

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОРДОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н. П. ОГАРЁВА  
ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ им. А. М. ПРОХОРОВА РАН  
НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ РАН  
ИНСТИТУТ ХИМИИ ВЫСОКОЧИСТЫХ ВЕЩЕСТВ РАН  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н. И. ЛОБАЧЕВСКОГО  
АУ «ТЕХНОПАРК-МОРДОВИЯ»  
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

# МАТЕРИАЛЫ НАНО-, МИКРО-, ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ И ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ: ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ

ПРОГРАММА И МАТЕРИАЛЫ  
17-й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ-ШКОЛЫ

Саранск, 18–21 сентября 2018 г.



МИНИСТЕРСТВО  
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



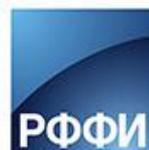
Национальный исследовательский  
Мордовский государственный университет  
имени Н. П. Огарёва



НЦВО  
РАН



Технопарк-Мордовия



РФФИ



Нижегородский  
государственный  
университет  
им. Н. И. Лобачевского

САРАНСК  
ИЗДАТЕЛЬСТВО МОРДОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
2018

УДК 537.533.3:621.3.049.77

ББК В3

М 341

Редакционная коллегия:

*К. Н. Нищев (отв. ред.), П. А. Рябочкина (отв. секр.),  
М. Н. Попова, С. А. Тарасенко, В. В. Семашко*

**М 341 Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение** : прогр. и материалы 17-й Междунар. науч. конф.-шк., Саранск, 18–21 сен. 2018 г. / редкол.: К. Н. Нищев (отв. ред.) [и др.]. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2018. – 224 с.

ISBN 978-5-7103-0000-0

В сборник включены конспекты лекций и тезисы докладов 17-й Международной научной конференции-школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение», посвященные актуальным проблемам современного физического материаловедения. Рецензирование докладов осуществлено программным комитетом школы. Мероприятие проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-32-10031 мол\_г).

Научное издание

**МАТЕРИАЛЫ НАНО-, МИКРО-, ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ  
И ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ:  
ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ**

**Программа и материалы  
17-й Международной научной конференции-школы**

*Печатается в авторской редакции в соответствии с представленным  
оригинал-макетом*

Дизайн обложки

Подписано в печать 00.09.18. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Усл. печ. л. 13,02. Тираж 130 экз. Заказ №

Издательство Мордовского университета  
Типография Издательства Мордовского университета  
430005, г. Саранск, ул. Советская, 24

ISBN 978-5-7103-0000-0

© Коллектив авторов, 2018

© ФГБОУ ВО «МГУ

им. Н. П. Огарёва», 2018

© Оформление Издательство

Мордовского университета, 2018

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УЧАСТНИКОВ

Конференция проводится Институтом физики и химии МГУ им. Н.П. Огарёва в период с 18 по 21 сентября 2018 года.

Место проведения пленарных заседаний – Дворец культуры и искусств МГУ им. Н.П. Огарёва.

Место проведения секционных заседаний и проживания участников конференции - санаторий «Надежда» (расположен в 30 км от г. Саранска).

Программой конференции предусмотрены:

- обзорные доклады-лекции ведущих ученых по тематике конференции;
- выступления участников с устными и стендовыми докладами.

Оргкомитетом установлена следующая продолжительность докладов: лекции – 45 мин, приглашенные доклады - 30 мин, устные сообщения – 15 мин.

Для демонстрации иллюстративных материалов лекторам и докладчикам будут предоставлены средства визуальной и компьютерной презентации. В последнем случае информация должна быть подготовлена в электронном виде с помощью Microsoft PowerPoint или в виде графических файлов: .jpg, .tif, .bmp.

Размеры щитов для размещения стендовых докладов – 90×120 см<sup>2</sup> (ширина, высота).

**РЕГИСТРАЦИЯ** участников конференции будет проводиться 17 сентября с 15.00 до 18.00 в фойе главного корпуса МГУ им. Н.П. Огарёва (ул. Большевикская, 68).

18 сентября с 8.00 до 8.30 в санатории «Надежда». До места проведения участники конференции будут отправлены транспортом оргкомитета.

***О времени прибытия в Саранск просим заблаговременно сообщить по электронной почте: [vnksh.secretary@mrsu.ru](mailto:vnksh.secretary@mrsu.ru). При наличии такой информации оргкомитетом будет организована встреча участников конференции по месту прибытия в любое время суток.***

### КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Адрес: 430000, г. Саранск, ул. Большевикская, 68а,  
МГУ им. Н.П. Огарёва, ИФХ

Тел./факс: (8342) 24-24-44

E-mail: [vnksh.secretary@mrsu.ru](mailto:vnksh.secretary@mrsu.ru)

Хрущалина Светлана Александровна

**<http://www.vnksh.mrsu.ru>**

**ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**  
**17-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ-ШКОЛЫ**  
**«МАТЕРИАЛЫ НАНО-, МИКРО-, ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ И ВОЛОКОННОЙ**  
**ОПТИКИ: ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ»**

Саранск, 18–21 сентября 2018 г.

**Сопредседатели конференции-школы:**

**Е. М. Дианов** – академик РАН, научный руководитель Научного центра волоконной оптики РАН

**В. В. Осико** – академик РАН, руководитель Научного центра лазерных материалов и технологий Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН

**Организационный комитет:**

**С. М. Вдовин** – ректор МГУ им. Н. П. Огарёва, председатель

**К. Н. Нищев** – директор ИФХ МГУ им. Н. П. Огарёва, заместитель председателя

**Е. В. Чупрунов** – ректор ННГУ им. Н. И. Лобачевского

**М. Ф. Чурбанов** – директор ИХВВ РАН

**В. В. Якуба** – генеральный директор АУ «Технопарк-Мордовия»

**С. А. Хрущалина** – ученый секретарь

**Программный комитет:**

**П. А. Рябочкина** – д.ф.-м.н., МГУ им. Н. П. Огарёва, Саранск, Россия, председатель

**Н. С. Аверкиев** – д.ф.-м.н., ФТИ им. А. Ф. Иоффе, С.-Петербург, Россия;

**Т. В. Антропова** – д.х.н., Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, С.-Петербург, Россия

**О. Н. Горшков** – к.ф.-м.н., ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Н. Новгород, Россия;

**С. А. Григорьев** – д.х.н., МЭИ, Москва, Россия

**Е. В. Жариков** – д.т.н., РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

**А. М. Зюзин** – д.ф.-м.н., МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия

**Г. Е. Малашкевич** – д.ф.-м.н., Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Республики Беларусь, Минск, Беларусь

**К. Н. Нищев** – к.ф.-м.н., МГУ им. Н. П. Огарёва, Саранск, Россия

**М. Н. Попова** – д.ф.-м.н., Институт спектроскопии РАН, Москва, Россия

**В. В. Семашко** – д.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

**С. Л. Семенов** – д.ф.-м.н., НЦВО РАН, Москва, Россия

**В. Н. Сигаев** – д.х.н., РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия

**С. А. Тарасенко** – д.ф.-м.н., ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

**С. Н. Ушаков** – к.ф.-м.н., ИОФРАН, Москва, Россия

- П. П. Федоров** – д.х.н., ИОФРАН, Москва, Россия  
**А. В. Шорохов** – д.ф.-м.н., МГУ им. Н. П. Огарёва, Саранск, Россия  
**A. C. Cefalas** – Ph.D., National Hellenic Research Foundation, Athens, Greece  
**F. Kusmartsev** – Ph.D., Loughborough University, Loughborough, UK  
**I. Sildos** – Ph.D., Tartu University, Tartu, Estonia

**Рабочая группа:**

А. В. Голубьев  
И. Н. Евтеева  
Л. А. Куликов  
Е. Н. Лютова  
А. А. Ляпин  
Е. П. Трямкина

Н. В. Моисеев  
М. А. Пятаев  
Н. В. Сидорова  
Н. А. Ларина  
С. А. Артемов  
И. А. Юрлов

## Спонсоры и официальные партнеры



**Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ)** создан Указом Президента Российской Федерации № 426 от 27 апреля 1992 года. РФФИ – самоуправляемая государственная некоммерческая организация в форме федерального учреждения, находящегося в ведении Правительства Российской Федерации.

Основные направления деятельности РФФИ:

- конкурсный отбор лучших научных проектов и последующее организационно-финансовое обеспечение поддержанных проектов;
- обобщение результатов завершенных проектов РФФИ;
- мониторинг науки – многоаспектный анализ состояния и тенденций развития комплекса российской науки на основе оригинальной системы конкурсных индикаторов, экспертных и других данных о ходе выполнения проектов;
- доведение результатов исследований, поддержанных Фондом, до потенциальных пользователей;
- программы общего назначения.



**Журнал «Фотоника»** посвящен оптическим системам различных типов (электрооптическим, оптоволоконным, лазерным, полностью оптическим), их элементам и технологиям. Цель издания – глубокое и подробное освещение вопросов, связанных с оптическими системами передачи, оптическими технологиями, оптическими материалами и элементами, оборудованием и станками, используемыми в оптических системах.

# ПРОГРАММА-ГРАФИК КОНФЕРЕНЦИИ-ШКОЛЫ

18 сентября 2018, вторник

13:00–13:30	<b>ТОРЖЕСТВЕННОЕ ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ</b> <i>С.М. Вдовин, председатель Организационного комитета</i> <i>В.В. Осико, академик РАН, сопредседатель конференции-школы</i> <i>Е.М. Дианов, академик РАН, сопредседатель конференции-школы</i>
13:30-16:00	<b>ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ</b> <i>Сопредседатели: академик РАН Е.М. Дианов, академик РАН В.В. Осико</i>
13:30–14:15	<b><u>Е.М. Дианов</u></b> <i>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва</i> <b>АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ: ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ – СОСТОЯНИЕ ДЕЛ И ПУТИ РАЗВИТИЯ В БЛИЖАЙШЕЕ ДЕСЯТИЛЕТИЕ</b>
14:15–15:00	<b><u>В.М. Плотников</u></b> <i>НТО «ИРЭ-Полюс», Фрязино</i> <b>ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ «ИРЭ-ПОЛЮС» И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ</b>
15:00-15:45	<b><u>Erkki Lähderanta</u></b> <i>School of Engineering Science, Lappeenranta University of Technology, Finland</i> <b>HOPPING MAGNETOTRANSPORT IN QUATERNARY CHALCOGENIDES</b>
15:45-16:00	<b>ПЕРЕРЫВ</b>
16:00-18:15	<b>ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ</b> <i>Председатель д.ф.-м.н. П.А. Рябочкина</i>
16:00–16:45	<b><u>Г.С. Соколовский</u></b> <i>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербурга</i> <b>КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ ИНФРАКРАСНОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА</b>
16:45–17:30	<b><u>А.А. Калачев</u></b> <i>Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского, Казань</i> <b>ИЗОТОПИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ПРИМЕСНЫЕ КРИСТАЛЛЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КВАНТОВОЙ ПАМЯТИ</b>
17:30–18:15	<b><u>В.П. Минаев</u></b> <i>НТО «ИРЭ-Полюс», Фрязино</i> <b>АППАРАТЫ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ И ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРАХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕРАПИИ И ХИРУРГИИ</b>

19 сентября 2018, среда

	<b>ДКИ МГУ им. Н.П. Огарёва</b>
<b>09:00-10:30</b>	<b>ЛЕКЦИИ</b> <b>Председатель: д.ф.- м.н. С.А. Тарасенко</b>
<b>09:00-09:45</b>	<b><u>К.Н. Ельцов</u></b> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва <b>СИНТЕЗ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГРАФЕНА БОЛЬШОГО РАЗМЕРА</b>
<b>09:45-10:30</b>	<b><u>A.C. Cefalas</u></b> National Hellenic Research Foundation. Theoretical and Physical Chemistry Institute, Athens Kazan Federal University, Kazan <b>SMALL SIZE CHARGED NANOPARTICLES ACTIVATE TUMOR CELL GROWTH</b>
<b>10:30-10:45</b>	<b>ПЕРЕРЫВ</b>
<b>10:45-12:15</b>	<b>Председатель: д.ф.-м.н. В.В. Семашко</b>
<b>10:45-11:30</b>	<b><u>Н.С. Аверкиев</u></b> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербурге <b>ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ</b>
<b>11:30-12:15</b>	<b><u>С.А. Тарасенко</u></b> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербурге <b>СПИНОВЫЕ ЦЕНТРЫ, СВЯЗАННЫЕ С ВАКАНСИЯМИ КРЕМНИЯ В SiC</b>
<b>12:15-13:00</b>	<b>ПЕРЕРЫВ</b>
<b>13:00-14:30</b>	<b>Председатель: д.ф.-м.н. Ю.Г. Вайнер</b>
<b>13:00-13:45</b>	<b><u>М.Н. Попова</u></b> Институт спектроскопии РАН, Троицк <b>КРИСТАЛЛЫ ДЛЯ КВАНТОВОЙ ПАМЯТИ</b>
<b>13:45-14:30</b>	<b><u>В.Н. Манцевич</u></b> МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва <b>НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТУННЕЛИРОВАНИИ В СВЯЗАННЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ С КУЛОНОВСКИМИ КОРРЕЛЯЦИЯМИ</b>
<b>14:30-14:45</b>	<b>ПЕРЕРЫВ</b>
<b>14:45-17:00</b>	<b>Председатель: д.ф.-м.н. Н.С. Аверкиев</b>
<b>14:45-15:30</b>	<b><u>И.В. Рожанский</u></b> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербурге <b>АНОМАЛЬНЫЙ И ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА</b>
<b>15:30-16:15</b>	<b><u>Ю.Г. Вайнер</u></b> Институт спектроскопии РАН, Троицк <b>НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДИНАМИКА НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ: ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ ОДИНОЧНЫХ МОЛЕКУЛ</b>
<b>16:15-17:00</b>	<b><u>О.В. Палашов</u></b> ИПФ РАН, г. Нижний Новгород <b>ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ГЕОМЕТРИИ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛАЗЕРОВ С ОДНОВРЕМЕННО ВЫСОКОЙ ПИКОВОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТЬЮ</b>
<b>19:00-20:30</b>	<b>СТЕНДОВАЯ СЕССИЯ (холл перед ауд. №1)</b>

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	
1	<p><b><u>К.А. Бжеумихов</u><sup>1</sup>, <u>З.Ч. Маргушев</u><sup>1</sup>, <u>А.А. Бжеумихов</u><sup>1,2</sup></b>  1 - Институт информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра РАН, Нальчик,  2 – Institute for Scientific Instruments GmbH, Berlin</p> <p><b>МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА (ВОЛНОВОДЫ) - КЛАССИФИКАЦИЯ, ПРИЛОЖЕНИЯ</b></p>
2	<p><b><u>А.М. Минкин</u><sup>1</sup>, <u>Н.С. Созонов</u><sup>2</sup>, <u>К.М. Фадеев</u><sup>1</sup>, <u>Д.И. Шевцов</u><sup>1</sup></b>  1 - ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь,  2 - ООО Инверсия-Сенсор, Пермь</p> <p><b>МИНИАТЮРНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО</b></p>
3	<p><b><u>И.О. Золотовский</u>, <u>В.А. Лапин</u>, <u>Д.И. Семенцов</u></b>  Ульяновский государственный университет Научно-технологический институт им. С.П. Капицы, Ульяновск</p> <p><b>МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В СВЕТОВОДЕ С КАСКАДНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ ДИСПЕРСИИ ОТ ДЛИНЫ</b></p>
4	<p><b><u>Б.И. Галаган</u><sup>1</sup>, <u>Б.И. Денкер</u><sup>1</sup>, <u>О.Н. Егорова</u><sup>2</sup>, <u>И.В. Жлуктова</u><sup>1</sup>, <u>В.А. Камынин</u><sup>1</sup>, <u>А.А. Поносова</u><sup>1,3</sup>, <u>С.Е. Сверчков</u><sup>1</sup>, <u>С.Л. Семенов</u><sup>2</sup>, <u>В.Б. Цветков</u><sup>1,4</sup></b>  1 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва,  2 - Научный центр волоконной оптики РАН, Москва,  3 - ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь,  4 - Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва</p> <p><b>ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ КОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОМ ЭРБИЕВОМ ВОЛОКНЕ</b></p>
5	<p><b><u>А.Д. Таратынова</u><sup>1</sup>, <u>А.А. Берсенева</u><sup>2</sup>, <u>А.В. Егорышева</u><sup>2</sup>, <u>О.М. Гайтко</u><sup>2</sup>, <u>П.А. Рябочкина</u><sup>1</sup>, <u>С.А. Хрущалина</u><sup>1</sup></b>  1 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск,  2 - Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва</p> <p><b>СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ <math>LaGa_{0,5}Sb_{1,5}O_6</math>, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ <math>Pr^{3+}</math></b></p>
6	<p><b><u>М.В. Черно</u><sup>1</sup>, <u>А.А. Ляпин</u><sup>1</sup>, <u>С.В. Кузнецов</u><sup>2</sup>, <u>С.В. Гуцин</u><sup>1</sup>, <u>А.С. Ермаков</u><sup>1</sup>, <u>В.Ю. Пройдакова</u><sup>2</sup>, <u>П.А. Рябочкина</u><sup>1</sup>, <u>П.П. Федоров</u><sup>2</sup></b>  1 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск,  2 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва</p> <p><b>ВИЗУАЛИЗАТОРЫ ИНФРАКРАСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФТОРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ</b></p>
7	<p><b><u>Д.В. Симановский</u>, <u>В.А. Иванов</u>, <u>М.О. Марычев</u>, <u>В.С. Николов</u>, <u>А.Е. Егорова</u></b>  Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород</p> <p><b>СИНТЕЗ И СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ <math>Ca_{2-x}Li_{2x}GeO_4</math></b></p>
8	<p><b><u>Е.С. Климов</u><sup>1</sup>, <u>М.В. Бузаева</u><sup>1</sup>, <u>И.А. Макарова</u><sup>1</sup>, <u>О.А. Давыдова</u><sup>1</sup>, <u>Е.С. Ваганова</u><sup>1</sup>, <u>Н.А. Бунаков</u><sup>2</sup></b>  1 - Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск,  2 - Ульяновский государственный университет, Ульяновск</p> <p><b>УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК</b></p>
9	<p><b><u>Т.Ю. Дьячкова</u>, <u>М.В. Бузаева</u>, <u>И.А. Макарова</u>, <u>О.А. Давыдова</u>, <u>Е.С. Климов</u></b></p>

	Ульяновский государственный технический университет <b>СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЦЕОЛИТА, ДОПИРОВАННОГО УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ</b>
10	<u>И.В. Вилков</u> <sup>1</sup> , <u>К.В. Кремлев</u> <sup>2</sup> , <u>П.В. Андреев</u> <sup>1</sup> , <u>Г.С. Забродина</u> <sup>2</sup> , <u>А.М. Объедков</u> <sup>2</sup> , <u>Б.С. Каверин</u> <sup>2</sup> , <u>Н.М. Семенов</u> <sup>2</sup> , <u>С.Ю. Кетков</u> <sup>2</sup> , <u>М.А. Фаддеев</u> <sup>1</sup> , <u>С.А. Гусев</u> <sup>3</sup> , <u>Д.А. Татарский</u> <sup>3</sup> 1 - Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 2 - Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН, Нижний Новгород, 3 - Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород <b>СИНТЕЗ И ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И НАНОПОКРЫТИЙ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> И ZrO<sub>2</sub></b>
11	<u>В.В. Грибко</u> , <u>В.Н. Трушин</u> , <u>А.С. Маркелов</u> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ В РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ</b>
12	<u>И.А. Глухов</u> <sup>1</sup> , <u>С.Г. Мусеев</u> <sup>1,2</sup> 1 - Ульяновский государственный университет, Ульяновск 2 - Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск <b>ОПТИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В УСИЛИВАЮЩЕМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ С МОНОСЛОЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ</b>
13	<u>К.Е. Сметанина</u> , <u>М.С. Болдин</u> , <u>П.В. Андреев</u> , <u>Е.А. Ланцев</u> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ФАЗОВОГО СОСТАВА В КЕРАМИКАХ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭИПС</b>
14	<u>Е.А. Исупова</u> , <u>В.А. Иванов</u> , <u>П.В. Андреев</u> , <u>М.А. Фаддеев</u> , <u>А.В. Боряков</u> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ КТР:Hf, КТР:Zr, КТР:Nb</b>
15	<u>И.И. Бучинская</u> , <u>Д.Н. Каримов</u> ФНИЦ Кристаллография и фотоника РАН, Москва <b>ПОЛУЧЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ R<sup>2+</sup><sub>1-x</sub>R<sup>3+</sup><sub>x</sub>F<sub>2+x</sub> (R = Eu, Sm, Yb)</b>
16	<u>П.В. Андреев</u> <sup>1</sup> , <u>К.В. Кремлев</u> <sup>2</sup> , <u>Г.С. Забродина</u> <sup>2</sup> , <u>И.В. Вилков</u> <sup>1</sup> , <u>А.М. Объедков</u> <sup>2</sup> , <u>Б.С. Каверин</u> <sup>2</sup> , <u>Н.М. Семенов</u> <sup>2</sup> , <u>С.Ю. Кетков</u> <sup>2</sup> , <u>М.А. Фаддеев</u> <sup>1</sup> 1 - Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 2 - Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН, Нижний Новгород <b>РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ</b>
17	<u>А.С. Сологуб</u> , <u>М.П. Зыкова</u> , <u>А.В. Хомяков</u> , <u>О.Б. Петрова</u> Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва <b>СВИНЦОВЫЕ ФТОРОБОРАТНЫЕ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, СОАКТИВИРОВАННЫЕ Nd<sup>3+</sup> и La<sup>3+</sup></b>
18	<u>И.В. Алтухов</u> <sup>1</sup> , <u>М.С. Каган</u> <sup>1</sup> , <u>С.К. Папроцкий</u> <sup>1</sup> , <u>Н.А. Хвальковский</u> <sup>1</sup> , <u>Н.Б. Родионов</u> <sup>2</sup> , <u>А.П. Большаков</u> <sup>3</sup> , <u>В.Г. Ральченко</u> <sup>3</sup> , <u>Р.А. Хмельницкий</u> <sup>4</sup> 1 - Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, 2 - Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований «ТРИНИ-ТИ», Москва, Троицк, 3 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва,

	4- Физический институт им. П.Н.Лебедева, Москва <b>ТРАНСПОРТ ДЫРОК В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ АЛМАЗЕ, ЛЕГИРОВАННОМ БОРОМ, В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ</b>
19	<u>П.Е. Железов</u> , <u>М.С. Алимбеков</u> Технопарк-Мордовия, Саранск <b>ВОЛОКОННЫЙ ИТТЕРБИЕВЫЙ ЛАЗЕР С КОЛЬЦЕВЫМ ВОЛОКОННЫМ ЗЕРКАЛОМ</b>
20	<u>А.В. Щучкина</u> , <u>С.А. Хрущалина</u> , <u>П.А. Рябочкина</u> , <u>О.В. Минаева</u> , <u>М.Н. Жарков</u> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск <b>СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА И ЦИТОКСИЧНОСТЬ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ (YEr)PO<sub>4</sub></b>
21	<u>Е.Г. Фирстова</u> <sup>1</sup> , <u>А.В. Харахордин</u> <sup>1</sup> , <u>С.В. Алышев</u> <sup>1</sup> , <u>С.В. Фирстов</u> <sup>1,2</sup> 1 - Научный Центр Волоконной Оптики РАН, Москва, 2 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск <b>АП-КОНВЕРСИОННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ Р-ЭЛЕМЕНТАМИ (Bi, Te, Pb), ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ В ИК ДИАПАЗОНЕ</b>
22	<u>Е.А. Корсакова</u> , <u>Н.А. Муфтахитдинова</u> , <u>А.С. Корсаков</u> , <u>Л.В. Жукова</u> Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург <b>ИК ВОЛОКОННЫЕ ПУЧКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ</b>
23	<u>А.А. Лашова</u> , <u>Д.А. Данилова</u> , <u>А.С. Корсаков</u> , <u>Л.В. Жукова</u> Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург <b>ИНФРАКРАСНЫЕ СВЕТОВОДЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК</b>
24	<u>М.С. Пудовкин</u> , <u>О.А. Морозов</u> , <u>Д.А. Коряковцева</u> , <u>Р.Ш. Хуснутдинова</u> , <u>А.Г. Киямов</u> , <u>А.С. Низамутдинов</u> , <u>В.В. Семашко</u> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань <b>ЛЮМИНЕСЦЕНТАЯ НАНОТЕРМОМЕТРИЯ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ Pr<sup>3+</sup>:LaF<sub>3</sub> ОДНОЯДЕРНОЙ СТРУКТУРЫ И НАНОЧАСТИЦ Pr<sup>3+</sup>:LaF<sub>3</sub>/LaF<sub>3</sub> СТРУКТУРЫ ЯДРО/ОБОЛОЧКА</b>
25	<u>М.А. Марисов</u> , <u>А.А. Шавельев</u> , <u>А.А. Шакиров</u> , <u>Е.В. Лукинова</u> , <u>А.С. Низамутдинов</u> , <u>С.Л. Кораблева</u> , <u>В.В. Семашко</u> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань <b>ВЫРАЩИВАНИЕ ФТОРИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ LiSr<sub>x</sub>Ca<sub>1-x</sub>AlF<sub>6</sub>:Ce<sup>3+</sup> (X = 0,2) МЕТОДОМ БРИДЖМЕНА</b>
26	<u>С.И. Мунтанилов</u> , <u>А.В.Голубьев</u> ФБУ «Мордовский центр стандартизации и метрологии», Саранск <b>МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПРОЕКТА «СОЗДАНИЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА СВЕРХМОЩНЫХ ПРИБОРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ И ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ В НАУКОЕМКИХ ОБЛАСТЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ТРАНСПОРТА И ЭНЕРГЕТИКИ»</b>

20 сентября 2018, четверг

08:30-09:30	<b>ПРИГЛАШЕННЫЕ ДОКЛАДЫ</b> Председатель д.ф.-м.н. М.Н. Попова	
08:30-09:00	<b><u>М.С. Каган</u></b> ИРЭ им. Котельникова РАН, Москва <b>ТУННЕЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ В СВЕРХРЕШЕТКАХ GaAs/AlAs С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДОМЕНАМИ</b>	
09:00-09:30	<b><u>Е.Д. Образцова</u></b> 1 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва 2 - Московский физико-технический институт, Москва <b>ТОНКИЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И ГРАФЕНА ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ</b>	
09:30-09:45	<b>ПЕРЕРЫВ</b>	
09:45-12:30	<b>ЗАСЕДАНИЯ СЕКЦИЙ</b>	
	<b>Ауд. 1</b>	<b>Ауд. 2</b>
	<b>ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ</b> Председатель: д.ф.-м.н. П.А. Рябочкина	<b>ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА</b> Председатель: к.ф.-м.н. К.Н. Нищев
09:45-10:00	<b><u>А.А. Гладилин<sup>1</sup>, С.И. Ченцов<sup>2</sup>, В.С. Кривобок<sup>2</sup>, О.В. Уваров<sup>1</sup>, В.П. Калинушкин<sup>1</sup></u></b> 1 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 2 - Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва <b>РАСПЕРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ZnSe:Fe</b>	<b><u>Д.Д. Салимгареев, А.Е. Львов, В.С. Корсаков, А.С. Корсаков, Л.В. Жукова</u></b> Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург <b>РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ГАЛОГЕНИД СЕРЕБРЯНЫХ КРИСТАЛЛОВ</b>
10:00-10:15	<b><u>С.В. Алышев<sup>1</sup>, А.М. Хегай<sup>1</sup>, С.В. Фирстов<sup>1,2</sup>, М.А. Мелькумов<sup>1</sup></u></b> 1 - Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, 2 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск <b>ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ГЕРМАНОСИЛИКАТНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ, СОЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ И ЭРБИЕМ</b>	<b><u>А.В. Харахордин, С.В. Алышев, Е.Г. Фирстова, С.В. Фирстов, Е.М. Дианов</u></b> Научный центр волоконной оптики РАН, Москва <b>ЛАЗЕРНОЕ ОБЕСЦВЕЧИВАНИЕ ЦЕНТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ВИСМУТОВЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ</b>
10:15-10:30	<b><u>Д.А. Гурьев</u></b> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва <b>ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ, ЗАПИСАННЫХ В ФОСФАТНОМ СТЕКЛЕ ЛАЗЕРОМ С ИМПУЛЬСАМИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ</b>	<b><u>К.Е. Рюмкин<sup>1</sup>, С.В. Фирстов<sup>1</sup>, М.А. Мелькумов<sup>1</sup>, В.Ф. Хопин<sup>2</sup>, В.В. Вельмискин<sup>1</sup>, А.Н. Денисов<sup>1</sup>, С.Л. Семенов<sup>1</sup>, Е.М. Дианов<sup>1</sup></u></b> 1 - Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, 2 - Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН, Нижний Новгород <b>ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЗАВИСИМОЕ УСИЛЕНИЕ В ГЕРМАНОСИЛИКАТНЫХ</b>

		<b>СВЕТОВОДАХ, ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ</b>
10:30-10:45	<b>М.В. Понарина, А.Г. Охримчук, М.Г. Рыбин, А.А. Таракановский, Т.В. Долматов, В.В. Букин, И.В. Жлуктова, В.А. Камынин, П.А. Образцов</b> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва <b>9,8 ГГц ВОЛНОВОДНЫЙ Nd:YAG ЛАЗЕР, РАБОТАЮЩИЙ В РЕЖИМЕ ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД</b>	<b>И.В. Жлуктова<sup>1</sup>, В.А. Камынин<sup>1,2</sup>, В.Г. Воронин<sup>3</sup>, О.Е. Наний<sup>3</sup>, В.Б. Цветков<sup>1,4</sup></b> 1 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 2 - Ульяновский государственный университет, Ульяновск 3 - МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 4 - Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва <b>ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ВОЛОКОННЫЙ ГОЛЬМИЕВЫЙ ЛАЗЕР С ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫМ МОДУЛЯТОРОМ МАХА-ЦЕНДЕРА</b>
10:45-11:00	<b>С.В. Гущин<sup>1</sup>, А.А. Ляпин<sup>1</sup>, С.В. Кузнецов<sup>2</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, В.Ю. Пройдакова<sup>2</sup>, А.С. Ермаков<sup>1</sup>, П.П. Федоров<sup>2</sup></b> 1 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, 2 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва <b>АПКОНВЕРСИОННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ФТОРИДНЫХ ПОРОШКАХ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Er<sup>3+</sup> и Yb<sup>3+</sup></b>	<b>Р.Р. Кашина, А.А. Поносова, В.П. Переадчук, А.С. Смирнов</b> 1 - ПАО «Пермская научно- производственная приборостроительная компания», Пермь, 2 - Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, 3 - Пермский государственный национальный исследовательский политехнический университет, Пермь <b>РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОМODOVЫХ ИТТЕРБИЕВЫХ СВЕТОВОДОВ, ОПТИМИЗИРОВАННЫХ ДЛЯ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ</b>
11:00-11:15	<b>А.С. Ермаков, А.А. Ляпин, С.В. Кузнецов, В.А. Конюшкин, А.Н. Накладов, П.А. Рябочкина, П.П. Федоров, С.В. Гущин</b> 1 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, 2 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва <b>СПЕКТРАЛЬНО- ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ CaF<sub>2</sub>-SrF<sub>2</sub>, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Tm<sup>3+</sup></b>	<b>Б.И. Галаган<sup>1</sup>, Б.И. Денкер<sup>1</sup>, О.Н. Егорова<sup>2</sup>, В.А. Камынин<sup>1</sup>, А.А. Поносова<sup>1,3</sup>, С.Е. Сверчков<sup>1</sup>, С.Л. Семенов<sup>2</sup>, В.Б. Цветков<sup>1,4</sup></b> 1 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 2 - Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, 3 - ПАО «Пермская научно- производственная приборостроительная компания», Пермь, 4 - Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва <b>КОМПОЗИТНЫЕ СВЕТОВОДЫ С Er<sup>3+</sup> ФОСФАТНОЙ СЕРДЦЕВИ- НОЙ ДЛЯ КОМПАКТНЫХ ВОЛОКОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ</b>
11:15-11:30	<b>С.А. Хрущалина, П.А. Рябочкина, А.Н. Беляев, О.С. Бушукина, И.А. Юрлов, М.А. Дворянчикова, О.А. Кузнецова</b> Национальный исследовательский	<b>А.Р. Рахматуллина<sup>1</sup>, И.С. Азанова<sup>1,2</sup>, М.К. Цибиногина<sup>2</sup>, О.Л. Кель<sup>2</sup>, А.А. Поносова<sup>2</sup></b> 1 - Пермский государственный национальный исследовательский

	<p>Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск</p> <p><b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ <math>Yb^{3+}</math> ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ЭФФЕКТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА БИОТКАНЬ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ БЛИЖНЕЙ ИК-ОБЛАСТИ СПЕКТРА</b></p>	<p>университет, Пермь, 2 - ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная кампания», Пермь</p> <p><b>ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГЕНЕРАЦИИ ЭРБИЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ</b></p>
11:30-11:45	<p><u>С.А. Артемов<sup>1</sup></u>, <u>А.А. Ляпин<sup>1</sup></u>, <u>П.А. Рябочкина<sup>1</sup></u>, <u>Ю.Л. Копылов<sup>2</sup></u>, <u>В.В. Балашов<sup>2</sup></u>, <u>Е.Е. Ломонова<sup>3</sup></u></p> <p>1 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, 2 - Фрязинский филиал ИРЭ им. Котельникова РАН, Москва, 3 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва</p> <p><b>ИМПУЛЬСНАЯ ДВУХМИКРОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НА КРИСТАЛЛАХ <math>ZrO_2-Y_2O_3</math>, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ <math>Ho^{3+}</math></b></p>	<p><u>А.В. Жаворонкин</u>, <u>А.А. Маслин</u></p> <p>Технопарк-Мордовия, Саранск</p> <p><b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ СУПЕРКОНТИНУУМА В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ</b></p>
11:45-12:00	<p><u>Э.И. Мадиров</u>, <u>А.А. Шакиров</u>, <u>А.А. Шавельев</u>, <u>А.С. Низамутдинов</u>, <u>В.В. Семашко</u></p> <p>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань</p> <p><b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРОВ ИОНОВ <math>Ce^{3+}</math> В КРИСТАЛЛАХ СМЕШАННОЙ СТРУКТУРЫ <math>LiSr_xCa_{1-x}AlF_6</math></b></p>	<p><u>И.Л. Воробьев</u>, <u>А.В. Кривовичев</u>, <u>А.Б. Пакалин</u>, <u>С.А. Смирнов</u>, <u>Ю.К. Чаморовский</u></p> <p>Технопарк-Мордовия, Саранск</p> <p><b>РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГОТОВОК И ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ТЕЙПЕРИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ</b></p>
12:00-12:15	<p><u>И.И. Фарухшин</u>, <u>Э.И. Мадиров</u>, <u>А.А. Шакиров</u>, <u>А.С. Низамутдинов</u>, <u>А.А. Шавельев</u>, <u>В.В. Семашко</u></p> <p>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань</p> <p><b>ПОЛУЧЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА СМЕШАННЫХ КРИСТАЛЛАХ <math>LiSr_xCa_{1-x}AlF_6:Ce^{3+}</math></b></p>	<p><u>А.М. Хегай<sup>1,2</sup></u>, <u>М.А. Мелькумов<sup>1</sup></u>, <u>С.В. Фирстов<sup>1</sup></u>, <u>Ф.В. Афанасьев<sup>3</sup></u></p> <p>1 - Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, 2 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 3 - Институт химии высокочистых веществ РАН, Нижний Новгород</p> <p><b>ИЗУЧЕНИЕ НЕПРОСВЕТЛЯЕМЫХ ПОТЕРЬ В ФОСФОРСИЛИКАТНЫХ СВЕТОВОДАХ, ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ</b></p>
12:15-12:30		<p><u>И. Риссанен<sup>1</sup></u>, <u>В.Н. Филиппов<sup>2</sup></u>, <u>Ю.К. Чаморовский<sup>3</sup></u>, <u>В. Устимчик<sup>2</sup></u>, <u>С. Попов<sup>3</sup></u>, <u>М.С. Алимбеков<sup>4</sup></u>, <u>П.Е. Железов<sup>4</sup></u></p> <p>1 - Технологический университет Тампере, Тампере, 2 - Ампликоникс, Тампере, 3 - Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва,</p>

