мощности насыщения P_s. После чего из второго эксперимента (рис. 1б) определялся коэффициент усиления по малому сигналу в пределе неистощаемой накачки.

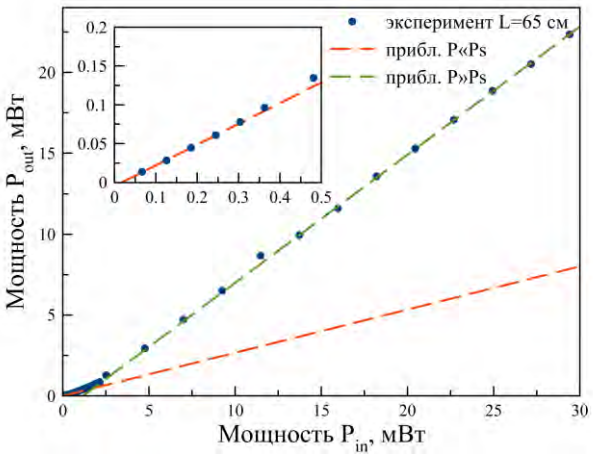


Рис. 2 Результаты измерения и поглощения по накачке и аппроксимация полученных данных

Отдельным вопросом является измерение дисперсии активных световодов, для которых не могут быть применены стандартные методы, основанные на интерферометрии белого света [1]. В данной работе был применен метод, основанный на изменении положения пиков Келли [5] в режиме генерации солитонов при изменении суммарной дисперсии резонатора. Метод работает как для активных, так и для пассивных волокон. В результате были измерены дисперсии образцов некоторых активных волокон: Er110 (Liekki) и AE 31 (производство ПНППК), а также пассивного световода Metrocor (Corning).

В результате была реализована схема измерения мощностных характеристик и дисперсии активных световодов, позволяющая получить все необходимые параметра волокна. Полученные результаты могут быть использованы при численном моделировании как фемтосекундных лазеров, так и усилителей.

Авторы работы выражают благодарность ПАО «ПНППК» за предоставленные образцы активных волокон. Работа выполнена при финансовой поддержке темы госзадания ИАиЭ СО РАН (рег. № АААА-А17-117062110026-3).

Литература

1. *Lee J. Y. and Kim D. Y., Opt. Express 14, 11608-11615 (2006)*
2. *Rodica M. M.: дис. – Ph. D. dissertation, Worcester Polytechnic, Institute, Worcester, MA, USA, (2006)*
3. *Barnard C. et al, IEEE J. Quantum Electron. 30, 1817-1830 (1994)*
4. *Никулин М. А.: дис. – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, (2010)*
5. *Dennis M.L. et al, IEEE J. Quantum. Electron. 30, 1469-1477 (1994)*

ЭРБИЕВЫЕ СВЕТОВОДЫ С НАКАЧКОЙ ПО ОБОЛОЧКЕ С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА, ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО ФТОРОМ

Худяков М.М.[1], Яшков М.В.[2], Липатов Д.С.[2], Вечканов Н.Н.[2], Абрамов А.Н.[2], Гурьянов А.Н.[2], Лихачев М.Е.[1]*

[1] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[2] Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девятых РАН, г. Нижний Новгород
** E-mail:* likhachev@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16213

Эрбиевые (не содержащие иттербий) световоды с накачкой по оболочке являются наиболее перспективным инструментом для усиления импульсного излучения до высокой пиковой мощности. Использование усилителей на основе таких световодов позволило нам ранее продемонстрировать рекордно высокую энергии в импульсе и пиковую мощность для спектрального диапазона 1.55 мкм [1, 2]. Основной проблемой при использовании эрбиевых световодов, не содержащих иттербий, является низкая скорость поглощения излучения накачки из оболочки и рост влияния кластеризации при увеличении длины световодов. Для решения этой проблемы при конструировании необходимо обеспечить максимально возможное отношение диаметра сердцевины к оболочке. Так в работах [1, 2] диаметр одномодовой сердцевины был увеличен до 35 мкм, а диаметр первой отражающей оболочки равнялся 125 мкм (минимальный диаметр совместимый с коммерчески доступными объединителями накачки и сигнала). Использование алюмофосфоросиликатного стекла (АФС) [3] позволило нам обеспечить приемлемую эффективность преобразования накачки в сигнал даже при высокой концентрации ионов эрбия. Одномодовый режим распространения, высокая эффективность преобразования накачки в сигнал (около 25%) и относительно небольшая длина световода (около 6 м) при усилении сигнала в области 1575 нм были достигнуты благодаря проведенной оптимизации геометрии световода и состава сердцевины [1].

Стоит отметить, что дальнейшее увеличение эффективности преобразования накачки в сигнал в эрбиевых световодах можно достичь, используя алюмосиликатную матрицу с высоким содержанием оксида алюминия (более 3 мол.%) [3, 4]. В то же время использованию такого стекла для создания одномодовых эрбиевых световодов с накачкой по оболочке мешает высокая рефрактивность оксида алюминия. Так разность показателей преломления сердцевины, легированной 3 мол.% Al_2O_3 и оболочки из нелегированного кварцевого стекла превышает 0.007, что приводит к существенно многомодовому режиму распространения излучения при диаметре сердцевины 35 мкм. Недавно нами была разработана технология высокого фторирования алюмосиликатного стекла, что позволяет уменьшить показатель преломления сердцевины, легированной 3 мол.% Al_2O_3 вплоть до уровня кварцевого стекла [5]. Целью настоящей работы являлось создание одномодовых эрбиевых световодов с накачкой по оболочке на основе фторалюмосиликатной матрицы с высоким уровнем фторирования для исследования возможности увеличения эффективности преобразования накачки в сигнал по сравнению с созданными ранее световодами на основе АФС матрицы [1].

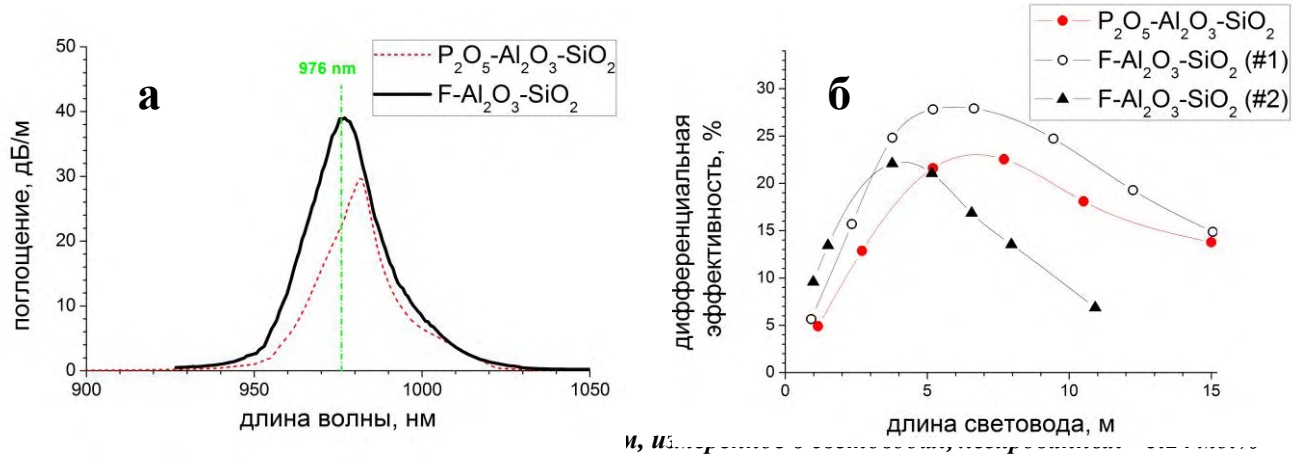
В рамках настоящего исследования методом модифицированного осаждения из газовой фазы (MCVD) была создана серия заготовок с сердцевиной, легированной ~3 мол.% Al_2O_3 и ~1.4 вес.% фтора и различным содержанием эрбия в сердцевине. Разность показателей преломления сердцевины и оболочки выбиралась такой, чтобы обеспечить близкий к одномодовому режим работы световода при диаметре сердцевины около 35 мкм (дополнительно вокруг сердцевины создавался слой с пониженным показателем преломления для уменьшения длины волны отсечки и снижения чувствительности к изгибам). Внешняя поверхность заготовок была сполирована до формы квадрата для того, что бы обеспечить максимальное перемешивание накачки, распространяющейся в оболочке световода. Из заготовок были вытянуты световоды с диаметром сердцевины около 35 мкм и средним диаметром оболочки около 125 мкм. Характеристики созданных световодов сравнивались с характеристиками световода на основе АФС матрицы легированной ~0.14 мол.% Er_2O_3, (соответствует поглощению из оболочки ~ 3 дБ/м на длине волны 981 нм) [1].