		4 - Технопарк-Мордовия, Саранск <b>ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ТЕЙПЕРНЫХ ВОЛОКОН С ВЫСОКИМ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕМ</b>
10:45-12:30	<b>Ауд. 3</b> <b>НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ</b> <b>Председатель: д.ф.-м.н. Ю.Г. Вайнер</b>	
10:45-11:00	<b>А.А. Никольская, Д.С. Королев, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.А. Сушков, Д.А. Павлов, Д.И. Тетельбаум</b> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО С ПОМОЩЬЮ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ</b>	
11:00-11:15	<b>А.А. Сушков<sup>1</sup>, Д.А. Павлов<sup>1</sup>, Н.В. Байдусь<sup>2</sup>, А.В. Рыков<sup>2</sup>, А.В. Новиков<sup>3</sup>, Д.В. Юрасов<sup>3</sup></b> 1 - Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 2 - Научно-исследовательский физико-технический институт, Нижний Новгород, 3 - Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород <b>РАСШИФРОВКА ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ ФАЗЫ AlAs НА Ge/Si(112)</b>	
11:15-11:30	<b>Г.В. Тихомирова, Т.К. Петросян, Я.Ю. Волкова, А.В. Тебеньков</b> Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург <b>ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ</b>	
11:30-11:45	<b>Д.В. Поминова, А.В. Рябова, И.Д. Романишкин, П.В. Грачев, В.Ю. Пройдакова, С.В. Кузнецов</b> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва <b>ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ IN VITRO С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АП-КОНВЕРСИОННЫХ НАНОЧАСТИЦ NaGdF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>-Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>-Tm<sup>3+</sup></b>	
11:45-12:00	<b>И.А. Юрлов, П.А. Рябочкина, С.А. Хрущалина</b> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск <b>СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИЗ АМИНОКАПРОНОВОЙ КИСЛОТЫ</b>	
12:00-12:15	<b>С.Л. Коваленко<sup>1</sup>, Т.В. Павлова<sup>1</sup>, О.И. Канищева<sup>1,2</sup>, К.Н. Ельцов<sup>1</sup></b> 1 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 2 - Московский физико-технический институт, Москва <b>ТЕРМОПРОГРАММИРУЕМЫЙ СИНТЕЗ МОНОКРИСТАЛЛОВ АЗОТИРОВАННОГО ГРАФЕНА ИЗ МОЛЕКУЛ АЦЕТОНИТРИЛА</b>	
12:15-12:30	<b>М.Н. Жарков, А.А. Ляпин, В.П. Агеев, С.А. Хрущалина, О.А. Куликов, П.А. Рябочкина</b> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск <b>СИНТЕЗ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИПОСОМ, СОДЕРЖАЩИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ НАНОРАЗМЕРНЫЕ ЧАСТИЦЫ CaF<sub>2</sub>: Yb<sup>3+</sup>, Re<sup>3+</sup> (Re = Er<sup>3+</sup>, Tm<sup>3+</sup>), ДЛЯ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ</b>	

21 сентября 2018, пятница

09:00-10:30	<b>ПРИГЛАШЕННЫЕ ДОКЛАДЫ</b>	
	<b>Председатель: д.ф.-м.н. В.В. Семашко</b>	
09:00-09:30	<b>Г.В. Будкин</b> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург <b>ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И СМЕШЕНИЕ ЧАСТОТ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ</b>	
09:30-10:00	<b>К.А. Барышников</b> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург <b>РЕЗОНАНСНОЕ И РЕЛАКСАЦИОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ЗВУКА НА ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРАХ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ</b>	
10:00-10:30	<b>П.Г. Зверев<sup>1,2</sup>, И.В. Смирнов<sup>2</sup>, Г.В. Шилова<sup>1</sup>, А.А. Сироткин<sup>1</sup></b> 1 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 2 - Московский энергетический институт (ТУ), Москва <b>МНОГОЧАСТОТНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ УАР:Nd ЛАЗЕРА</b>	
10:30-10:45	<b>ПЕРЕРЫВ</b>	
10:45-12:45	<b>Ауд. 1</b>	<b>Ауд. 2</b>
	<b>НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ</b> <b>Председатель: д.ф.-м.н. М.Н. Попова</b>	<b>ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ</b> <b>Председатель: д.ф.-м.н. Н.С. Аверкиев</b>
10:45-11:00	<b>Т.В. Волкова<sup>1</sup>, М.А. Борик<sup>2</sup>, И.Е. Курицина<sup>2</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>2</sup>, В.А. Мызина<sup>2</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>4</sup></b> 1 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, 2 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 3 - Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, 4 - Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва <b>ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА И ЛОКАЛЬНОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НА ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> И ZrO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Е.С. Азарова, Г.М. Максимова</b> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>МАССИВНЫЕ ДИРАКОВСКИЕ ФЕРМИОНЫ В ОДНОМЕРНЫХ МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ КОЛЬЦАХ С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ: ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА И ПЕРСИСТЕНТНЫЕ ТОКИ</b>
11:00-11:15	<b>Н.А. Ларина<sup>1</sup>, Т.В. Волкова<sup>1</sup>, М.А. Борик<sup>2</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>2</sup>, В.А. Мызина<sup>2</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>4</sup>, С.А. Хрущалина<sup>1</sup></b> 1 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, 2 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 3 - Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, 4 - Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва	<b>А.Р. Зайнагутинов, А.В. Тележников</b> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В СВЕРХРЕШЕТКАХ СО СПИНОРБИТАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ РАШБЫ</b>

	<b>ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ <math>ZrO_2-Sc_2O_3-R_2O_3-Eu_2O_3</math> (R-Y, Yb, Gd, Ce)</b>	
11:15-11:30	<b><u>И.В. Степанова</u>, С.Ю. Кривобородова, О.Б. Петрова</b> Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва <b>СИНТЕЗ ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ИСХОДНЫХ ОКСИДОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ</b>	<b><u>Д.А. Кулаков</u>, <u>Д.В. Хомицкий</u></b> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ</b>
11:30-11:45	<b><u>А.В. Кулебякин</u><sup>1</sup>, <u>И.Е. Курицына</u><sup>2</sup>, <u>Ф.О. Милович</u><sup>3</sup>, <u>А.С. Числов</u><sup>1,3</sup>, <u>Н.Ю. Шульга</u><sup>3</sup></b> 1 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 2 - Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, 3 - Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва <b>ВЛИЯНИЕ СОЛЕГИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ <math>CeO_2</math> И <math>Nd_2O_3</math> НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ <math>ZrO_2-Y_2O_3</math></b>	<b><u>А.С. Рутьков</u>, <u>А.А. Перов</u>, <u>Е.А. Морозова</u></b> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>КВАНТОВЫЕ СОСТОЯНИЯ НОСИТЕЛЕЙ В КВАДРУПОЛЬНЫХ ПОЛУМЕТАЛЛАХ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ</b>
11:45-12:00	<b><u>М.А. Борик</u><sup>1</sup>, <u>В.Р. Боричевский</u><sup>2</sup>, <u>А.В. Кулебякин</u><sup>1</sup>, <u>Е.Е. Ломонова</u><sup>1</sup>, <u>Ф.О. Милович</u><sup>2</sup>, <u>В.А. Мызина</u><sup>1</sup>, <u>П.А. Рябочкина</u><sup>3</sup>, <u>Н.В. Сидорова</u><sup>3</sup>, <u>Н.Ю. Табачкова</u><sup>2</sup></b> 1 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 2 - Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, 3 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск <b>МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННОГО <math>ZrO_2-M_2O_3</math> (M-Nd, Ce, Yb)</b>	

12:00-12:15	<p><b>М.А.Борик<sup>1</sup>, А.В. Кулебякин<sup>1</sup>, И.Е. Курицына<sup>2</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>1</sup>, Ф.О. Милович<sup>4</sup>, В.А. Мызина<sup>1</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>3</sup>, <u>А.С. Числов<sup>1,3</sup></u></b>  1 - Институт общей физики  им. А.М. Прохорова РАН, Москва.  2 - Институт физики твердого тела  РАН, Черноголовка.  3 - Национальный исследовательский  технологический университет  «МИСиС», Москва</p> <p><b>МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ ЧСЦ, СОЛЕГИРОВАННЫХ ОКСИДАМИ СКАНДИЯ И ИТТРИЯ</b></p>	
12:15-12:30	<p><b>М.А. Борик<sup>1</sup>, <u>В.Р. Боричевский<sup>2</sup></u>, А.В. Кулебякин<sup>1</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>1</sup>, Ф.О. Милович<sup>2</sup>, В.А. Мызина<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>3</sup>, Н.В. Сидорова<sup>3</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>2</sup></b>  1 - Институт общей физики  им. А.М. Прохорова РАН, Москва.  2 - Национальный исследовательский  технологический университет  «МИСиС», Москва.  3 - Национальный исследовательский  Мордовский государственный  университет им. Н.П. Огарёва, Саранск</p> <p><b>ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЗМОВ УПРОЧНЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ ZrO<sub>2</sub> ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННОГО Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b></p>	
14:00	<b>ПОДВЕДЕНИЕ ИТОГОВ КОНФЕРЕНЦИИ-ШКОЛЫ</b>	

# **ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА**

# РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ГАЛОГЕНИД СЕРЕБРЯНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Д.Д. Салимгареев, А.Е. Львов, В.С. Корсаков, А.С. Корсаков, Л.В. Жукова,  
И.А. Кашуба

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России*

*Б. Н. Ельцина, Екатеринбург*

*E-mail: [viktor.korsakov@urfu.ru](mailto:viktor.korsakov@urfu.ru)*

В России в последние пять лет стабильно растёт выработка электроэнергии, приходящаяся на атомные электростанции. Однако, в хранилищах радиоактивных отходов, горячих камерах, напорных спец. канализациях и других объектах при повышенном радиационном фоне протекают различные химические реакции, которые необходимо контролировать с использованием ИК-Фурье спектроскопии, благодаря которой через регистрацию пиков поглощения можно судить о качественном и количественном составе среды, а также наблюдать кинетику происходящих процессов. Размещение спектрометра в непосредственной близости к источникам ионизирующего излучения приводит к выходу его из строя, таким образом, актуальной представляется задача разработки радиационно-стойких оптических каналов доставки аналитического сигнала [1].

Исследована радиационная стойкость оптических волокон полученных из кристаллов составов 1, 10, 21, 78 и 100 мол. %  $\text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$  в  $\text{AgBr}$ . Измерения выполнены на линейном ускорителе электронов модели УЭЛР-10-10С в ИВЦ «Центр радиационной стерилизации». Была последовательно накоплена доза облучения 100 кГр. Зависимость оптических потерь после облучения приведена на рисунке 1.

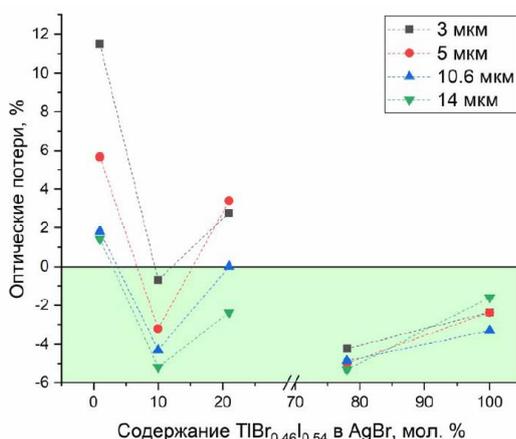


Рис. 1. Изменение оптических потерь волокон после воздействия ионизирующего излучения

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-73-10063).

1. А.В. Королева, Новый метод исследования инфракрасных спектров фазовых состояний водных систем при различных температурах. Дисс., Москва, МГУ, 2016.

# ЛАЗЕРНОЕ ОБЕСЦВЕЧИВАНИЕ ЦЕНТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ВИСМУТОВЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ

А.В. Харахордин, С.В. Алышев, Е.Г. Фирстова, С.В. Фирстов, Е.М. Дианов  
Научный центр волоконной оптики РАН, Москва  
E-mail: [fir@fo.gpi.ru](mailto:fir@fo.gpi.ru)

Волоконные световоды, легированные висмутом, обладают уникальными спектрально-люминесцентными характеристиками, которые позволяют генерировать и усиливать оптическое излучение в области длин волн 1150 – 1800 нм.

В данной работе приводятся результаты исследования недавно обнаруженного оптического эффекта – явления фотообесцвечивания активных центров под воздействием лазерного излучения, заключающегося в исчезновении полос поглощения и люминесценции висмутовых активных центров (ВАЦ) [1]. На рис. 1(а) представлена диаграмма энергетических уровней ВАЦ, ассоциированного с германием, с излучательными переходами, соответствующие полосам люминесценции, показанным на рис. 1(б, в). При облучении световода на  $\lambda_p = 532$  нм происходит существенное снижение интенсивности всех полос люминесценции, принадлежащих данному ВАЦ. Проведено детальное изучение наблюдаемого явления, получены оригинальные результаты, которые будут представлены на предстоящей конференции.

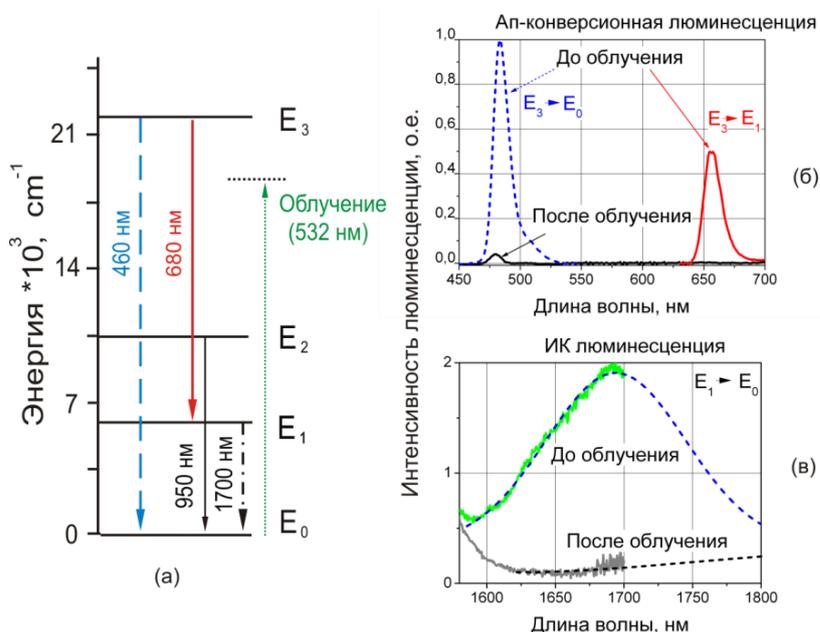


Рис.1. Фотообесцвечивание ВАЦ: схема энергетических уровней с излучательными переходами (а); ап-конверсионная (б) и ИК люминесценция (в) при возбуждении на 925 нм до и после облучения на длине волны 532 нм

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 18-32-00148).

1. S.V. Firstov et al., Opt. Express **23**, 19226 (2015).

ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЗАВИСИМОЕ УСИЛЕНИЕ  
В ГЕРМАНОСИЛИКАТНЫХ СВЕТОВОДАХ, ЛЕГИРОВАННЫХ  
ВИСМУТОМ

К.Е. Рюмкин<sup>1</sup>, С.В. Фирстов<sup>1</sup>, М.А. Мелькумов<sup>1</sup>, В.Ф. Хопин<sup>2</sup>,  
В.В. Вельмискин<sup>1</sup>, А.Н. Денисов<sup>1</sup>, С.Л. Семенов<sup>1</sup>, Е.М. Дианов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

<sup>2</sup>Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН,

Нижний Новгород

E-mail: [3bc@mail.ru](mailto:3bc@mail.ru)

На данный момент на основе висмутовых активных световодов разработано большое количество лазерных устройств в спектральном диапазоне от 1150 до 1750 нм [1]. При исследовании усилителей и суперлюминесцентных волоконных источников [2] было обнаружено, что степень поляризации выходного сигнала СВИ существенно зависит от поляризации сигнала накачки, а коэффициент усиления от взаимного расположения поляризации 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 давно изучен в световодах, легированных эрбием [3], для висмутовых световодов подобные исследования проводятся впервые.

Для измерения поляризационно-зависимого усиления был изготовлен световод типа PANDA, сохраняющий поляризацию введенного в него излучения за счет большого двулучепреломления, с сердцевиной на основе германосиликатного стекла, легированного висмутом. Измерено поляризационно-зависимое усиление, определено соотношение между минимальным и максимальным усилением висмутовых активных центров. Максимальное усиление достигалось при условии сонаправленности вектора поляризации сигнала с вектором поляризации накачки, а в случае их перпендикулярности усиление минимально. Было показано, что коэффициент усиления существенно зависит от взаимного расположения поляризации накачки и сигнала. Данные наблюдения свидетельствуют о том, что сечения поглощения и люминесценции висмутовых активных центров не изотропны и существенно отличаются в различных проекциях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00927.

1. I.A. Bufetov et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron **20**, 111 (2014).
2. К.Е. Рюмкин et al., Opt. Lett. **37**, 4817 (2012).
3. V.J. Mazurczyk, J.L. Zyskind, IEEE Photon. Technol. Lett. **6**, 616 (1994).

# ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ВОЛОКОННЫЙ ГОЛЬМИЕВЫЙ ЛАЗЕР С ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫМ МОДУЛЯТОРОМ МАХА-ЦЕНДЕРА

И.В. Жлуктова<sup>1</sup>, В.А. Камынин<sup>1,2</sup>, В.Г. Воронин<sup>3</sup>, О.Е. Наний<sup>3</sup>,  
В.Б. Цветков<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>2</sup>Ульяновский государственный университет, Ульяновск

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

<sup>4</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва

E-mail: [iv.zhuktova@gmail.com](mailto:iv.zhuktova@gmail.com)

Волоконные лазеры, работающие в режиме модуляции добротности, спектр излучения которых лежит в двухмикронном спектральном диапазоне, имеют перспективы применения в таких областях как медицина, лазерная локация, нелинейная оптика и т. д. [1, 2]. Исследована полностью волоконная схема лазера с модуляцией добротности, предложенная в статье [3]. В качестве активной среды использовано гольмиевое волокно длиной 4,5 м, а в роли оптической накачки использовался волоконный иттербиевый лазер с длиной волны 1125 нм. Излучение накачки вводилось через волоконную брэгговскую решетку (ВБР) с высоким коэффициентом отражения (99 %) на длине волны 2098 нм и выходным зеркалом, которым являлся коннектор с торцом прямой полировки с коэффициентом френелевского отражения 4 %. Так же в резонаторе лазера был расположен полностью волоконный модулятор, созданный по схеме интерферометра Маха-Цендера.

Получена импульсно – периодическая генерация на длине волны 2098 нм с длительностью импульсов от 0,8 мкс до 1,56 мкс, частотами следования 11,2 кГц и 22,4 кГц, максимальной пиковой мощностью 3,9 Вт и энергией импульса ~ 3,5 мкДж.

Исследование было поддержано Российской Академией Наук в рамках программы «Основные и прикладные задачи фотоники и физики новых оптических материалов» (Проект № I.25П) и Министерством Образования и Науки Российской Федерации (Проект № 14.Z50.31.0015).

1. K. Scholle et al., Croatia, InTech 471 (2010).
2. С.А. Филатова и др., Прикладная фотоника **1**, 130 (2014).
3. В.Г. Воронин, В.А. Камынин, Прикладная фотоника **2 (2)**, 135 (2015).

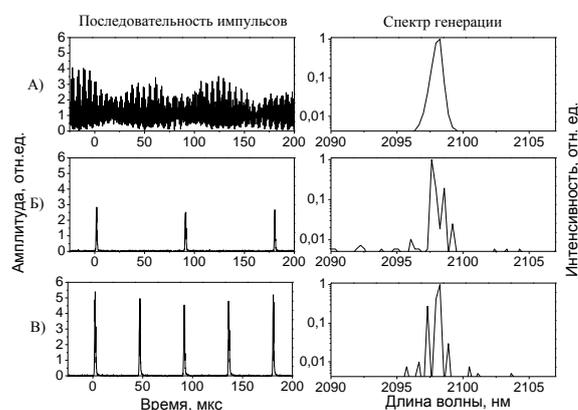


Рис. 1. Последовательности импульсов генерации гольмиевого импульсно-периодического лазера (слева) и спектры лазерного излучения (справа). А – без модуляции при накачке 1,8 Вт; Б – амплитуда напряжения на модуляторе 10 В и накачка 1,8 Вт, В – амплитуда напряжения на модуляторе 10 В и накачка 2,9 Вт

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОМОДОВЫХ ИТТЕРБИЕВЫХ СВЕТОВОДОВ, ОПТИМИЗИРОВАННЫХ ДЛЯ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ

Р.Р. Кашина<sup>1,2</sup>, А.А. Поносова<sup>1</sup>, В.П. Первадчук<sup>3</sup>, А.С. Смирнов<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

<sup>3</sup>Пермский государственный национальный исследовательский политехнический университет, Пермь  
E-mail: [NizamutdinovaRR@pnppk.ru](mailto:NizamutdinovaRR@pnppk.ru)

Передача мощного лазерного излучения на расстояния порядка нескольких десятков метров при помощи волоконных световодов является актуальной задачей современной оптоэлектроники. Препятствием в реализации волоконно-оптических систем передачи мощного лазерного излучения является появление нежелательных нелинейных эффектов, которые могут быть решены с помощью разработки волоконных световодов с увеличенным диаметром поля основной моды. В то же время, для увеличения размера поля, играет большую роль изгибные оптические потери в световоде: для создания одмодового режима с большим диаметром сердцевины, необходимо очень сильно снизить  $\Delta n$ , например, если диаметр сердцевины равен 30 мкм и длина волны отсечки 1 мкм, то  $\Delta n$  должно быть не более 0,002 при ступенчатом профиле показателя преломления (рис. 1), что в свою очередь приводит к огромным потерям на изгибах.

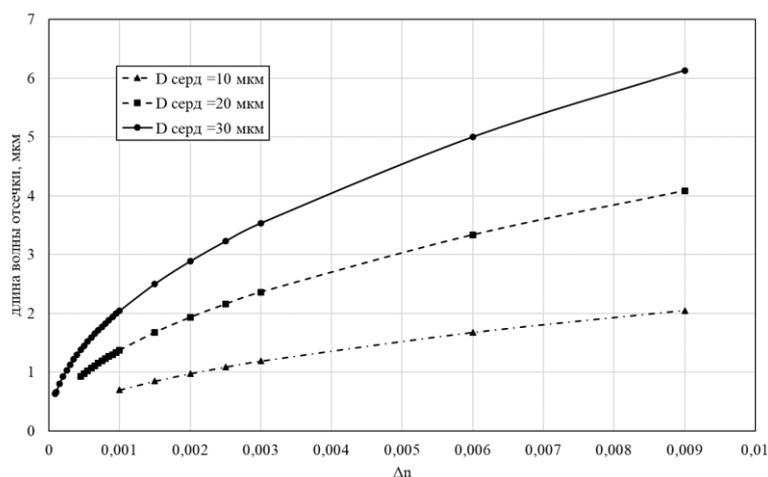


Рис. 1. Изменение длины волны отсечки в зависимости от  $\Delta n$

Целью данной работы является моделирование и оптимизация световодов, легированных ионами  $\text{Yb}^{3+}$ , для создания мощных волоконных лазеров и усилителей.

Моделирование проводилось в программном обеспечении Optiwave. В результате работы были разработаны модели оптимизированных световодов, легированных ионами  $\text{Yb}^{3+}$ .

# КОМПОЗИТНЫЕ СВЕТОВОДЫ С $\text{Er}^{3+}$ ФОСФАТНОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ ДЛЯ КОМПАКТНЫХ ВОЛОКОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Б.И. Галаган<sup>1</sup>, Б.И. Денкер<sup>1</sup>, О.Н. Егорова<sup>2</sup>, В.А. Камынин<sup>1</sup>,  
А.А. Поносова<sup>1,3</sup>, С.Е. Сверчков<sup>1</sup>, С.Л. Семенов<sup>2</sup>, В.Б. Цветков<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>2</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

<sup>3</sup>ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная  
компания», Пермь

<sup>4</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва

E-mail: [nastya-aleksi@mail.ru](mailto:nastya-aleksi@mail.ru)

Представлено исследование волоконных усилителей на основе композитных световодов с фосфатной сердцевинной и кварцевой оболочкой. Исходные фосфатные стекла, изготовленные для сердцевины волокон, содержали 1 вес. % и 3 вес. % эрбия. Вытянутые из заготовок световоды были одномодовыми на рабочей длине волны. Поглощение слабого сигнала в сердцевине образцов на длине волны 1535 нм составляло от 1,2 до 3,75 дБ/см, для 1 вес. % и 3 вес. %, соответственно.

Для исследования усиления был реализован однопроходный усилитель с попутной накачкой. Излучение накачки и усиливаемого сигнала вводились в композитный световод через спектрально-селективный ответвитель. Потери на сварке между композитными и кварцевыми волокнами составляли от 0,2 до 1 дБ на длине волны 980 нм. В качестве источника сигнала использован непрерывный волоконный лазер мощностью до 10 мВт и длиной волны 1536 нм. Проведена оптимизация длины активных волокон усилителей (рис. 1).

В работе получены высокие коэффициенты усиления слабого сигнала ( $-30$  дБм) при малых длинах активного световода. Коэффициент усиления составлял 36 дБ в 3 вес. % Er волокне длиной 20 см и 38 дБ в 1 вес. % Er волокне длиной 50 см.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-01010.

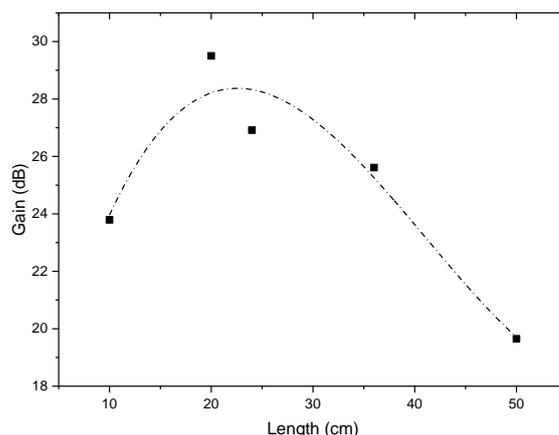


Рис. 1. Зависимость коэффициента усиления от длины световода для входного сигнала  $-20$  дБм (3 вес. % Er)

# ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГЕНЕРАЦИИ ЭРБИЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

А.Р. Рахматуллина<sup>1</sup>, И.С. Азанова<sup>1,2</sup>, М.К. Цибиногина<sup>2</sup>, О.Л. Кель<sup>2</sup>,  
А.А. Поносова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

<sup>2</sup>ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь

E-mail: [aly\\_physicist@mail.ru](mailto:aly_physicist@mail.ru)

Волоконные эрбиевые лазеры широко применяются в телекоммуникациях, науке, промышленности и медицине. Диапазон излучения ионов эрбия соответствует минимальным потерям в традиционных кварцевых световодах и при этом безопасно для человека.

Эффективность генерации ионов определяется сечениями поглощения и люминесценции ионов, а также наличием кластеризованных ионов, безызлучательно поглощающих излучение накачки и сигнала. Поэтому работа в длинноволновом диапазоне, где сечение поглощения кластеров меньше, может повысить эффективность лазера.

Цель работы заключалась в исследовании эффективности генерации эрбиевых световодов в диапазоне от 1,518 до 1,585 мкм.

Эрбиевые световоды исследованы в схеме волоконного лазера средней мощности со встречной накачкой (рис.1а). В качестве источника накачки был использован полупроводниковый лазерный диод (980 нм). Излучение накачки вводилось в активный световод через WDM. В качестве активной среды использовались оптические волокна с концентрацией  $\text{Er}^{3+}$  порядка  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ , предоставленные ПАО ПНППК. Резонатор лазера был образован волоконными брэгговскими решетками с разной центральной длиной волны с коэффициентом отражения, близким к 100 %, и прямым торцом волокна с другой стороны резонатора.

Проведено измерение спектров излучения в зависимости от длины волокна во всем спектральном диапазоне люминесценции ионов эрбия. Показано, что максимальная эффективность генерации наблюдается в более длинноволновой части спектра по сравнению с пиком люминесценции эрбия (рис.1б).

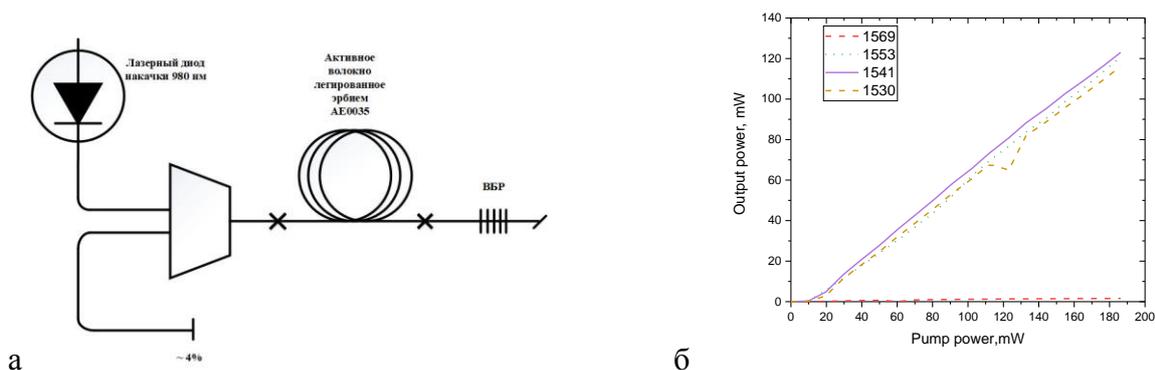


Рис. 1. а - схема лазера; б – эффективность работы лазера при разных ВБР

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ СУПЕРКОНТИНУУМА В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

А.В. Жаворонкин, А.А. Мاستин  
*Технопарк-Мордовия, Саранск*  
*E-mail: [mastinaa@mail.ru](mailto:mastinaa@mail.ru)*

Исследование генерации суперконтинуума в оптических волокнах привлекает значительное внимание по причине его потенциального использования в телекоммуникационных системах, генерации оптических импульсов ультракороткой длительности, оптической когерентной томографии и оптической метрологии [1].

В работе приведены результаты численного моделирования генерации суперконтинуума полученного при вводе оптического импульса накачки в область аномальной дисперсии близи точки нуля дисперсии оптического волокна с высокой нелинейностью. Также приведены результаты анализа структуры сигнала суперконтинуума методом XFROG спектрограмм.

1. А.М. Желтиков, УФН **176 (6)**, 623 (2006).

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГОТОВОК И ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ТЕЙПЕРИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

И.Л. Воробьев, А.В. Кривовичев, А.Б. Пакалин, С.А. Смирнов,

Ю.К. Чаморовский

*Технопарк-Мордовия, Саранск*

*E-mail: [newsmirnov@mail.ru](mailto:newsmirnov@mail.ru)*

Специальные волоконные световоды, приборы на их основе находят все более широкое применение во многих отраслях: медицина, лазерная обработка материала, нефтегазовая, авиакосмическая, атомная отрасли и другие. Разнообразие сфер применений, а также нарастающая конкуренция производителей, предъявляет все большие требования к оптическим, геометрическим, механическим параметрам специальных волоконных световодов.

Получен новый тип тейперированных волоконных световодов, который может быть использован в волоконных лазерах и усилителях, получивших широкое распространение во многих областях промышленности, медицины и науки. Проведены исследования оптических свойств полученных опытных образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

# ИЗУЧЕНИЕ НЕПРОСВЕТЛЯЕМЫХ ПОТЕРЬ В ФОСФОРСИЛИКАТНЫХ СВЕТОВОДАХ, ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ

А.М. Хегай<sup>1,2</sup>, М.А. Мелькумов<sup>1</sup>, С.В. Фирстов<sup>1</sup>, Ф.В. Афанасьев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>3</sup>Институт химии высокочистых веществ РАН, Нижний Новгород

E-mail: [khegai@fo.gpi.ru](mailto:khegai@fo.gpi.ru)

Импульсные источники на основе фосфоросиликатных (ФС) висмутовых световодов (ВС) представляют исключительный интерес в науке, технике и медицине, так как позволяют получать лазерное излучение в области 1,3 мкм [1]. Преимуществом использования ВС является возможность реализовывать полностью волоконные лазерные источники, помимо этого, силикатная матрица активного световода позволяет использовать стандартные волоконные компоненты для реализации рабочей схемы. При разработке высокоэнергетичных импульсных источников важным параметром, порой определяющим максимально достижимую энергию, является уровень просветления (отношение поглощения слабого сигнала к непросветляемым потерям). В действительности, в ВС данный параметр играет существенно большую роль, в сравнении с волокнами, легированными редкоземельными элементами, так как величина просветления, например, в ФС ВС при накачке на длине волны  $\sim 1,23$  мкм не превышает 13 (для лучших иттербиевых световодов данный параметр может составлять  $\sim 10^5$ ). Поэтому для оптимизации работы импульсных висмутовых лазеров в плане повышения выходной энергии в импульсе необходимо детальное изучение непросветляемых потерь.

В данной работе мы исследовали зависимость непросветляемых потерь в ФС ВС от длины волны излучения накачки (рис. 1(а)) и от типа просветляющего излучения: импульсное, с различной частотой повторения или непрерывное (рис. 1(б)).

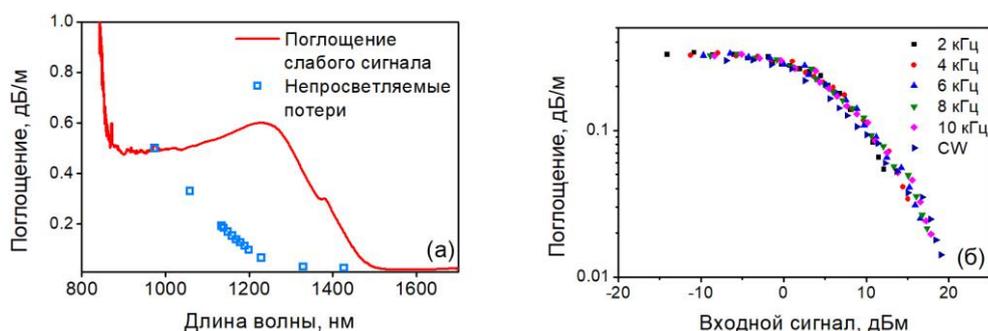


Рис. 1. Спектр поглощения и непросветляемых потерь в ФС ВС (а) и зависимость поглощения на длине волны 1,33 мкм от мощности (б)

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-32-00438).

1. А.М. Хегай и др., Квантовая электроника **46**, 1077 (2016).

# ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ТЕЙПЕРНЫХ ВОЛОКОН С ВЫСОКИМ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕМ

Й. Риссанен<sup>1</sup>, В.Н. Филиппов<sup>2</sup>, Ю.К. Чаморовский<sup>3</sup>, В. Устимчик<sup>3</sup>,  
С. Попов<sup>3</sup>, М.С. Алимбеков<sup>4</sup>, П.Е. Железов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Технологический университет Тампере, Тампере

<sup>2</sup>Ампликоникс, Тампере

<sup>3</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Москва

<sup>4</sup>Технопарк-Мордовия, Саранск

E-mail: [iamhellio@gmail.com](mailto:iamhellio@gmail.com)

Одним из подходов к увеличению выходной мощности волоконных лазеров является технология тейперных волокон с двойной оболочкой (TDCF), впервые внедренная в Технологическом университете Тампере [1]. TDCF представляет собой оптическое волокно с увеличением диаметра вдоль оси и обеспечивает одномодовое распространение излучения в многомодовом волокне. Тейперные волокна, легированные редкоземельными ионами, были успешно продемонстрированы в высокомошных волоконных лазерах и усилителях и могут потенциально использоваться для усиления оптической мощности до уровня МВт [2].