Интересно отметит (см. рис.1), что дополнительным преимуществом использования алюмосиликатной матрицы оказалось то, что полоса поглощения ионов эрбия в области 980 нм имеет приблизительно в 1.3 раза большую интенсивность по сравнению с АФС световодами при условии одинакового содержания эрбия в сердцевине (интенсивность полосы поглощения в области 1530 нм была равна в обоих случаях 100 дБ/м). Более того максимум полосы расположен на длине волны

976 нм (в отличие от АФС световодов, имеющих максимум поглощения на длине волны 981 нм), что обеспечивает наиболее оптимальные условия при использовании стандартных диодов накачки со стабилизацией длины волны (стандартная длина волны при стабилизации – 976 нм).

Для сравнения с АФС световодом было изготовлено два световода с сердцевиной на основе алюмосиликатной матрицы с высоким уровнем легирования фтором: световод #1 имел максимальное поглощение из оболочки (на длине волны 976 нм) около 3 дБ/м, что совпадало с этой величиной в АФС световоде, выбранном для сравнения; световод #2 имел более высокую концентрацию эрбия в сердцевине приблизительно равную концентрации в АФС световоде, при этом поглощение на длине волны 976 нм составляло около 3.8 дБ/м. Все световоды сравнивались в схеме усилителя с сонаправленной накачкой по оболочке. В качестве источников накачки использовались многомодовые полупроводниковые диоды стабилизированные по длине волны (976 нм). Мощность входного сигнала (длина волны 1590 нм) равнялась 0.5 В. В процессе измерения брались разные длины каждого световода, для каждой длины измерялась зависимость выходного сигнала от мощности накачки и определялась дифференциальная эффективность преобразования накачки в сигнал. Полученные зависимости эффективности от длины показаны на Рис.1б. Как можно видеть световод #1 обладал заметно большей эффективностью преобразования накачки в сигнал по сравнению с АФС световодом. В случае световода #2, дифференциальная эффективность оказалась практически такой же как в АФС световоде, но зато оптимальная длина (соответствующая максимальной эффективности) оказалась заметно короче, что крайне важно при усилении импульсов до высокой пиковой мощности.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 17-13-01343.



и, и… Er₂O₃; б – зависимость дифференциальной эффективности от длины измеренная для световодов разного состава

Литература

1. *Kotov L., et al, Opt. Lett. 40, 1189 (2015)*
2. *Kotov L.V., et al, Laser Physics Letters, 11(9), 095102 (2014)*
3. *Likhachev M.E., Opt. Lett. 34, 3355 (2009)*
4. *Kotov L.V., et. al., Journal of Lightwave Technology, 35(20), 4540-4546 (2017)*
5. *Yashkov M.V., Quantum Electronics, 47(12), 1099 (2017)*

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СВЕТОВОДОВ ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА НА ИХ ПРОЧНОСТЬ

Ероньян М.А.[1], Мешковский И.К.[2], Реуцкий А.А.[1], Парфенов П.С.[2*], Перевислов С.Н.[3]

[1] АО "Концерн «Центральный научно- исследовательский институт "Электроприбор", г.Санкт-Петербург
[2] Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург
[3] Санкт-Петербургский государственный технологический институт, г.Санкт-Петербург
[*] e-mail: grspeter@gmail.com

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16214

Прочность кварцевых волоконных световодов (КВС) имеет статистический характер, обусловленный, скорее всего, спецификой распределения микронеоднородностей химической природы в поверхностном слое волокна [1]. Уменьшение площади его поверхности за счет снижения диаметра световода до 120 нм существенно снижает вероятность присутствия микронеоднородностей, что приближает прочностные свойства волокна к теоретическому пределу прочности кварцевого стекла [2]. На прочностные свойства КВС могут влиять и другие малоизученные факторы такие как: снижение вязкости поверхностного слоя заготовки, легированного "водой" [3] или B_2O_3 [4].

Цель работы заключалась в исследовании влияния вязкости поверхностного слоя заготовки на прочность КВС и на рельеф его поверхности.

Заготовки германосиликатных многомодовых КВС изготавливали методом MCVD с пламенным нагревом опорных кварцевых труб из кварцевого стекла марки F-300, обладающего высоким уровнем однородности и прочности. Содержание ОН групп в таком стекле не превышало 10^{-5} мас. %. Наружный диаметр полученной заготовки длиной 800 мм ≈ 12 мм. Методом наружного парофазного осаждения на половину заготовки наносили пористый слой из SiO_2 с 4 мол. % B_2O_3 и спекали его при нагреве газовой горелкой. Толщина этого низковязкого слоя, измеренного на рефрактометре Р-101, составляла 0,5 мм.

Из двух частей заготовки изготовили два вида образцов световодов. КВС 2 отличался от КВС 1 наличием боросиликатного поверхностного слоя. Волокна диаметром 125 мкм вытягивали со скоростью 60 м/мин с одновременным нанесением двухслойного УФ отверждаемого эпоксиакрилатного покрытия толщиной 60 мкм. Заготовку нагревали в печи с графитовым нагревателем, продуваемым аргоном высокой чистоты, содержащим не более 10^{-4} об. % паров воды.

Метровые отрезки КВС, предназначенные для исследования состояния поверхности, снимали с установки вытягивания до их вхождения в кювету с полимером, исключая касание с окружающими предметами зоны их исследования на микроскопе.

Прочность КВС измеряли методом двухточечного изгиба на 30 образцах. Для исследования поверхности КВС использовали оптический и электронный микроскопы. Особо тонкую структуру поверхности исследовали на атомном силовом микроскопе (АСМ) Solver PRO-M в контактном режиме, используя зонд NSG01 с радиусом закругления острия 10 нм, что обеспечивало пространственное разрешение по горизонтали не хуже 20 нм, а по вертикали менее 0,1 нм.

С понижением температуры вытягивания КВС 1 с 2100 до 1900ºС их прочность снижалась с 5,8 до 5,5 ГПа. Дальнейшее понижение температуры вытягивания приводило к увеличению натяжения волокна до 5 Н и к его разрыву. Фотография на оптическом микроскопе разорванных таким образом КВС 1 выявила спиралеобразную трещину на их поверхности (рис. 1).

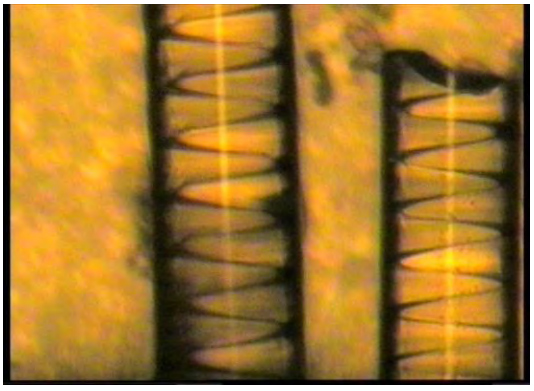


Рис. 1. КВС 1, разорванные при усилии вытягивания 5Н

Образцы КВС 1 на АСМ демонстрируют почти везде наклонные «насечки» (рис. 2) глубиной около 3 нм и периодом чуть менее 1 мкм.

Такой пологий характер рельефа вряд ли может привести к концентрации напряженного состояния до критического уровня в заглубленных на 3 нм местах периодической структуры. Типичная для световодов прочность 6 ГПа обусловлена острыми трещинами глубиной 6 нм [1].

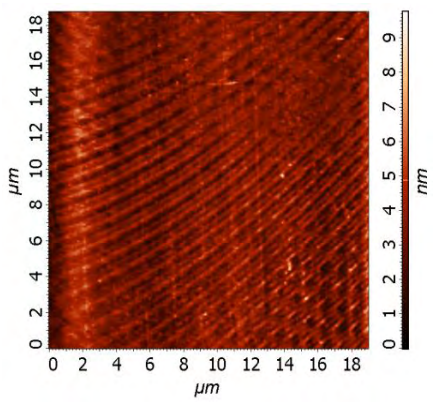


Рис. 2. Рельеф поверхности КВС 1

Наличие низковязкой боросиликатной оболочки у КВС 2 изменило характер зависимости его прочности от температуры вытягивания. Среднеарифметическое ее значение из 30 измерений выросло с 6,66 до 7,16 ГПа при снижении температуры вытягивания с 2200 до 1950 °С. Усилие вытягивания волокна при этом увеличивалось с 0,25 до 2,8 Н. В отличие от не защищенного боросиликатной оболочкой КВС 1, увеличение усилия вытягивания КВС 2 до 5 Н не привело к его разрыву.

На снимках АСМ поверхности КВС 2 не наблюдается свойственная для КВС 1 периодическая структура.

Принципиально разное поведение КВС 1 и КВС 2 при вытягивании можно объяснить следующим образом.

Поверхность заготовки КВС 1 после высокотемпературной пламенной операции сжатия на оборудовании MCVD насыщена ОН группами, наличие которых существенно снижает вязкость кварцевого стекла. При вытягивании волокна нагрев заготовки в графитовой печи приводит к удалению с ее поверхности ОН групп в поток сухого аргона. Поэтому образуется тонкий слой стекла с повышенной вязкостью, что может приводить к возникновению в нем трещин.

При вытягивании КВС 2 поверхностный слой из боросиликатного стекла, обладая пониженной вязкостью по сравнению с кварцевым стеклом заготовки, подвержен пластической деформации. Все усилие вытягивания волокна до полного его остывания воспринимается оболочкой из чистого кварцевого стекла. После остывания и снятия растягивающей нагрузки центральная часть волокна сжимается, создавая при этом напряжения сжатия в наружном боросиликатном слое. При допущении равенства модулей упругости всех слоев КВС можно приближенно оценить величину сжимающих напряжений в поверхностном боросиликатном слое $\sigma_{сж}$ [4].

$$\sigma_{сж} = F/S$$

где, F –усилие вытягивания, S площадь поперечного сечения КВС.

Такая приближенная оценка дает величину сжимающих напряжений 0,23 ГПа при усилии вытягивания 2,8 Н.

Таким образом, модификация поверхности заготовки КВС боросиликатным слоем благотворно влияет как на рельеф их поверхности, так и на прочность, открывая новые технологические возможности для изготовления световодов, приобретающих особые свойства при низкотемпературном вытягивании кварцевого волокна.

Литература

1. *Eronyan M.A., et al, Glass Phys. and Chem. 32, 623–628 (2006)*
2. *Brambilla G. and Payne D.N., Nano Letters 9, 831–835 (2009)*
3. *Lezzi P.J., et al, J. Non-Cryst. Solids 379, 95–108 (2013)*
4. *Rongved L., Kurjian C.R., Geyling F.T. J. Non-Cryst. Solids 42, 579-584(1980)*

ГЕНЕРАЦИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИДЕНТИЧНЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ФАЗОЙ НЕСУЩЕЙ ОТНОСИТЕЛЬНО ОГИБАЮЩЕЙ

Дмитриев А.К.[1, 2*], Головин Н.Н.[1], Горохов Е.А.[1], Бычев Ю.П.[1, 3], Нюшков Б.Н.[1, 2, 4], Толстиков А. С.[1, 3], Гусар Д.Ф.[3]

[1] Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск
[2] Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск
[3] Сибирский государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии, г. Новосибирск
[4] Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск
[*] E-mail: alexander_dmitriev@ngs.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16215

Поскольку при коротких импульсах, когда длительность импульса одного порядка с длиной волны, сдвиг фазы между огибающей и несущей существенно влияет на эффективность преобразования частоты в нелинейных оптических процессах, что чрезвычайно важно для получения аттосекундных импульсов [1-3]. Кроме того, отсутствие сдвига гребенки фемтосекундного лазера упрощает процесс измерения частот, поскольку при этом необходимо определять только частоту повторения импульсов. В работах [4, 5] описывались системы стабилизации сдвига фазы несущей относительно огибающей (carrier-envelope phase, CEP).

Ранее нами были теоретически описаны условия получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с помощью модулятора интенсивности [6]. Необходимо соблюдение двух условий:

$$\Phi k = 2\pi q \text{ и } k/q = f/\Delta.$$

Здесь Φ – разность фаз между огибающей и несущей между $(i+k)$-ым и i-ым импульсами, f – частота повторения импульсов лазерного излучения, Δ – частота сдвига частотной гребенки, k и q – целые числа.

Таким образом, при выделении из излучения фемтосекундного лазера каждого k-ого импульса при соблюдении вышеуказанных условий получается периодическая последовательность идентичных импульсов на частоте повторения $F=f/k$.

Функциональная схема формирователя излучения без сдвига частотной гребенки представлена рис. 1. Принцип работы схемы подробно описан также в [6].

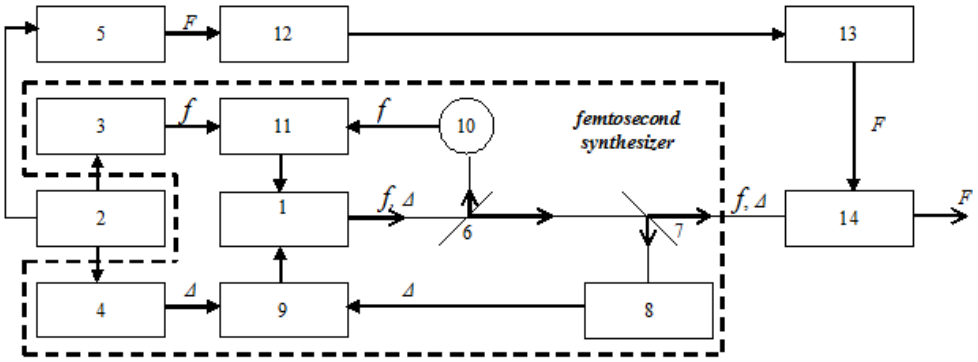


Рис. 1. Функциональная схема формирователя излучения с управляемой CEP: 1 - фемтосекундный лазер; 2 - стандарт частоты; 3 - синтезатор опорной частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера f; 4 - синтезатор опорной частоты сдвига гребенки Δ; 5 - синтезатор опорной частоты повторения синтезированной последовательности импульсов F; 6, 7 - делительные зеркала; 8 - f-2f интерферометр; 9 - блок фазовой привязки сдвига частотной гребенки излучения фемтосекундного лазера; 10 - фотодетектор; 11 - блок фазовой привязки частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера; 12 - фазовращатель; 13 - формирователь импульсов и 14 - модулятор интенсивности

Эксперименты проводились на модифицированном волоконном фемтосекундном лазере MenloSystems FC1500-250WG с частотой следования импульсов f = 250 МГц и частотой смещения Δ=50 МГц. Частота следования импульсов была привязана к частоте 10 МГц прецизионного

генератора Stanford SG384 с внутренним стандартом частоты. Этот генератор также задавал смещение гребенки Δ. и частоту повторения импульсов F синтезированной последовательности импульсов. Синтезатор эталонной частоты повторения синтезированной последовательности импульсов и фазовращатель были объединены в цифровом генераторе сигналов, который также был привязан к стандарту частоты. Сигнал на частоте F поступил на генератор импульсов, управляющий модулятором интенсивности, на выходе которого была синтезирована последовательность идентичных фемтосекундных импульсов с частотой повторения F. Фазовращатель позволил выделить последовательность импульсов с заранее определенной разностью фаз между несущей и огибающей. В нашем эксперименте $k=f/F = 5$, что позволило нам синтезировать пять разных последовательностей с CEP, отличающимися друг от друга на 72 градуса. На рисунке 2 показаны эти последовательности, записанные на цифровом осциллографе с частотой 1 ГГц. Разрешение было ограничено полосой пропускания фотоприемника.

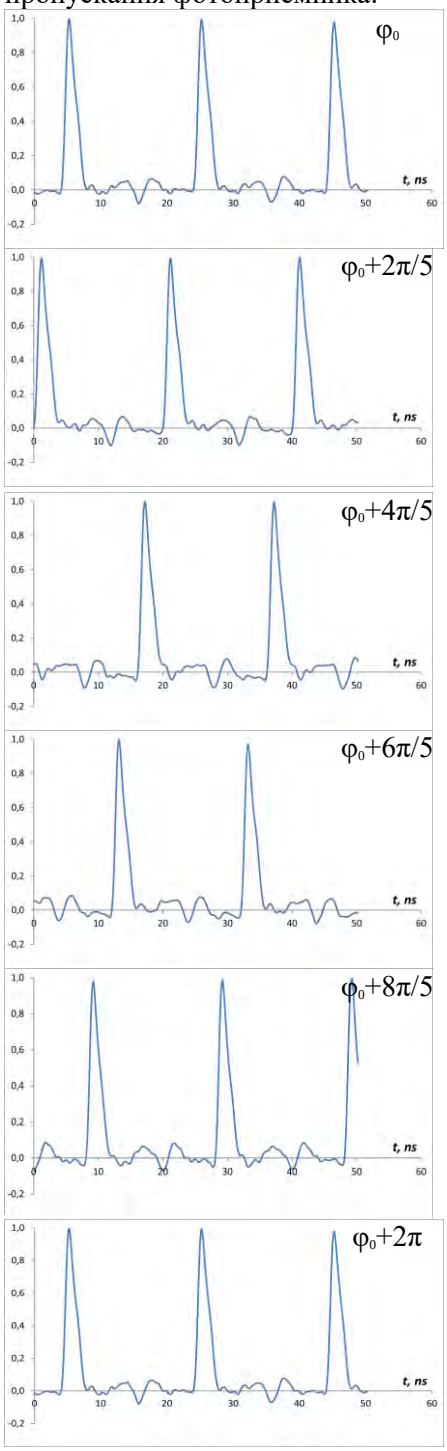


Рис. 2. Синтезированные последовательности фемтосекундных импульсов

Модулятор выделяет каждый пятый импульс из исходной последовательности фемтосекундных импульсов. Наличие низкоамплитудных (не более 10% от амплитуды основных импульсов) «промежуточных» импульсов объясняется видом временной характеристики формирователя импульсов, управляющего модулятором, и частотной характеристикой фотоприемника.