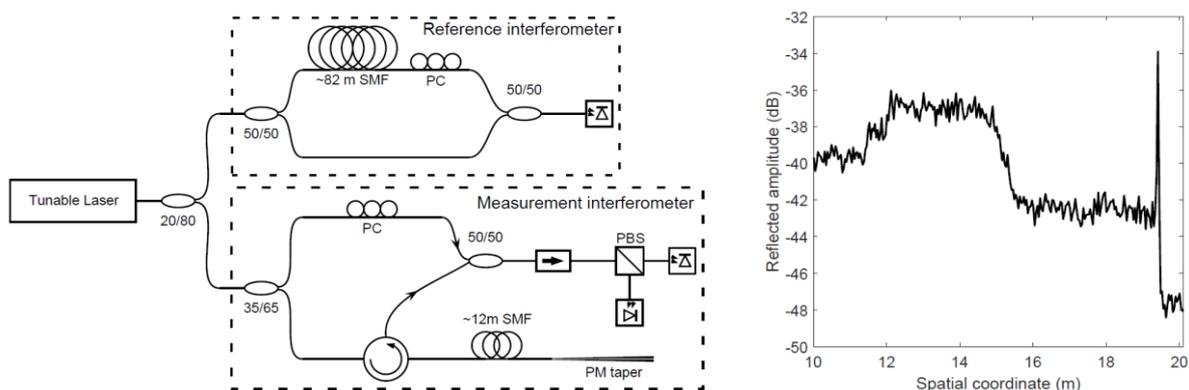


Рис. 1. Схема установки OFDR измерений и картина рэлеевского рассеяния в эллиптическом тейпере

Одной из наиболее важных характеристик тейперных волокон с сохранением поляризации является профиль двулучепреломления. Инновационным и неразрушающим способом измерения является использование высокочувствительной оптической частотной рефлектометрии (OFDR) [3].

Установка OFDR может фиксировать картину рэлеевского рассеяния в тейпере, показанную на рис. 1. В настоящей работе представлены предварительные результаты характеризизации двух тейперных волокон, сохраняющих поляризацию (PM): один с эллиптическим сердечником, а другой с круглым сердечником и эллиптической напрягающей оболочкой.

1. V. Filippov et al., Optics Express **16**, 1929 (2008).
2. V. Filippov et al., Proc. SPIE **9728**, 97280V (2016).
3. M. Froggatt et al., JLT **24**, 4149 (2006).

## МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА (ВОЛНОВОДЫ): КЛАССИФИКАЦИЯ, ПРИЛОЖЕНИЯ

К.А. Бжеумихов<sup>1</sup>, З.Ч. Маргушев<sup>1</sup>, А.А.Бжеумихов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт информатики и проблем регионального управления  
Кабардино-Балкарского научного центра РАН, Нальчик*

<sup>2</sup>*Institute for Scientific Instruments GmbH, Berlin*

*E-mail: [kazbek\\_ba@inbox.ru](mailto:kazbek_ba@inbox.ru)*

Материал посвящен одному из таких направлений волоконной оптики как «микроструктурированные оптические волокна» (МОВ). На основании анализа работ, опубликованных различными научными группами за прошедшие двадцать с лишним лет, сделана попытка классификации известных на сегодняшний день конструкции МОВ с учётом, как особенностей геометрии, так и основных физических свойств которая, по нашему мнению, может стать основой стандартизации. Такие попытки ранее были предприняты в [1, 2]. Также, недавно Бенабид (Benabid) в своём презентационном материале привёл составленную Расселом (Russell) оригинальную «PCF Family Tree» [3]. Учитывая интенсивность развития в этой области за прошедшее с тех пор время, представленные в этих материалах варианты классификации требуют значительного дополнения, чему и посвящена данная работа.

Предложенная нами классификационная древовидная архитектура отражает как различие классов волокон по двум признакам (особенности конструкции и основные волноводные механизмы), так и существующие взаимосвязи отдельных классов. Это «идеология» заложена и в самых сокращённых названиях (апронимах) волокон что, на наш взгляд, позволяет систематизировать уже существующие конструкции волокна и в какой-то степени, позволяет сделать прогноз дальнейшего развития - какая «ветвь», в каком направлении может развиваться. Это актуально, поскольку постепенно появляются новые конструкции или модификации известных волноводов, расширяя «древовидную» классификационную архитектуру в целом. Также немаловажен и такой аспект как стандартизация данных классов волокон, по аналогии с (стандартными) телекоммуникационными, при их промышленном производстве в будущем.

1. A. Bjarklev, J. Broeng, A.S. Bjarklev, Photonic Crystal Fibres. Kluwer Academic Publishers Boston, 2003. 298 p.
2. А.М. Желтиков, УФН **174** (1), 73 (2004).
3. Электронный ресурс: <http://www.elettromagnetismo.it/wp-content/uploads/2017/03/Invited-Benabid.pdf>

# МИНИАТЮРНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО

А.М. Минкин<sup>1</sup>, Н.С. Созонов<sup>2</sup>, К.М. Фадеев<sup>1</sup>, Д.И. Шевцов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь

<sup>2</sup>ООО «Инверсия-Сенсор», Пермь

E-mail: [constantinefadeev@gmail.com](mailto:constantinefadeev@gmail.com)

В докладе демонстрируется новый миниатюрный вариант реализации волоконно-оптического датчика давления (ВОДД), потенциально способный выдерживать давление более 50 бар и температуру более 600 °С. Рассматриваются результаты, полученные на одном из первых образцов.

Чувствительным элементом ВОДД является мембрана, выполненная из боросиликатного стекла по технологии травления. Толщина мембраны в чувствительной области составляет 50 мкм, диаметр чувствительной области 600 мкм.

В чувствительной части, излучение частично отражается и частично проходит через полость, сформированную торцом оптического волокна и внутренней стенкой мембраны. Воздушная полость составляет 450 мкм. Далее свет частично проходит в мембрану, где частично отражается третий раз от внешней стенки мембраны. Таким образом, чувствительная часть датчика создаёт три отражения: одно от торца оптического волокна и два других от двух поверхностей мембраны. Благодаря взаимодействию отраженных лучей на фотоприемнике образуется интерференционная картина.

По результатам эксперимента, вследствие изменения давления, действующего на мембрану датчика, происходило смещение спектра (рис. 1). Чувствительность датчика к давлению составляет 150 пм/бар.

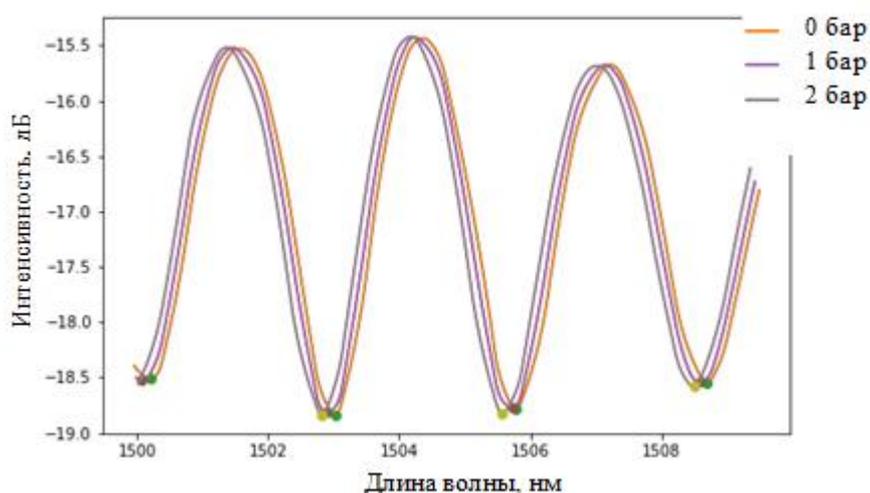


Рис. 1. Смещение спектра под действием давления

Датчик также чувствителен к температурным изменениям. Чувствительность датчика составляет 20 пм/°С.

# МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В СВЕТОВОДЕ С КАСКАДНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ ДИСПЕРСИИ ОТ ДЛИНЫ

И.О. Золотовский, В.А. Лапин, Д.И. Семенцов

Ульяновский государственный университет, Научно-технологический институт им. С.П. Капицы, Ульяновск

E-mail: [LVA2013@yandex.ru](mailto:LVA2013@yandex.ru)

Модуляционная неустойчивость (МН) – рост малых гармонических возмущений непрерывной волны – эффект, характерный для многих нелинейных систем, поддерживающих распространение локализованных волн, обусловленный совместным действием нелинейных и дисперсионных эффектов [1].

В работе исследовалось распространение квазинепрерывной модулированной волны в двухсекционных световодах, обладающих непрерывной каскадной зависимостью дисперсии от длины вида:

$$d_2 = d_{20} \cdot \begin{cases} 1, & z < z_0 \\ \exp[-b(z - z_0)], & z \geq z_0 \end{cases} \quad (1)$$

На рис. 1 представлены зависимости максимальных мощностей модулированной волны от продольной координаты  $z$ , полученные при помощи решения уравнения для огибающей (НУШ), методом Фурье расщепления по компонентам (SSFM) [2].

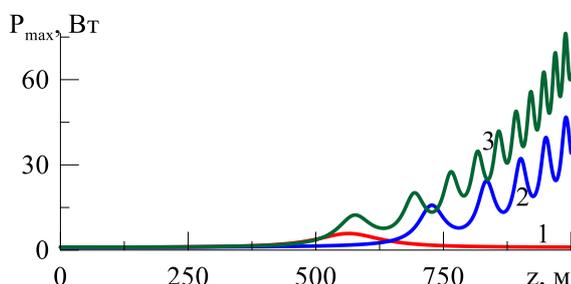


Рис. 1. Продольные зависимости максимумов мощности модулированной волны при  $d_{20} = -10^{-26} \text{ с}^2/\text{м}$ ,  $R = 10^{-2} (\text{Вт} \cdot \text{м})^{-1}$  для случаев однородного световода; неоднородного и каскадного с  $z_0 = 300 \text{ м}$  – кривые (1; 2; 3)

Показано, что правильный подбор длины однородного сегмента рассматриваемого в работе каскадного соединения может обеспечить устойчивую генерацию высокочастотных последовательностей ультракоротких импульсов с большей пиковой мощностью, чем при использовании однородного неоднородного световода.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 18-32-00957).

1. G. Agrawal, Applications of Nonlinear Fiber Optics. Elsevier Science, 2010.
2. И.О. Золотовский и др., Оптика и спектроскопия **122** (3), 490 (2017).

# ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ КОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОМ ЭРБИЕВОМ ВОЛОКНЕ

Б.И. Галаган<sup>1</sup>, Б.И. Денкер<sup>1</sup>, О.Н. Егорова<sup>2</sup>, И.В. Жлуктова<sup>1</sup>,  
В.А. Камынин<sup>1</sup>, А.А. Поносова<sup>1,3</sup>, С.Е. Сверчков<sup>1</sup>, С.Л. Семенов<sup>2</sup>,  
В.Б. Цветков<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>2</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

<sup>3</sup>ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь

<sup>4</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

E-mail: [iv.zhuktova@gmail.com](mailto:iv.zhuktova@gmail.com)

При усилении ультракоротких импульсов в волоконных усилителях нелинейные эффекты приводят к деформации спектра и увеличению длительности импульсов. Для того чтобы сохранить длительность импульсов, используют системы декомпрессор/усилитель/компрессор или, при получении невысоких мощностей можно использовать усилитель, с малой длиной активного волокна и высоким коэффициентом усиления.

В работе проведено исследование усиления коротких импульсов в компактном усилителе на основе композитного волокна. В качестве задающего генератора использован импульсный лазер с синхронизацией мод на нелинейном вращении поляризации. Усилитель представлял собой однопроводную схему с попутной накачкой. В качестве усиливающей среды было использовано волокно с фосфатной сердцевиной, сильнолегированной ионами эрбия, и кварцевой оболочкой длиной 20 см. Волокно являлось одномодовым в диапазоне люминесценции ионов эрбия. Для создания инверсии населенности в активной среде был использован диод накачки с длиной волны 980 нм и максимальной мощностью до 540 мВт. Проведено исследование спектральных характеристик лазерного излучения и длительности импульсов после усиления (рис. 1).

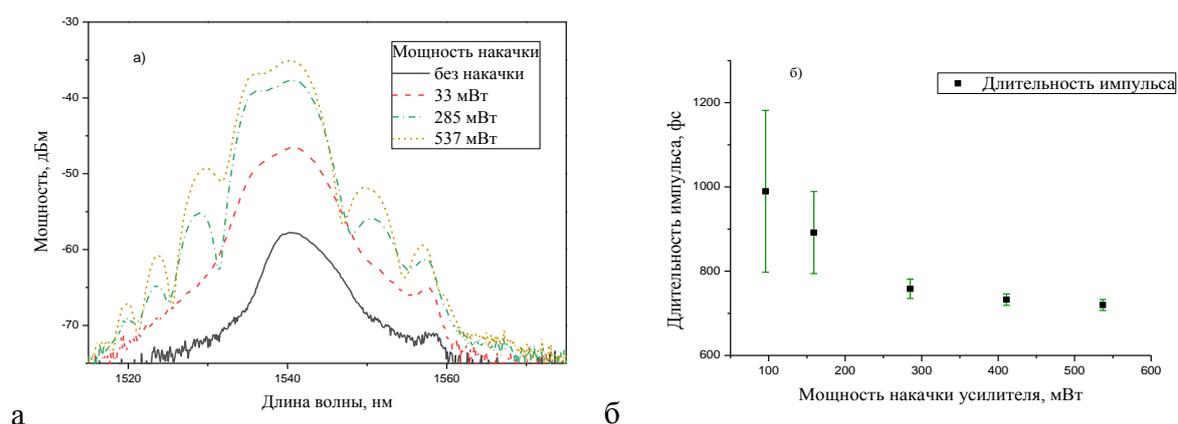


Рис. 1. Динамика изменения спектра излучения при увеличении мощности накачки усилителя (а) и длительность импульсов (б)

После усиления наблюдается изменение спектральных характеристик импульсного излучения, при этом длительность импульсов остается неизменной в пределах погрешности измерительного оборудования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-01010.

# ВОЛОКОННЫЙ ИТТЕРБИЕВЫЙ ЛАЗЕР С КОЛЬЦЕВЫМ ВОЛОКОННЫМ ЗЕРКАЛОМ

П.Е. Железов, М.С. Алимбеков  
Технопарк-Мордовия, Саранск  
E-mail: [z\\_1390@mail.ru](mailto:z_1390@mail.ru)

Задающие волоконные лазеры являются неотъемлемой частью различных лазерных систем, а также генераторами излучения для дальнейшего усиления в высокомоощных волоконных лазерах и конических усилителях. Поэтому выходное излучение задающего лазера должно иметь стабильные временные и спектральные характеристики, такие как: центральная длина волны, ширина спектра, длительность импульса, выходная мощность.

Разработанный авторами иттербиевый волоконный лазер, схема которого представлена на рис. 1, содержит в петле кольцевого волоконного зеркала участок волокна с сохранением поляризации. Это дает кольцевому зеркалу свойства фильтра: спектральная функция передачи проявляет выраженные периодические колебания [1, 2]. Глубина модуляции зависит от коэффициента деления кольцевого зеркала, а период обратно пропорционален коэффициенту двулучепреломления или длине биений волокна с сохранением поляризации и длине этого волокна [3].

Благодаря дополнительному свойству фильтра данный лазер имеет стабильный выходной спектр, среднюю выходную мощность и длительность импульса.

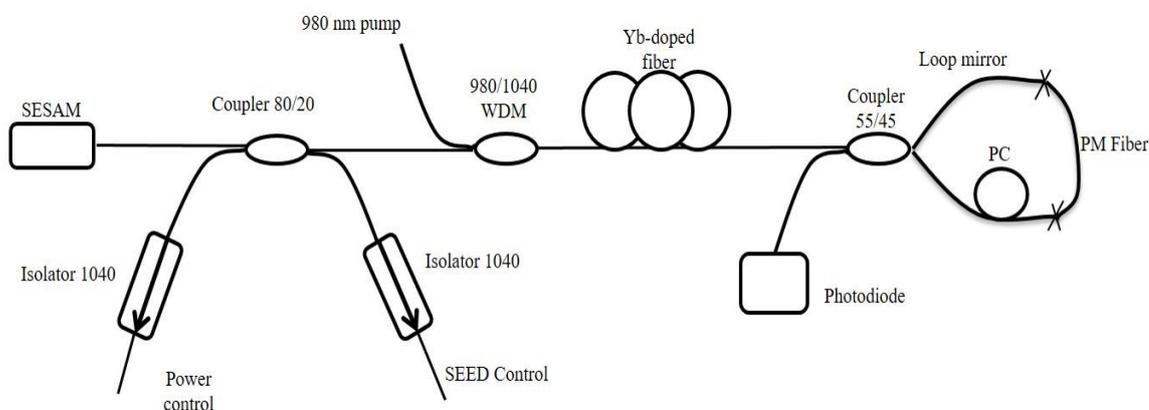


Рис. 1. Схема волоконного иттербиевого лазера с кольцевым волоконным зеркалом, содержащим волокно с сохранением поляризации

1. J. Wang, K. Zheng et al., *Optics Express* **17(13)**, 10573 (2009).
2. S. Feng et al, *Optics Communications* **277 (2)**, 322 (2007).
3. O. Frazão et al., *Sensors* **7**, 2970 (2007).

# АП-КОНВЕРСИОННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ Р-ЭЛЕМЕНТАМИ (Bi, Te, Pb), ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ В ИК ДИАПАЗОНЕ

Е.Г. Фирстова<sup>1</sup>, А.В. Харахордин<sup>1</sup>, С.В. Алышев<sup>1</sup>, С.В. Фирстов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

E-mail: [kilena85@mail.ru](mailto:kilena85@mail.ru)

В настоящее время большое внимание уделяется разработке оптических материалов, способных преобразовывать излучение ближнего ИК диапазона в излучение видимой части спектра, что определяется широким кругом практических применений в медицине, фотонике, микроскопии, лазерной физике и других областях. Как правило, основное внимание сосредоточено на изучении ап-конверсионных свойств редкоземельных ионов в различных средах [1].

В данной работе изучалась ап-конверсионная люминесценция, возникающая в волоконных световодах, легированных р-элементами, в частности, Bi, Pb, Te. В висмутовых световодах были обнаружены полосы ап-конверсионной люминесценции, спектральное положение и интенсивность которых зависит от температуры, химического состава стеклянной матрицы и длины волны возбуждающего излучения. Типичные спектры ап-конверсионной люминесценции Bi-легированных световодов различного типа представлены на рис. 1. Аналогичные исследования проведены для световодов, легированных Te и Pb.

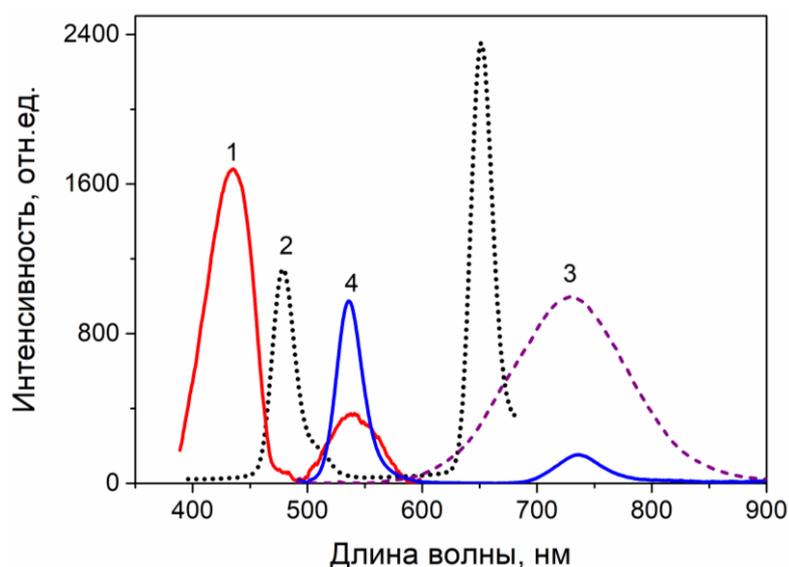


Рис. 1. Ап-конверсионная люминесценция различных типов висмутовых световодов: 1 – Bi:SiO<sub>2</sub>; 2 - Bi:(GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>); 3 - Bi:(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub>); 4 - Bi:(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>)

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ) (грант 18-32-00148).

1. A. Nadort, J. Zhao, E.M. Goldys, *Nanoscale* **8**, 13099 (2016).

# ИК ВОЛОКОННЫЕ ПУЧКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ

Е.А. Корсакова, Н.А. Муфтахитдинова, А.С. Корсаков, Л.В. Жукова  
Уральский федеральный университет им. первого Президента России  
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург  
E-mail: [korsa5555@bk.ru](mailto:korsa5555@bk.ru)

Тепловизионные системы широко используются в энергетике. ИК волоконные сборки могут значительно расширить сферу применения данных систем. Они могут быть использованы в качестве зондов для *in situ* исследований тепловых сетей, теплообменников, двигателей, газовых турбин и других объектов. Они позволяют получать распределение теплового поля в ограниченных пространствах и в местах, где нет прямой видимости между объектом и тепловизионной камерой. Ранее сообщалось о ряде применений волоконных пучков из галогенидов серебра [1], но они не были связаны с энергетикой.

Мы изготавливали волоконные пучки методом экструзии из кристаллов галогенидов серебра. Пучки имеют широкое окно прозрачности 2,5-20 мкм, они гибкие, нетоксичны, негигроскопичны и способны передавать излучение, соответствующие температурам (-130 ÷ +1100 °С). На рис. 1а представлен пример изготовленного пучка длиной 300 мм. Пучок позволяет передавать тепловые изображения с минимальным размером 0,5 мм. Перекрестные помехи между соседними волокнами в пучке не превышают 5 %. Калибровка системы проведена с использованием нагретого тела с постоянной температурой (см. рис. 1б).

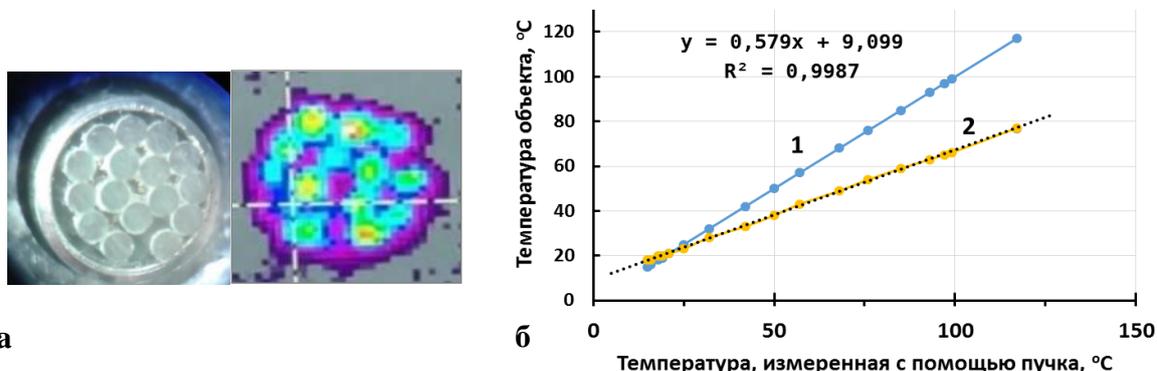


Рис. 1. а - изображение пучка из 16 галогенидсеребряных волокон диаметром 525 мкм, б - график калибровки для пучка: 1 - линия равных значений температур, 2 - измеренные значения температуры с учетом общих оптических потерь в системе

В ближайшем будущем необходимо повысить разрешение волоконного пучка, гибкость и удобство использования в труднодоступных местах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-73-10063).

1. Y. Lavi, A. Millo, A. Katzir, *Applied Optics* **45**, 5808 (2006).

## ИНФРАКРАСНЫЕ СВЕТОВОДЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А.А. Лашова, Д.А. Данилова, А.С. Корсаков, Л.В. Жукова  
*Уральский федеральный университет им. первого Президента России*  
*Б.Н. Ельцина, Екатеринбург*  
*E-mail: [l.v.zhukova@urfu.ru](mailto:l.v.zhukova@urfu.ru)*

В процессе работы ветроэлектрических установок (ВЭУ) происходит разогрев подшипников электродвигателя, смазывающего масла, обмоток генератора. Температура данных элементов может достигать 70-80 градусов Цельсия в связи с чем ВЭУ оснащены системой контроля температуры, включающей в себя датчики температуры, охлаждающие контуры и устройства впрыска охлаждающего масла в подшипники. На сегодняшний день измерение температуры осуществляется как классическими устройствами: термометрами сопротивления и термопарами, так и набирающими популярность волоконно-оптическими датчиками (ВОД).

Термоэлектрические преобразователи температуры способны проводить измерения в широком диапазоне, однако подвержены электромагнитным наводкам генератора и сильным вибрациям. Кварцевые ВОД помимо длинных волоконных каналов дополнительно требуют источник излучения – лазер, а также устройства для обработки оптических сигналов с высокими вычислительными мощностями.

Сотрудниками уральского федерального университета разработан и разрабатывается новый класс материалов фотоники на основе модифицированных галогенидов серебра и одновалентного таллия, прозрачных в ИК диапазоне от 2 до 60 мкм [1]. Изготовленные на их основе световоды обладают высокой механической прочностью, малыми оптическими потерями до 0,5 дБ/м, фотостойкостью и устойчивостью к радиации [1]. ИК световоды способны передавать тепловое излучение из труднодоступных мест и работать в условиях ЭМ помех и высоких вибраций, таким образом, могут применяться для теплового контроля подшипников и масел ВЭУ.

Инфракрасные ВОД, оснащенные ИК световодами, позволяют осуществлять прямое измерение температуры нагретых объектов бесконтактным методом путем передачи теплового сигнала к приемникам излучения, которые преобразуют его в значения температуры.

Данный метод контроля позволит существенно сократить длину волоконно-оптической линии, ускорить и упростить систему обработки оптических сигналов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-73-10063)

1. A.S. Korsakov et al., *Optical Materials* **62**, 534 (2016).

# **FIBER OPTICS**

## B-RADIATION RESISTENT OPTICAL FIBERS BASED ON MODIFIED SILVER HALIDE CRYSTALS

D.D. Salimgareev, A. E. Lvov, V.S. Korsakov, D.Y. Gul'ko, I.A. Kashuba,  
A.S. Korsakov, L.V. Zhukova

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Yekaterinburg, Russia*

*E-mail: [l.v.zhukova@urfu.ru](mailto:l.v.zhukova@urfu.ru)*

Power production with the use of nuclear power plants is steadily growing in Russia. Various chemical reactions, taking place in radioactive waste tank cubicles, hot cells, special force main sewage and other high radiation environments, should be monitored by means of FTIR spectroscopy. Due to this method, one can evaluate media composition qualitatively and quantitatively, and observe kinetics of various processes. Placing spectrometers in ionizing radiation zone leads to their failure, so the actual task is to develop radiation-resistant optical channels for the delivery of analytical signals from high radiation environment to normal one and vice versa [1].

We studied  $\beta$ -radiation resistance of optical fibers derived from crystals that contained 1, 10, 21, 78 and 100 mol. %  $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$  in AgBr. The samples were irradiated by means of a linear electron accelerator UELR-10-10C located in the ICC Center for Radiation Sterilization. The total accumulated dose was 100 kGy. Fig. 1. shows the change of the fiber optical losses after exposure to ionizing radiation.

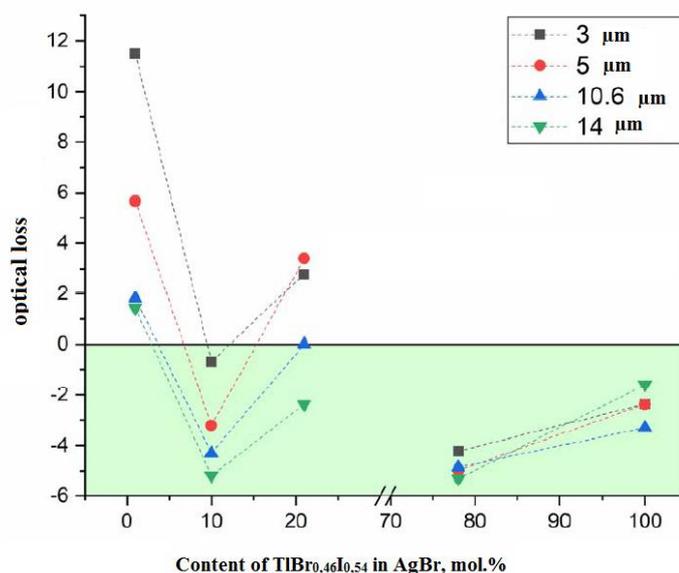


Fig. 1. Change fiber optical losses after exposure to ionizing radiation

This work is supported by the Russian Science Foundation under grant No. 18-73-10063.

1. A.V. Koroleva, New method for studying infrared spectra of phase states of water systems at different temperatures. Diss., Moscow, Moscow State University, 2016.

# LASER-INDUCED BLEACHING OF LUMINESCENCE CENTERS IN BISMUTH OPTICAL FIBERS

A.V. Kharakhordin, S.V. Alyshev, E.G. Firstova, S.V. Firstov, E.M. Dianov  
*Fiber Optics Research Center RAS, Moscow, Russia*  
*E-mail: fir@fo.gpi.ru*

Bismuth doped fibers possess unique optical characteristics that can provide the generation and amplification of optical radiation in the wavelength range 1150-1800 nm.

In this paper, we present the results on a detailed study of an optical effect recently discovered, namely the photobleaching of active centers under laser irradiation. It reveals itself in the decrease of absorption and luminescence intensity assigned to bismuth active centers (BACs) [1]. Fig. 1 (a) shows a diagram of the energy levels of the BAC associated with germanium, and main radiative transitions corresponding to the luminescence bands as shown in Fig. 1 (b, c). When the optical fiber is irradiated at  $\lambda_p = 532$  nm, the intensity of all the luminescence bands belonging to this BAC decreases substantially. A detailed study of the observed phenomenon was performed. The results obtained will be presented at the forthcoming conference.

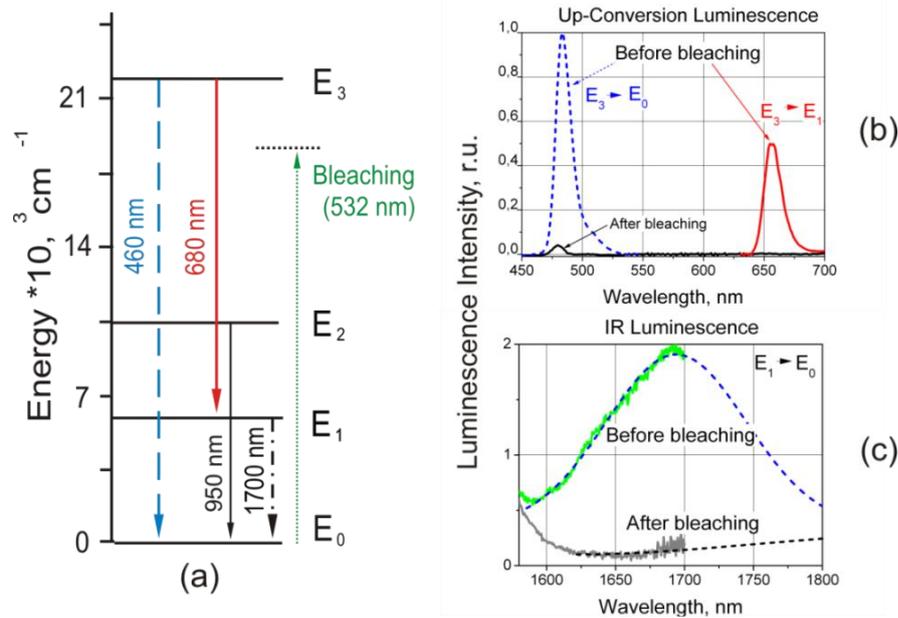


Fig.1. Photobleaching of BAC: scheme of energy levels with radiative transitions (a); up-conversion (b) and IR luminescence (c) upon excitation at 925 nm before and after irradiation at a wavelength of 532 nm

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (No. 18-32-00148).

1. S.V. Firstov et al., *Opt. Express* **23**, 19226 (2015).

## POLARIZATION-DEPENDENT GAIN IN GERMANIUM-SILICATE BISMUTH-DOPED FIBERS

K.E. Riumkin<sup>1</sup>, S.V. Firstov<sup>1</sup>, M.A. Melkumov<sup>1</sup>, V.F. Khopin<sup>2</sup>,  
V.V. Vel'miskin<sup>1</sup>, A.N. Denisov<sup>1</sup>, S.L. Semenov<sup>1</sup>, E.M. Dianov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Fiber Optics Research Center RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Chemistry of High-Purity Substances, RAS, Nizhny Novgorod,  
Russia*

*E-mail: [3bc@mail.ru](mailto:3bc@mail.ru)*

At the moment, a large number of laser devices have been developed on the basis of bismuth active fibers in the spectral range from 1150 to 1750 nm [1]. During the study of amplifiers and superluminescent fiber sources [2], it was found that the degree of polarization of the output signal of the SFS depends significantly on the polarization of the pump signal and gain depends on the mutual arrangement of the pump and signal polarizations. These observations indicate that the absorption and luminescence cross sections of bismuth active centers are not isotropic and have different values in different projections. The effect of polarization-dependent amplification has been studied for a long time in optical fibers doped with erbium [3], in bismuth-doped fibers such studies are carried out for the first time.

To measure the polarization-dependent amplification, a PANDA type optical fiber was fabricated, preserving the polarization of the propagating radiation by large birefringence, with a bismuth-doped germanium-silicate glass based core. The polarization-dependent gain was measured, the ratio between the minimum and maximum amplification in the bismuth active centers was determined. The maximum gain was achieved under the condition that the polarization vector of the signal is co-directed with the pump polarization vector, and in the case of their perpendicularity, the gain is minimal. It was shown that the amplification factor depends essentially on the mutual arrangement of the pump and signal polarization. These observations indicate that the absorption and luminescence cross sections of bismuth active centers are not isotropic and differ significantly in perpendicular projections.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-32-00927.

1. I.A. Bufetov et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron **20**, 111 (2014).
2. K.E. Riumkin et al., Opt. Lett. **37**, 4817 (2012).
3. V.J. Mazurczyk, J.L. Zyskind, IEEE Photon. Technol. Lett. **6**, 616 (1994).

## A PULSED-PERIODIC FIBER HOLMIUM LASER WITH A MACH-ZEHNDER INTRACAVITY MODULATOR

I.V. Zhluktova<sup>1</sup>, V.A. Kamynin<sup>1,2</sup>, V.G. Voronin<sup>3</sup>, O.E. Nanii<sup>3</sup>, V.B. Tsvetkov<sup>1,4</sup>

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

<sup>2</sup>*Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia*

<sup>3</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

*E-mail: [iv.zhluktova@gmail.com](mailto:iv.zhluktova@gmail.com)*

Fiber lasers operating in the Q-switched mode, whose emission spectrum lies in a two-micron spectral range, have prospects for applications in such areas as medicine, laser location, nonlinear optics, etc. [1, 2]. In this paper, we investigated a simple, all-fiber laser construction with Q-switching proposed in [3]. Holmium fiber 4.5 m long was used as the active medium, and a fiber ytterbium laser with a wavelength of 1125 nm was used as optical pumping. Pumping radiation was introduced through a fiber Bragg grating (FBG) with a high reflection coefficient (99 %) at a wavelength of 2098 nm and an output mirror, which was a connector with a straight polishing face with a Fresnel reflection coefficient of 4 %. Also in the laser resonator was located completely fiber modulator, created by the scheme of the Mach-Zehnder interferometer.

Pulsed-periodic generation at wavelength of 2098 nm was obtained with pulse widths from 0.8  $\mu\text{s}$  to 1.56  $\mu\text{s}$ , repetition rates of 11,2 kHz and 22,4 kHz, a maximum peak power of 3,9 W and pulse energy of  $\sim 3,5 \mu\text{J}$ .

The study was supported by the Russian Academy of Sciences in the framework of the program "Basic and applied problems of photonics and the physics of new optical materials" (Project No. I.25P) and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project No. 14.Z50.31.0015).