Таким образом, в данной работе продемонстрирована возможность получения последовательности идентичных импульсов фемтосекундного лазера с управляемой разностью фаз между огибающей и несущей. Из всех возможных последовательностей импульсов сдвиг фазы несущей относительно огибающей φ можно было устанавливать с дискретностью $2\pi/5$. Дискретность установки фазы несущей относительно огибающей можно уменьшить за счет увеличения k.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ в рамках базовой части государственного задания №3.6835.2017/8.9 и гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-02-00316.

Литература

1. *Bohan A.D., et al, Sc. Phys. Rev.Lett. 81, p.1837 (1998)*
2. *Ivanov M., et al, Phys. Rev. Lett. 74, p.2933 (1995)*
3. *Christov I.P., Murnane M.M., Kapteyn H.C., Phys. Rev. Lett. 78, 1251 (1997)*
4. *David J. Jones, et al, Science 288, p.635 (2000)*
5. *Andrius Baltu˘ska, et al, J. Lightwave Technology 9 p.972(2003)*
6. *Головин Н.Н. и др., Оптика и спектроскопия 127 449-452 (2019)*

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬДЛЯ ДИАПАЗОНА 1430-1490 НМ НА ОСНОВЕ СВЕТОВОДА, ЛЕГИРОВАННОГО ВИСМУТОМ

Двойрин В. В. [1,2], Пушкарев Д. В. [2,3]*, Мазаева И. В. [3], Мелькумов М. А. [4], Турицын С. К. [1,2]

[1] Физический Факультет, Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Россия
[2] Институт Фотонных Технологий университета Астон, университет Астон, Бирмингем, B4 7ET, Великобритания.
[3] Физический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия
[4] Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, 11933, Россия.
** E-mail: d-push@yandex.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16216

Увеличение пропускной способности существующих оптоволоконных систем связи является одной из ключевых задач развития современных телекоммуникаций. Расширение спектрального диапазона их работы, ограниченного шириной полосы пропускания наиболее распространенных эрбиевых волоконных усилителей, работающих в области 1.55 мкм – т.н. C- и L- телекоммуникационных диапазонах, актуально для решения этой задачи. Широкие полосы оптического усиления новых, легированных висмутом, световодов позволяют разрабатывать волоконные лазеры и широкополосные усилители, работающие в O-, E- и S- диапазонах [1-8].

В данной работе сообщается о создании прототипа многоканального усилителя для систем Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM), или грубого спектрального уплотнения, с использованием активного световода, легированного висмутом, способного усиливать каналы излучения, принадлежащего E- и S-телекоммуникационным диапазонам. За исключением активного световода, применялись только коммерчески доступные оптические компоненты, предназначенные для использования в волоконных линиях связи.

В многоканальном усилителе использовался активный световод длиной 260 м с диаметром сердцевины и апертурой, соответствовавшими параметрам широко используемого для передачи информации в волоконных линиях связи световода SMF-28 (Corning Glass Inc.), концентрация атомов висмута не превосходила 0,02% [2]. Схема эксперимента представлена на Рис. 1. В качестве входных сигналов выступало непрерывное излучение лазерных диодов с рабочими длинами волн 1430, 1450, 1470 и 1490 нм и выходной мощностью 2,3, 2,2, 2,1 и 2,4 мВт, соответственно. После мультиплексирования сигналы объединялись с оптической накачкой, источником которой служил лазерный диод с рабочей длиной волны 1310 нм и выходной оптической мощностью до 300 мВт, и поступали в активный световод. Для изоляции каскада усиления использовались волоконно-оптические изоляторы. После усиления в активном световоде сигналы разделялись с остаточным излучением накачки, демультиплексировались и измерялись калиброванными полупроводниковыми детекторами излучения, позволяющими определять оптическую мощность. Суммарные оптические потери в компонентах усилителя (за исключением активного световода) составляли около 3 дБ и не учитывались при вычислении коэффициента усиления (КУ). КУ в спектральном канале усилителя определялся как отношение мощностей выходного и входного сигналов. Для определения шум-фактора усилителя регистрировались выходные спектры излучения.

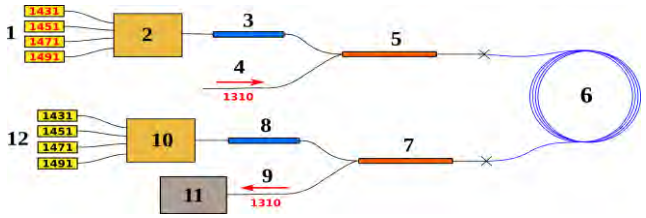
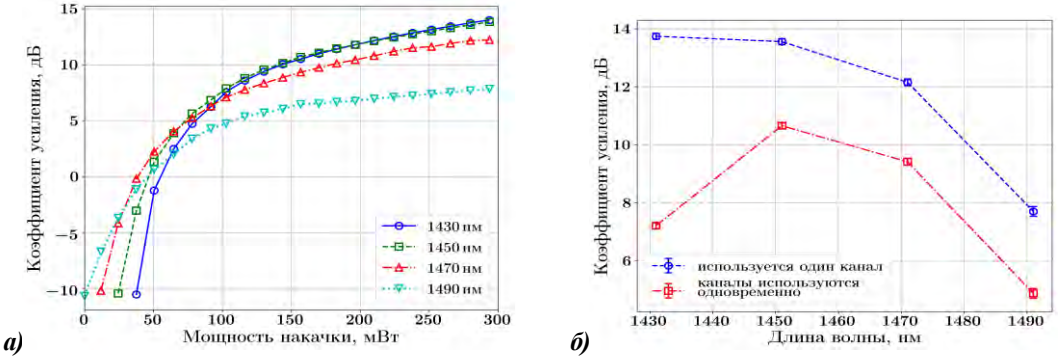


Рис. 1. Экспериментальная схема, состоящая из излучающих сигнал лазерных диодов (1), мультиплексоров (2 и 10), изоляторов (3 и 8), волоконно-оптических объединителей (5 и 7), активного световода (6), входа и выхода оптической накачки (4 и 9, соответственно), поглотителя остаточной накачки (11) и оптических детекторов (12)

На Рис. 2 (а) представлен характерный вид зависимости КУ в спектральных каналах усилителя от мощности накачки. При работе только одного канала максимальный КУ достигал 14 дБ (выходная оптическая мощность 54 мВт) на длине волны 1430 нм, монотонно уменьшаясь в более длинноволновой области до величины 7.8 дБ на длине волны 1490 нм. При одновременной работе всех каналов КУ в каждом канале уменьшался по сравнению с одноканальным режимом работы, причем максимальный КУ достигался на длине волны 1450 нм и составлял 10,7 дБ, Рис. 2 (б). Суммарная выходная мощность каналов составила 63 мВт. Эффекты уменьшения КУ и спектрального сдвига максимального КУ при совместной работе каналов объяснялись выходом из режима усиления малого сигнала части активного световода, в результате чего сигнал заметно влиял на населенность возбужденного состояния активной среды. Суммарное увеличение мощности входного сигнала вело к уменьшению населенности возбужденного состояния и, соответственно, увеличению населенности ее основного состояния. Поскольку активная среда работает по частично трехуровневой схеме, то,

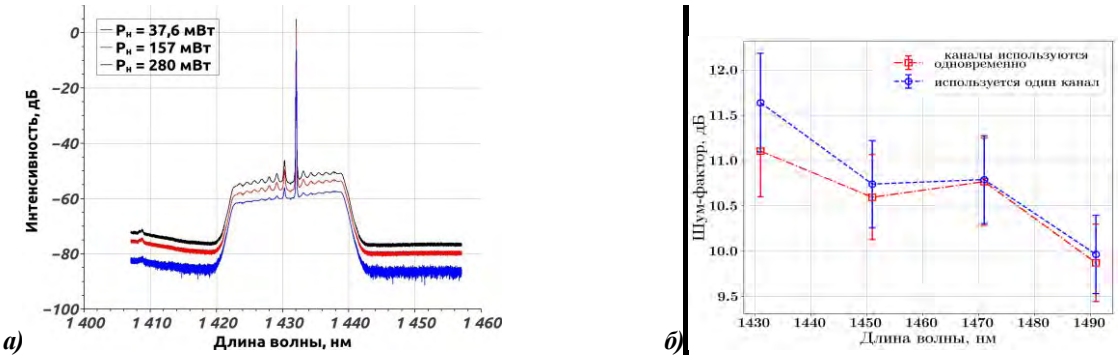
при увеличении суммарной мощности сигнала, на более короткой длине волны (1430 нм), где сечение поглощения из основного состояния больше, КУ становился меньше, чем на больших длинах волн (1450 и 1470 нм). Это позволяет предполагать увеличение КУ при использовании сигналов меньшей интенсивности либо при увеличении мощности накачки. Усиление малого сигнала в подобных активных световодах исследовалось ранее [5-8], в данной работе изучалось усиление при умеренной оптической накачке нескольких спектрально разнесенных сигналов, характерных по мощности для входных эрбиевых волоконных усилителей в линиях связи со спектральным уплотнением каналов.