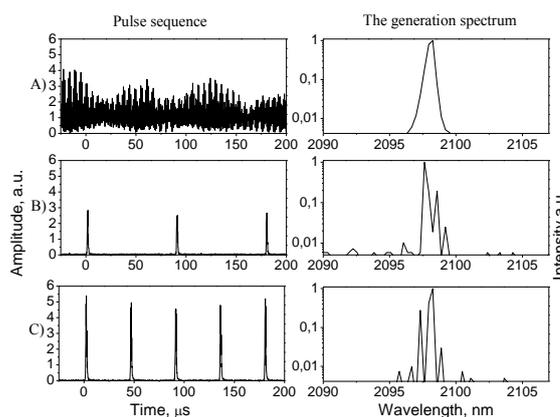


Fig. 1. Sequences of generation pulses of a pulsed-periodic ho-doped laser (on the left) and laser emission spectra (on the right). A - without modulation when pumped 1,8 W; B - voltage amplitude on the 10 V modulator and 1,8 W pumping, C - voltage amplitude on the 10 V modulator and pumping 2,9 W

1. K. Scholle et al., Croatia, InTech 471 (2010).
2. S.A. Filatova, V.B. Tsvetkov, A.S. Kurkov, Applied Photonics **1**, 130 (2014).
3. V.G. Voronin, V.A. Kamynin, Applied Photonics **2** (2), 135 (2015).

# DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF SINGLE-MODULAR ITERBIUM DOPED FIBERS PTIMIZED FOR POWER LASERS

R.R. Kashina<sup>1,2</sup>, A.A. Ponosova<sup>1</sup>, V.P. Pervadchuk<sup>3</sup>, A.S. Smirnov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Perm Scientific Industrial Instrument-Making Company, Perm, Russia

<sup>2</sup>Perm State National Research University, Perm, Russia

<sup>3</sup>Perm State National Research Polytechnic University, Perm, Russia

E-mail: [NizamutdinovaRR@pnppk.ru](mailto:NizamutdinovaRR@pnppk.ru)

The transmission of high-power laser radiation over distances of the order of several tens of meters by means of optical fibers is an actual task of modern optoelectronics. An obstacle in the implementation of fiber-optic transmission systems for high-power laser radiation is the appearance of undesirable non-linear effects, which can be solved by the development of optical fibers with an increased diameter of the fundamental mode field. At the same time, flexural optical losses in the optical fiber play a large role in increasing the field size: to create a single-mode operation with a large core diameter, it is necessary to greatly reduce  $\Delta n$ , for example, if the core diameter is 30  $\mu\text{m}$  and the cut-off wavelength is 1  $\mu\text{m}$ , then  $\Delta n$  must be no more than 0.002 for the stepped profile of the refractive index (fig. 1), which in turn leads to huge losses on the bends.

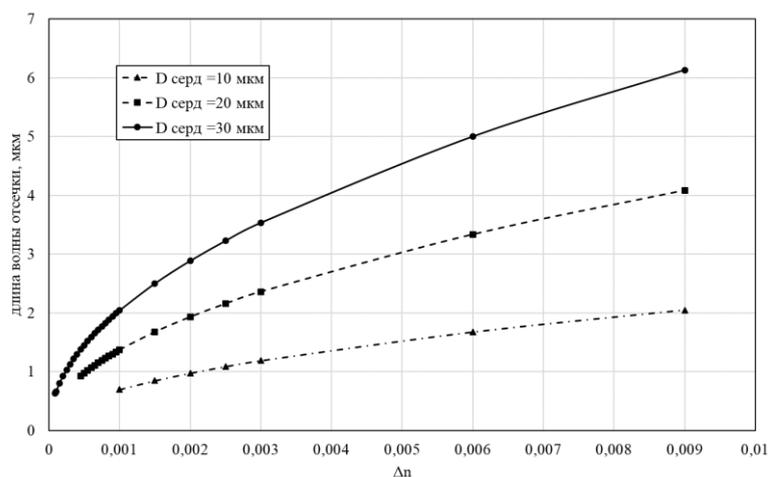


Fig. 1. The change in the cut-off wavelength as a function of  $\Delta n$

The aim of this work is the modeling and optimization of optical fibers doped with  $\text{Yb}^{3+}$  ions to create powerful fiber lasers and amplifiers.

The simulation was carried out in the Optiwave software. As a result of the work, models of optimized light guides doped with  $\text{Yb}^{3+}$  ions were developed.

# COMPOSITE FIBER WITH ER-DOPED PHOSPHATE CORE AND SILICA CLADDING FOR COMPACT AMPLIFIER

B.I. Galagan<sup>1</sup>, O.N. Egorova<sup>2</sup>, B.I. Denker, V.A. Kamynin<sup>1</sup>, A.A. Ponosova<sup>1,3</sup>,  
S.E. Sverchkov<sup>1</sup>, S.L. Semjonov<sup>2</sup>, V.B. Tsvetkov<sup>1,4</sup>

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

<sup>2</sup>*Fiber Optics Research Center RAS, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Perm Scientific Industrial Instrument-Making Company, Perm, Russia*

<sup>4</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

*E-mail: [nastya-aleksi@mail.ru](mailto:nastya-aleksi@mail.ru)*

We report results of investigation of fiber amplifier based on composite fiber with phosphate core and silica cladding. The initial phosphate glasses, fabricated for the fiber core, were doped with 1wt. % and 3wt. % of erbium. The fibers, made from the fiber blanks, were single mode on the operating wavelength. The small-signal absorption in the fiber core on 1535 nm were 1,2 and 3,75 dB/cm, for 1 wt. % and 3 wt. %, respectively.

A single-pass forward pumping configuration of fiber amplifier was realized. Pump and signal radiations were launched in the composite fiber through wavelength division multiplexer. The losses at the silica and composite fibers fusion splices were estimated from 0,2 to 1 dB at 980 nm. Continuous-wave fiber laser with a power of 10 mW and central wavelength of 1536 nm was used as signal source. Optimization of the length of amplifier active fibers is presented (fig. 1).

The high small-signal gain was obtained for short active fibers. The gain coefficient was about 36 dB for 3wt. % Er-doped fiber 20 cm length, and was about 38 dB for 1wt. % Er-doped fiber 50 cm length.

This study was supported by RFBR, the project № 18-32-01010.

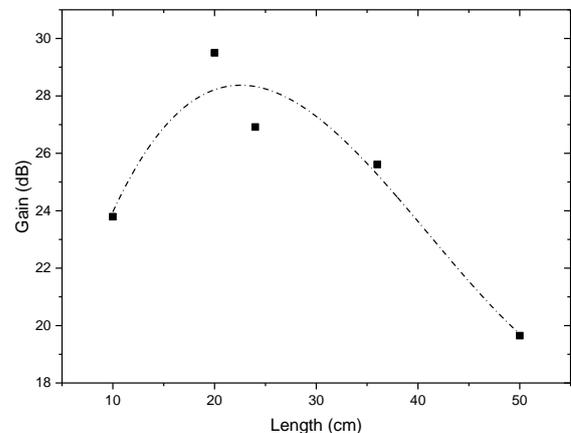


Fig. 1 Dependence of gain on active fiber length for input signal power of  $-20$  dBm (3wt. % Er)

## RESEARCH MODES OF GENERATION $\text{Er}^{3+}$ FIBER LASER

A.R. Rakhmatullina<sup>1</sup>, I.S. Azanova<sup>1,2</sup>, A.A. Ponosova<sup>2</sup>,  
M.K. Tsibinogina<sup>2</sup>, O.L. Kel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Perm State National Research University, Perm, Russia

<sup>2</sup>Perm Scientific Industrial Instrument-Making Company, Perm, Russia

E-mail: aly\_physicist@mail.ru

Fiber erbium lasers are widely used in telecommunications, science, industry and medicine. The emission range of erbium ions corresponds to the minimum losses in traditional quartz fibers and at the same time it is safe for humans.

The efficiency of generation of erbium light guides with an average ion concentration can be limited by unbricked losses caused by the absorption of radiation by clusters. For this reason, an increase in efficiency can also be achieved by operating in the long-wave range, where the absorption cross section of erbium, and hence clusters, is much smaller [1].

The aim of this work was to study the efficiency of erbium light guide generation in the range from 1,518 to 1,585  $\mu\text{m}$ .

Erbium light guides are investigated in a medium-power fiber laser scheme with counter-pumping (Fig. 1a). A semiconductor laser diode (980 nm) was used as the pump source. The pump radiation was introduced into the active fiber through WDM. As an active medium, optical fibers with concentrations of  $\text{Er}^{3+}$  the order of  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , provided by the Perm Scientific Industrial Instrument-Making Company, were used. The laser resonator was formed by fiber Bragg gratings with different central wavelengths with a reflection coefficient close to 100 % and a straight end of the fiber on the other side of the resonator.

The emission spectra were measured as a function of the fiber length in the entire spectral range of the luminescence of erbium ions. It is shown that the maximum generation efficiency is observed in the longer-wave part of the spectrum compared with the erbium luminescence peak (fig. 1b).

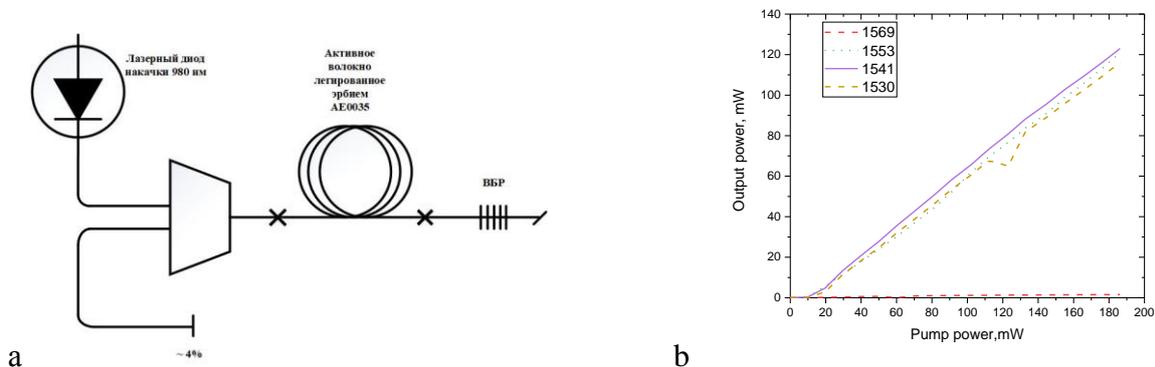


Fig. 1. a - laser circuit; b - laser efficiency at different FBGs

# THE SUPERCONTINUUM GENERATION SIMULATION IN OPTICAL FIBER

A.V. Zhavoronkin, A.A. Mastin  
*Technopark-Mordovia, Saransk, Russia*  
*E-mail: mastinaa@mail.ru*

The broadband supercontinuum (SC) generation currently attracts a lot of attention because of the high potential for applications in the fields of the optical communications, the generation of the ultrashort pulse, the optical coherence tomography, the optical frequency metrology [1].

We present simulation results of supercontinuum generation by injecting the pump pulse into the anomalous group velocity dispersion region near the zero-dispersion wavelength of the fiber. The supercontinuum signal spectrum and pulse profile development as it goes through the fiber is shown. The XFROG spectrogram of supercontinuum development also is shown.

1. A.M. Zheltikov, Phys. Usp. **49**, 605 (2006).

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF PREFORMS AND  
EXPERIMENTAL SAMPLES TAPERED OPTIC FIBERS

I.L. Vorobiev, A.V. Krivovichev, A.B. Pakalin, S.A. Smirnov,  
Yu.K. Chamorovskii

*Technopark-Mordovia, Saransk, Russia*

*E-mail: newsmirnov@mail.ru*

Specialty optical fibers, devices based on them are increasingly used in many fields: medicine, laser processing of material, oil and gas, aerospace, nuclear industry and others. The variety of application areas and the growing competition of manufacturers impose ever greater demands on the optical, geometric and mechanical parameters of special optical fibers.

A new type of tapered optical fibers was manufactured, which can be used in fiber lasers and amplifiers that have become widespread in many fields of industry, medicine and science. The optical properties of the obtained prototypes are studied.

The work was carried out with the financial support of the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises (FASIE).

# INVESTIGATION OF UNSATURABLE LOSSES IN PHOSPHOSILICATE FIBERS DOPED WITH BISMUTH

A.M. Khagai<sup>1,2</sup>, M.A. Melkumov<sup>1</sup>, S.V. Firstov<sup>1</sup>, F.V. Afanasiev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Fiber Optics Research Center RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Institute of Chemistry of High-Purity Substances RAS, Nizhny Novgorod, Russia*

*E-mail: [khagai@fo.gpi.ru](mailto:khagai@fo.gpi.ru)*

Pulsed sources based on phosphosilicate fibers doped with bismuth are of great interest in science, technology and medicine, since they lasing in the region of  $1.3 \mu\text{m}$  [1] The advantage of using bismuth fibers is the possibility to realize all-fiber laser sources, in addition, the silicate matrix of the active fiber allows the use of standard fiber components when develop laser scheme. In the development of high-energy pulse sources, an important parameter determining the maximum achievable energy is the small-signal to unsaturable losses ratio in the active fiber. In fact, for bismuth fibers this parameter is more important in comparison with fibers doped with rare-earth elements, since the ratio, for example, in phosphosilicate bismuth fibers when pumped at a wavelength of  $\sim 1,23 \mu\text{m}$  does not exceed 13 (for the best ytterbium specimens this parameter is  $\sim 10^5$ ). In view of the above, to optimize the performance of pulsed bismuth fiber lasers in terms of increasing the output pulse energy is necessary a detailed study of unsaturable losses in bismuth fibers.

In this paper, we investigated the dependence of unsaturable losses in phosphosilicate fibers with bismuth on the wavelength of the pump radiation (fig. 1 (a)) and on the type of radiation: pulsed, with a different repetition rate or continuous wave (fig. 1 (b)).

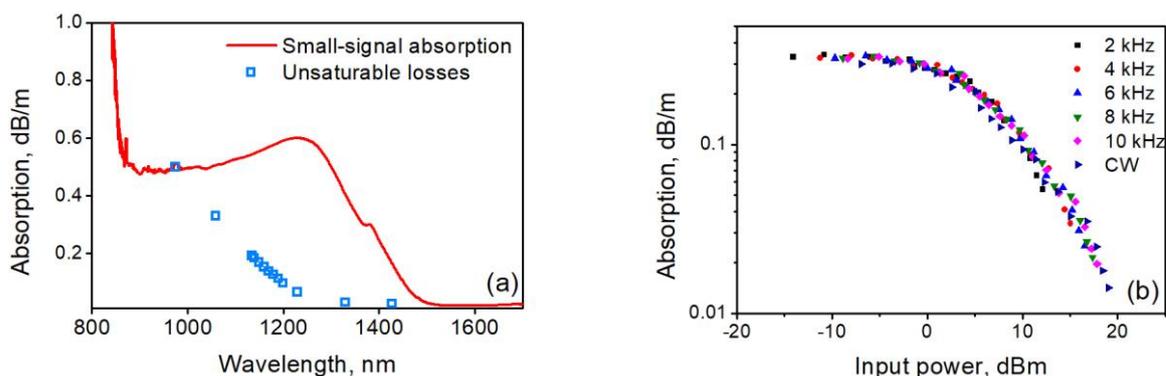


Fig. 1. Absorption and unbranched losses in a bismuth fiber (a) and absorption at  $1,33 \mu\text{m}$  versus the input power (b)

The research was supported by RFBR (grant № 18-32-00438)

1. A.M. Khagai et al., *Quantum electronics* **46**, 1077 (2016).

# CHARACTERIZATION OF TAPERED FIBERS WITH HIGH BIREFRINGENCE

J. Rissanen<sup>1</sup>, V.N. Filippov<sup>2</sup>, Y.K. Chamorovskii<sup>3</sup>, V. Ustimchik<sup>3</sup>, S. Popov<sup>3</sup>,  
M.S. Alimbekov<sup>4</sup>, P.E. Zhelezov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Tampere University of Technology, Tampere, Finland

<sup>2</sup>Ampliconyx, Tampere, Finland

<sup>3</sup>Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Technopark-Mordovia, Saransk, Russia

E-mail: [iamhellio@gmail.com](mailto:iamhellio@gmail.com)

One emerging approach to scale up the power output of fiber light sources is the tapered double-clad fiber (TDCF) technology pioneered at the Tampere University of Technology [1]. A TDCF is an optical fiber with an axially increasing diameter and, in essence, enables single mode propagation in a multi-mode fiber. Doped with rare-earth ions, these fiber tapers have been successfully demonstrated in both high power fiber lasers and amplifiers and can potentially be used to amplify optical power up to the MW level [2].

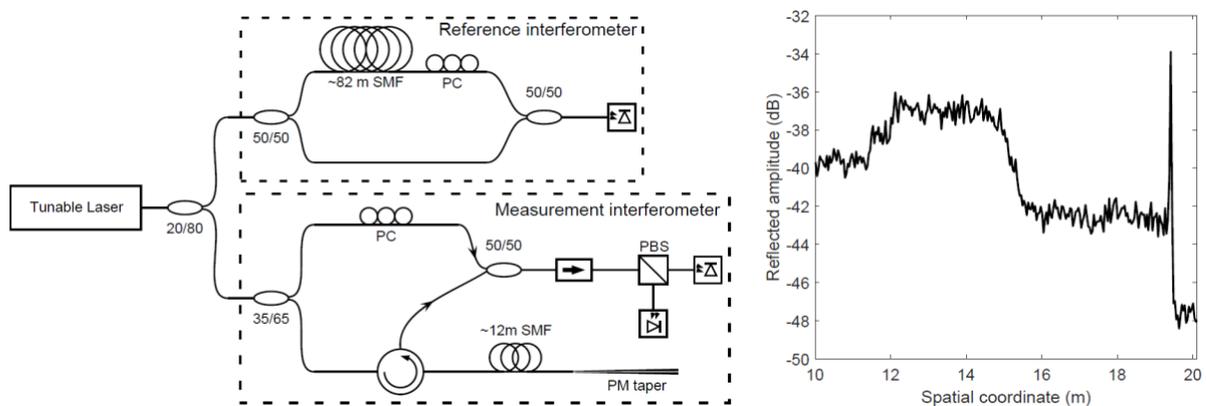


Fig. 1. A schematic of the OFDR measurement setup at the ORC and OFDR trace of the elliptical taper

One of the most important characteristics of such tapers is the axial birefringence profile. An innovative and non-destructive way to make the measurement is to use high sensitivity optical frequency-domain reflectometry (OFDR) [3].

OFDR setup can detect the scatter pattern in the taper, shown in aig. 1. This paper presents the preliminary results of the characterization of two such specially produced polarization maintaining (PM) tapered fibers: one with an elliptical core and another with a circular core an elliptical inner stress cladding.

1. V. Filippov et al., Optics Express **16**, 1929 (2008).
2. V. Filippov et al., Proc. SPIE **9728**, 97280V (2016).
3. M. Froggatt et al., JLT **24**, 4149 (2006).

## MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBERS (WAVEGUIDES): CLASSIFICATION, APPLICATIONS

K.A. Bzheumikhov<sup>1</sup>, Z.Ch. Margushev<sup>1</sup>, A.A. Bzheumikhov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Computer Science and Problems of Regional Management  
Kabardin-Balkar Scientific Centre RAS, Nalchik, Russia*

<sup>2</sup>*Institute for Scientific Instruments GmbH, Berlin, Germany*

*E-mail: [kazbek\\_ba@inbox.ru](mailto:kazbek_ba@inbox.ru)*

The material is devoted to one of such directions of fiber optics as "micro-structured optical fibers" (MOF). Based on the analysis of works published by various scientific groups over the past twenty-odd years, an attempt has been made to classify the currently known design of the MOU, taking into account both the features of geometry and the basic physical properties, which, in our opinion, can become the basis for standardization. Such attempts were previously made in [1, 2]. Also, recently Benabid in his presentation material cited the original "PCF Family Tree" compiled by Russell [3]. Given the intensity of development in this field since then, the classification options presented in these materials require considerable complementation, which is the subject of this work.

The classification tree structure proposed by us reflects both the difference of fiber classes on two grounds (design features and basic waveguide mechanisms) and the existing interrelationships of individual classes. This "ideology" is embedded in the most abbreviated names (apronimah) of the fibers, which, in our opinion, allows us to systematize the existing fiber structures and to some extent, allows us to make a forecast for further development - which "branch", in which direction can develop. This is relevant, as new designs or modifications of known waveguides are gradually emerging, expanding the "tree" classification architecture as a whole. Also important is the aspect of standardization of these classes of fibers, by analogy with (standard) telecommunications, with their industrial production in the future.

1. A. Bjarklev, J. Broeng, A.S. Bjarklev, Photonic Crystal Fibres. Kluwer Academic Publishers Boston, 2003. 298 p.
2. A.M. Zheltikov, UFN 174 (1), 73 (2004).
3. Electronic resource: <http://www.elettromagnetismo.it/wp-content/uploads/2017/03/Invited-Benabid.pdf>.

## MINIATURE FIBER-OPTIC PRESSURE SENSOR BASED ON INTERFEROMETER FABRY-PEROT

A.M. Minkin<sup>1</sup>, N.S. Sozonov<sup>2</sup>, K.M. Fadeev<sup>1</sup>, D.I. Shevtsov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Perm Scientific Industrial Instrument-Making Company, Perm, Russia*

<sup>2</sup>*«Inversion-Sensor» Ltd., Perm, Russia*

*E-mail: [constantinefadeev@gmail.com](mailto:constantinefadeev@gmail.com)*

The report describes a new miniature version of a fiber optic pressure sensor, potentially capable of withstanding pressures of more than 50 bar and temperatures of more than 600 °C.

The sensor element of the pressure sensor is a membrane made of borosilicate glass by etching technology. The membrane thickness in the sensitive region is 50 μm, the diameter of the sensitive region is 600 μm.

In the sensitive part, the radiation is partially reflected and partly passes through the cavity formed by the end face of the optical fiber and the inner surface of the membrane. The air cavity is 450 μm. Further light partially passes into the membrane, where it is partially reflected a third time from the outer surface of the membrane. Thus, the sensitive part of the sensor creates three reflections: one from the end face of the optical fiber and two from the two surfaces of the diaphragm. Due to the interaction of reflected rays on the photodetector, an interference pattern is formed.

According to the results of the experiment, due to a change in the pressure acting on the sensor membrane, the spectrum shifted (fig. 1). Sensitivity of the sensor to pressure is 150 pm/bar.

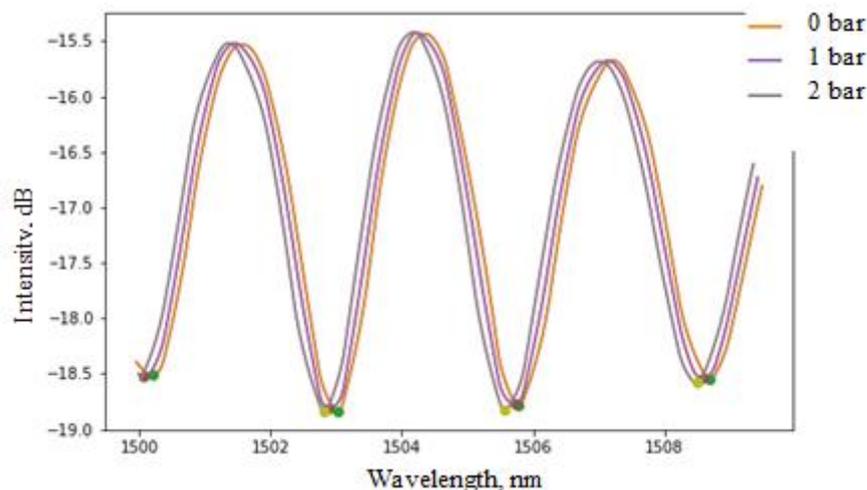


Fig. 1. Shift of the spectrum under the action of pressure

The sensor is also sensitive to temperature changes. Sensitivity of the sensor is 20 pm/°C.

The analysis of the obtained results demonstrates the potential possibilities of using such a pressure sensor design for recording pressure in environments with extremely high temperature values.

# MODULATIVE INSTABILITY OF WAVE PACKAGES IN THE LIGHT GUIDE WITH THE CASCADE DEPENDENCE OF DISPERSION FROM LENGTH

I.O. Zolotovskii, V.A. Lapin, D.I. Sementsov

*Ulyanovsk State University, S.P. Kapitsa Research Institute of Technology,  
Ulyanovsk, Russia*

*E-mail: LVA2013@yandex.ru*

Modulation instability (MN) - growth of small harmonic continuous wave disturbances - an effect typical of many non-linear systems that support distribution of localized waves, the nature of which is connected with the joint action of nonlinear and dispersive effects [1].

We investigated the propagation of a quasicontinuous modulated wave in two-section lightguides having a continuous cascade dependence of the dispersion on the length of the species:

$$d_2 = d_{20} \cdot \begin{cases} 1, & z < z_0 \\ \exp[-b(z - z_0)], & z \geq z_0 \end{cases}. \quad (1)$$

Fig. 1 shows the maximum power of the modulated wave as a function of the longitudinal coordinate, obtained by solving the envelope equation (NSE), using the Split step Fourier method for the components (SSFM) [2].

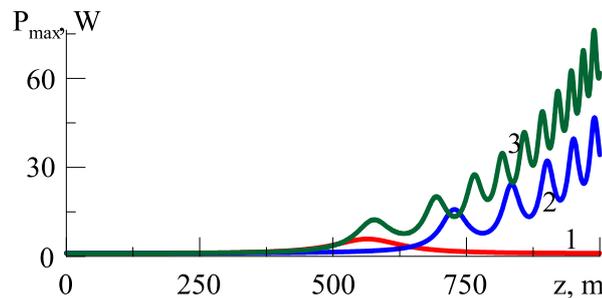


Fig. 1. Longitudinal dependences of the power maxima of the modulated wave at  $d_{20} = -10^{-26} \text{ s}^2/\text{m}$ ,  $R = 10^{-2} (\text{W}\cdot\text{m})^{-1}$  for cases of a homogeneous, inhomogeneous and cascade fiber with  $z_0 = 300 \text{ m}$  - curves (1; 2; 3)

It is shown that the correct selection of the length of a homogeneous segment of the cascade connection considered in the work can provide a stable generation of high-frequency sequences of ultrashort pulses with a higher peak power than with a single inhomogeneous fiber.

The work was supported by the RFBR grant (project 18-32-00957).

1. G. Agrawal, Nonlinear fiber optics. Springer, 2007.
2. I.O. Zolotovskii et al., Opt. Spectrosc. **122** (3), 475 (2017).

## INVESTIGATION OF SHORT LASER PULSES IN A HIGH-CONCENTRATED ERBIE FIBER

B.I. Galagan<sup>1</sup>, B.I. Denker<sup>1</sup>, O.N. Egorova<sup>2</sup>, I.V. Zhluktova<sup>1</sup>, V.A. Kamynin<sup>1</sup>,  
A.A. Ponosova<sup>1,3</sup>, S.E. Sverchkov<sup>1</sup>, S.L. Semenov<sup>2</sup>, V.B. Tsvetkov<sup>1,4</sup>

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

<sup>2</sup>*Fiber Optics Research Center RAS, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Perm Chamber of Commerce and Industry, Perm, Russia*

<sup>4</sup>*National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia*

*E-mail: [iv.zhluktova@gmail.com](mailto:iv.zhluktova@gmail.com)*

When ultrashort pulses are amplified in fiber amplifiers, nonlinear effects lead to an increase in the pulse duration. In order to maintain a short duration of pulses, a decompressor/amplifier/compressor system is used or, if low power is obtained, an amplifier with a short active fiber length and a high gain can be used.

A study was made of the amplification of short pulses in a compact amplifier based on a composite fiber. As a master oscillator, a pulsed laser with mode locking at nonlinear rotation of the polarization was used. The amplifier was a single-pass scheme with a passing pumping. As the amplifying medium, a fiber with a phosphate core heavily doped with erbium ions and a quartz shell of 20 cm in length was used. The fiber was single-mode in the luminescence band of erbium ions. To create population inversion in the active medium, a pump diode with a wavelength of 980 nm and a maximum power of up to 540 mW was used. The spectral characteristics of laser radiation and the pulse duration after amplification are investigated (fig. 1).

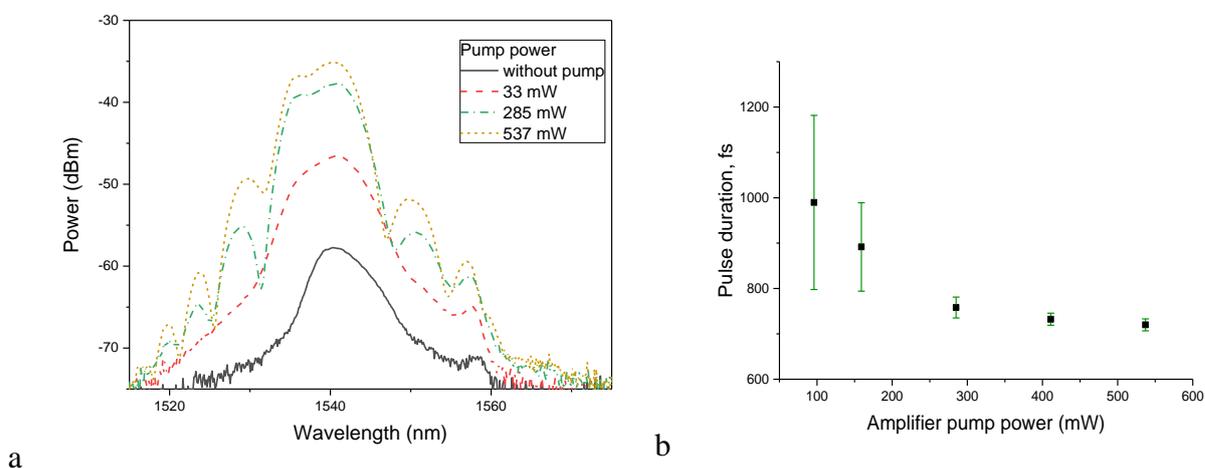


Fig.1. The dynamics of the change in the radiation spectrum with increasing pumping power of the amplifier (a) and the pulse duration (b)

After amplification, a change in the spectral characteristics of the pulsed radiation is observed, while the duration of the pulses remains unchanged within the error of the measuring equipment.

The research was carried out with the financial support of the RFBR in the framework of the scientific project No. 18-32-01010.

# YTTERBIUM FIBER LASER WITH THE FIBER LOOP MIRROR

P.E. Zhelezov, M.S. Alimbekov

*Technopark-Mordovia, Saransk, Russia*

*E-mail: z\_1390@mail.ru*

The fiber seed-lasers are an integral part of various laser systems and seed sources for further amplification in high-power fiber lasers and tapered amplifiers. Therefore, the output signal of seed-laser must have stable time and spectral characteristics, such as: central wavelength, spectrum width, pulse duration, output power.

Developed by the authors ytterbium fiber laser, the scheme of which is shown in fig. 1, has a fiber section with polarization-maintaining fiber in the fiber loop mirror. This gives the loop mirror the properties of the filter: the spectral transmission function exhibits pronounced oscillations [1, 2]. The depth of the modulation depends on the coupling ratio of the coupler, and period is inversely proportional to the birefringence or the beat length and length of that fiber [3].

Due to the additional filter property, this laser has a stable output spectrum, output power and pulse width.

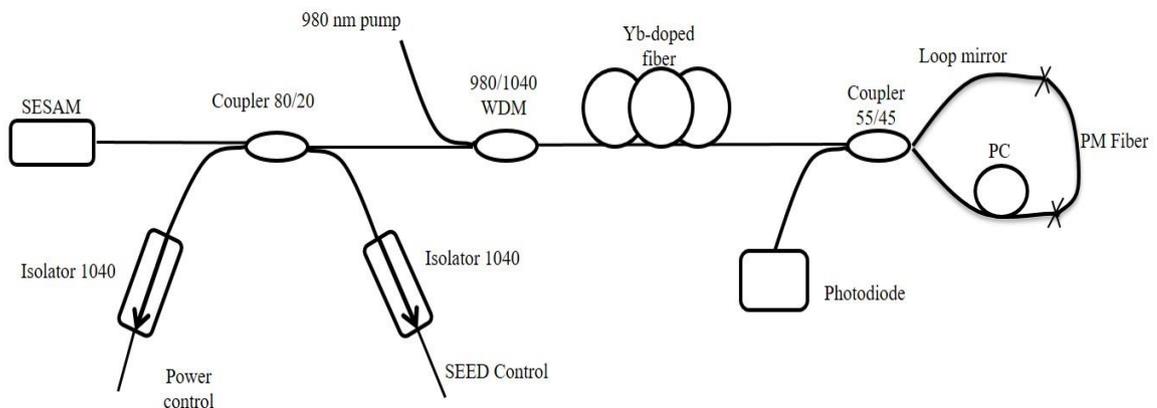


Fig. 1. Scheme of ytterbium fiber laser with polarization-maintaining fiber incorporated into the fiber loop mirror

1. J. Wang, K. Zheng et al., *Optics Express* **17(13)**, 10573 (2009).
2. S. Feng et al, *Optics Communications* **277 (2)**, 322 (2007).
3. O. Frazão et al., *Sensors* **7**, 2970 (2007).

# UP-CONVERSION LUMINESCENCE OF OPTICAL FIBERS DOPED WITH P-ELEMENTS (Bi, Te, Pb) UNDER IR EXCITATION

E.G. Firstova<sup>1</sup>, A.V. Kharakhordin<sup>1</sup>, S.V. Alyshev<sup>1</sup>, S.V. Firstov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Fiber Optics Research Center RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

*E-mail: [kilena85@mail.ru](mailto:kilena85@mail.ru)*

Nowadays, much attention is paid to the development of optical materials capable of converting near infrared into visible radiation. These materials are of great interest for a number of practical applications, in particular, medicine, photonics, microscopy, laser physics etc. The main attention is focused on studying the up-conversion luminescence properties of rare-earth ions in various media [1].

In this paper, we studied the up-conversion luminescence in optical fibers doped with p-elements, in particular, Bi, Pb, Te. Intensive lines of the up-conversion luminescence originated from bismuth-related active centers were observed. It was revealed that spectral position and intensity of this luminescence strongly depend on temperature, glass matrix and excitation wavelength. Typical spectra of the up-conversion luminescence of various types of Bi-doped optical fibers are shown in fig. 1. The study of up conversion luminescence of Te and Pb-doped optical fibers were also performed.

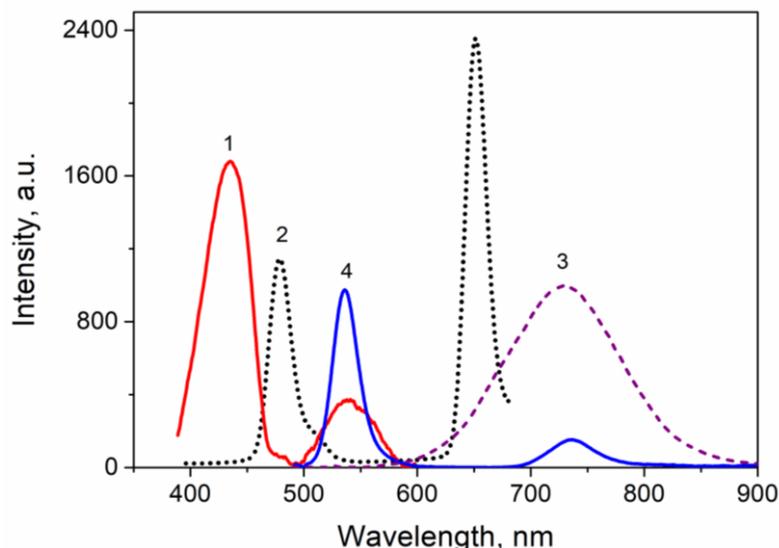


Fig. 1. Up-conversion luminescence of various Bi-doped fibers: 1 – Bi:SiO<sub>2</sub>; 2 – Bi:(GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>); 3 – Bi:(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub>); 4 – Bi:(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>)

This investigation was supported by Russian Foundation for Basic Research (grant 18-32-00148).