а) *б)*

Рис. 2. Зависимость КУ от мощности накачки при работе усилителя в одноканальном режиме (а), и максимальные значения КУ в различных каналах усилителя для одноканального и многоканального режимов работы (б)

Характерные спектры выходного излучения усилителя представлены на Рис. 3 (а), отношение сигнал/шум для спектрального максимума сигнала составляло не менее 50 дБ. Шум-фактор усилителя приведен на Рис. 3(б). Его величина на данный момент заметно превышает характерные значения шум-фактора в телекоммуникационных эрбиевых волоконных усилителях, что может частично объясняться неполной инверсией населенностей активной среды [9]. Дальнейшая оптимизация схемы, включая параметры активного световода, должна привести к существенному улучшению характеристик усилителей такого типа.



а) *б)*

Рис. 3. Спектр выходного сигнала на длине волны 1430 нм (а), и шум-фактор усилителя (б)

В данной работе сообщается о первой, насколько известно авторам, реализации многоканального усилителя для CWDM-систем на основе легированного висмутом световода, одновременно усиливающего оптические сигналы в E- и S- телекоммуникационных диапазонах. Продемонстрированное усиление сигналов с входной мощностью около 2 мВт на спектральный канал (1430, 1450, 1470 и 1490 нм) с максимальным КУ > 10 дБ и суммарной выходной мощностью до 63 мВт, обуславливает перспективность разработок на основе подобных световодов многоканальных усилителей, которые позволят существенно расширить пропускную способность современных телекоммуникационных линий связи со спектральным уплотнением каналов.

Литература

1. *Mikhailov, V., et al, Optical Fiber Communication Conference (OFC), OSA Technical Digest, paper M1J.4 (2019)*
2. *Dvoyrin V. V., et al, In Conference on Lasers and Electro-Optics, p. STu1F.4. Optical Society of America (2016)*
3. *Firstov, S. V., et al, Scientific reports, 6, pp. 28939 (2016)*
4. *Thipparapu N. K., et al, Opt. Lett., 40(10), 2441–2444 (2015)*
5. *Dianov, E. M., et al, Optical Fiber Communication Conference (OFC), OSA Technical Digest, paper OMH1 (2011)*
6. *V.V. Dvoyrin, et. al, 18 th Intern. Laser Phys. Workshop (July 13-17, 2009, Barcelona, Spain), Book of abstracts, p.646 (2009)*
7. *Mashinsky, V.M., Dvoyrin, V.V., 2009 IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proc., Belek-Antalya, Turkey, pp 775-776 (2009)*
8. *Dvoyrin, V.V., et al, Quant. Electron., 39, p. 583 (2009)*
9. *А.С.Курков, О.Е.Наний, Lightwave russian edition, 1, 14-19 (2003)*

ОДНОЧАСТОТНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР НА СВЕТОВОДЕ, ИЗГОТОВЛЕННОМ МЕТОДОМ СПЕКАНИЯ ФОСФАТНОГО СТЕКЛА В ТРУБКЕ ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА

Егорова О.Н. [1*], **Рыбалтовский А.А.** [2], **Журавлев С.Г.** [2], **Васильев С.А.** [2], **Сверчков С.Е.** [1], **Галаган Б.И.** [1], **Денкер Б.И.** [1], **Семенов С.Л.** [2]

[1] *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва*
[2] *Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва*
* *E-mail: egorova@nsc.gpi.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16217

В работе продемонстрирована возможность создания одночастотного волоконного лазера на композитном волоконном световоде, полученном методом спекания фосфатного стекла в трубке из кварцевого стекла [1]. Несмотря на то, что в процессе вытяжки таких световодов происходит взаимная диффузия фосфатного и кварцевого стекол, концентрация оксида фосфора и активных редкоземельных ионов в сердцевине превышает концентрацию этих веществ в световодах, получаемых методом осаждения кварцевого стекла из газовой фазы. Благодаря высокой концентрации активных редкоземельных ионов композитные световоды перспективны для создания одночастотных волоконных лазеров.

Для использования в качестве активного элемента лазера разработан и изготовлен легированный ионами эрбия композитный световод, одномодовый в окрестности длины волны 1,55 мкм. Процесс изготовления световода подробно описан в работе [1]. Для изготовления сердцевины было использовано стекло, содержащее 65 мол % оксида фосфора, 7 мол % Al_2O_3, 12 мол % B_2O_3, 9 мол % Li_2O и 7 мол % RE_2O_3 [2]. Концентрация ионов эрбия в исходном стекле составила 1.0×10^{20} $см^{-3}$. Диаметр сердцевины изготовленного световода составил около 4,5 мкм, диаметр оболочки из кварцевого стекла - 125 мкм. Концентрация оксида фосфора в сердцевине световода составляла около 24 мол %.

Исследование распределения интенсивности на выходном торце световода при различных условиях возбуждения показало, что световод является одномодовым на длине волны в окрестности 1,55 мкм. Измеренное значение длины волны отсечки первой высшей моды составило 1,4 мкм. Величина поглощения на длине волны 980 нм в полученном световоде составила около 0,4 дБ/см, время жизни уровня ионов эрбия $^4I_{13/2}$ - 6,1 мс. Минимальное значение оптических потерь в области 1100-1300 нм составило 1 дБ/м.

Изготовленный световод являлся фоточувствительным под действием излучения на длине волны 193 нм [3]. Наличие фоточувствительности позволило сформировать лазерный резонатор целиком в сердцевине активного световода.

На рисунке 1 представлена схема исследуемого волоконного лазера. Резонатор лазера был образован одной широкополосной брэгговской решеткой HRFBG с коэффициентом отражения 99,9 % и шириной спектра отражения на уровне 3 дБ 0,5 нм и решеткой PRFBG с коэффициентом отражении 95,4 % и шириной спектра на уровне 3 дБ – 0,15 нм. Обе решетки были записаны непосредственно в композитном волоконном световоде, длина решетки HRFBG составила 3,6 мм, длина решетки PRFBG - 8 мм, а расстояние между решётками составляло примерно 9 мм. Таким образом, общая длина резонатора составляла около 21 мм. Согласно [4] данная конструкция резонатора соответствует расстоянию между продольными модами 0,073 нм или 5,96 ГГц. Активный световод с двух сторон был подварен к специально изготовленному световоду, легированному оксидом германия. Диаметры полей мод световода, легированного оксидом германия и активного световода практически совпадали и составляли на длине волны 1,55 мкм около 5 мкм. Оптические потери, измеренные в резонаторе лазера с подваренными с двух сторон отрезками легированного оксидом германия световода, на длине волны 1,31 мкм составили 21 %.

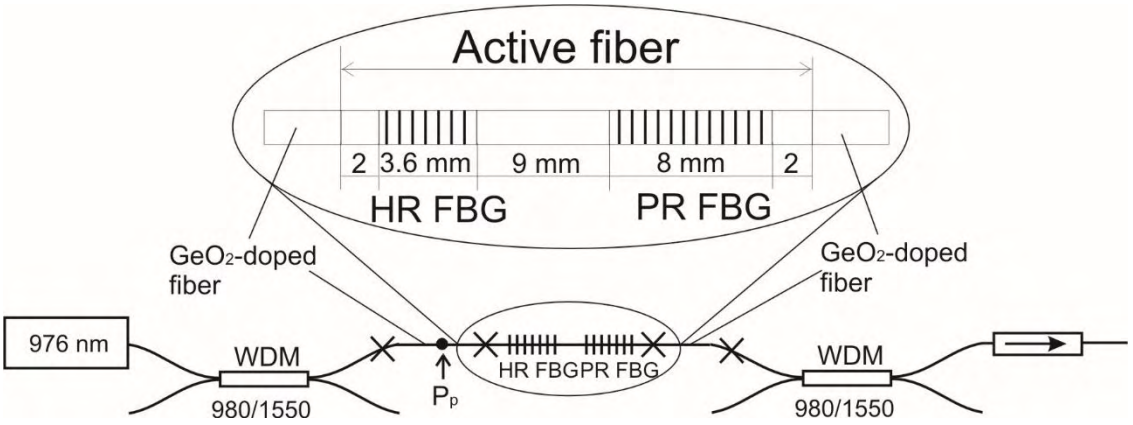


Рис. 1 Схема одночастотного волоконного лазера

Модовый состав полученного лазера изучался с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо с областью свободной дисперсии 750 МГц (FSR=750 MHz). Несмотря на то, что спектр выходной брэгговской решетки был больше расстояния между продольными модами резонатора, был получен одночастотный режим генерации. Одночастотный режим генерации удавалось получать за счет точной подстройки максимума отражения выходной решетки и одной из продольных мод резонатора с помощью регуляции температуры лазера, размещенного на элементе Пельтье [5, 6].

Лазер работал в устойчивом непрерывном режиме на длине волны в окрестности 1564,5 нм. Спектр излучения лазера, измеренный при мощности накачки около 200 мВт с разрешением 0,01 нм, приведён на рисунке 2а.

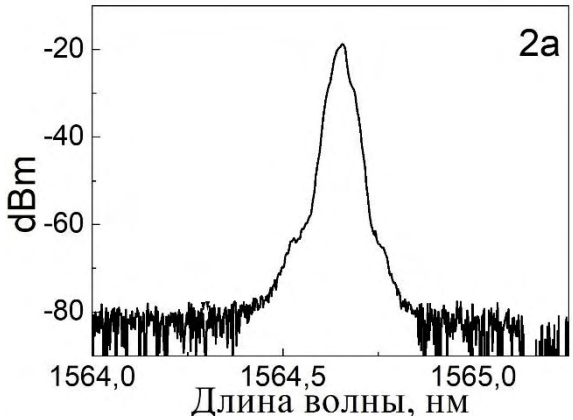
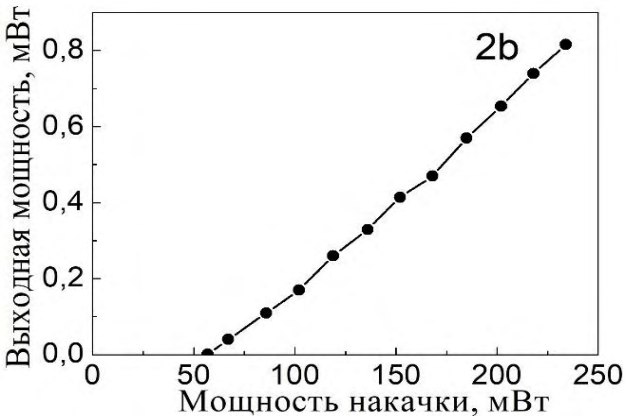


Рисунок 2. 2a - Спектр излучения лазера



2b - Зависимость выходной мощности лазера от введённой мощности накачки

На рисунке 2b представлена зависимость выходной мощности лазера от введенной мощности накачки. Введенная мощность накачки измерялась в точке, обозначенной на рисунке 1 точкой Pp. Наклон эффективности лазерной генерации составляет 0,5 %. Максимальная выходная мощность составила 0,8 мВт.

Небольшой наклон эффективности лазера можно объяснить, главным образом, малой длиной активной части резонатора и сравнительно невысокой, по сравнению со световодами, целиком состоящими из фосфатного стекла, концентрацией ионов эрбия. Повысить эффективность генерации возможно, очевидно, за счет увеличения концентрации ионов эрбия, а также использование совместного легирования световода эрбием и иттербием.

Литература

1. *Egorova O.N., et al, Optics Express 22, 7632 (2014)*
2. *Karlsson G., et al, Applied Physics B 75, 41-46, (2002)*
3. *Рыбалтовский А.А. и др., ВКВО'2019 (2019)*
4. *Barmenkov Y.O., et al, Optics Express 14, 6394-6399 (2006)*
5. *Qiu T., et al, Optics Letters 30, 2748 -2750 (2005)*
6. *Xu S., et al, Optics Letters 38, 501 -503 (2013)*

ПОЛЯРИЗОВАННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ВИСМУТОВЫХ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ В ГЕРМАНОСИЛИКАТНЫХ СТЕКЛАХ

Рюмкин К.Е.[1*], Фирстов С.В.[1], Хегай А.М.[1], Хопин В.Ф.[2], Мелькумов М.А.[1]

[1] Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
[2] Институт химии высокочистых веществ РАН, г. Нижний Новгород
[*] E-mail: riumkin@fo.gpi.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16218

В настоящее время большое внимание уделяется разработке широкополосных волоконных оптических усилителей и перестраиваемых лазеров для ближнего ИК диапазона. В этих целях перспективным является использование в качестве активного материала световодов, легированных висмутом, имеющих широкие полосы вынужденного излучения в ближней ИК области спектра. На данный момент на основе висмутовых активных световодов разработано большое количество лазерных устройств в спектральном диапазоне от 1150 до 1750 нм [1, 2]. При исследовании усилителей и суперлюминесцентных волоконных источников [3] было обнаружено, что степень поляризации выходного сигнала СВИ зависит от состояния поляризации сигнала накачки, а коэффициент усиления от взаимного расположения состояний поляризаций накачки и сигнала. Данные наблюдения свидетельствуют о том, что сечения поглощения и люминесценции висмутовых активных центров не изотропны и имеют различные значения в различных проекциях. Эффект поляризационно-зависимого усиления довольно хорошо изучен в световодах, легированных редкоземельными элементами [4]. Большое количество работ посвящено изучению поляризованной люминесценции [5] в объемных стеклах, легированных ионами Pr3+, Nd3+, Eu3+, Er3+, Tm3+ [6, 7]. В то же время в исследовании активных центров, формирующихся в стеклах и световодах, легированных висмутом, интерес к которым непрерывно возрастает, внимание вопросам анизотропии поглощения и излучения еще не уделялось.

Исследуемые образцы представляли собой заготовки лазерных висмутовых световодов, изотовленных по MCVD технологии. Оболочка состоит из чистого плавленного кварца, а сердцевина из германосиликатного стела, легированного ионами висмута. Диаметр заготовок составлял ~ 12 мм, диаметр сердцевины – 2 мм. Разница показателей преломления сердцевины и оболочки составляла величину $\Delta n = (8 \div 9) \times 10{-}3$. Концентрация Bi во всех образцах составляла менее 0,1 мас.%, поскольку эффективное усиление и лазерная генерация наблюдаются только в волоконных световодах с низкой концентрацией висмута. Центры возбуждались излучением с длиной волны 1260 нм, люминесценция регистрировалась в диапазоне 1300 – 1600 нм.

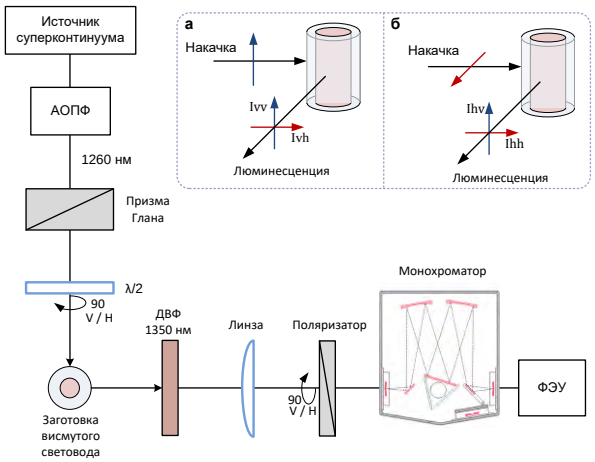


Рис. 1 Схема экспериментальной установки

Схема установки изображена на Рис. 1. В качестве возбуждающего излучения использовался источник суперконтинуума с акустооптическим перестраиваемым фильтром (АОПФ, Рис. 1), оставляющим полосу на 1260 нм шириной 5 нм, соответствующую полосе возбуждения висмутовых активных центров (ВАЦ) в германосиликатных стеклах. Для выделения линейной поляризации использовалась призма Глана. Поворот плоскости состояния поляризации накачки осуществлялся с

помощью ахроматической полуволновой пластины. Люминесценция образца собиралась плосковыпуклой линзой из кварцевого стекла. Для подавления сигнала рассеянной накачки между линзой и образцом был установлен фильтр, отрезающий излучение с длиной волны короче 1350 нм (ДВФ, Рис. 2). Контроль состояния поляризации люминесценции осуществлялся с помощью поляризатора. В схеме использовался монохроматор, работающий в диапазоне 500 - 1800 нм. Сигнал люминесценции детектировался фотоэлектронным умножителем. Полуволновая пластина выставлялась таким образом, чтобы плоскость поляризации возбуждающего излучения была направлена вертикально (Рис. 2, вставка а), люминесценция образца регистрировалась при поляризаторе выровненном относительно вертикали I_{VV} (первая буква обозначает плоскость поляризации излучения накачки, вторая – плоскость поляризации излучения люминесценции: V – вертикальная, H – горизонтальная), затем по горизонтали I_{VH}. Степень поляризации рассчитывается по следующей формуле:

$$P = (I_{VV} - G\, I_{VH}) / (I_{VV} + G\, I_{VH})$$

где I_{VV} – интенсивность люминесценции вертикальной поляризации при вертикально поляризованном возбуждении, I_{VH} – интенсивность люминесценции горизонтальной поляризации при вертикально поляризованном возбуждении. Поскольку некоторые компоненты схемы имеют различное пропускание для различных поляризаций излучения в формуле используется коэффициент поправки G. Этот коэффициент практически совпадает с экстинкцией решетки монохроматора, и численно составлял от 2,25 до 2,7 в диапазоне длин волн 1,35 - 1,45 мкм. Для тестирования собранной экспериментальной установки использовались образцы стекол, активированных ионами Er, с известной степенью поляризации люминесценции.