1. A. Nadort, J. Zhao, E.M. Goldys, *Nanoscale* **8**, 13099 (2016).

## IR FIBER BUNDLES FOR INVESTIGATION OF HEAT FIELD DISTRIBUTION OF OBJECTS INTERNAL SURFACE

E.A. Korsakova, N.A. Muftakhitdinova, A.S. Korsakov, L.V. Zhukova  
*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,*  
*Yekaterinburg, Russia*  
*E-mail: [korsa5555@bk.ru](mailto:korsa5555@bk.ru)*

Thermal imaging systems are widely used for industrial applications, in particular for power engineering. IR fiber bundles may extend the scope of the systems applications. They may be used as probes for *in situ* investigation of heating networks, heat exchangers, engines, gas turbines, and other units. They enable to obtain a thermal field distribution in restricted spaces and in locations where there is no line of sight between the object and thermal camera. A number of applications for silver halide fiber bundles have been reported [1], but there is no an application among them, which is related with investigations in the field of power engineering.

Our ordered fiber bundles were fabricated from silver halide crystals using extrusion technique. The bundles have a wide transparency window of 2,5 - 20  $\mu\text{m}$ . They are flexible, nontoxic, and nonhygroscopic and able to transmit radiation corresponded to temperatures from  $-130$  to  $+1100$   $^{\circ}\text{C}$ . Fig. 1a represents an example of the bundle comprised 16 unclad single-layer fibers with the individual fiber diameter of 0,525 mm and the length of 300 mm. We used a simple mechanical assembly in a heat shrink tube to fabricate the bundle. It was found that crosstalk between neighboring fibers in the bundle does not exceed 5 %. It allows transmitting thermal images with minimum size of 0,5 mm. We carried out a calibration of our thermal imaging setup using a heated body with constant temperature (see fig. 1b).

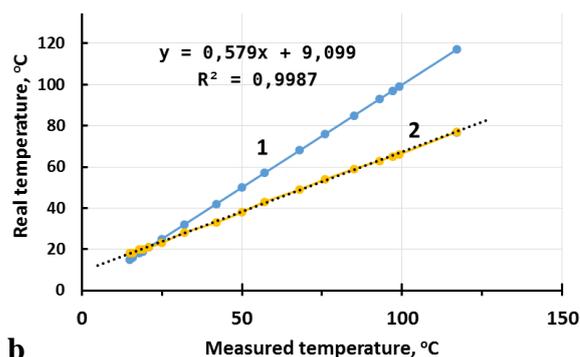
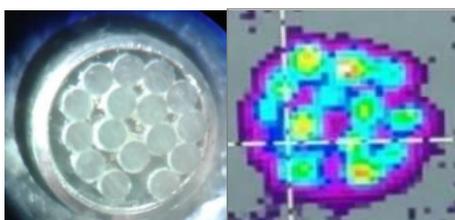


Fig. 1. a – image of 16-fiber bundle from silver halides, b - calibration graph for the bundle: 1 - line of equal values of temperature, 2 - measured temperature values taking into account total optical losses

Future challenge is to increase resolution of the bundle, its flexibility, and convenience of practical use in hard-to-reach places.

This work is supported by the Russian Science Foundation under grant No. 18-73-10063.

1. Y. Lavi, A. Millo, A. Katzir, *Applied Optics* **45**, 5808 (2006).

## INFRARED FIBERS FOR THERMAL DIAGNOSTICS OF WIND TURBINES

A.A. Lashova, D.A. Danilova, A.S. Korsakov, L.V. Zhukova  
*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,*  
*Yekaterinburg, Russia*  
*E-mail: [l.v.zhukova@urfu.ru](mailto:l.v.zhukova@urfu.ru)*

During operation of wind-electric plant (WEP), the bearings of the electric motor, lubricating oil, and winding of the generator are heated. The temperature of these elements can reach 70-80 Celsius degrees, so wind turbines need a temperature control system that includes sensors, cooling circuits and cooling oil injection devices in bearings. To date, temperature measurement is performed by both resistance thermometers and thermocouples, as well as gaining popularity by fiber-optic sensors (FOS).

Thermoelectric temperature transducers are capable of measuring in a wide range, but are subject to electromagnetic generator oscillations and strong vibrations. Existing FOS have long fiber channels based on quartz, in addition require a radiation source - a laser and devices for processing optical signals with high computing powers.

Known monitoring devices are able to perform measurements over a wide range of temperatures, but are subject to electromagnetic generator oscillations and strong vibrations. Fiber-optical sensors made of quartz are able to detect the spectral characteristics of the engine without contact and transmit radiation for tens of kilometers without significant energy losses, but their use for temperature monitoring is possible only in the presence of complex data processing systems due to the limitation of the spectral range by near infrared radiation.

Employees of the Ural Federal University have developed a new class of photonics materials based on modified silver and thallium halides, transparent in the IR range from 2 to 60  $\mu\text{m}$  [1]. The optical fibers produced on their basis have high mechanical strength, small optical losses of up to 0,5 dB/m, photo stability and radiation resistance [1]. IR fibers are able to transmit thermal radiation from hard-to-reach places and operate under electromagnetic interference and high vibration, thus can be used for thermal monitoring of bearings and oils of wind turbines

Infrared FOS, equipped with infrared fibers, allow direct temperature measurement by a contactless method by transferring a thermal signal to radiation receivers that convert it into temperature values.

This measuring method will significantly reduce the length of the fiber optic line, accelerate and simplify the optical signal processing system.

This work is supported by the Russian Science Foundation under grant № 18-73-10063

1. A.S. Korsakov et al., *Optical Materials* **62**, 534 (2016).

# **ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ**

## ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Н.С. Аверкиев

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

*E-mail: [averkiev@les.ioffe.ru](mailto:averkiev@les.ioffe.ru)*

Поверхностными волнами называют возбуждения, распространяющиеся вдоль границ различных сред, так что их амплитуда убывает вдали от раздела, а энергия волн сосредоточена вблизи границы. Это означает, что интерфейс служит волноводом для таких возбуждений, что представляется весьма привлекательным с прикладной точки зрения.

Исторически, наиболее известны поверхностные акустические волны Дебая на границе воздуха и изотропного твердого тела. В изотропной упругой среде существуют акустические волны трех типов - две поперечные с одинаковой скоростью и одна продольная. На границе с воздухом при отсутствии внешних сил возникает новая волна, которая является гибридом из продольной и одной из поперечных волн, и ее амплитуда затухает в толще твердого тела. Принципиально, что энергия в такой волне не затухает и зависимость фазы волны от времени задается обычным гармоническим законом.

В докладе будут рассмотрены другие примеры подобных волн: поверхностные электромагнитные волны, моды шепчущей галереи, смешанные электронно-дырочные возбуждения на границе бесщелевого полупроводника и вакуума, волны на границе пьезоэлектрика и вакуума. Все эти типы возбуждений объединяет то, что восприимчивости, входящие в материальные соотношения, не зависят от частоты и положительны.

Особенно необычными оказались поверхностные волны на интерфейсе между двумя одинаковыми анизотропными кристаллами, главные оси которых лежат в плоскости интерфейса. Тогда в области углов вблизи биссектрисы между направлениями главных осей возможно распространение электромагнитных волн, представляющих собой смесь обыкновенной и необыкновенной волн в объемных материалах.

Другая возможность для возникновения поверхностных электромагнитных мод связана с дисперсией диэлектрической проницаемости и ее вещественностью (отсутствие поглощения). Это поверхностные плазмоны, распространяющиеся вдоль поверхностей проводящих сред и вакуума. В докладе будет рассмотрена возможность существования поверхностных мод, аналогичных модам шепчущей галереи, на границе проводящего шара и воздуха.

1. M.I. D'yakonov, Sov. Phys. JETP **67**, 714 (1988).
2. N.S. Averkiev, M.I. Dyakonov, Opt. Spectrosc. **68**, 653 (1990).
3. K.Yu. Golenitskii, N.S. Averkiev, Opt. Spectrosc. **120**, 948 (2016).

## СПИНОВЫЕ ЦЕНТРЫ, СВЯЗАННЫЕ С ВАКАНСИЯМИ КРЕМНИЯ В SiC

С.А. Тарасенко

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

Карбид кремния (SiC) – уникальный полупроводник, который имеет множество политипов и обладает замечательными электрическими и оптическими свойствами, а также радиационной стабильностью. Особый интерес для фундаментальных исследований по оптике и практических применений в области квантовых технологий и сенсорике представляют центры окраски, связанные с вакансиями кремния ( $V_{Si}$ ) [1, 2].  $V_{Si}$ -центры являются многоэлектронными комплексами со спином  $3/2$ . Они характеризуются спин-зависимым оптическим циклом, что позволяет выстраивать центры по спину и регистрировать спиновое состояние центров оптическими методами. Прикладывая дополнительно внешнее радиочастотное поле, можно эффективно управлять спиновым состоянием выстроенных центров, в том числе создавать когерентную суперпозицию собственных спиновых состояний.

В докладе обсуждаются спиновые и оптические свойства  $V_{Si}$ -центров в карбиде кремния. Представлены результаты теоретического исследования тонкой структуры, оптического выстраивания, спиновой динамики и релаксации спиновой когерентности  $V_{Si}$ -центров [2]. Результаты сопоставляются с экспериментальными данными, полученными методами оптически-детектируемого магнитного резонанса (ОДМР). Структура спиновых подуровней  $V_{Si}$ -центров оказывается очень чувствительной к внешним магнитным и электрическим полям, изменениям температуры, механическим напряжениям и т.д., что может быть использовано для создания высокочувствительных датчиков [1]. Описаны современные достижения в магнитометрии и термометрии на основе  $V_{Si}$ -центров и физика, лежащая в их основе. Обсуждаются механизмы неоднородного уширения ОДМР линий в ансамбле  $V_{Si}$ -центров, связанные с локальными деформациями кристалла и сверхтонким электрон-ядерным взаимодействием, а также перспектива дальнейшего увеличения чувствительности датчиков при использовании техники выжигания спектральных провалов в ОДМР линиях.

1. D. Simin et al., Phys. Rev. **X** **6**, 031014 (2016).
2. S.A. Tarasenko et al., Phys. Status Solidi **B** **255**, 1700258 (2018).

# НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТУННЕЛИРОВАНИИ В СВЯЗАННЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ С КУЛОНОВСКИМИ КОРРЕЛЯЦИЯМИ

В.Н. Манцевич

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*  
*E-mail: [vmantsev@gmail.com](mailto:vmantsev@gmail.com)*

Нестационарные характеристики наряду с корреляционными функциями высших порядков содержат больше информации о состоянии системы со взаимодействием, чем стационарные характеристики [1, 2]. В связи с этим, представляют интерес особенности временной эволюции коррелированных систем, взаимодействующих с резервуаром, с различной пространственной и спиновой симметрией. Релаксация электронной плотности и локального магнитного момента в системах с взаимодействием сильно зависит от поведения высших корреляционных функций. На примере простейшей модели двух связанных квантовых точек с кулоновскими корреляциями, подключенных в начальный момент времени к резервуару, исследованы характерные времена релаксации для состояний с различной пространственной и спиновой симметрией. Анализ релаксационных процессов проводился различными способами. Один из предложенных способов основан на использовании уравнений Гейзенберга, в которых корреляционные функции всех высших порядков для локализованных электронов учитывались точно. Показано, что помимо высших корреляционных функций в рамках этого подхода необходимо учитывать интерференционные эффекты (типа эффекта Фано), связанные с существованием нескольких каналов релаксации. Именно за счет интерференционных эффектов в системе связанных коррелированных квантовых точек оказывается возможно существование остаточного заряда. Второй метод исследования временной эволюции коррелированных систем основан на введении вспомогательных псевдо-частиц, соответствующих точным многоэлектронным состояниям в связанных квантовых точках, с дополнительным ограничением на возможное пространство физических состояний. Кинетические уравнения для чисел заполнения псевдочастиц позволяют исследовать динамику полной электронной плотности и локального магнитного момента для различных начальных состояний. С помощью обоих методов получены явные временные зависимости для изменения электронной плотности и локального магнитного момента в случае синглетного и триплетного начального двухэлектронного состояния. Полученные результаты позволили предложить экспериментальную схему для диагностики различных многоэлектронных состояний в системе коррелированных квантовых точек, основанную на анализе нестационарных токов, возникающих при подключении исследуемой системы к резервуару и контроле за остаточным локализованным зарядом [3].

Также показано, что при туннелировании через одноуровневую квантовую точку в берегах контакта возникают нестационарные спин-

поляризованные токи, направлением и поляризацией которых можно управлять, изменяя приложенное напряжение [4]. Нестационарные спин-поляризованные токи могут течь в обоих берегах туннельного контакта, а их поляризация и направление зависят от величины приложенного напряжения. Для наблюдения эффектов переключения необходимо, чтобы времена переключения были меньше времен жизни магнитных состояний. Кроме того, продемонстрировано, что на основе одиночной квантовой точки с кулоновскими корреляциями, находящейся во внешнем магнитном поле, можно сформировать высокоэффективный спиновый фильтр, основанный на анализе нестационарных туннельных токов [5].

1. W.K. Wootters, Phys. Rev. Lett. **80**, 2245 (1998).
2. M. Nizama, D. Frustaglia, K. Hallberg, Phys. Rev. **B 86**, 075413 (2012).
3. N.S. Maslova, V.N. Mantsevich, P.I. Arseev, JETP Letters **105(2)**, 119 (2017).
4. N.S. Maslova, V.N. Mantsevich, P.I. Arseev, Solid State Comm. **241**, 20 (2016).
5. V.N. Mantsevich, N.S. Maslova, P.I. Arseev, Physica E. **93**, 224 (2017).

## АНОМАЛЬНЫЙ И ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА

И.В. Рожанский

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

*E-mail: [rozhansky@gmail.com](mailto:rozhansky@gmail.com)*

Аномальный эффект Холла (АЭХ) представляет собой дополнительный вклад в холловское сопротивление, связанный с намагниченностью образца. Различают несколько механизмов аномального эффекта Холла, все они основаны на спин-орбитальном взаимодействии, а для возникновения поперечного электрического тока необходима поляризация носителей по спину. В докладе представлен краткий обзор известных механизмов АЭХ в режиме металлической и прыжковой проводимости. Теоретическое описание АЭХ в этих двух случаях оказывается совершенно различным.

Нарушение симметрии по отношению к инверсии времени, необходимое для возникновения поперечного тока, не обязательно связано со спиновой поляризацией носителей или наличием в системе спин-орбитального взаимодействия. Другая возможность возникновения поперечного тока, топологический эффект Холла (ТЭХ), связана с обменным рассеянием электрона на киральных вихревых текстурах намагниченности. Помимо фундаментальной значимости ТЭХ, существуют идеи прикладного использования этого явления, например в устройствах памяти на магнитных скирмионах.

С физической точки зрения имеются два качественно различных режима ТЭХ. Адиабатический режим имеет место в случае большой константы обменного взаимодействия и описывается в терминах геометрической фазы Берри. Движение электрона в киральном поле намагниченности приводит к поперечному спиновому току, который приводит к зарядовому току только если носители в образце поляризованы по спину, как и в АЭХ. В случае слабой обменной связи (неадиабатический режим) теоретическое описание с помощью фазы Берри неприменимо. Другой теоретический подход, основанный на теории возмущений, предсказывает ярко выраженный зарядовый, а не спиновый, эффект Холла, даже для полностью неполяризованных свободных носителей [1].

Мы разработали теорию ТЭХ, основанную на анализе задачи спин-зависимого рассеяния электрона на локализованном киральном поле намагниченности. Этот подход справедлив для произвольного значения адиабатического параметра. Развитая теория применена для анализа ТЭХ в двумерной пленке с магнитными скирмионами. Нам удалось проследить нетривиальный переход между двумя режимами. В неадиабатическом режиме противоположные спины рассеиваются в одном и том же поперечном направлении (рис. 1, слева). В адиабатическом режиме поперечный зарядовый ток превращается в чисто спиновый ток, когда противоположные спины рассеиваются в противоположных направлениях (рис. 1, справа). Таким образом, очевидное противоречие между результатами адиабатических и пертурбативных теоретических подходов к ТЭХ устранено [2].

Кроме того, нами установлено, что асимметричное обменное рассеяние может приводить к поперечному току для киральных магнитных текстур с нулевым топологическим зарядом, поэтому, возможно, это явление следует называть киральным (а не топологическим) эффектом Холла.

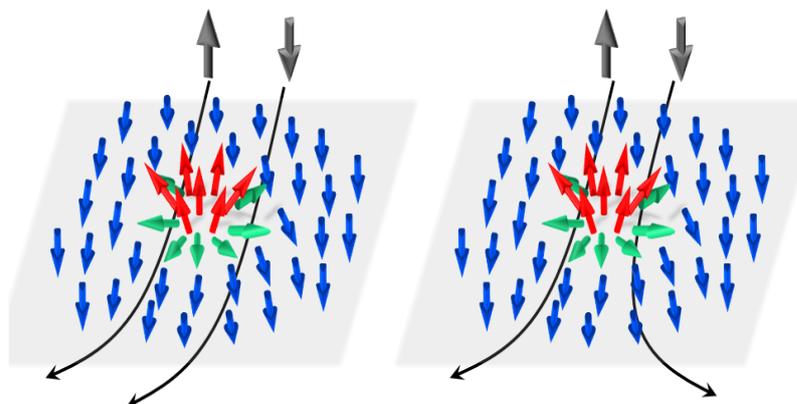


Рис.1. Топологический эффект Холла в неадиабатическом (слева) и адиабатическом (справа) режиме

Возможность реализации топологического эффекта Холла в киральных структурах с нулевым топологическим зарядом означает, что это явление должно наблюдаться в значительно более широком классе материалов, чем ранее считалось. В частности, топологический эффект Холла должен наблюдаться в разбавленных магнитных полупроводниках со спин-орбитальным взаимодействием, в том числе в структурах на основе (Ga,Mn)As, а также в топологических изоляторах с магнитными примесями.

1. K.S. Denisov et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 027202 (2016).
2. K.S. Denisov et al., Scientific Reports **7**, 17204 (2017).

## ТУННЕЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ В СВЕРХРЕШЕТКАХ GaAs/AlAs С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДОМЕНАМИ

И.В. Алтухов<sup>1</sup>, М.С. Каган<sup>1</sup>, С.К. Папроцкий<sup>1</sup>, И.С. Васильевский<sup>2</sup>,  
А.Н. Виниченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Москва*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва*

*E-mail: [kagan@cplire.ru](mailto:kagan@cplire.ru)*

При комнатной температуре исследовались короткопериодные сверхрешетки (СР), содержавшие 100 периодов 4 нм GaAs / 2 нм AlAs, расположенных между сильно легированными верхним контактным слоем  $n^+$ -GaAs и подложкой  $n^+$ -GaAs, в условиях образования электрических доменов. Домены возникают из-за наличия отрицательной дифференциальной проводимости в некоторой области напряжений при резонансном туннелировании электронов между соседними квантовыми ямами (механизм Esaki - Tsu). Меза-структуры в форме колец диаметром 10-15 мкм и шириной кольца 0,8-1,5 мкм с кольцевыми металлическими контактами формировали распределенный ТГц резонатор на длины волн в свободном пространстве от 110 до 160 мкм. Прослежена перестройка режимов доменной неустойчивости как при самовозбуждении резонатора, так и в его отсутствие. Установлено, что механизмы проводимости в областях слабого и сильного поля существенно различны: вне домена проводимость минизонная (резонансное туннелирование Эсаки – Цу), а внутри домена проводимость происходит за счет последовательного нерезонансного туннелирования (sequential tunneling).

На вольтамперных характеристиках в режиме доменной неустойчивости наблюдалась серия максимумов, возникновение которых связывается с особенностями нерезонансного туннелирования электронов в треугольном домене сильного поля. Обнаружен также гистерезис при прямой и обратной развертке напряжения, который связывается с переключением между режимами с движущимся и статическим доменом.

Обнаружено значительное изменение порогового напряжения образования доменов при изменении параметров ТГц резонатора. Предложено объяснение, связывающее этот сдвиг порога с возбуждением в резонаторе колебаний значительной амплитуды, которые за счет выпрямления на сильной нелинейности образца сдвигают рабочую точку на вольтамперной характеристике. Влияние резонатора на резонансное туннелирование в СР GaAs/AlAs указывает на возбуждение ТГц резонатора за счет динамического отрицательного сопротивления СР с доменами.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 16-29-09626, 16-29-03135) и программ РАН «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий» и «Новые источники миллиметрового и терагерцового излучения и их перспективные приложения».

## ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И СМЕШЕНИЕ ЧАСТОТ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ

Г.В. Будкин

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*  
*E-mail: [gbukin@gmail.com](mailto:gbukin@gmail.com)*

При воздействии переменного электрического поля излучения, проходящего через полупроводниковые структуры, на свободные носители заряда в системе возникает электрический ток. Линейный отклик на переменное поле приведет к генерации тока на той же частоте с величиной, пропорциональной амплитуде электрического поля. Однако в структуре без центра инверсии могут возникать и эффекты второго порядка, пропорциональные интенсивности излучения, такие как: фотогальванический эффект, генерация второй гармоники, а также эффект смешения частот, если спектральное разложение электрического поля излучения содержит несколько гармоник. Экспериментальные и теоретические исследования фотогальванических эффектов и генерации второй гармоники в квантовых ямах [1], топологических изоляторах [2] и графене [3] позволяет получать информацию о симметрии полупроводниковых систем, деталях энергетического спектра и механизмах рассеяния электронов.

Эффективность генерации фототоков может быть значительно усилена во внешнем магнитном поле в условиях циклотронного резонанса. В представленной работе построена теория фотогальванических эффектов и эффекта смешения частот в квантовых ямах со структурной асимметрией во внешнем магнитном поле. В рамках кинетического уравнения Больцмана разработана микроскопическая модель в геометриях нормального и наклонного статических магнитных полей. Получены аналитические выражения для токов в зависимости от частоты и поляризации излучения и величины статического магнитного поля. В геометрии нормального магнитного поля показано, что фотогальванический эффект резонансно усиливается, когда циклотронная частота близка к частоте излучения, а для смешения частот усиление наблюдается, если циклотронная частота близка к одной из частот спектрального разложения или их комбинации. В геометрии наклонного магнитного поля генерация постоянного тока обусловлена асимметрией рассеяния носителей заряда, вызванной компонентой статического магнитного поля в плоскости квантовой ямы. Продемонстрировано, что в этой геометрии резонансное усиление индуцированных излучением токов наблюдается также на первой субгармонике циклотронного резонанса.

1. G.V. Budkin, S.A. Tarasenko, Phys. Rev. **B 93**, 075306 (2016).
2. K.-M. Dantscher et al., Phys. Rev. **B 92**, 165314 (2015).
3. N. Kheirabadi, E. McCann, V.I. Fal'ko, Phys. Rev. **B 97**, 075415 (2018).

## РЕЗОНАНСНОЕ И РЕЛАКСАЦИОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ЗВУКА НА ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРАХ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

К.А. Барышников

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*  
*E-mail: [barysh.1989@gmail.com](mailto:barysh.1989@gmail.com)*

Ультразвуковая спектроскопия кристаллов позволяет определить многие параметры и выявить важные свойства полупроводников и металлов, такие как форма поверхности Ферми для данного металла, подвижность и концентрация носителей заряда, константа деформационного потенциала, структурные особенности решетки кристалла, ангармонизм сил связи в кристалле, время релаксации тепловых фононов и многие другие. Для ультразвуковой спектроскопии, как правило, используют объемные упругие волны. Особый интерес представляют ультразвуковые исследования концентрации и свойств примесных центров в полупроводниках [1, 2]. Это связано с тем, что частоты ультразвуковых волн лежат в интервале от 10 МГц до 10 ГГц, что позволяет измерять времена релаксации многих примесных центров при низких температурах, которые обычно принимают значения  $10^{-7} - 10^{-9}$  с.

Измерение времени релаксации примесного центра основано на явлении релаксационного поглощения ультразвука центром. Длина ультразвуковой волны может меняться в диапазоне от одного микрона до нескольких долей миллиметра, что во много раз превосходит радиус локализации носителей заряда на примесях в полупроводниках. Это позволяет рассматривать действие ультразвука на такой центр, как периодически меняющееся однородное деформационное возмущение, расщепляющее по энергии собственные состояния примеси. Поскольку время установления термодинамически равновесной заселенностей собственных состояний центра конечно и сравнимо с периодом ультразвуковой волны, то в поле ультразвуковой волны в каждый момент времени будет наблюдаться существенное отклонение заселенности расщепленных уровней энергии центра от равновесной. Наличие неравновесной заселенности центров, индуцированной звуковой волной, приводит к релаксационному поглощению звука на данном центре.

Коэффициент затухания ультразвуковой волны в таком случае будет пропорционален концентрации примесных центров, на которых поглощается волна, квадрату константы деформационного потенциала, сумме равновесных заселенностей энергетических уровней, расщепляемых ультразвуковой волной. А также коэффициент поглощения пропорционален дебаевскому члену, описывающему частотную зависимость поглощения звука,  $\omega^2\tau_1/(1+\omega^2\tau_1^2)$ , где  $\tau_1$  – это время энергетической релаксации центра (время прихода центра к термодинамическому равновесию при данной температуре, аналог времени продольной релаксации в теории магнитного резонанса). Время  $\tau_1$  однозначно зависит от температуры и сильно меняется при ее изменении. Была разработана методика [2] выявления темпера-

турной зависимости времени релаксации примесных центров с помощью анализа температурной зависимости поглощения ультразвука на данных центрах.

Однако при наличии внутренних энергетических расщеплений примесного центра на величину  $\hbar\omega_0$  порядка одного микроэлектронвольта (например, туннельного расщепления основного состояния центра, подверженного эффекту Яна-Теллера [3]) периодическое во времени возмущение от ультразвуковой волны может приводить к резонансным переходам между уровнями центра. Такие переходы вызовут резонансное поглощение ультразвуковой волны при совпадении частоты звука  $\omega$  и соответствующей резонансной частоты примесной системы  $\omega_0$ . Коэффициент поглощения волны в этом случае будет отличаться от коэффициента релаксационного поглощения звука тем, что он будет пропорционален разности равновесных заселенностей основного и возбужденного состояния центра. А также он будет иметь резонансную частотную зависимость  $\omega_0\omega\tau_2/(1+(\omega-\omega_0)^2\tau_2^2)$ , которая определяется уже временем установления когерентности состояний центра  $\tau_2$ , ответственным за однородное уширение уровней центра (время затухания некогерентных состояний центра, аналог времени поперечной релаксации в теории магнитного резонанса).

Недавно было показано [4], что время декогеренции состояний  $\tau_2$  при определенных условиях может также вносить вклад и в релаксационное поглощение ультразвука. Для любого ян-теллеровского примесного центра, отвечающего так называемой T-e задаче (в которой трехкратно вырожденный электронный уровень T смешивается с двукратно вырожденными локальными e-колебаниями примесного комплекса, приводя к выделению тетрагональных осей комплекса), туннелирование между тремя эквивалентными минимумами его адиабатического потенциала запрещено. Однако этот запрет снимается в магнитном поле, которое смешивает орбитальные состояния T-терма и приводит к открытию нового эффективного канала релаксации примесного центра в магнитных полях. Такое магнитиндуцированное туннелирование приводит к увеличению интенсивности релаксационных переходов между основными состояниями примесного центра в магнитном поле:  $\tau_1^{-1}(B) = \tau_1^{-1}(0) + \Gamma^2\tau_2/(1+\Delta U^2\tau_2^2)$ , где  $\Gamma$  – это туннельный элемент, связанный со смешиванием состояний в магнитном поле (и поэтому пропорциональный его величине),  $\Delta U$  – энергия расщепления собственных состояний центра (которое тоже может зависеть от магнитного поля), между которыми изучаются релаксационные переходы. Этот эффект можно наблюдать при условии  $\Gamma\tau_2 \ll 1$ . Однако поскольку время  $\tau_2$  определяется как неупругими, так и упругими процессами взаимодействия центра с неким термостатом (например, термостатом фононов), а время  $\tau_1$  определяется только неупругими процессами, то всегда выполнено неравенство  $\tau_2 \ll \tau_1$ . Поэтому часто может оказаться так, что в определенных магнитных полях выполнено неравенство  $\Gamma^2\tau_2 \geq \tau_1^{-1}(0)$  даже при условии  $\Gamma\tau_2 \ll 1$ , и эффект существенен. В работе [4] данный эффект позволил объяснить резкий и большой рост релаксационного поглощения

звука в малых магнитных полях (до 0,1 Тл) при низких температурах (1,4; 2; 4 К).

1. M.D. Sturge, *Advances in Research and Applications*, New York: Academic Press, **20**, 92 (1967).
2. V. Gudkov, *The Jahn-Teller Effect: Fundamentals and Implications for Physics and Chemistry*, Berlin, Heidelberg: Springer, **97**, 743 (2009).
3. К.А. Барышников и др., *Физика твердого тела* **54** (3), 442 (2012).
4. N.S. Averkiev et al., *Phys. Rev.* **B 96**, 094431 (2017).

# МАССИВНЫЕ ДИРАКОВСКИЕ ФЕРМИОНЫ В ОДНОМЕРНЫХ МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ КОЛЬЦАХ С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ: ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА И ПЕРСИСТЕНТНЫЕ ТОКИ

Е.С. Азарова, Г.М. Максимова

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: [azarova.ekaterin@yandex.ru](mailto:azarova.ekaterin@yandex.ru)*

С момента открытия эффекта Ааронова-Бома и первого его наблюдения кольцевые устройства продолжают привлекать к себе внимание исследователей. В течение последних десяти лет появилось множество работ, посвященных кольцевым графеновым наноструктурам [см., например, 1-4]. Впервые осцилляции проводимости Ааронова-Бома на графеновом кольце были зарегистрированы Руссо с соавторами [3]. В ряде теоретических работ исследовались электронные спектры в графеновых кольцах различной геометрии.

В данной работе исследуется эффект Ааронова-Бома в одномерных мезоскопических кольцах с неоднородностями из щелевых дираковских материалов. Рассмотрено влияние локального дефекта на структуру энергетических уровней и персистентные токи (ПТ) в графеновых и силициновых кольцах. Показано, что наличие дефекта в графеновом кольце приводит к антикроссингу уровней и к появлению уровней, почти не зависящих от магнитного потока  $\Phi$ , что вызывает уменьшение ПТ и сглаживание их зависимости от  $\Phi$ . Для силицинового кольца в поперечном электрическом поле возникают две группы уровней, характеризующихся различными спиндолинными индексами, пересечение которых вызывает скачки ПТ  $J(\Phi^*)$ . Исследован энергетический спектр неоднородного кольца с произвольным числом локальных дефектов, периодически распределённых вдоль него (сверхрешетка на кольце). Для щелевого графена показано формирование энергетических подзон, количество уровней в которых равно числу дефектов на кольце  $N_d$ ; с ростом  $N_d$  ширина разрешенных подзон увеличивается, а запрещенных уменьшается. Рассмотрено влияние энергетического беспорядка на зонную структуру кольца. Неупорядоченное изменение высоты барьеров означает потерю вращательной симметрии, что в свою очередь приводит к антикроссингу уровней и сглаживанию зависимости  $J(\Phi)$ , т.е. к уменьшению ПТ в таком кольце так же, как в случае одиночного дефекта.

Работа поддержана грантами РФФИ (18-32-00740-мол\_а) Минобрнауки РФ (задание № 3.2637.2017/4.6) и Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

1. P. Recher et al., Phys. Rev. **B 76**, 235404 (2007).
2. D.R. da Costa et al., Phys. Rev. **B 89**, 075418 (2014).
3. S. Russo et al., Phys. Rev. **B 77**, 085413 (2008).
4. D. Smirnov, H. Schmidt, R.J. Haug, Appl. Phys. Lett. **100**, 203114 (2012).

# ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В СВЕРХРЕШЕТКАХ СО СПИН-ОРБИТАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ РАШБЫ

А.Р. Зайнагутдинов, А.В. Тележников

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: [zoya1066@mail.ru](mailto:zoya1066@mail.ru)*

В последние годы успехи в методах роста материалов привели к возможности изготовления полупроводниковых гетероструктур с различной геометрией, где электроны и дырки могут быть ограничены в одном или нескольких направлениях потенциальными барьерами. Одними из таких структур являются объекты нано-кольцевой формы, которые востребованы для изучения эффекта Ааронова-Бома и в различных технологических применениях в оптоэлектронных устройствах.

В частности, в работе [1] исследовалось влияние серии чередующихся прямоугольных квантовых ям и барьеров, расположенных вдоль квантового кольца, на его энергетический спектр. Также в последнее время представляет большой интерес исследование эффектов, связанных со спин-орбитальным взаимодействием (СОВ) в полупроводниковых гетероструктурах в связи с открывающимися возможностями для манипулирования спиновой степенью свободы электронов. Исследование особенностей спектра носителей в кольцах с СОВ Рашбы в аксиальном магнитном поле, в частности, выполнено в [2].

В настоящей работе рассматривается полупроводниковое кольцо с периодически повторяющимися квантовыми ямами с СОВ Рашбы. Таким образом, структура представляет собой квазиодномерную сверхрешетку с СОВ. Нами получено дисперсионное уравнение и на его основе выполнен расчёт энергетического спектра носителей (рис. 1). В работе представлен анализ зависимости энергетического спектра от параметров системы.

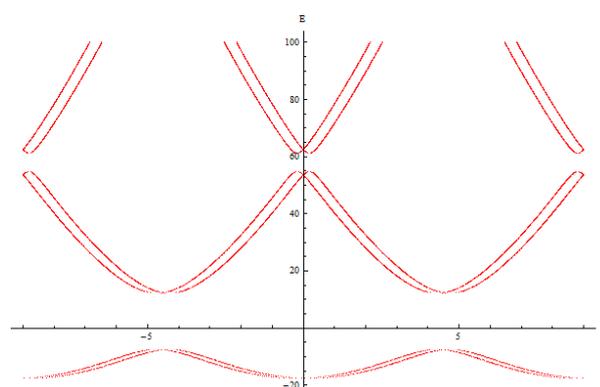


Рис. 1. Энергетический спектр кольца с периодическим потенциалом и SOI Рашбы

Работа была выполнена в рамках проектной части госзадания Минобрнауки РФ (Государственное задание №. 3.2637.2017/4.6).

1. D.R. da Costa et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **29**, 165501 (2017).
2. J. Splettstoesser, M. Governale, U. Zülicke, *Phys. Rev.* **B 68**, 165341 (2003).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРАХ

Д.А. Кулаков, Д.В. Хомицкий

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,*

*Нижний Новгород*

*E-mail: [deniskulakov@mail.ru](mailto:deniskulakov@mail.ru)*

Исследование задачи о возможности управления характером движения и спином волнового пакета в топологических изоляторах (ТИ) при помощи магнитных стационарных и нестационарных барьеров представляет самостоятельный интерес как метод управления движением и спином волнового пакета, а также как перспективный инструмент для будущих приложений в наноэлектронике и спинтронике. Данная работа посвящена численному моделированию динамики волновых пакетов, сформированных из двумерных поверхностных состояний в трехмерных ТИ [1].

В рамках данной исследовательской задачи численно решается нестационарное уравнение Шредингера [2], согласно методике, представленной [3].

Численное значение коэффициента надбарьерного прохождения сопоставляется с аналитической формулировкой, полученной для графена [4], спектр которого имеет аналогичную особенность в виде линейного спектра вблизи точки  $k = 0$ .

Исследована динамика волновых пакетов в структурах на основе трехмерных ТИ. Установлено влияние начальных условий на динамику системы. Рассмотрена динамика между немагнитными и магнитными потенциальными барьерами различной формы. Исследовано надбарьерное прохождение сквозь данные структуры. Обнаружено влияние системы барьеров на характер движения, изменение энергии и спиновую плотность.

Работа выполнена при поддержке гранта в рамках проектной части Государственного задания Минобрнауки РФ 3.3026.2017/ПЧ.

1. X-L. Qi, S-Ch. Zhang, *Reviews of Modern Physics* **83**, 1057 (2011).
2. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, *Теоретическая физика: Т.III. Квантовая механика (нерелятивистская теория)*, - М.: Наука, 1989.
3. С. Кунин, *Вычислительная физика*, - М: Мир, 1992.
4. J. Milton Pereira et al., *Physical Review* **B 74**, 045424 (2006).