Типичные спектры поляризованной люминесценции различных образцов построенные с учетом аппаратной функции монохроматора представлены на Рис. 2.

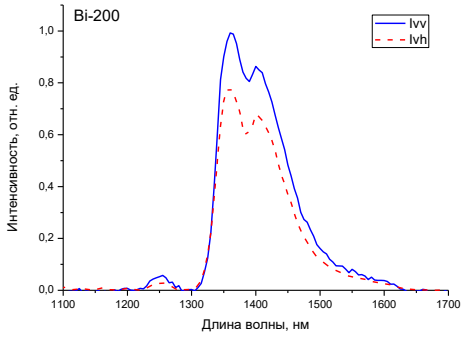


Рис. 2. Типичные спектры поляризованной люминесценции ВАЦ

Таблица 1. Степень поляризации люминесценции образцов

Образец	Поглощение ВАЦ на длине волны 1,4 мкм, дБ/м	Степень поляризации (1400 нм)
Bi-199	2,2	0,12
Bi-200	1,65	0,12
Bi-201	1,4	0,12
Bi-202	18	0,09
Bi-203	4	0,09

Измерения показали, что при возбуждении образцов линейно поляризованным светом полоса люминесценции в спектрах стекол приобретает частичную поляризацию. В таблице 1 сведены значения степени поляризации люминесценции образцов и поглощение ВАЦ в световодах, вытянутых из заготовок, на длине волны 1,4 мкм.

Исследована поляризованная люминесценция висмутовых активных центров в германосиликатных стеклах. Обнаружена частичная поляризация люминесценции вблизи 1.4 мкм при возбуждении линейно поляризованным излучением на 1.29 мкм. Степень поляризации достигает значения ~ 0.12. Увеличение концентрации висмутовых активных центров в исследованном диапазоне приводит к незначительному снижению степени поляризации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00927.

Литература

1. *I.A. Bufetov et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, 20, 111 (2014)*
2. *S. V. Firstov et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, 24, 1-15 (2018)*
3. *K.E. Riumkin et al., Opt. Lett. 37, 4817 (2012)*
4. *V.J. Mazurczyk et al., IEEE Photon. Technol. Lett., 6, 616 (1994)*
5. *П.П. Феофилов, Поляризованная люминесценция атомов, молекул и кристаллов. М.: ГИФМЛ (1959)*
6. *T. Kushida et al., J. Luminescence., 12, 723-727 (1976)*
7. *A.S. Rokhmin et al., Optical Materials, 41,136-138 (2015)*

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ДОСТИЖЕНИЯ ОДНОМОДОВОГО РЕЖИМА В ПОЛЫХ АНТИРЕЗОНАНСНЫХ СВЕТОВДАХ С БОЛЬШОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ МОДОВОЙ ПЛОЩАДЬЮ

Демидов В.В.[1,2*], Ананьев В.А.[1,2,3], Хохлов А.В.[1], Комаров А.В.[1], Тер-Нерсесянц Е.В.[1], Леонов С.О.[2], Карасик В.Е.[2]

[1] Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, г. Санкт-Петербург
[2] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва
[3] Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург
** E-mail:* demidov@goi.ru

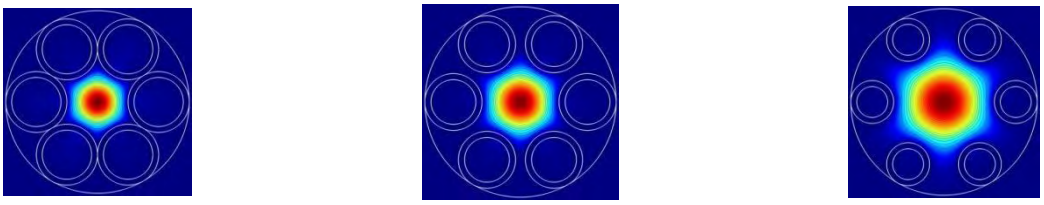
DOI 10.24411/2308-6920-2019-16219

На протяжении последнего десятилетия значительное внимание разработчиков в области волоконной оптики сосредоточено на создании микроструктурированных световодов с полой сердцевиной, принцип локализации излучения в которых основан на явлении антирезонансного отражения света [1-3]. Это обусловлено рядом преимуществ таких световодов относительно аналогов, сердцевина которых выполнена из стекла, в том числе возможностью передачи высокомощных ультракоротких лазерных импульсов, управления дисперсией и нелинейностью, функционирования в средней инфракрасной области спектра.

Способы достижения в рассматриваемых оптических элементах одномодового режима работы базируются обычно на тщательном подборе геометрических параметров сердцевины и капилляров оболочки, способствующих подавлению распространения излучения модами высшего порядка за счет их фазового согласования с интенсивно затухающими оболочечными модами [4, 5]. Настоящее исследование было направлено на изучение этого процесса в полых антирезонансных световодах с большой эффективной модовой площадью, функционирующих в ближней и средней инфракрасных областях спектра.

В качестве базового объекта для исследования использовался квазиодномодовый световод из кварцевого стекла с сердцевиной диаметром 46 мкм (эффективная площадь поля фундаментальной моды более 1000 мкм^2) и оболочкой на основе шести несоприкасающихся капилляров [6]. Толщина стенок капилляров составляла 2,8 мкм, что обеспечивало существование, по меньшей мере, четырех спектральных областей с максимальным пропусканием оптического сигнала – вблизи длин волн 1,3, 1,6, 2,15 и 3,25 мкм.

Оценка эффективности фазового согласования наиболее конкурентной первой высшей моды сердцевины и фундаментальной моды оболочки осуществлялась в программной среде COMSOL Multiphysics с применением метода конечных элементов. Для решения этой задачи были построены и численно проанализированы более двадцати кросс-секций полого антирезонансного световода с вариацией внешнего диаметра капилляров оболочки (d_{out}) без изменения толщины их стенок, а также внутреннего диаметра опорной оболочки. На Рис. 1 приведены изображения трех характерных кросс-секций и соответствующих им поперечных распределений электрического поля фундаментальной моды на длине волны λ = 1,3 мкм.



d_{out} = 29 мкм — d_{out} = 26 мкм — d_{out} = 20 мкм

а) б) в)

Рис. 1. Эволюция поперечного распределения электрического поля фундаментальной моды полого антирезонансного световода на длине волны λ = 1,3 мкм по мере увеличения диаметра сердцевины (D): D = 29 мкм (а), D = 35 мкм (б), D = 47 мкм (в)

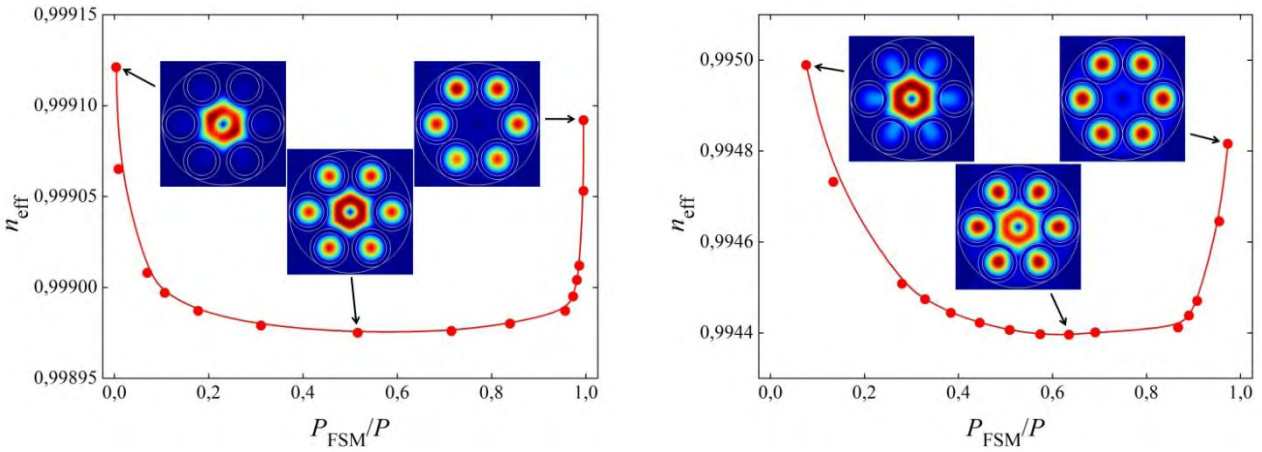
Рис. 1а иллюстрирует случай d_{out}/D = 1,0 (D – диаметр сердцевины), а Рис. 1в – d_{out}/D = 0,426, воспроизводящий кросс-секцию реально полученного световода [6]. Очевиден более интенсивный характер вытеснения электрического поля за пределы сердцевины по мере уменьшения d_{out}/D, что

находит отражение в монотонном увеличении эффективной площади поля фундаментальной моды. Как показывают ниже данные Таблицы 1, это обстоятельство справедливо и при смещении в область больших значений длины волны излучения. С другой стороны, оптический элемент с геометрической конфигурацией, обеспечивающей наибольшее значение эффективной модовой площади, может не отвечать условию распространения единственной фундаментальной моды.