# КВАНТОВЫЕ СОСТОЯНИЯ НОСИТЕЛЕЙ В КВАДРУПОЛЬНЫХ ПОЛУМЕТАЛЛАХ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.А. Перов, А.С. Рульков, Е.А. Морозова

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород

E-mail: [aleksrulkov@yandex.ru](mailto:aleksrulkov@yandex.ru)

Топологические квадрупольные полуметаллы (ТКПМ) новый класс материалов, предсказанный относительно недавно. Характерная особенность этих материалов состоит в нахождении топологически защищённых состояний носителей в объёме структуры, а не на границе, как в обычном топологическом изоляторе (ТИ). Простейшая модель ТКПМ может быть представлена в виде послойной комбинации двумерных топологических изоляторов на основе структуры  $\text{Bi-Se}$ .

Первопринципные расчёты зонной структуры данной простейшей модели, позволяют определить эффективный гамильтониан для носителя, находящегося вблизи конкретного узла подрешётки двумерной структуры модели в объёме ТКПМ [1, 2]. В результате на каждом узле для электрона формируется четыре бесспиновые орбитали, образующие некую ячейку с трансляционной симметрией. Расчёты квантовых состояний носителей в данной модели свидетельствуют о том, что энергетические подзоны электрона будут двукратно вырождены.

Действие внешнего однородного магнитного поля, ориентированного перпендикулярно плоскости двумерного слоя ТИ объёмной структуры ТКПМ, приведёт к снятию вырождения в энергетическом спектре. Численное решение уравнения Шредингера с данным эффективным гамильтонианом в магнитном поле позволило рассчитать энергетический спектр электрона в зависимости от величины магнитного поля  $p/q = |e|\mathcal{H}a^2/2\pi\hbar c$ , где  $p$  и  $q$  взаимно простые числа,  $a$  – постоянная решётки,  $\mathcal{H}$  - напряженность магнитного поля (рис. 1).

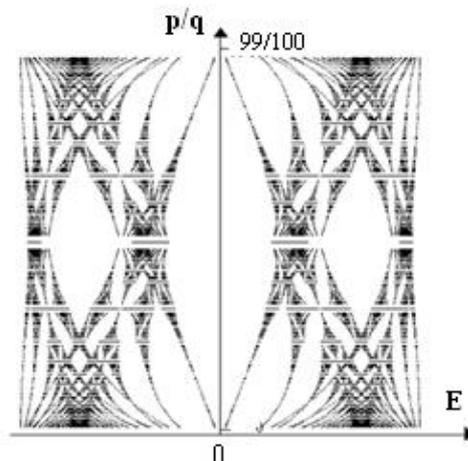


Рис. 1. Энергетический спектр электрона в ТКПМ в зависимости от величины магнитного поля

1. M. Lin et al., arXiv. 1708.08457 (2017).
2. W.A. Benalcazar et al., arXiv. 1611.07987 (2017).

**ELECTRONIC PHENOMENA  
IN NANOSTRUCTURES**

## HOPPING MAGNETOTRANSPORT IN QUATERNARY CHALCOGENIDES

E. Lähderanta<sup>1</sup>, E. Arushanov<sup>2</sup>, K.G. Lisunov<sup>1,2</sup>, E. Hajdeu-Chicarosh<sup>1,2</sup>,  
M. Guc<sup>1,2</sup>, I.V. Bodnar<sup>3</sup>, M. Shakhov<sup>4</sup>, S. Levcenko<sup>5</sup>, I. Zakharchyk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland*

<sup>2</sup>*Institute of Applied Physics, Chisinau, Republic of Moldova*

<sup>3</sup>*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus*

<sup>4</sup>*Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russia*

<sup>5</sup>*Helmholtz Zentrum Berlin für Materialien und Energie, Berlin, Germany*

*E-mail: [Erkki.lahderanta@lut.fi](mailto:Erkki.lahderanta@lut.fi)*

The quaternary chalcogenide *p*-type semiconductors, belonging to a family of I<sub>2</sub>-II-IV-VI<sub>4</sub>, are among the most promising materials for utilization in photovoltaic conversion, investigated in recent time. In particular, they exhibit an efficiency exceeding 11 % for solar cells based on a purely Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> compound, and up to 12,6 % for devices fabricated with Cu<sub>2</sub>ZnSn(S, Se)<sub>4</sub> solid solutions [1]. At the same time, incorporation of Ge even at a level smaller than 10 % leads to a substantial increase of the solar cell efficiency [2].

Investigations of magnetotransport in the Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub>, Cu<sub>2</sub>ZnSn<sub>x</sub>Ge<sub>1-x</sub>Se<sub>4</sub>, Cu<sub>2</sub>ZnGeS<sub>4</sub> and Cu<sub>2</sub>ZnSn<sub>x</sub>Ge<sub>1-x</sub>S<sub>4</sub> single crystals are presented here. Zero-field resistivity,  $\rho(T)$ , magnetoresistance (MR) and Hall effect have been studied in pulsed magnetic fields up to  $B = 20$  T. The purpose is identification of the charge transfer mechanisms and determination of important electronic parameters and details of the energy spectrum of charge carriers.

Presence of the Mott variable-range hopping (VRH) conductivity [3] within a broad temperature interval  $\Delta T_M$  with an upper limit lying sometimes close to the room temperature is a common feature of all the investigated materials. In addition, the nearest-neighbor hopping charge transfer was established above  $\Delta T_M$ . Next, the mechanism connected to activation of holes on the mobility edge of the acceptor band was observed both above and below  $\Delta T_M$ . Eventually, the Shklovskii-Efros VRH conductivity [4] was observed in Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> below 4,2 K. MR contained usually the positive and the negative contributions. They were attributed to shrinkage of the impurity wave functions in the magnetic field [4] and to quantum interference effects [5], respectively. Finally, the Hall coefficient,  $R(T)$ , in Cu<sub>2</sub>ZnGeS<sub>4</sub> was observed to be negative (despite of the *p*-type conductivity), exhibiting in the Mott VRH region the temperature dependence quite close to that of  $\rho(T)$ , which is of the hopping charge transfer [6]. Analysis of the  $\rho(T)$  and MR data permitted determination of the acceptor concentration, density of the localized states, as well as positions of the Fermi level and the mobility edge in the acceptor band. The enhanced localization of the holes, observed in Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> below 4,2 K, was explained by the quantum interference effects, too [5].

This work was supported by Project IRSES MAGNONMAG 295180, as well as by the Institutional Project No. CSSDT 15.817.02.04A and project STCU 6224. E. H.-C. acknowledges the World Federation of Scientists National Scholarship Program.

1. W. Wang et al., *Adv. Energy Mater.* **4**, 1301465 (2014).
2. S. Giraldo et al., *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **24**, 1359 (2016).
3. N.F. Mott, E.A. Davies, *Electron Processes in Non-Crystalline Materials*, Oxford: Clarendon, 1979.
4. B.I. Shklovskii, A.L. Efros, *Electronic Properties of Doped Semiconductors*, Berlin: Springer, 1984.
5. B.I. Shklovskii, B.Z. Spivak, in *Scattering and Interference Effects in Variable Range Hopping Conduction*, Amsterdam: North-Holland, 1991.
6. Yu.M. Gal'perin, E.P. German, V.G. Karpov, *Sov. Phys. JETP* **72**, 193 (1991).

## SPIN CENTERS ASSOCIATED WITH SILICON VACANCIES IN SiC

S.A. Tarasenko

*Ioffe Institute RAS, Saint-Petersburg, Russia*

*E-mail: [tarasenko@coherent.ioffe.ru](mailto:tarasenko@coherent.ioffe.ru)*

Silicon Carbide (SiC) is a unique semiconductor that occurs in many polytypes and has remarkable and tunable electrical and optical properties, and radiation stability. Of particular interest to fundamental research in optics as well as practical applications in the field of quantum technologies and sensorics are color centers associated with silicon vacancies ( $V_{\text{Si}}$ ) [1, 2].  $V_{\text{Si}}$ -centers are multi-electron complexes with the  $3/2$  spin. They are characterized by a spin-dependent optical cycle, which enables the spin alignment of the centers and the read-out of their spin states by optical means. Applying an additional external radio-frequency field, one can effectively control the spin state of the aligned centers and create a coherent superposition of the eigen spin states.

Here, we discuss the spin and optical properties of  $V_{\text{Si}}$  centers in silicon carbide. We present the results of a theoretical study of the fine structure, optical alignment, spin dynamics, and the relaxation of spin coherence of  $V_{\text{Si}}$  centers [2]. The results are compared with the experimental data obtained by the optically detected magnetic resonance (ODMR) technique. The structure of the spin sublevels of the  $V_{\text{Si}}$  centers turns out to be highly sensitive to external magnetic and electric fields, temperature variation, mechanical stress, etc., which can be used to create highly sensitive sensors [1]. Modern achievements in magnetometry and thermometry based on  $V_{\text{Si}}$ -centers and the underlying physics are briefly overviewed. Finally, we discuss the mechanisms of inhomogeneous broadening of the ODMR lines in an ensemble of  $V_{\text{Si}}$ -centers, associated with local strain of the crystal and/or hyperfine electron-nuclear interaction, as well as the prospect for further increasing the sensitivity employing the technique of spectral hole burning in the ODMR lines.

1. D. Simin et al., Phys. Rev. **X** **6**, 031014 (2016).
2. S.A. Tarasenko et al., Phys. Status Solidi **B** **255**, 1700258 (2018).

# ANOMALOUS AND TOPOLOGICAL HALL EFFECT

I.V. Rozhansky

*Ioffe Institute RAS, Saint-Petersburg, Russia*

*E-mail: [rozhansky@gmail.com](mailto:rozhansky@gmail.com)*

The anomalous Hall effect (AHE) is an additional contribution to the Hall resistance associated with the magnetization of the sample. There are several mechanisms of the anomalous Hall effect, all of them are based on the spin-orbit interaction, and polarization of the carriers along the spin is necessary for the appearance of a transverse electric current. The talk presents a brief review of the known mechanisms of AHE in the regime of metallic and hopping conductivity. The theoretical description of the AHE in these two cases turns out to be completely different.

The symmetry breaking with respect to time inversion, which is necessary for the appearance of a transverse current, is not necessarily related to the spin polarization of the carriers or to the presence of a spin-orbit interaction in the system. Another possibility of the appearance of a transverse current, the topological Hall effect (THE), is associated with the exchange scattering of an electron on chiral vortex textures of magnetization. In addition to the fundamental importance of the THE, there are ideas of applied use of this phenomenon, for example, in so-called racetrack memory devices on magnetic skyrmions.

From the physical point of view, there are two qualitatively different regimes of the THE. The adiabatic regime takes place in the case of a large exchange interaction constant and is described in terms of the geometric Berry phase. The motion of an electron in a chiral magnetization field leads to a transverse spin current that leads to a charge current only if the carriers in the sample are spin-polarized, as in the AHE. In the case of a weak exchange coupling (non-adiabatic regime), a theoretical description using the Berry phase is not applicable. Another theoretical approach, based on perturbation theory, predicts a pronounced charge, rather than a spin, Hall effect, even for completely unpolarized free carriers [1].

We have developed a theory of the THE, based on an analysis of the problem of spin-dependent electron scattering on a localized chiral magnetization field. This approach is valid for an arbitrary value of the adiabatic parameter. The developed theory is applied to the analysis of the THE in a two-dimensional film with magnetic skyrmions. We managed to trace a non-trivial transition between the two regimes. In the non-adiabatic regime, the opposite spins are scattered in the same transverse direction (fig. 1, left). In adiabatic mode, the transverse charge current turns into a purely spin current, when opposite spins are scattered in opposite directions (fig. 1, right). Thus, the obvious contradiction between the results of adiabatic and perturbative theoretical approaches to the thermodynamics is eliminated [2].

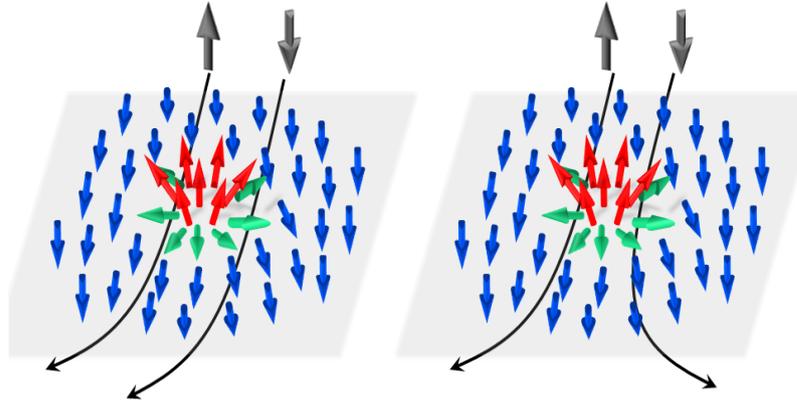


Fig.1. The topological Hall effect in the non-adiabatic (left) and adiabatic (right)

In addition, we have established that asymmetric exchange scattering can lead to a transverse current for chiral magnetic textures with zero topological charge, so, perhaps, this phenomenon should be called the chiral (and not topological) Hall effect.

The possibility of realizing the topological Hall effect in chiral structures with zero topological charge means that this phenomenon should be observed in a much wider class of materials than previously thought. In particular, the topological Hall effect should be observed in dilute magnetic semiconductors with spin-orbit interaction, including in structures based on (Ga, Mn), As, and also in topological insulators with magnetic impurities.

1. K.S. Denisov et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 027202 (2016).
2. K.S. Denisov et al., Scientific Reports **7**, 17204 (2017).

## TUNNELING TRANSPORT IN GaAs/AlAs SUPERLATTICES WITH ELECTRIC DOMAINS

I.V. Altukhov<sup>1</sup>, M.S. Kagan<sup>1</sup>, S.K. Paprotskiy<sup>1</sup>, I.S. Vasil'evskii<sup>2</sup>,  
A.N. Vinichenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia  
E-mail: [kagan@cplire.ru](mailto:kagan@cplire.ru)*

GaAs/AlAs short-period superlattices (SLs) at the domain formation was studied at room temperature. The SLs consisted of 100 periods of 4 nm GaAs / 2 nm AlAs between heavily doped  $n^+$  cap layer and  $n^+$  substrate. Domains formation is due to the negative differential conductivity arising in superlattices at resonant electron tunneling between neighboring quantum wells (Esaki - Tsu mechanism). The ring-shaped mesa structures of 7 - 15  $\mu\text{m}$  diameters and 0.8 – 1,5  $\mu\text{m}$  ring widths with ring metal contacts formed THz optical cavity for free-space wavelengths of 110 to 160  $\mu\text{m}$ . The change in domain instability regimes is traced both at and without self-excitation of the THz cavity. The different conductivity mechanisms were found to exist in weak and strong electric field regions: the conductivity outside the domain is miniband one (due to Esaki - Tsu resonant tunneling), while the conductivity inside the domain is due to nonresonant (sequential) tunneling.

The series of maxima observed in the current-voltage characteristics in the range of moving domains is supposed to be the result of peculiarities in nonresonant tunneling through barriers inside the triangular domain. The current hysteresis observed at sweep-up and sweep-down of the bias was explained by a transition between moving and static domain regimes.

The change of the cavity parameters leads to the significant change in the threshold field for domain formation. The reason for this change can be the rise of high enough alternating field in the cavity, which shifts the operating point due to the rectification of ac field because of strong nonlinearity of the SL. The effect of THz cavity on the resonant tunneling in GaAs/AlAs SLs points to the possibility of the excitation of THz cavity by the dynamical negative resistance of SL with electric domains.

The work is supported in part by RFBR grants 16-29-09626, 16-29-03135 and RAS programs «Nanostructures: physics, chemistry, biology, basics of technology» and «New sources of mm and THz radiation and their perspective applications».

# PHOTOGALVANIC EFFECTS AND FREQUENCY MIXING IN SEMICONDUCTOR NANOSTRUCTURES

G.V. Budkin

*Ioffe Institute RAS, Saint-Petersburg, Russia*

*E-mail: [gbudkin@gmail.com](mailto:gbudkin@gmail.com)*

Acting on the free charge carriers alternating electric field of the radiation, passing through semiconductor structures, induces an electric current. A linear response to an ac electric field will lead to the generation of a current at the same frequency with a magnitude proportional to the amplitude of the field. However, in a structure lacking the spatial inversion symmetry, second-order effects, proportional to the radiation intensity, can occur, such as photogalvanic effect, second harmonic generation, and frequency mixing, if the radiation spectrum contains several harmonics. Experimental and theoretical studies of photogalvanic effects and second harmonic generation in quantum wells [1], topological insulators [2], and graphene [3] provide information on the symmetry of semiconductor structure, the details of the energy spectrum, and electron scattering mechanisms.

The efficiency of photocurrent generation can be greatly enhanced in an external magnetic field under cyclotron resonance conditions. Here, we present a theory of photogalvanic effects and frequency mixing in quantum wells with structural asymmetry in an external magnetic field. We develop a microscopic model of the phenomena in the framework of the Boltzmann kinetic equation in the geometries of normal and tilted static magnetic field. Analytical expressions for the currents are obtained as a function of the radiation frequency and polarization and the magnitude of the static magnetic field. It is shown that in the geometry of a normal magnetic field the photogalvanic effect is resonantly enhanced when the cyclotron frequency matches the radiation frequency, and the frequency mixing enhancement is observed when the cyclotron frequency is close to one of the frequencies of the radiation spectrum or their combination. It is demonstrated that, in the geometry of the tilted magnetic field, the generation of a direct current is due to the asymmetry of charge carriers scattering caused by in-plane component of the static magnetic field. It is shown that in this geometry the resonant amplification of the radiation-induced currents is also observed on the first subharmonic of the cyclotron resonance.

1. G.V. Budkin, S.A. Tarasenko, Phys. Rev. **B 93**, 075306 (2016).
2. K.-M. Dantscher et al., Phys. Rev. **B 92**, 165314 (2015).
3. N. Kheirabadi, E. McCann, V.I. Fal'ko, Phys. Rev. **B 97**, 075415 (2018).

# RESONANCE AND RELAXATION ULTRASONIC ATTENUATION BY IMPURITY CENTERS IN SEMICONDUCTORS

K.A. Baryshnikov

*Ioffe Institute RAS, Saint-Petersburg, Russia*

*E-mail: [barysh.1989@gmail.com](mailto:barysh.1989@gmail.com)*

Ultrasonic spectroscopy of crystals makes it possible to determine many parameters and to reveal important properties of semiconductors and metals, such as the shape of the Fermi surface for a given metal, the mobility and concentration of charge carriers, the deformation potential constant, the structural features of the crystal lattice, the anharmonicity of the binding forces in the crystal, the relaxation time of thermal phonons, and a lot others. For ultrasonic spectroscopy, as a rule, bulk elastic waves are used. Of particular interest are ultrasonic studies of the concentration and properties of impurity centers in semiconductors [1, 2]. This is due to the fact that the frequencies of ultrasonic waves lie in the range from 10 MHz to 10 GHz, which makes it possible to measure the relaxation times of many impurity centers at low temperatures, which usually take the values  $10^{-7} - 10^{-9}$  s.

The measurement of the relaxation time of the impurity center is based on the phenomenon of the relaxation absorption of ultrasound by the center. The length of an ultrasonic wave can vary in the range from one micron to several tenths of a millimeter, which many times exceeds the radius of localization of charge carriers by impurities in semiconductors. This makes it possible to consider the action of ultrasound on such a center as a periodically varying uniform deformation perturbation splitting the eigenstates of the impurity by energy. Since the time for establishing the thermodynamically equilibrium populations of the eigenstates of the center is finite and comparable with the period of the ultrasonic wave, then in the field of the ultrasonic wave at each instant of time there will be an appreciable deviation of the population of the split energy levels of the center from the equilibrium one. The presence of a nonequilibrium population of centers induced by a sound wave leads to a relaxation absorption of sound at a given center.

The attenuation coefficient of the ultrasonic wave in such a case will be proportional to the concentration of the impurity centers on which the wave is absorbed, the square of the deformation potential constant, the sum of the equilibrium populations of the energy levels split by the ultrasonic wave. Also, the absorption coefficient is proportional to the Debye term describing the frequency dependence of the sound absorption,  $\omega^2\tau_1/(1+\omega^2\tau_1^2)$ , where  $\tau_1$  is the energy relaxation time of the center (the time of arrival of the center to thermodynamic equilibrium at a given temperature, the analog of the longitudinal relaxation time in the theory of magnetic resonance). The time  $\tau_1$  uniquely depends on the temperature and varies greatly with its change. A technique was developed [2] for detecting the temperature dependence of the relaxation time of impurity centers by analyzing the temperature dependence of the ultrasound absorption at these centers.

However, in the presence of internal energy splittings of the impurity center by an amount  $\hbar\omega_0$  of the order of one microelectronvolt (for example, the

tunnel splitting of the ground state of the center subjected to the Jahn-Teller effect), a periodic in time perturbation from the ultrasonic wave can lead to resonant transitions between the levels of the center. Such transitions will cause the resonance absorption of the ultrasonic wave when the frequency of the sound  $\omega$  coincides with the corresponding resonant frequency of the impurity system  $\omega_0$ . The absorption coefficient of the wave in this case will differ from the coefficient of the relaxation absorption of sound in the way that it will be proportional to the difference in the equilibrium populations of the ground and excited states of the center. And also it will have a resonant frequency dependence  $\omega_0\omega\tau_2/(1+(\omega-\omega_0)^2\tau_2^2)$ , which is determined by the time of establishing the coherence of the states of the center  $\tau_2$ , responsible for the homogeneous broadening of the center levels (the decay time of the incoherent states of the center, the analog of the transverse relaxation time in the theory of magnetic resonance).

It was recently shown [4] that the decoherence time of states  $\tau_2$  under certain conditions can also contribute to the relaxation absorption of ultrasound. For any Jahn-Teller impurity center that corresponds to the so-called T-e problem (in which a threefold degenerate electron level T is mixed with doubly degenerate local e-vibrations of the impurity complex, leading to the distinguishing of the tetragonal axes of the complex), the tunneling between three equivalent minima of its adiabatic potential is forbidden. However, this prohibition is removed in a magnetic field that mixes the orbital states of the T-term and leads to the appearance of a new effective channel of relaxation of the impurity center in magnetic fields. Such magnetic field induced tunneling leads to an increase in the intensity of the relaxation transitions between the ground states of the impurity center in a magnetic field:  $\tau_1^{-1}(\mathbf{B}) = \tau_1^{-1}(0) + \Gamma^2\tau_2/(1+\Delta U^2\tau_2^2)$ , where  $\Gamma$  is the tunnel element associated with the mixing of states in a magnetic field (and therefore proportional to its magnitude),  $\Delta U$  is the splitting energy of eigenstates of the center (which can also depend on the magnetic field), between which the relaxation transitions are studied. This effect can be observed under the condition  $\Gamma\tau_2 \ll 1$ . However, since the time  $\tau_2$  is determined by both inelastic and elastic processes of the center interaction with a certain thermostat (for example, a phonon thermostat), and the time  $\tau_1$  is determined only by inelastic processes, then  $\tau_2 \ll \tau_1$  is always satisfied. Therefore, it can often turn out that in certain magnetic fields the inequality  $\Gamma^2\tau_2 \geq \tau_1^{-1}(0)$  is satisfied even under the condition  $\Gamma\tau_2 \ll 1$ , and the effect is significant. In [4], this effect made it possible to explain the sharp and large growth of the relaxation absorption of sound in small magnetic fields (up to 0,1 T) at low temperatures (1,4; 2; 4 K).

1. M.D. Sturge, *Advances in Research and Applications*, New York: Academic Press, **20**, 92 (1967).
2. V. Gudkov, *The Jahn-Teller Effect: Fundamentals and Implications for Physics and Chemistry*, Berlin, Heidelberg: Springer, **97**, 743 (2009).
3. K.A. Baryshnikov et al., *Solid State Physics* **54(3)**, 442 (2012).
4. N.S. Averkiev et al., *Phys. Rev. B* **96**, 094431 (2017).

# MASSIVE DIRAC FERMIONS IN ONE-DIMENSIONAL MESOSCOPIC RINGS WITH INHOMOGENEITIES: ELECTRONIC PROPERTIES AND PERSISTENT CURRENT

E.S. Azarova, G.M. Maksimova

*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*

*E-mail: [azarova.ekaterin@yandex.ru](mailto:azarova.ekaterin@yandex.ru)*

Since the discovery of the Aharonov-Bohm effect and its first observation, ring structures continue to attract the attention of the scientific community. This is due not only to the fact that they exhibit many new physical phenomena associated with quantum interference effects, but also with the possibilities of using them in various optoelectronic devices. Ring graphene nanostructures were widely studied both theoretically and experimentally [1-4]. Russo and co-authors [3] have observed the Aharonov-Bohm conductivity oscillations on a graphene ring for the first time. In some theoretical studies, electronic spectra in graphene rings of various geometries were investigated.

In this paper we investigate the Aharonov-Bohm effect in one-dimensional mesoscopic rings with inhomogeneities made of gapped Dirac materials. The effect of a local defect on the energy structure and persistent currents (PC) in graphene and silicene rings is considered. It is shown that the presence of a defect in the graphene ring induces levels anticrossing and leads to the appearance of levels that are almost independent of the magnetic flux. It causes a decrease in the PC and a smoothing of the dependence  $J(\Phi)$ . Transverse electric field leads to the appearance of two groups of levels for the silicene ring characterized by different spin-valley indices. Due to its crossing there are additional jumps of PC. The energy spectrum of a ring with an arbitrary number of periodically distributed local defects (superlattice on a ring) is studied. For gapped graphene, it is shown that the energy levels grouped into subbands: the number of levels in the subbands is equal to the number of defects  $N_d$  on the ring; with the growth of  $N_d$ , the width of the allowed (forbidden) subbands increases (decreases). The effect of the energy disorder on the band structure of such a ring is considered. Barrier height fluctuations lead to a loss of rotational symmetry, which results in levels anticrossing and smoothing of the dependence  $J(\Phi)$ , i. e. a decrease in the PC in the same way as in the case of a single defect.

This work is supported by the RFBR (Grant no. 18-32-00740-mol\_a), Russian Ministry of Education and Science through the project part of the federal task (application №3.2637. 2017) and the «BASIS» Foundation.

1. P. Recher et al., Phys. Rev. **B 76**, 235404 (2007).
2. D.R. da Costa et al., Phys. Rev. **B 89**, 075418 (2014).
3. S. Russo et al., Phys. Rev. **B 77**, 085413 (2008).
4. D. Smirnov, H. Schmidt, R.J. Haug, Appl. Phys. Lett. **100**, 203114 (2012).

# ELECTRON STATES IN SEMICONDUCTOR RINGS WITH RASHBA SPIN-ORBIT INTERACTION

A.R. Zaynagutdinov, A.V. Telezhnikov

*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*

*E-mail: [zoya1066@mail.ru](mailto:zoya1066@mail.ru)*

In recent years, advances in methods of material growth have led to the possibility of fabricating semiconductor heterostructures with different geometries, where electrons and holes can be limited in one or several directions by potential barriers. One of such structures are objects of nano-ring shape, which are in demand for studying the Aaronov-Bohm effect and in various technological applications in optoelectronic devices.

In particular, the influence of a series of alternating rectangular quantum wells and barriers located along a quantum ring on its energy spectrum was investigated in [1]. Also, recently it is of great interest to research the effects associated with the spin-orbit interaction (SOI) in semiconductor heterostructures in connection with the opening possibilities for manipulating the spin degree of electron freedom. The research of the features of the carrier spectrum in rings with Rashba SOI in an axial magnetic field is, in particular, carried out in [2].

In this paper we consider a semiconductor ring with periodically repeating quantum wells with Rashba SOI. Thus, the structure is a quasi-one-dimensional superlattice with SOI. We obtained the dispersion equation and calculated the energy spectrum of the carriers on its basis (fig. 1). The paper presents an analysis of the dependence of the energy spectrum on the parameters of the system.

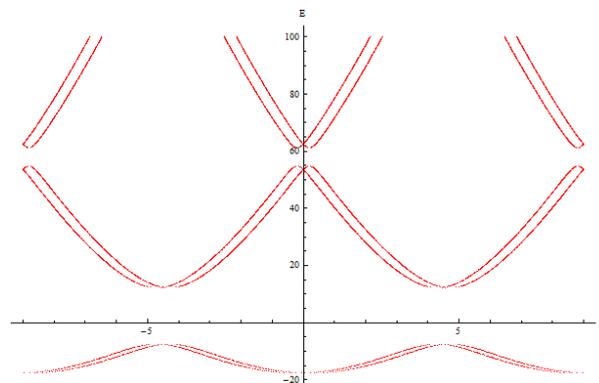


Fig. 1. Energy spectrum of a ring with periodic potential and SOI Rashba

The work was supported by the Russian Ministry of Education and Science (State Assignment №. 3.2637.2017/4.6).

1. D.R. da Costa et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **29**, 165501 (2017).
2. J. Splettstoesser, M. Governale, U. Zülicke, *Phys. Rev.* **B 68**, 165341 (2003).

# MODELING OF THE DYNAMICS OF WAVE PACKETS IN THREE-DIMENSIONAL TOPOLOGICAL INSULATORS

D.A. Kulakov, D.V. Khomitsky

*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*  
*E-mail: [deniskulakov@mail.ru](mailto:deniskulakov@mail.ru)*

The study of the problem of the possibility of controlling the nature of motion and the spin of the wave packet in topological insulators using magnetic stationary and nonstationary barriers is of independent interest as a method of controlling the motion and spin of the wave packet, and also as a promising tool for future applications in nanoelectronics and spintronics. This paper is devoted to numerical simulation of the dynamics of wave packets formed from two-dimensional surface states in three-dimensional topological insulators [1].

In the framework of that article the nonstationary Schrödinger equation [2] is solved numerically, according to the technique presented in [3].

The numerical value of the coefficient of the above-barrier transmission is compared with the analytical formulation obtained for graphene [4], whose spectrum has an analogous feature in the form of a linear spectrum near the point  $k = 0$ .

The dynamics of wave packets is investigated in structures based on three-dimensional topological insulators. The effect of the initial conditions on the dynamics of the system is established. Dynamics in between non-magnetic and magnetic potential barriers of various shapes is considered. The above-barrier passage through these structures is investigated. The effect of the barrier system on the nature of the motion, the change in energy, and the spin density are found.

The work is supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (State Assignment No 3.3026.2017/PCh).

1. X-L. Qi, S-Ch. Zhang, *Reviews of Modern Physics* **83**, 1057 (2011).
2. L.D. Landau, E.M. Lifshitz, *Theoretical Physics: T.III. Quantum mechanics (nonrelativistic theory)*, M.: Nauka, 1989.
3. S. Kunin, *Computational Physics*: M: Mir Publishers, 1992.
4. J. Milton Pereira et al., *Physical Review* **B 74**, 045424 (2006).

# QUANTUM STATES OF ELECTRONS IN TOPOLOGICAL QUADRUPOLAR SEMIMETALS WITHIN A MAGNETIC FIELD

A.A. Perov, A.S. Rulkov, E.A. Morozova

*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*

E-mail: [aleksrulkov@yandex.ru](mailto:aleksrulkov@yandex.ru)

Recently a new class of materials such as topological quadrupolar semimetals (TSMs) was predicted [1]. TSMs include a bulk quadrupole moments with gapless bulk nodes, yet without gapless surface modes. The simplest model of topological quadrupolar semimetal is based on an extension of the 2D topological insulator (Bi-Se) to a layered 3D system [1, 2].

First-principle method calculations (Hartree-Fock method) of the band structure of the simplest model allow determining the effective Hamiltonian for the electron located near a lattice node in the TSM bulk. A tightbinding representation of the effective Hamiltonian describes four spinless orbitals per unit cell [2]. These spinless orbitals define a certain cell with translational symmetry. During research of quantum states we found that the energy subbands of particles are two times degenerated.

The main aim of this research is to learn about quantum states of electron in the external homogenous magnetic field. This magnetic field is directed perpendicular to the surface of 2D layer topological insulator. We have numerically calculated the energy spectrum of an electron in the external magnetic field based on the proposed effective Hamiltonian (fig. 1). The dependence on the magnetic field is determined by expression:  $p/q = |e|\mathcal{H}a^2/2\pi\hbar c$ , where  $p$  and  $q$  are coprimes,  $a$  – lattice period,  $\mathcal{H}$  - magnetic field magnitude.

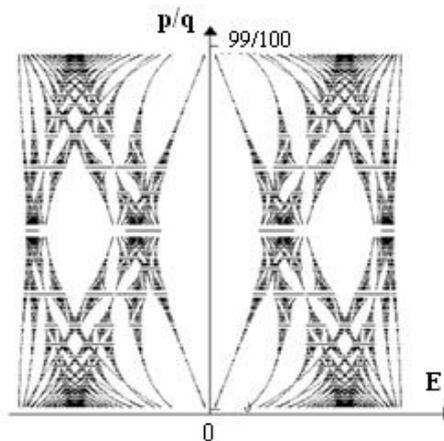


Fig. 1. The energy spectrum of an electron in TSM as a function of the magnetic field

1. M. Lin et al., arXiv. 1708.08457 (2017).
2. W.A. Benalcazar et al., arXiv. 1611.07987 (2017).

# **НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

## СИНТЕЗ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГРАФЕНА БОЛЬШОГО РАЗМЕРА

К.Н. Ельцов

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

*E-mail: [eltsov@kapella.gpi.ru](mailto:eltsov@kapella.gpi.ru)*

Синтез бездефектных монокристаллов графена больших размеров в настоящее время является совершенно актуальной задачей, которая решается различными способами (см. например, обзоры [1-4]). Особенностью роста т. н. ван-дер-ваальсовых кристаллов, т. е. слоистых материалов, в которых атомные слои связаны между собой силами Ван-дер-Ваальса, является отсутствие необходимости эпитаксиальной связи с подложкой и, как следствие, возможен рост кристаллов на гладких подложках даже в случае сильного рассогласования атомных параметров подложки и растущего слоя. Тем не менее, эпитаксиальный рост графена на монокристаллической подложке с небольшим рассогласованием параметров решетки (около 1 %) является приоритетным в силу потенциальной возможности роста монокристалла графена размером с подложку. Недавно нами [5] была продемонстрирована возможность синтеза монокристалла графена на образце Ni(111) размером 6×6 мм. Графен был синтезирован методом т. н. термопрограммируемого роста (ТПР), который включал в себя адсорбцию пропилена при комнатной температуре, с последующим прогревом образца при температуре 500 °С. Как выяснилось, в результате такой процедуры получается эпитаксиальная, и соответственно, монокристаллическая, монослойная пленка углерода, упакованная в решетку графена. Однако, электронная структура (дисперсия электронов) в окрестности К-точки такой углеродной пленки отлична от конуса Дирака в силу сильной гибридизации  $\pi$ -электронов углеродной пленки с объемными состояниями подложки, что приводит к возникновению запрещенной щели и параболичности зоны занятых и свободных состояний. Для снятия гибридизации электронных состояний между углеродной пленкой и поверхностью активного металла обычно вводят инертную прослойку в виде монослоя благородного металла (Au, Ag), что приводит к восстановлению конуса Дирака. Как располагаются атомы золота, и какая атомная структура формируется при взаимодействии золота с поверхностью исходного металла (в частности, Ni(111)), является отдельным вопросом, который будет освещен в предлагаемой лекции.

Практически все методы роста графена на поверхности металлов с использованием углеводородных молекул в качестве источника углерода основаны на диссоциации адсорбирующихся молекул на нагретой поверхности. Это так называемый метод CVD – chemical vapor deposition, в котором температура поверхности металла составляет от 500 до 1200 °С в зависимости от вида металла. Именно об этом подходе идет речь в имеющихся обзорах по синтезу графена из углеводородных молекул [1-4 и более свежие]. В случае разделения процесса адсорбции углеводородных молекул при достаточно низкой температуре (комнатная и ниже) и процесса после-

дующей сегрегации и агрегации атомов углерода в структуру графена при высоких температурах (500-600 °С) оказывается возможным создавать гораздо более совершенный графен, а также наблюдать шаг за шагом стадии реакции на атомном уровне, применяя метод сканирующей туннельной микроскопии. Данный вопрос также будет подробно обсужден в лекции.