Таблица 1. Геометрические параметры и вычисленные значения эффективной площади поля фундаментальной моды в полых антирезонансных световодах

№ п/п	d_{out}, мкм	D, мкм	Эффективная площадь поля фундаментальной моды, мкм^2			
			λ = 1,3 мкм	λ = 1,6 мкм	λ = 2,15 мкм	λ = 3,25 мкм
1	29	29	432,6	434,9	437,6	436,0
2	26	35	634,1	635,2	637,0	639,9
3	20	47	1134,0	1144,6	1150,5	1159,9

Эффективность фазового согласования (равенства волноводных показателей преломления) направляемой первой высшей моды сердцевины и ненаправляемой фундаментальной моды оболочки, оказывающего влияние на способность световода к достижению одномодового режима передачи излучения, проиллюстрирована на Рис. 2.



а) б)

Рис. 2. Характер изменения волноводного показателя преломления в паре «фундаментальная мода оболочки – первая высшая мода сердцевины» (n_{eff}) в зависимости от доли мощности фундаментальной моды оболочки (P_{FSM}/P) на длине волны λ = 1,3 мкм (а) и λ = 3,25 мкм (б) (P – суммарная мощность)

Как видно из кривых на Рис. 2, фазовое согласование модовых компонент происходит в том случае, если доля мощности фундаментальной моды оболочки составляет не менее 0,5 от суммарной в паре мод (d_{out} = 27,4 мкм и P_{FSM}/P = 0,516 для λ = 1,3 мкм, d_{out} = 27,6 мкм и P_{FSM}/P = 0,635 для λ = 3,25 мкм). С позиции выбора геометрических параметров световода этот критерий отвечает неравенству 0,82 < d_{out}/D < 0,88. Добавим, что условию фазового согласования мод в паре «фундаментальная мода оболочки – первая высшая мода сердцевины» соответствует наибольшее из вычисленных значений оптических потерь, а именно, 25 дБ/м на λ = 1,3 мкм и 35 дБ/м на λ = 3,25 мкм. Это эквивалентно затуханию мощности первой высшей моды более чем в 300 раз на участке световода длиной 1 м, что фактически способствует поддержанию режима передачи только фундаментальной моды сердцевины в отрезках длиной даже в несколько десятков сантиметров.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00596).

Литература

1. *Pryamikov A.D., et al, Optics Express 19, 1441-1448 (2011)*
2. *Kolyadin A.N., et al, Optics Express 21, 9514-9519 (2013)*
3. *Poletti F., Optics Express 22, 23807-23828 (2014)*
4. *Hartung A., et al, Optics Letters 40, 3432-3435 (2015)*
5. *Uebel P., et al, Optics Letters 41, 1961-1964 (2016)*
6. *Ананьев В.А. и др., Труды учебных заведений связи 5, 6-14 (2019)*

Ленинградские
Лазерные Системы

Поставка, интеграция лазерно-оптических компонентов и оборудования

Поставка и внедрение интеллектуальных разработок в области оптики и фотоники, которые решают сложные прикладные задачи и помогают совершать коммерческие, технологические и научные прорывы.

ofs
A Furukawa Company

OFS Furukawa (США) – широкий выбор оптических волокон для различных применений в промышленности, телекоммуникациях и научных исследованиях

www.ofsoptics.com



«Ленинградские Лазерные Системы» – официальный дистрибьютор компании OFS в России.

Активные волокна

- Эрбий
- Тулий
- Эрбий-Иттербий
- Иттербий

Применение

- DWDM-, CWDM-системы
- 100G, 200G, 400G, терабитные сети
- Волоконные лазеры, усилители и компоненты
- FTTx, сети Metro Ethernet

Варианты исполнения

- Волокна с сохранением поляризации (PM)
- Высоко-нелинейные волокна
- Бессердцевинные волокна
- Многосердцевинное волокно
- Волокна для сложных эксплуатационных условий
- Рамановские волокна

- **Технологический консалтинг**
- **Разработка и выпуск ТУ**
- **Гарантийное и пост-гарантийное обслуживание**
- **Обучение**
- **Работа в рамках законов РФ (44ФЗ, 223ФЗ)**

199034 г. Санкт Петербург
Биржевая линия, д. 16
Технопарк ИТМО, офис 401

lenlasers.ru

7(812)325-09-73
info@lenlasers.ru

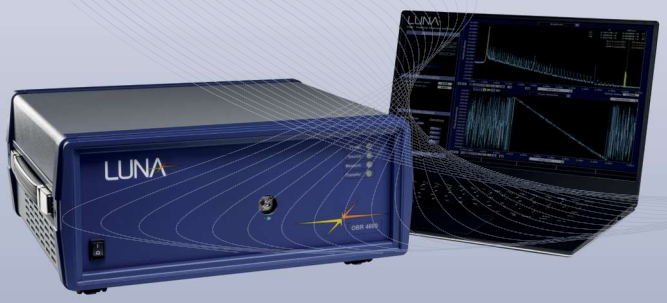
специальные системы
ФОТОНИКА

LUNA

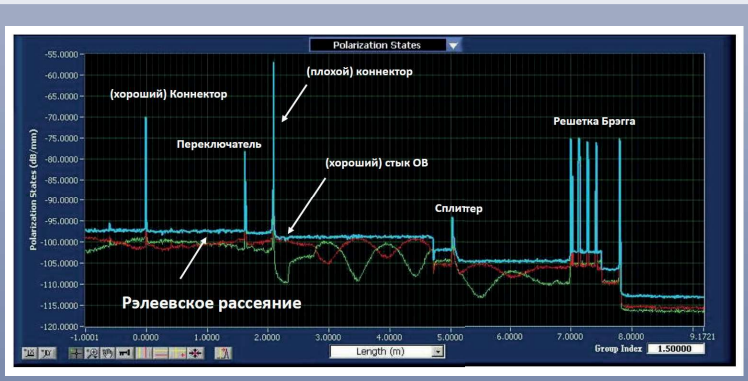
ОПТИЧЕСКИЕ РЕФЛЕКТОМЕТРЫ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

OBR 4600 OFDR-рефлектометр высокого разрешения

- Пространственное разрешение 10 мкм для дистанции измерения 30 м, 20 мкм для 70 м.
- Пространственное разрешение 1 мм для дистанции измерения 2000 м (опция).
- Динамический диапазон 80 дБ.
- Чувствительность -130 дБ.
- Рабочие длины волн: 1525 - 1610 нм, 1270 - 1340 нм.
- Отсутствие "мертвой зоны".
- Измерение SM, PM, MM световодов.



Области применения OFDR-рефлектометра OBR 4600

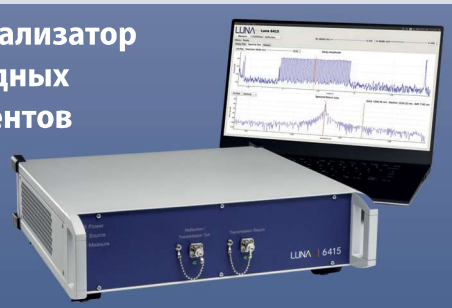


- Тестирование волоконных компонентов и световодов.
- Интегральная фотоника, анализ параметров интегральных фотонных схем.
- Тестирование волоконных кабелей.
- Диагностика и выявление дефектов в ВОЛС.
- Анализ параметров оптического пути и задержек.
- Радиофотоника и оптическая связь.

ПРИБОРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ И КОМПОНЕНТОВ

Luna 6415

OFDR-анализатор световодных компонентов



- Анализатор/рефлектометр без "мертвой зоны".
- Режим отражения (RL) или пропускания (IL).
- Пространственное разрешение 20 мкм.
- Дистанция измерения 20/40 м.
- Чувствительность -135 дБ. C-диапазон длин волн.

OVA 5000

Оптический векторный анализатор



- Измерение IL, RL, PDL, PMD, CD, GD, оптической фазы.
- Встроенный перестраиваемый лазер.
- Спектральное разрешение лазера 1.6 пм.
- Работа в режиме отражения или пропускания.
- Динамический диапазон 80 дБ.

WWW.SPHOTONICS.RU – КАТАЛОГ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ И СВЕТОВОДНОЙ ФОТОНИКИ

Получите более подробную информацию, связавшись с нами любым удобным для Вас способом.

8 (800) 550-72-97 | info@sphotonics.ru | www.sphotonics.ru