1. J. Li et al. *J. Mater. Chem.* **C 3**, 3530 (2015).
2. D. Geng, H. Wang, G. Yu. *Adv. Mater.* **27**, 2821 (2015).
3. Z. Yan, Z. Peng, J. M. Tour. *Acc. Chem. Res.* **47 (4)**, 1327 (2014).
4. T. Ma et al., *ACS Nano.* **23**, 12806 (2014).
5. С.Л. Коваленко и др. *Письма ЖЭТФ* **105**, 170 (2017).

## КРИСТАЛЛЫ ДЛЯ КВАНТОВОЙ ПАМЯТИ

М.Н. Попова

*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

*E-mail: [popova@isan.troitsk.ru](mailto:popova@isan.troitsk.ru)*

В настоящее время большое внимание уделяется практической реализации оптической квантовой памяти (ОКП) – необходимой части различных устройств квантовой информатики, в частности, квантовых повторителей, предназначенных для увеличения протяженности уже функционирующих линий криптографической квантовой связи. Схемы ОКП базируются на так называемой трехуровневой  $\Lambda$  системе. Среди различных возможных схем, два уровня сверхтонкой структуры (СТС) основного состояния редкоземельных (РЗ) ионов в кристаллах, в комбинации с третьим (метастабильным) уровнем в оптическом диапазоне рассматриваются в качестве наиболее перспективных кандидатов для реализации эффективной трехуровневой  $\Lambda$  системы [1].

В лекции будут рассмотрены требования к кристаллам и то, какие характеристики конкретных материалов существенны для ОКП. Это – точные положения уровней, оптическая плотность, времена когерентности сверхтонких уровней, времена жизни метастабильных оптических уровней, сверхтонкая структура (СТС) уровней, неоднородная ширина спектральных линий.

Наша группа в сотрудничестве с несколькими отечественными и зарубежными группами изучает спектроскопические свойства кристаллов, активированных РЗ ионами, существенные для применения в ОКП. Будет дан краткий обзор некоторых результатов по исследованию СТС и формы линий в спектрах различных кристаллах [2-6]. Также будет упомянуто недавнее открытие антипересечения сверхтонких уровней в оптических спектрах кристалла  ${}^7\text{LiYF}_4$ :Но в магнитном поле. Это явление может быть использовано для построения эффективной  $\Lambda$  (или  $V$ ) системы с равной вероятностью переходов в обоих плечах системы.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-52-52001).

1. Ph. Goldner, A. Ferrier, O. Guillot-Noël, *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, Elsevier, 2015.
2. E.P. Chukalina, M.N. Popova, S.L. Korableva, R.Yu. Abdulsabirov, *Phys. Lett. A* **269**, 348 (2000).
3. M.N. Popova, E.P. Chukalina, B.Z. Malkin, S.K. Saikin, *Phys. Rev. B* **61**, 7421 (2000).
4. D.S. Pytalev, E.P. Chukalina, M.N. Popova et al., *Phys Rev B* **86**, 115124 (2012).
5. M.N. Popova, *Optical Materials* **35**, 1842 (2013).
6. G.S. Shakurov et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **16** (45), 24727 (2014).
7. M.N. Popova, K.N. Boldyrev, *Optical Materials* **63**, 101 (2017).

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА И ЛОКАЛЬНОЙ  
КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НА ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА  
ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $Eu_2O_3$  И  $ZrO_2$ - $Gd_2O_3$ - $Eu_2O_3$

М.А. Борик<sup>1</sup>, Т.В. Волкова<sup>2</sup>, И.Е. Курицина<sup>3</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>1</sup>,  
В.А. Мызина<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>2</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

<sup>3</sup>Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка

<sup>4</sup>Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС», Москва

E-mail: [sendboxvv@mail.ru](mailto:sendboxvv@mail.ru)

Область практического применения кристаллических материалов на основе  $ZrO_2$  чрезмерно обширна. Это обусловлено тем, что данные материалы характеризуются уникальными физико-химическими свойствами, среди которых исключительно важным является свойство ионной проводимости, благодаря которому они получили широкое распространение в качестве твердых электролитов, используемых для изготовления различных электрохимических устройств, включая ТОТЭ, датчики кислорода и др. Кислород-ионная проводимость твердых растворов на основе диоксида циркония обусловлена наличием в их кристаллической структуре кислородных вакансий, которые образуются в результате замещения части ионов  $Zr^{4+}$  на ионы оксида-стабилизатора меньшей валентности [1].

В настоящей работе методом направленной кристаллизации расплава с использованием прямого высокочастотного нагрева в холодном контейнере синтезированы концентрационные серии кристаллов диоксида циркония со стабилизирующими оксидами  $Y_2O_3$  и  $Gd_2O_3$  при их изменении в широком интервале концентраций (2,7–38 мол. %  $Y_2O_3$ ; 2,7–33 мол. %  $Gd_2O_3$ ). Методами комбинационного рассеяния света и рентгеновской дифрактометрии выполнен анализ их фазового состава.

С использованием метода оптической спектроскопии выявлены особенности локальной кристаллической структуры твердых растворов  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $Eu_2O_3$  и  $ZrO_2$ - $Gd_2O_3$ - $Eu_2O_3$  при использовании ионов  $Eu^{3+}$  в качестве спектроскопического зонда. Также в настоящей работе осуществлена попытка выявления взаимосвязи фазового состава и локальной кристаллической структуры с ионной проводимостью данных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ\_а, № проекта 16-02-00457.

1. Ю.С. Кузьминов, Е.Е. Ломонова, В.В. Осико, *Тугоплавкие материалы из холодного тигля*, М.: Наука, 2004.
2. В.Г. Заводинский, ФТТ **46**, 441 (2004).
3. Н.В. Токий, Б.И. Перекрестов, Д.Л. Савина, И.А. Даниленко, ФТТ **53**, 1732 (2011).

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ  
СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ  $ZrO_2-Sc_2O_3-R_2O_3-Eu_2O_3$   
(R – Y, Yb, Gd, Ce)

Н.А. Ларина<sup>1</sup>, Т.В. Волкова<sup>1</sup>, М.А. Борик<sup>2</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>2</sup>,  
В.А. Мызина<sup>2</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>3</sup>, С.А. Хрущалина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>3</sup>Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС», Москва

E-mail: [saharova.1996@mail.ru](mailto:saharova.1996@mail.ru)

Твердые растворы на основе  $ZrO_2$  характеризуются уникальными физико-химическими свойствами, наличие которых обеспечивает самые разнообразные их практические применения. При образовании твердых растворов на основе  $ZrO_2$  в их анионной подрешетке образуются кислородные вакансии, наличие которых существенно влияет на свойства данных материалов [1].

Результаты работ [2-5] свидетельствуют о том, что метод оптической спектроскопии с использованием ионов  $Eu^{3+}$  в качестве спектроскопического зонда является эффективным методом выявления особенностей локальной структуры материалов на основе  $ZrO_2$ , которая формируется с учетом кислородных вакансий. В качестве объектов исследования в данных работах преимущественно выступали поликристаллические образцы  $ZrO_2-Y_2O_3$ , полученные различными методами.

В настоящей работе методами рентгеновской дифракции и спектроскопии комбинационного рассеяния света выполнены исследования фазового состава монокристаллов  $ZrO_2-Sc_2O_3-R_2O_3-Eu_2O_3$  (R – Y, Yb, Gd, Ce), полученных методом направленной кристаллизации расплава с использованием прямого высокочастотного нагрева в холодном контейнере. Методом оптической спектроскопии с использованием ионов  $Eu^{3+}$  в качестве спектроскопического зонда выявлены особенности локальной структуры данных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ\_а, № проекта 16-02-00457.

1. Ю.С. Кузьминов, Е.Е. Ломонова, В.В. Осико, *Тугоплавкие материалы из холодного тигля*, М.: Наука, 2004.
2. J. Dexpert-Ghys, M. Faucher, P. Caro, *Journal of Solid State Chemistry* **54**, 179 (1984).
3. Н. Yugami, А. Koike, М. Ishigame, *Phys. Rev.* **44**, 9214 (1991).
4. Ю.К. Воронько и др., *Оптика и спектроскопия* **81**, 814 (1996).
5. Ю.К. Воронько и др., *Неорганические материалы* **33**, 452 (1997).

# СИНТЕЗ ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ИСХОДНЫХ ОКСИДОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ

И.В. Степанова, С.Ю. Кривобородова, О.Б. Петрова

*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,  
Москва*

*E-mail: [stir@inbox.ru](mailto:stir@inbox.ru)*

Оксидные висмутгерманатные стекла обладают высоким показателем преломления, высокой плотностью и прозрачны в видимом и ближнем ИК диапазоне. Особенность спектральных свойств таких стекол заключается в наличии оптически активных висмутовых центров [1] и проявляется в виде широкой пологой полосы поглощения в области 500 нм. Концентрация висмутовых центров возрастает с увеличением концентрации оксида висмута в составе стекла [2], однако, исследований спектральных свойств висмутгерманатных стекол в широком диапазоне существенных концентраций оксида висмута до сих пор не проводилось. В данной работе были исследованы спектральные, оптические и механические свойства висмутгерманатных стекол с содержанием оксида висмута 0-50 мол. %.

Для синтеза были выбраны составы  $x\text{V}_2\text{O}_3-(1-x)\text{GeO}_2$ , где  $x = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50$  мол.%; стекла получали плавлением смеси исходных оксидов при температуре 1100 °С в течение 1 часа и последующим отливом на подложку. Спектры поглощения полученных образцов снимали на спектрофотометре UNICO 2800 (UV/VIS) в диапазоне 190-1100 нм. Плотность стеклянных образцов измеряли методом гидростатического взвешивания. Показатель преломления измеряли методом Лодочкикова.

Край поглощения стекол изменяется в диапазоне ~340-415 нм, смещаясь в длинноволновую область с ростом концентрации оксида висмута. Спектры поглощения всех стекол, кроме образца с  $x = 0$ , содержат плечо поглощения в области 500 нм, интенсивность которого увеличивается с ростом концентрации  $\text{V}_2\text{O}_3$ . Зависимость коэффициента поглощения от концентрации оксида висмута близка к линейной, но угол наклона отличается для малых (5-30 мол. %) и высоких (35-50 мол. %) концентраций оксида висмута. Полагаем, это связано с тем, что только небольшая часть из общего количества ионов висмута участвует в образовании висмутовых центров, и с ростом концентрации оксида висмута доля таких ионов уменьшается.

Показатель преломления и плотность образцов ожидаемо возрастают с увеличением концентрации оксида висмута.

1. Е.М. Дианов, Квантовая электроника **40** (4), 283 (2010).
2. М.А. Hughes, R.M. Gwilliam et al., Optics Express **21** (7), 8101 (2013).

ВЛИЯНИЕ СОЛЕГИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ  $\text{CeO}_2$  И  $\text{Nd}_2\text{O}_3$   
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ  $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$

А.В. Кулебякин<sup>1</sup>, И.Е. Курицына<sup>2</sup>, Ф.О. Милович<sup>3</sup>, А.С. Числов<sup>1,3</sup>,  
Н.Ю. Шульга<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка*

<sup>3</sup>*Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС», Москва*

*E-mail: [philippmilovich@gmail.com](mailto:philippmilovich@gmail.com)*

Материалы на основе циркония, в зависимости от вида и концентрации легирующей примеси являются перспективными во многих приложениях и представляют значительный интерес, как с научной, так и с практической точки зрения. Синтез кристаллических материалов с применением методов кристаллизации расплава позволяет получать высокоплотные монолитные материалы с нулевой пористостью и отсутствием зеренной структуры. Поэтому кристаллы на основе диоксида циркония обладают более высокими трибологическими и прочностными свойствами по сравнению с известными конструкционными керамическими материалами на основе  $\text{ZrO}_2$ .

В работе рассмотрено влияние дополнительных солегирующих примесей  $\text{CeO}_2$  и  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  на механические свойства твердых растворов  $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ . Кристаллы были получены методом направленной кристаллизации расплава в холодном контейнере с использованием высокочастотного нагрева. Анализ механических свойств кристаллов, таких как микротвердость и трещиностойкость, проводили методом микроиндентирования.

Показано, что значения микротвердости кристаллов, легированных оксидами церия или неодима сопоставимы со значением микротвердости для кристаллов, стабилизированных только оксидом иттрия. Дополнительное легирование оксидом неодима твердых растворов  $\text{ZrO}_2\text{--}2,8$  мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  приводит к уменьшению значений трещиностойкости кристаллов при увеличении концентрации оксида неодима и соответственно увеличении суммарной концентрации стабилизирующих оксидов. При этом значения трещиностойкости данных кристаллов, учитывая суммарную концентрацию стабилизирующих оксидов, сопоставимы с трещиностойкостью кристаллов стабилизированных только оксидом иттрия. Дополнительное легирование оксидом церия кристаллов  $\text{ZrO}_2\text{--}2,8$  мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  носит другой характер и приводит к увеличению значений трещиностойкости при увеличении концентрации оксида церия, несмотря на увеличение суммарной концентрации стабилизирующих оксидов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-32-00533 мол\_а.

МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ЧАСТИЧНО  
СТАБИЛИЗИРОВАННОГО  $ZrO_2 - R_2O_3$  (R - Nd, Ce, Y, Yb)

М.А. Борик<sup>1</sup>, В.Р. Боричевский<sup>2</sup>, А.В. Кулебякин<sup>1</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>1</sup>,  
Ф.О. Милович<sup>2</sup>, В.А. Мызина<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>3</sup>, Н.В. Сидорова<sup>3</sup>,  
Н.Ю. Табачкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС», Москва*

<sup>3</sup>*Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

*E-mail: [ya.natalka2112@yandex.ru](mailto:ya.natalka2112@yandex.ru)*

Перспективными материалами для использования в качестве конструкционных, полирующих и шлифовальных деталей, элементов триботехники, огнеупоров и теплозащитных покрытий являются кристаллы и керамика на основе диоксида циркония. Высокие механические характеристики кристаллов ЧСЦ обусловлены их структурными особенностями: наличием двух тетрагональных фаз с разной степенью тетрагональности и сложной доменной двойниковой структурой.

Присутствие в составе трансформируемой тетрагональной фазы обеспечивает один из основных механизмов упрочнения данных материалов – трансформационное упрочнение. Напряжения, возникающие на острие микротрещины, индуцируют тетрагонально-моноклинный переход, который сопровождается изменением удельного объема моноклинной фазы, что приводит к возникновению сжимающих механических напряжений, тормозящих распространение трещины в материале [1-3].

Другим возможным механизмом упрочнения в тетрагональном диоксиде циркония является ферроэластичная переориентация доменов, происходящая под действием механической нагрузки [4-6].

В настоящей работе методом микроиндентирования при ориентации диагоналей индентора вдоль кристаллографических направлений  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 110 \rangle$  исследованы механизмы упрочнения кристаллов ЧСЦ  $ZrO_2 - 2$  мол. %  $Y_2O_3 - 0,8$  мол. %  $R_2O_3$  где R = Ce, Nd, Y, Yb.

1. R. M. McMeeking, A.G. Evans, J. Amer. Ceram. Soc. **65 (5)**, 461 (1982).
2. R. H. J. Hannink, P. M. Kelly, B. C. Muddle, J. Amer. Ceram. Soc. **83(3)**, 461 (2000).
3. J. Chevalier, L. Gremillard, A. V. Virkar, D. R. Clarke, J. Amer. Ceram. Soc. **92 (9)**, 1901 (2009).
4. A.V. Virkar, Key Engineering Materials **153–154**, 183 (1998).
5. C.-J. Chan et al., J. Amer. Ceram Soc. **74 (4)**, 807 (1991).
6. A. M. Bolon, M.M. Gentleman, J. Amer. Ceram. Soc. **94(12)**, 4478 (2011).

# МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ ЧСЦ, СОЛЕГИРОВАННЫХ ОКСИДАМИ СКАНДИЯ И ИТТРИЯ

М.А. Борик<sup>1</sup>, А.В. Кулебякин<sup>1</sup>, И.Е. Курицына<sup>2</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>1</sup>,  
Ф.О. Милович<sup>3</sup>, В.А. Мызина<sup>1</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>3</sup>, А.С. Числов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка*

<sup>3</sup>*Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС», Москва*

*E-mail: [chislov.artem@bk.ru](mailto:chislov.artem@bk.ru)*

Материалы на основе диоксида циркония обладают высокой ионной проводимостью и используются в качестве твердых электролитов в различных электрохимических устройствах. Частично стабилизированный диоксид циркония (ЧСЦ) обладает как высокими механическими, так и электрофизическими характеристиками, величины которых определяются составом и способом синтеза материала.

В работе методом направленной кристаллизацией расплава в холодном тигле были выращены кристаллы твердых растворов  $(\text{ZrO}_2)_{1-x-y}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_x(\text{Y}_2\text{O}_3)_y$  ( $x = 0,003-0,045$ ;  $y = 0,005-0,03$ ). Проведено исследование фазового состава, структуры и физико-химических свойств полученных кристаллов. Измерение транспортных характеристик выполняли методом импедансной спектроскопии в температурном интервале 450 - 900 °С.

Фазовый анализ кристаллов показал, что кристаллы всех исследуемых составов представляли собой смесь двух тетрагональных фаз диоксида циркония с разной степенью тетрагональности ( $t$  и  $t'$ ), принадлежащих к пространственной группе симметрии  $R4_2/mnc$ . В некоторых кристаллах было обнаружено незначительное количество моноклинной фазы. Все кристаллы содержали двойники, размеры и морфология которых зависели от суммарной концентрации стабилизирующих оксидов. Для большинства исследуемых кристаллов характерны высокие значения трещиностойкости ( $6 - 7 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ). Показано, что высокие значения трещиностойкости связаны с количеством трансформируемой тетрагональной фазы в кристаллах. Значения проводимости практически для всех исследуемых составов довольно близки и составляют порядка  $0,03 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ , что в 1,5 - 2 раза выше по сравнению с проводимостью кристаллов стабилизированных только оксидом иттрия при сопоставимых концентрациях.

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН № 32 «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий».

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЗМОВ УПРОЧНЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ  $ZrO_2$  ЧАСТИЧНО  
СТАБИЛИЗИРОВАННОГО  $Y_2O_3$

М.А. Борик<sup>1</sup>, В.Р. Боричевский<sup>2</sup>, А.В. Кулебякин<sup>1</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>1</sup>,  
Ф.О. Милович<sup>2</sup>, В.А. Мызина<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>3</sup>, Н.В. Сидорова<sup>3</sup>,  
Н.Ю. Табачкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС», Москва*

<sup>3</sup>*Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

*E-mail: [vasbm@yandex.ru](mailto:vasbm@yandex.ru)*

Частично стабилизированный диоксид циркония (ЧСЦ) обладает свойствами, перспективными во многих приложениях. Кристаллы ЧСЦ отличаются повышенной стойкостью к кислотам и щелочам, парам воды, большой стойкостью к абразивному износу и низким коэффициентом трения. Дegradация механических характеристик при высоких температурах (до 1600 °С) в окислительных средах у кристаллов ЧСЦ существенно меньше, чем у металлов и конструкционной керамики. Химическая и биологическая инертность, прочность и высокая трещиностойкость делают кристаллы ЧСЦ перспективными для использования в медицине в качестве имплантатов и хирургического инструмента.

В работе рассмотрена взаимосвязь между химическим составом, структурой, кристаллографической ориентацией тетрагональных кристаллов  $ZrO_2 - Y_2O_3$  и их механическими свойствами, обусловленными разными механизмами упрочнения. Оценка сегнетоэластичного механизма упрочнения, показала, что для его реализации требуются меньшие напряжения, чем для трансформационного механизма упрочнения, связанного с фазовым превращением тетрагональной фазы в моноклинную. Установлено, что при индентировании кристаллов диоксида циркония частично стабилизированного оксидом иттрия вклад в механизм деформации мартенситной и сегнетоэластичной трансформации различен и зависит не только от концентрации стабилизирующего оксида, определяющего структуру и фазовый состав материала, но и от кристаллографической ориентации плоскости индентирования и ориентации диагоналей отпечатка индентора. Показано, что имеет место анизотропия тетрагонально-моноклинного перехода влияющего на трансформационный механизм упрочнения. При снижении нагрузок соотношение действующих механизмов упрочнения меняется, снижение интенсивности появления моноклинной фазы происходит быстрее, чем снижение интенсивности переориентации двойников тетрагональной фазы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 18–13–00397.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ФАЗОВОГО СОСТАВА В КЕРАМИКАХ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭИПС

К.Е. Сметанина, М.С. Болдин, П.В. Андреев, Е.А. Ланцев  
*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*  
*E-mail: [smetanina-ksenia@mail.ru](mailto:smetanina-ksenia@mail.ru)*

Исследованы керамические образцы, полученные электроимпульсным плазменным спеканием (ЭИПС) порошка карбида вольфрама при температуре 1625 °С [1]. Исследование фазового состава проводится методом рентгеновского фазового анализа. Качественный анализ керамик на основе карбида вольфрама WC в образцах демонстрирует наличие примесной фазы полукарбида вольфрама W<sub>2</sub>C.

Исследование образцов проводилось на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 (CuK $\alpha$ ,  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ). Все рентгеновские эксперименты проводились в идентичных условиях. Расчет фазового состава проводился методом корундовых чисел, полученных на основе структурных параметров корунда и карбида/полукарбида вольфрама.

Образец Т1 был подвержен первичной обработке с удалением сильно неровного поверхностного слоя. Для проверки наличия преимущественной ориентации кристаллитов в образце Т1 были проведены эксперименты при различных углах поворота образца в собственной плоскости. Далее с образцом Т1 была проведена серия экспериментов, перед каждым из которых с поверхности образца посредством шлифовки удалялся слой толщиной 50 мкм.

Исследовалось влияние шероховатости образца Т1 на интенсивность дифракции. При этом выполнялась полировка образца с применением алмазных паст с параметрами 28/20 мкм, 14/10 мкм, 5/3 мкм, 3/2 мкм. Содержание фазы W<sub>2</sub>C составляет 4,8 % масс.

Для изучения фазового состава приповерхностного слоя керамики был приготовлен образец Т2 с естественной плоской поверхностью. Анализ показал присутствие текстуры в приповерхностном слое образца, однако при этом в приповерхностном слое содержание примесной фазы W<sub>2</sub>C не выявлено.

1. М.С. Болдин, *Физические основы технологии электроимпульсного плазменного спекания*, Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ КТР:Hf, КТР:Zr, КТР:Nb.

Е.А. Исупова, В.А. Иванов, П.В. Андреев, М.А. Фаддеев, А.В. Боряков  
*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*  
*E-mail: [evgeniya.isupova@yandex.ru](mailto:evgeniya.isupova@yandex.ru)*

Кристаллы титанил фосфата калия (КТР) с примесями гафния, циркония и ниобия выращивались из раствора в расплаве (flux-метод) методом спонтанной кристаллизации. В качестве исходного состава шихты для выращивания был выбран один из составов, исследованных в [1-2]: 42 мол. %  $K_2O$ , 14 мол. %  $P_2O_5$ , 14 мол. %  $TiO_2$ , 30 мол. %  $WO_3$ . Примесь  $HfO_2$ ,  $ZrO_2$  или  $Nb_2O_5$  замещала необходимую по стехиометрии часть, приходящуюся на  $TiO_2$  так, что суммарная молярная доля оксида титана и оксида примесного атома оставалась равной 14 мол. %. Вещество кристаллизовалось на платиновой проволоке, помещаемой в платиновый тигель. Выращенные кристаллы отмывались в горячей воде от осевших на них незакристаллизовавшихся остатков раствор-расплава. Нами были выращены ряды кристаллов  $KTi_{1-x}Hf_xOPO_4$ ,  $KTi_{1-x}Zr_xOPO_4$  и  $KTi_{1-x}Nb_xOPO_4$  со значениями молярных долей  $HfO_2/(TiO_2 + HfO_2)$ ,  $ZrO_2/(TiO_2 + ZrO_2)$  и  $Nb_2O_5/(TiO_2 + Nb_2O_5)$  в начальном составе в интервале от 0,01 до 0,13, а также чистый кристалл КТР (всего более 35 образцов). Полученные образцы кристаллов перетирались в порошок в агатовой ступке.

Рентгеновский фазовый анализ (дифрактометр Shimadzu XRD-7000, излучение Cu-K $\alpha$ ) показал, что все образцы являются однофазными, близкими по структуре к чистому КТР (PDF №00-035-0802). Обнаружена линейная зависимость между объемом элементарной ячейки и концентрацией циркония при  $x < 0,07$ . При дальнейшем увеличении концентрации циркония, объем ячейки почти не меняется. Зависимость между объемом элементарной ячейки и концентрацией гафния  $x$  разбивается на два близких к линейным участка с условной границей при  $x \approx 0,05$ . Объем элементарной ячейки при внесении в кристалл ниобия меняется незначительно. Таким образом, результаты рентгеновской дифрактометрии позволяют сделать вывод, что ионы примесей встраиваются в структуру кристаллов, замещая ионы титана.

Для количественного определения относительного содержания титана и циркония, гафния и ниобия в выращенных кристаллах проводился элементный анализ на рентгенофлуоресцентном спектрометре последовательного типа (Shimadzu Lab Center XRF-1800) и на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (Prodigy High Dispersion ICP, Teledyne Leeman Labs).

Выращенные серии образцов перспективны для изучения взаимосвязи структуры кристаллов и их нелинейно-оптических свойств.

1. K. Iliev et al., J. of Crystal Growth **100** (1-2), 225 (1990).
2. D.P. Shumov et al. Cryst. Res. Tech. **25**(11), 1245 (1990).

ПОЛУЧЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ  
МАТЕРИАЛОВ  $R^{2+}_{1-x}R^{3+}_x F_{2+x}$  ( $R = \text{Eu}, \text{Sm}, \text{Yb}$ )

И.И. Бучинская, Д.Н. Каримов

*ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва*

*E-mail: [buchinskayaii@gmail.com](mailto:buchinskayaii@gmail.com)*

Типичной значение валентности для редкоземельных элементов (РЗЭ) – 3+, однако Eu, Sm, Yb и Tm в связи с особым строением электронных оболочек проявляют валентность 2+. Кристаллические дифториды  $RF_2$  и твердые растворы  $R^{2+}_{1-x}R^{3+}_x F_{2+x}$  со структурой типа флюорита ( $\text{CaF}_2$ ), содержащие разновалентные катионы, в настоящее время мало изучены. Они могут представлять интерес для фотоники твердого тела, радиационного оптического материаловедения и систем оптической записи информации.

Устойчивость дифторидов  $RF_2$  по данным [1] изменяется нелинейно с атомным номером РЗЭ и уменьшается по ряду  $\text{Eu}^{2+} > \text{Yb}^{2+} > \text{Sm}^{2+} > \text{Tm}^{2+}$ . В настоящей работе проведено восстановление  $RF_3$  ( $R = \text{Eu}, \text{Sm}, \text{Yb}$ ) в одном процессе с направленной кристаллизацией из расплава по методу Бриджмена с применением различных материалов тигля (кварц, графит, Мо) и окислительно-восстановительной среды (соответствующие металлы  $R^0$ , Si, атмосфера  $\text{He}/\text{H}_2$ , продукты разложения  $\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HF}$ ). Продукты кристаллизации исследованы с помощью рентгенофазового анализа и спектроскопии.

Однофазные кристаллы оптического качества удалось получить только для  $R = \text{Eu}$ . Они имели состав  $\text{Eu}^{2+}_{1-x}\text{Eu}^{3+}_x F_{2+x}$  ( $0 < x \leq 0,084$ ). Во всех образцах с  $R = \text{Sm}$  и  $\text{Yb}$  кроме флюоритового твердого раствора  $R^{2+}_{1-x}R^{3+}_x F_{2+x}$  обнаружены примеси высокотемпературной тисонитовой фазы (пр. гр.  $Pnma$ ) и упорядоченной фазы  $R_{13}F_{32-\delta}$  (пр. гр.  $R\bar{3}$ ), описанной в [2]. Полученные результаты позволяют сделать выводы, что процесс восстановления  $R^{3+} \rightarrow R^{2+}$  ( $R = \text{Sm}$  и  $\text{Yb}$ ) в условиях выращивания фторидных кристаллов не проходит до конца. Для получения устойчивых твердых растворов типа  $R^{2+}_{1-x}R^{3+}_x F_{2+x}$  ( $R = \text{Sm}$  и  $\text{Yb}$ ), а следовательно, оптически прозрачных кристаллов, следует предпринять введение гетеровалентных примесей для химической стабилизации состояния  $R^{2+}$ .

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-03-00707) в части синтеза образцов и Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26) в части структурного исследования кристаллов с использованием оборудования ЦКП ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

1. O. Greis, J.M. Haschke, *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, K.A. Gscheidner & Le Roy Eyring: Amsterdam, N.-Y., Oxford, 1982.
2. O. Greis, J. Solid State Chem. **24** (2), 227 (1978).

# РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ

П.В. Андреев<sup>1</sup>, К.В. Кремлев<sup>2</sup>, Г.С. Забродина<sup>2</sup>, И.В. Вилков<sup>1</sup>,  
А.М. Объедков<sup>2</sup>, Б.С. Каверин<sup>2</sup>, Н.М. Семенов<sup>2</sup>, С.Ю. Кетков<sup>2</sup>,  
М.А. Фаддеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

<sup>2</sup>*Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН,  
Нижний Новгород*

*E-mail: [andreev@phys.unn.ru](mailto:andreev@phys.unn.ru)*

Углеродные нанотрубки и гибридные материалы на их основе благодаря широкому спектру уникальных физических и химических свойств являются чрезвычайно актуальными объектами в различных областях науки и промышленности, в том числе и в сфере нанoeлектроники. Одним из наиболее перспективных классов подобных функциональных материалов являются многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) с наноразмерными покрытиями оксидов металлов, например, с покрытиями оксида алюминия и оксида циркония.

Ранее в лаборатории Наноразмерных систем и структурной химии Института металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН методом осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений были синтезированы гибридные материалы на основе МУНТ и нанесенных на них покрытий при пиролизе ацетилацетонатов алюминия и циркония.

Полученные материалы были исследованы методом порошковой рентгеновской дифракции. Указанный метод позволяет качественно определить фазовый состав наночастиц, а также оценить области когерентного рассеяния, то есть дать оценку размерам частиц нанofазы.

Исследование образцов проводилось на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 ( $\text{CuK}\alpha$ ,  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ). Все рентгеновские эксперименты проводились в идентичных условиях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-00776.

## СВИНЦОВЫЕ ФТОРОБОРАТНЫЕ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, СОАКТИВИРОВАННЫЕ $\text{Nd}^{3+}$ и $\text{La}^{3+}$

А.С. Сологуб, М.П. Зыкова, А.В. Хомяков, О.Б. Петрова

*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,  
Москва*

*E-mail: [petrova@proriv.ru](mailto:petrova@proriv.ru)*

Оксифторидные стеклокерамические материалы (СКМ) объединяют лучшие свойства кристаллических фторидов и оксидных стекол и перспективны для создания новых лазерных материалов [1]. В свинцовых силикатных [2] и боратных [3-4] стеклянных системах стремятся кристаллизовать высокотемпературную кубическую фазу  $\text{PbF}_2$  ( $\text{Fm}\bar{3}\text{m}$ ), активированную редкоземельными ионами (RE). Однако часто выделяется низкотемпературная ромбическая фаза  $\text{PbF}_2$  ( $\text{Pnma}$ ), в которую RE не встраиваются [3]. RE стабилизируют кубическую фазу, и около 10 ат. % фторида RE достаточно для стабилизации [4]. Таким образом, 1 мол. %  $\text{RE}\text{F}_3$  в исходном стекле позволяет стабилизировать около 10 мол. % кубического  $\text{PbF}_2$ , при дальнейшей кристаллизации выделяется паразитная ромбическая фаза  $\text{PbF}_2$ . Кубическая фаза представляет собой твердый раствор с концентрацией RE 10-13 ат. %, что слишком велико для большинства лазерных и люминесцентных применений, поскольку приводит концентрационному тушению и кооперативным процессам передачи энергии. В данном исследовании мы попытались решить эту проблему, одновременно увеличив общую концентрацию ионов RE в стекле и уменьшив концентрацию люминесцентного агента. Для этого мы легировали исходные стекла двумя RE с близкими ионными радиусами, один из которых не имеет f-f переходов (La) и выполняет только функцию стабилизатора кубической фазы, а другой (Nd) играет роль центра люминесценции. В системе  $75\text{PbF}_2\text{-}21,5\text{B}_2\text{O}_3\text{-}3\text{LaF}_3\text{-}0,5\text{NdF}_3$  получены оптически качественные стекла и сформированы соответствующие СКМ с кристаллической фазой твердого раствора на основе кубического  $\text{PbF}_2$ . Общая концентрация RE в кристаллической фазе составила 11-12 ат. % ( $\text{Pb}_{1-x}\text{La}/\text{Nd}_x\text{F}_{2+x}$ ), объемная доля кристаллической - более 25%, что больше, чем в СКМ на основе стекла, легированного 1 мол. %  $\text{NdF}_3$  (8-10 об. %). Интенсивность люминесценции  $\text{Nd}^{3+}$  и время жизни возрастало по сравнению с СКМ на основе стекла легированного 1 мол. %  $\text{NdF}_3$ .

1. P.P. Fedorov, A.A. Luginina, A.I. Popov, J. Fluor. Chem. **172**, 22 (2015).
2. О.Б. Петрова, А.В. Хомяков, Опт. и спектр. **114** (6), 962 (2013).
3. J. Pisarska et al., J. All. and Comp. **451**, 223 (2008).
4. Т.С. Севостьянова и др., Опт. и спектр. **123** (5), 734 (2017).

## ТРАНСПОРТ ДЫРОК В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ АЛМАЗЕ, ЛЕГИРОВАННОМ БОРОМ, В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

И.В. Алтухов<sup>1</sup>, М.С. Каган<sup>1</sup>, С.К. Папроцкий<sup>1</sup>, Н.А. Хвальковский<sup>1</sup>,  
Н.Б. Родионов<sup>2</sup>, А.П. Большаков<sup>3</sup>, В.Г. Ральченко<sup>3</sup>, Р.А. Хмельницкий<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Москва*

<sup>2</sup>*Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований  
«ТРИНИТИ», Троицк*

<sup>3</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>4</sup>*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва  
E-mail: [nik@cplire.ru](mailto:nik@cplire.ru)*

Исследовались номинально нелегированные (i-тип) эпитаксиальные алмазные плёнки толщиной 10-12 мкм, выращенные методом парофазного химического осаждения на подложках с ориентацией (100), сильно легированных бором ( $\sim 2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ). К образцам прикладывались импульсы напряжения (0,5-100 мкс), либо постоянное напряжение. Исследовались вольтамперные характеристики при комнатной температуре. Статические ВАХ пленок с контактом Шоттки резко асимметричны при разных полярностях приложенного напряжения, что связано с асимметрией m-i-p<sup>+</sup>-структуры. При полярности, когда контакт Шоттки заперт, ток на три порядка меньше, чем при открытом контакте Шоттки. Импульсные ВАХ кардинально отличаются от статических. А именно, в значительном интервале напряжений ВАХ линейны, и имеется область напряжений (от 0,05 до 1,5 В), где токи в обеих полярностях совпадают. Это объясняется тем, что при импульсном напряжении из-за ёмкости закорачиваются контакты Шоттки и все приложенное напряжение падает на высокоомном слое алмаза. По величине омической проводимости можно оценить концентрацию  $p$  свободных носителей в этом слое и, соответственно, концентрацию  $N_B$  нейтральных атомов акцепторной примеси бора:  $p \sim 10^8 \text{ см}^{-3}$  и  $N_B \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

При увеличении напряжения (или амплитуды импульсов), линейная зависимость тока от напряжения переходит в квадратичную, из-за монополярной инжекции. Напряжение этого перехода дает возможность оценить время рекомбинации дырок на атомах бора  $\sim 10^{-9} \text{ с}$ .

В алмазе с омическими контактами измерены ВАХ вплоть до полей  $\sim 5 \times 10^5 \text{ В/см}$ . Начиная с полей  $\sim 30 \text{ кВ/см}$ , наблюдается ударная ионизация примеси. Основная особенность пробоя примеси в нашем случае – отсутствие S-образности на ВАХ. Обычно S-образность при пробое водородоподобной примеси связывают с наличием возбужденных состояний, поле ионизации которых существенно меньше, чем для основного. В нашем случае большое пробойное поле приводит к тому, что все возбужденные состояния оказываются в сплошном спектре валентной зоны из-за эффекта Френкеля-Пула. Проанализировано влияние этого эффекта на зависимость коэффициента ионизации примеси от поля.

Работа частично поддержана РФФИ (грант 18-02-01079).

ВЫРАЩИВАНИЕ ФТОРИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ  
 $\text{LiSr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{AlF}_6:\text{Ce}^{3+}$  ( $x = 0,2$ ) МЕТОДОМ БРИДЖМЕНА

М.А. Марисов, А.А. Шавельев, А.А. Шакиров, Е.В. Лукинова,  
А.С. Низамутдинов, С.Л. Кораблева, В.В. Семашко  
*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*  
*E-mail: [m.a.marisov@gmail.com](mailto:m.a.marisov@gmail.com)*

Фторидные кристаллы являются перспективными материалами фотоники [1-2]. Преимуществами данных соединений, по сравнению с широко распространенными оксидными кристаллами, является значительно меньшая температура плавления, а также более широкая запрещенная зона [3]. Особое место среди применений занимают лазерные источники, излучающие в ближнем ультрафиолетовом диапазоне спектра, например лазеры на основе кристалла  $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}$ . Недостатком данных соединений является низкая изоморфная емкость кристаллической решетки по отношению к редкоземельным ионам, что обуславливает образование высокого количества дефектов при попытке получить высококонцентрированные образцы. При этом известно, что, варьируя химический состав, можно добиться повышения оптического качества кристалла за счет увеличения изоморфной емкости [4]. Ранее в Казанском государственном университете, на примере  $\text{LiYLuF}_4$ , было установлено улучшение качества кристаллов при переходе к смешанной структуре [5]. Поэтому целью нашей работы является рост фторидных кристаллов смешанной структуры методом Бриджмена  $\text{LiSr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{AlF}_6$  ( $x = 0,2$ ), активированных редкоземельными ионами  $\text{Ce}^{3+}$  и проверка их оптического качества.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-32-00936.

1. V.A. Fromzel, C.R. Prasad et al., *Advances in Optical and Photonic Devices*, 101 (2010).
2. K. Watanabe, T. Yanagida et al., *Sensors and Materials* **27**, 269 (2015).
3. D. Alderighi et al., *Applied Physics B: Lasers and Optics* **83**, 51 (2006).
4. A.S. Nizamutdinov, V.V. Semashko et al., *Physics of the Solid State* **50**, 1648 (2008).
5. A.S. Nizamutdinov et al., *JETP letters* **91**, 21 (2010).

# **NEW FUNCTIONAL MATERIALS**

## CRYSTALS FOR QUANTUM MEMORY

M.N. Popova

*Institute of Spectroscopy RAS, Troitsk, Russia*

*E-mail: [popova@isan.troitsk.ru](mailto:popova@isan.troitsk.ru)*

At present, much attention is paid to the implementation of optical quantum memory (OQM), which should be an essential part of various quantum informatics devices, in particular, quantum repeaters intended to increase the length of already functioning quantum cryptographic communication lines. Schemes of OQM are based on a three-level  $\Lambda$  system. Among different possible schemes investigated so far, two ground-state hyperfine levels of rare-earth (RE) ions in crystals, combined with the third (metastable) level in optical frequency region are considered as the most promising candidates for realizing an efficient three-level  $\Lambda$  system [1].

I'll briefly discuss what requirements should be met by crystals for OQM and what characteristics of particular materials should be studied. Those are precise level positions, the optical density, coherence times of hyperfine levels, life times of metastable optical levels, hyperfine structure (HFS) of the energy levels, inhomogeneous broadening of spectral lines.

My group, in collaboration with other institutions in Russia and abroad, studies spectroscopic properties of RE-doped crystals, relevant for applications in OQM. I'll review some of our results on the studies of HFS and line shapes in the spectra of different crystals [2-6]. Then, I'll describe our recent discovery of the hyperfine level anticrossings in optical spectra of  ${}^7\text{LiYF}_4:\text{Ho}$  placed into a magnetic field. This phenomenon can be used to build an effective  $\Lambda$  or V system with equal transition probabilities in both legs of the system.

Financial support by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No 18-52-52001) is acknowledged.

1. Ph. Goldner, A. Ferrier, O. Guillot-Noël, *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, Elsevier, 2015.
2. E.P. Chukalina, M.N. Popova, S.L. Korableva, R.Yu. Abdulsabirov, *Phys. Lett. A* **269**, 348 (2000).
3. M.N. Popova, E.P. Chukalina, B.Z. Malkin, S.K. Saikin, *Phys. Rev. B* **61**, 7421 (2000).
4. D.S. Pytalev, E.P. Chukalina, M.N. Popova et al., *Phys Rev B* **86**, 115124 (2012).
5. M.N. Popova, *Optical Materials* **35**, 1842 (2013).
6. G.S. Shakurov et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **16** (45), 24727 (2014).
7. M.N. Popova, K.N. Boldyrev, *Optical Materials* **63**, 101 (2017).

# INFLUENCE OF PHASE COMPOSITION, LOCAL CRYSTAL STRUCTURE ON TRANSPORT PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS

ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> AND ZrO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

M.A. Borik<sup>1</sup>, T.V. Volkova<sup>2</sup>, I.E. Kuritsyna<sup>3</sup>, E.E. Lomonova<sup>1</sup>, V.A. Myzina<sup>1</sup>,  
P.A. Ryabochkina<sup>1</sup>, N.Yu. Tabachkova<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

<sup>3</sup>*Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka, Russia*

<sup>4</sup>*National University of Science and Technology «MISIS», Russia*

*E-mail: [sendboxvv@mail.ru](mailto:sendboxvv@mail.ru)*

The field of practical application of crystalline materials based on ZrO<sub>2</sub> is excessively extensive. This is due to the fact that these materials are characterized by unique physical and chemical properties. Among them the ionic conductivity is extremely important, due to which they have become widely used as solid electrolytes used for the manufacture of various electrochemical devices, including SOFC, oxygen sensors, etc. Oxygen-ionic conductivity of solid solutions based on zirconium dioxide is due to the presence in their crystal structure of oxygen vacancies which are formed due to the replacement of part of Zr<sup>4+</sup> ions by the ions of the stabilizing oxide [1].

In the present study, method of the directional high-frequency heating in a cold container has been used to synthesize the concentration series of zirconia crystals with stabilizing Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxides as they change over a wide range of concentrations (2,7-38 mol. % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2,7-33 mol. % Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Methods of the Raman scattering and X-ray diffractometry are used to analyze their phase composition.

Using the optical spectroscopy method, the features of the local crystal structure of ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solid solutions are revealed using Eu<sup>3+</sup> ions as a spectroscopic probe. Also, in the present work an attempt was made to reveal the relationship between the phase composition and the local crystal structure with the ionic conductivity of these materials.

The work was financially supported by RFBR Grant ofi\_a, Project No. 16-02-00457.

1. Yu.S. Kuzminov, E.E. Lomonova, V.V. Osiko, *Refractory materials from cold crucible*, Moscow: Nauka, 2004.
2. V.G. Zavodinskii, *Solid State Physics* **46**, 441 (2004).
3. N.V. Tokiy, B.I. Perekrestov, D.L. Savina, I.A. Danilenko, *Solid State Physics* **53**, 1732 (2011).

PHASE COMPOSITION AND SPECTRAL-LUMINESCENCE PROPERTIES  
OF SOLID SOLUTIONS  $ZrO_2$ - $Sc_2O_3$ - $R_2O_3$ - $Eu_2O_3$  (R – Y, Yb, Gd, Ce)

N.A. Larina<sup>1</sup>, T.V. Volkova<sup>1</sup>, M.A. Borik<sup>2</sup>, E.E. Lomonova<sup>2</sup>, V.A. Myzina<sup>2</sup>,  
P.A. Ryabochkina<sup>1</sup>, N.Yu. Tabachkova<sup>3</sup>, S.A. Khrushchalina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

<sup>2</sup>*Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*National University of Science and Technology «MISIS», Russia*

*E-mail: saharova.1996@mail.ru*

Solid solutions based on  $ZrO_2$  are characterized by unique physicochemical properties, the presence of which provides a variety of their practical applications. In the formation of solid solutions based on  $ZrO_2$ , oxygen vacancies are formed in their anion sublattice. The presence of oxygen vacancies essentially affects the properties of these materials [1].

The results of [2-5] show that the optical spectroscopy method using  $Eu^{3+}$  ions as a spectroscopic probe is an effective method of revealing the features of the local structure of materials based on  $ZrO_2$ , which is formed taking into account oxygen vacancies. In these studies, polycrystalline samples of  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ , obtained by various methods, were predominantly used as objects of research.

In the present work, methods of the Raman scattering and X-ray diffraction are used to analyze the phase composition of  $ZrO_2$ - $Sc_2O_3$ - $R_2O_3$ - $Eu_2O_3$  (R – Y, Yb, Gd, Ce) single crystals obtained by directional high-frequency heating in a cold container. Using by the optical spectroscopy using  $Eu^{3+}$  ions as a spectroscopic probe were revealed features of the local structure of these materials.

The work was financially supported by RFBR Grant ofi\_a, Project No. 16-02-00457.

1. Yu.S. Kuzminov, E.E. Lomonova, V.V. Osiko, *Refractory materials from cold crucible*, Moscow: Nauka, 2004.
2. J. Dexpert-Ghys, M. Faucher, P. Caro, *Journal of Solid State Chemistry* **54**, 179 (1984).
3. H. Yugami, A. Koike, M. Ishigame, *Phys. Rev.* **44**, 9214 (1991).
4. Yu.K. Voronko et al., *Optics and Spectroscopy* **81**, 814 (1996).
5. Yu.K. Voronko et al., *Inorganic Materials* **33**, 452 (1997).

# SYNTHESIS OF BISMUTH-GERMANATE GLASSES IN A WIDE RANGE OF INITIAL OXIDES CONCENTRATIONS AND THEIR SPECTRAL PROPERTIES RESEARCH

I.V. Stepanova, S.Yu. Krivoborodova, O.B. Petrova

*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

*E-mail: [stir@inbox.ru](mailto:stir@inbox.ru)*

Oxide bismuth-germanate glasses have a high refractive index, high density and are transparent in the visible and near-IR ranges. A special feature of the spectral properties of such glasses is the presence of optically active bismuth centers [1] which is manifested as a wide sloping absorption band in the region of 500 nm. The concentration of bismuth centers increases with the concentration of bismuth oxide in the glass composition [2], however, no studies of the spectral properties of bismuth-germanate glasses in a wide range of significant concentrations of bismuth oxide have been carried out so far. In this paper, the spectral, optical and mechanical properties of bismuth-germanate glasses with a bismuth oxide content of 0-50 mol. % were investigated.

For the synthesis, the compositions  $x\text{Bi}_2\text{O}_3-(1-x)\text{GeO}_2$  were chosen, where  $x = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50$  mol. %; glasses were made by melting the mixture of the initial oxides at a temperature of 1100 °C for 1 hour followed by casting on the mold. The absorption spectra of the synthesized samples were recorded with a UNICO 2800 (UV/VIS) spectrophotometer in the range 190-1100 nm. The density of the glass samples was measured by hydrostatic weighing. The refractive index was measured by the Lodochnikov method.

The absorption edge of the glasses varies in the range of ~ 340-415 nm, shifting to the long-wave region with an increase in the bismuth oxide concentration. The absorption spectra of all glasses, except for the sample with  $x = 0$ , contain an absorption shoulder in the region of 500 nm, the intensity of which increases with  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  concentration rising. The absorption coefficient dependence on the concentration of bismuth oxide is close to linear, but the slope angle differs for small (5-30 mol. %) and high (35-50 mol. %) concentrations of bismuth oxide. We suppose that this is due to the fact that only a small part of the total number of bismuth ions participates in the formation of bismuth centers, and the fraction of such ions decreases while bismuth oxide concentration increasing.

The refractive index and the density of the samples increase with the bismuth oxide concentration growth, as expected.

1. E.M. Dianov, *Quantum Electronics* **40** (4), 283 (2010).
2. M.A. Hughes, R.M. Gwilliam et al., *Optics Express* **21** (7), 8101 (2013).

EFFECT OF DOPING IMPURITIES  $\text{CeO}_2$  AND  $\text{Nd}_2\text{O}_3$   
ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$

A.V. Kulebyakin<sup>1</sup>, I. E. Kuritsyna<sup>2</sup>, F.O. Milovich<sup>3</sup>, A.S. Chislov<sup>1,3</sup>,  
N.Yu. Shulga<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka, Russia*

<sup>3</sup>*National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia*

*E-mail: [philippmilovich@gmail.com](mailto:philippmilovich@gmail.com)*

Materials based on zirconium are promising in many applications depending on the type and concentration of the dopant and are of considerable interest both from a scientific and practical point of view. Synthesis of crystalline materials using the methods of crystallization of the melt makes it possible to produce high-density monolithic materials with zero porosity and the absence of a grain structure. Therefore, crystals based on zirconia have higher tribological and strength properties compared to known structural ceramic materials based on  $\text{ZrO}_2$ .

The effect of additional alloying impurities  $\text{CeO}_2$  and  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  on the mechanical properties of solid solutions  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  is considered. The crystals were obtained by directional crystallization of the melt in a cold crucible using high-frequency heating. Analysis of the mechanical properties of crystals such as microhardness and crack resistance was carried out by microindentation.

It is shown that the microhardness values of crystals doped with cerium or neodymium oxides are comparable to the value of microhardness for crystals stabilized only by yttrium oxide. Additional doping with neodymium oxide of  $\text{ZrO}_2$  solid solutions – 2,8 mol. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  leads to a decrease in the fracture toughness of crystals with an increase in the concentration of neodymium oxide and, accordingly, an increase in the total concentration of stabilizing oxides. In this case, the fracture toughness values of these crystals, taking into account the total concentration of the stabilizing oxides, are comparable with the crack resistance of crystals stabilized only by yttrium oxide. The additional doping with cerium oxide of  $\text{ZrO}_2$  crystals – 2,8 mol. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  is of a different nature and leads to an increase in fracture toughness values with increasing cerium oxide concentration, despite an increase in the total concentration of stabilizing oxides.

The work was supported by the RFBS grant 18-32-00533 mol\_a.

MECHANISMS OF TOUGHENING IN CRYSTAL PARTIALLY  
STABILIZED ZrO<sub>2</sub>-M<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M - Nd, Ce, Y, Yb)

M.A. Borik<sup>1</sup>, V.R. Borichevskii<sup>2</sup>, A.V. Kulebyakin<sup>1</sup>, E.E. Lomonova<sup>1</sup>,  
F.O. Milovich<sup>2</sup>, V.A. Mysina<sup>1</sup>, P.A. Ryabochkina<sup>3</sup>, N.V. Sidorova<sup>3</sup>,  
N.Yu. Tabachkova<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

*E-mail: [ya.natalka2112@yandex.ru](mailto:ya.natalka2112@yandex.ru)*

Perspective materials for fabrication structural, polishing and grinding detail, elements of tribotechnics, refractories and thermal protective coatings are crystals and ceramics based on zirconia. The high mechanical characteristics of PSZ crystals are due to their structural features: the presence of two tetragonal phases with different degrees of tetragonality and a complex domain-like twinning structure.

The presence of a transformable tetragonal phase in the composition provides one of the main mechanisms of toughening of these materials - transformation toughening. The stresses arising at the tip of the microcrack induce a tetragonal-monoclinic transition, which is accompanied by a change in the specific volume of the monoclinic phase, which leads to the appearance of compressive mechanical stresses that inhibit the propagation of a crack in the material [1-3].

Another possible mechanism of toughening in tetragonal zirconia is the ferroelastic reorientation of domains that occurs under a mechanical load [4-6].

In this paper we investigate the mechanisms of toughening of ZrO<sub>2</sub>-2 mol. % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-0,8 mol. % M<sub>2</sub>O<sub>3</sub> crystals (with M = Ce, Nd, Y, Yb) by microindentation with orientation of the diagonals of the indenter along the crystallographic directions <100> and <110>.

1. R.M. McMeeking, A.G. Evans, J. Amer. Ceram. Soc. **65** (5), 461 (1982).
2. R.H. J. Hannink, P.M. Kelly, B.C. Muddle, J. Amer. Ceram. Soc. **83**(3), 461 (2000).
3. J. Chevalier, L. Gremillard, A.V. Virkar, D.R. Clarke, J. Amer. Ceram. Soc. **92** (9), 1901 (2009).
4. A.V. Virkar, Key Engineering Materials **153–154**, 183 (1998).
5. C.-J. Chan et al., J. Amer. Ceram Soc. **74** (4), 807 (1991).
6. A.M. Bolon, M.M. Gentleman, J. Amer. Ceram. Soc. **94**(12), 4478 (2011).

## MECHANICAL AND TRANSPORT CHARACTERISTICS OF PSZ CRYSTALS DOPED WITH SCANDIUM AND YTTRIUM OXIDES

M.A. Borik<sup>1</sup>, A.V. Kulebyakin<sup>1</sup>, I.E. Kuritsyna<sup>2</sup>, E.E. Lomonova<sup>1</sup>,  
F.O. Milovich<sup>3</sup>, V.A. Myzina<sup>1</sup>, N.Yu. Tabachkova<sup>3</sup>, A.S. Chislov<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup>*Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka, Russia*

<sup>3</sup>*National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia*

*E-mail: [chislov.artem@bk.ru](mailto:chislov.artem@bk.ru)*

Materials based on zirconia have high ionic conductivity and are used as electrolytes in various electrochemical devices. Partially stabilized zirconia (PSZ) has both high mechanical and electrophysical characteristics, the values of which are determined by the composition and method of synthesis of the material.

Crystals of solid solutions  $(\text{ZrO}_2)_{1-x-y}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_x(\text{Y}_2\text{O}_3)_y$  ( $x = 0,003 - 0,045$ ,  $y = 0,005 - 0,03$ ) were grown by directional crystallization of the melt in a cold crucible. A study of the phase composition, structure, and physico-chemical properties of the crystals obtained was carried out. The transport characteristics were measured by impedance spectroscopy at a temperature range of 450 - 900 °C.

Phase analysis of the crystals showed that the crystals of all the studied compositions were a mixture of two tetragonal phases of zirconia with different degrees of tetragonality ( $t$  and  $t'$ ) belonging to the spatial symmetry group  $P4_2/mnc$ . A small amount of the monoclinic phase was found in some crystals. All crystals contained twins whose dimensions and morphology depended on the total concentration of the stabilizing oxides. High values of crack resistance ( $6 - 7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) are characteristic for most of the crystals under study. It is shown that high values of crack resistance are associated with the amount of the transformed tetragonal phase in crystals. The conductivity values for all the compositions under study are close (of the order of  $0,03 \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) which is 1,5 - 2 times higher than the conductivity of crystals stabilized only by yttrium oxide at comparable concentration.

This work was supported by the program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 32 «Nanostructures: Physics, Chemistry, Biology, Technology Basics».

THE EFFECT OF HARDENING MECHANISMS ON THE MECHANICAL  
CHARACTERISTICS OF ZrO<sub>2</sub> CRYSTALS  
OF PARTIALLY STABILIZED Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

M.A. Borik<sup>1</sup>, V.R. Borichevskii<sup>2</sup>, A.V. Kulebyakin<sup>1</sup>, E.E. Lomonova<sup>1</sup>,  
F.O. Milovich<sup>3</sup>, V.A. Myzina<sup>1</sup>, P.A. Ryabochkina<sup>3</sup>, N.V. Sidorova<sup>3</sup>,  
N.Yu. Tabachkova<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

*E-mail: [vasbm@yandex.ru](mailto:vasbm@yandex.ru)*

Partially stabilized zirconia (PSZ) has properties promising in many applications. Increased resistance to acids and alkalis, water vapor, high abrasion resistance and low coefficient of friction characterizes PSZ crystals. The degradation of mechanical characteristics at high temperatures (up to 1600 °C) under oxidizing conditions for PSZ crystals is much less than for metals and structural ceramics. Chemical and biological inertness, strength and high crack resistance make PSZ crystals promising for use in medicine as implants and surgical instruments.

The relationship between the chemical composition, structure, crystallographic orientation of tetragonal ZrO<sub>2</sub> - Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> crystals and their mechanical properties is considered. The evaluation of the ferroelastic reinforcement mechanism showed that lower stresses are required for its realization than for the transformation mechanism of hardening, associated with the phase transformation of the tetragonal phase into the monoclinic phase. It is found that when indenting zirconia crystals partially stabilized with yttrium oxide, the contribution to the deformation mechanism of the martensitic and ferroelastic transformation is different and depends not only on the concentration of the stabilizing oxide determining the structure and the phase composition of the material, but also on the crystallographic orientation of the indentation plane and the orientation of the indentation diagonals. It is shown that there is an anisotropy of the tetragonal-monoclinic transition affecting the hardening transformation mechanism. The ratio of the existing hardening mechanisms changes with decreasing loads, the decrease in the intensity of the appearance of the monoclinic phase occurs more rapidly than the decrease in the intensity of the reorientation of twins of the tetragonal phase.

This work was supported by the grant of the RSF No. 18-13-00397.

RESEARCH HOMOGENEITY OF THE PHASE COMPOSITION  
IN CERAMICS BASED ON TUNGSTEN CARBIDE  
OBTAINED BY SPARK PLASMA SINTERING

K.E. Smetanina, M.S. Boldin, P.V. Andreev, E.A. Lantsev

*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*

*E-mail: [smetanina-ksenia@mail.ru](mailto:smetanina-ksenia@mail.ru)*

Solid ceramic samples obtained by spark plasma sintering of tungsten carbide powder at  $T = 1625$  °C [1] had been investigated. X-ray diffraction analyses were used for the analysis of the phase composition. Qualitative phase analysis of the samples demonstrated the impurity phase of semi-carbide  $W_2C$ .

Analysis of the samples was conducted on the Shimadzu XRD-700 diffractometer ( $CuK\alpha$ ,  $\lambda = 1,54$  Å). All X-ray experiments were performed under the identical condition. The phase composition was calculated by the reference intensity ratio method obtained on the basis of corundum ( $\alpha-Al_2O_3$ ) and tungsten carbide/semi-carbide structure parameters.

Sample T1 was subject to primary treatment with the removal of a highly uneven surface layer. Experiments at various angles of rotation of the sample in the own plane were performed for verification of a preferential orientation of crystallites in sample T1. Then a series of experiments with sample T1 has been conducted, before each of which a layer 50  $\mu m$  thick was removed from the surface of the sample by grinding.

The influence on intensity of diffraction of the roughness of sample T1 was investigated. The sample was polished using diamond pastes with parameters 28/20  $\mu m$ , 14/10  $\mu m$ , 5/3  $\mu m$ , 3/2  $\mu m$ . The  $W_2C$  phase content is 4,8 % by weight.

Sample T2 with a natural planar surface has been prepared to study the phase composition of the near-surface layer of the ceramic. A series of experiments with the rotation of sample T2 in its own plane showed the presence of a texture in the near-surface layer of the sample. However, the  $W_2C$  impurity phase content was not detected in the near-surface.

1. M.S. Boldin, *The physical basis of the technology of spark plasma sintering*, Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2012.

## RESEARCH OF KTP:Hf, KTP:Zr AND KTP:Nb CRYSTALS

E.A. Isupova, V.A. Ivanov, P.V. Andreev, M.A. Faddeev, A.V. Boryakov  
*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*  
*E-mail: [evgeniya.isupova@yandex.ru](mailto:evgeniya.isupova@yandex.ru)*

Potassium titanyl phosphate (KTP) crystals doped with hafnium, zirconium or niobium were grown using the flux method by spontaneous crystallization. One of the starting compounds demonstrated in [1, 2] has been selected for growing: 42 mol. %  $K_2O$ , 14 mol. %  $P_2O_5$ , 14 mol. %  $TiO_2$ , 30 mol. %  $WO_3$ . A part of  $TiO_2$  required by the stoichiometry were replaced by  $HfO_2$ ,  $ZrO_2$  or  $Nb_2O_5$  so the total mole fraction of titanium oxide and doping oxide remained equal to 14 mol. %. The KTP were crystallized on the platinum probe immersed in a platinum crucible. The grown crystals were separated mechanically and washed several times with hot water. We have grown a series of  $KTi_{1-x}Hf_xOPO_4$ ,  $KTi_{1-x}Zr_xOPO_4$  and  $KTi_{1-x}Nb_xOPO_4$  crystals with  $HfO_2/(TiO_2 + HfO_2)$ ,  $ZrO_2/(TiO_2 + ZrO_2)$  or  $Nb_2O_5/(TiO_2 + Nb_2O_5)$  ratio in the starting compositions in a range from 0,01 to 0,13, so the total number of samples was more than 35 including pure KTP. Crystals were milled in an agate mortar.

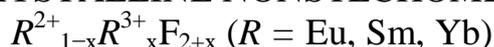
X-ray phase analysis was carried out to identify the grown phases. Powder XRD data for the specimens were recorded on a Shimadzu XRD-7000 powder diffractometer using filtered  $Cu-K\alpha$  radiation. Phase analysis showed that all samples are single-phases similar to the pure KTP (PDF №00-035-0802). The increase of the cell volume is related to the increase of the proportion of substitution of titanium atoms by zirconium atoms up to a value of 0,07. The cell volume has an approximately constant value with a further increase of the proportion of substitution of titanium atoms by zirconium atoms. The relationship between the unit cell volume and proportion of substitution of titanium atoms by hafnium  $x$  is divided into two linear diapasons. The slope of the line changes nearly  $x \approx 0,05$ . The cell volume changes not prudently when niobium is introduced into the crystal. According to the powder XRD data we can conclude that some part of the Hf, Zr and Nb from initial compositions used for growing incorporated in the KTP crystal structure.

The relative titanium and hafnium, zirconium or niobium content in the crystals were determined by the elemental analyses on Shimadzu Lab Center XRF-1800 and Prodigy High Dispersion ICP (Teledyne Leeman Labs) equipment.

The grown series of samples are promising for studying relationship between their crystal structure and nonlinear-optical properties.

1. K. Iliev et al., *J. of Crystal Growth* **100 (1-2)**, 225 (1990).
2. D.P. Shumov et al., *Cryst. Res. Tech.* **25 (11)**, 1245 (1990).

## SYNTHESIS OF CRYSTALLINE NONSTECHEMETRIC MATERIALS



I. I. Buchinskaya, D. N. Karimov

*Federal Scientific Research Centre «Crystallography and Photonics» RAS,  
Moscow, Russia*

*E-mail: [buchinskayai@gmail.com](mailto:buchinskayai@gmail.com)*

As usual, value of valence for rare-earth elements (REE) is 3+, but Eu, Sm, Yb and Tm due to the special structure of the electron shells demonstrate valence of 2+. However, up to now crystalline compounds  $RF_2$  and solid solutions  $R^{2+}_{1-x}R^{3+}_x F_{2+x}$  with a fluorite-type structure ( $CaF_2$ ) containing differently-valence cations are poorly understood. They can be used in solid-state photonics, radiation optical material science, and optical information recording systems.

In line with presented data [1] the stability of  $RF_2$  difluorides varies non-linearly in depend of the atomic number of REE, and decreases in the series  $Eu^{2+} > Yb^{2+} > Sm^{2+} > Tm^{2+}$ . In the present work was carry out the reduction of  $RF_3$  ( $R = \text{Eu, Sm and Yb}$ ) in a one stage process with directional crystallization from the melt using the Bridgman method with using of various crucible materials (quartz, graphite, Mo) and oxidation-reduction medium (corresponding metals  $R^0$ , Si, atmosphere He/ $H_2$ , the decomposition products  $NH_4F \cdot HF$ ). Crystallization products were investigated using X-ray phase analysis and spectroscopy.

Single-phase crystals of optical quality were obtained only for  $R = \text{Eu}$ . They had the composition  $Eu^{2+}_{1-x}Eu^{3+}_x F_{2+x}$  ( $0 < x \leq 0,084$ ). In all samples with  $R = \text{Sm and Yb}$ , in addition to the fluorite solid solution  $R^{2+}_{1-x}R^{3+}_x F_{2+x}$ , the impurities of the high-temperature tysonite phase (space group is  $Pnma$ ) and the ordered phase  $R_{13}F_{32-\delta}$  (space group is  $R\bar{3}$ ), which described in [2], were found. Above mentioned makes us think that the process of reduction of  $R^{3+} \rightarrow R^{2+}$  ( $R = \text{Sm and Yb}$ ) in conditions of grow of fluoride crystals does not go to the end. As next step, authors plan to introduce heterovalent impurities for chemical stabilization of the  $R^{2+}$  state and obtain stable solid solutions of the type  $R^{2+}_{1-x}R^{3+}_x F_{2+x}$  ( $R = \text{Sm and Yb}$ ), and hence optically transparent crystals.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 16-03-00707) in terms of synthesis of samples and the Federal Agency of Scientific Organizations (agreement No. 007-GZ/C3363/26) regarding the structural study of crystals using the equipment of the Collective Use Center of Federal Scientific Research Centre «Crystallography and Photonics».

1. O. Greis, J.M. Haschke, *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, K.A. Gscheidner & Le Roy Eyring: Amsterdam, N.-Y., Oxford, 1982.
2. O. Greis, J. Solid State Chem. **24** (2), 227 (1978).

## X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS OF HYBRID MATERIALS BASED ON CARBON NANOTUBES AND NANOSIZED METAL OXIDES

P.V. Andreev<sup>1</sup>, K.V. Kremlev<sup>2</sup>, G.S. Zabrodina<sup>2</sup>, I.V. Vilkov<sup>1</sup>,  
A.M. Obiedkov<sup>2</sup>, B.S. Kaverin<sup>2</sup>, N.M. Semenov<sup>2</sup>, S.Yu. Ketkov<sup>2</sup>,  
M.A. Faddeev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>2</sup>*Razuvaev Institute of Organometallic Chemistry of RAS, Nizhny Novgorod,  
Russia*

*E-mail: [andreev@phys.unn.ru](mailto:andreev@phys.unn.ru)*

Carbon nanotubes and hybrid materials based on them due to a wide range of unique physical and chemical properties are extremely relevant objects in various fields of science and industry, including in the field of nanoelectronics. One of the most promising classes of such functional materials are multiwalled carbon nanotubes (MWNTs) with nanoscale coatings of metal oxides, for example, with coatings of aluminum and zirconium oxides

Earlier, in the Laboratory of Nanoscale Systems and Structural Chemistry of the G.A. Razuvaev Institute of Organometallic Chemistry of RAS hybrid materials based on MWNTs were synthesized by the method of deposition from the vapor phase of organometallic compounds. Coatings deposited on them during the pyrolysis of aluminum and zirconium acetylacetonates.

The obtained materials were investigated by the powder X-ray diffraction method. The method allows us to determine qualitatively the phase composition of nanosystems, and also to estimate the coherent-scattering regions, that is, to estimate the particle sizes of the nanophase.

Analysis of the samples was conducted on the Shimadzu XRD-700 diffractometer (CuK $\alpha$ ,  $\lambda = 1,54\text{\AA}$ ). All X-ray experiments were performed under the identical condition.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-33-00776.

LEAD FLUOROBORATE GLASSCERAMIC  
CO-ACTIVATED Nd<sup>3+</sup> AND La<sup>3+</sup>

A.S. Sologub, M.P. Zykova, A.V. Khomyakov, O.B. Petrova  
*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*  
*E-mail: [petrova@proriv.ru](mailto:petrova@proriv.ru)*

Oxyfluoride glass-ceramic (GC) combine the best properties of crystalline fluorides and oxide glasses and are promising for the creation of new laser materials [1]. In lead silicate [2] and borate [3-4] glass systems, the high-temperature cubic phase of PbF<sub>2</sub> (Fm3m) activated by rare-earth ions (RE) tends to crystallize. However, a low-temperature orthorhombic phase PbF<sub>2</sub> (Pnma) is precipitates the entry into which RE does not intercalate [3]. RE stabilize the cubic phase, and about 10 at. % of the RE fluoride is sufficient for stabilization [4]. Thus, 1 mol. % of RE<sub>2</sub>F<sub>3</sub> in the initial glass allows about 10 mol. % of cubic PbF<sub>2</sub> to stabilize, further parasitic rhombic phase of PbF<sub>2</sub> is released upon further crystallization. The cubic phase is a solid solution with a RE concentration of 10-13 at. %, which is too large for most laser and luminescent applications, since it results in concentration quenching and cooperative energy transfer processes. In this study, we attempted to solve this problem, while simultaneously increasing the total concentration of RE ions in the glass and decreasing the concentration of the luminescent agent. We doped the initial glasses with two REs with similar ionic radii, one of which does not have f-f transitions (La) and performs only the function of the stabilizer of the cubic phase, and the other (Nd) plays the role of a luminescence center. In the 75PbF<sub>2</sub>-21,5B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3LaF<sub>3</sub>-0,5NdF<sub>3</sub> system, optically high-quality glasses were obtained and corresponding GCs with a crystalline phase of a solid solution based on cubic PbF<sub>2</sub> were formed. The total RE concentration in the crystalline phase was 11-12 at. % (Pb<sub>1-x</sub>La/Nd<sub>x</sub>F<sub>2+x</sub>), the volume fraction of the crystalline phase is more than 25 %, which is higher than in the GC based on glass doped with 1 mol. % NdF<sub>3</sub> (8-10 vol. %). The Nd<sup>3+</sup> luminescence intensity and lifetime increased in comparison with the GC based on glass doped with 1 mol. % NdF<sub>3</sub>.

1. P.P. Fedorov, A.A. Luginina, A.I. Popov, *J. Fluor. Chem.* **172**, 22 (2015).
2. O.B. Petrova, A.V. Khomyakov, *Opt. and Spectr.* **114** (6), 876 (2013).
3. J. Pisarska et al., *J. All. and Comp.* **451**, 223 (2008).
4. T.S. Sevostjanova et al., *Opt. and Spectr.* **123** (5), 733 (2017).

## HOLE TRANSPORT IN MONOCRYSTALLINE DIAMOND DOPED WITH BORON AT HIGH ELECTRIC FIELDS

I.V. Altukhov<sup>1</sup>, M.S. Kagan<sup>1</sup>, S.K. Paprotskiy<sup>1</sup>, N.A. Khval'kovskiy<sup>1</sup>,  
N.B. Rodionov<sup>2</sup>, A.P. Bol'shakov<sup>3</sup>, V.G. Ral'chenko<sup>3</sup>, R.A. Khmel'nitskiy<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Moscow,  
Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Innovative and Thermonuclear Research, Troitsk, Russia*

<sup>3</sup>*Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: [nik@cplire.ru](mailto:nik@cplire.ru)*

Monocrystalline 10-12  $\mu\text{m}$  thick diamond films with ohmic and Schottky contacts have been studied at room temperature. The basically undoped (i-type) films were CVD grown on (100)-substrate heavily doped with boron ( $\sim 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ). Current-voltage (I-V) characteristics have been measured at d.c. and pulsed (0,5-100  $\mu\text{s}$ ) voltage conditions.

The static I-V characteristics at different voltage polarities were sharply asymmetrical because of asymmetry of m-i-p<sup>+</sup> structure studied; the current at blocked Schottky contact was  $\sim 3$  orders of magnitude less than at the opposite polarity. The I-V curves measured at pulsed voltage differed drastically from the d. c. characteristics. First, sample resistances in both polarities coincided in some voltage range. Second, there is the considerable voltage range (0,05 to 1,5 V) of linear I(V) dependence. This is the result of a shortening of Schottky barrier by the pulsed voltage because of its capacitance, so that the total voltage is applied to the high-resistance diamond layer. The value of ohmic conductivity makes it possible to estimate the concentrations of free carriers and acceptors in the material. They turned out to be  $10^8$  and  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , respectively.

At higher voltages the linear I-V dependence changed by square-law one corresponding to one-carrier injection. The voltage of the transition from the linear to quadratic dependence gives the possibility to estimate the capture time of boron acceptors as  $\sim 10^{-9} \text{ s}$ .

Current-voltage characteristics of diamond films with ohmic contacts have been measured at fields up to  $\sim 5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ . The impact ionization of boron acceptors was observed beginning at  $\sim 30 \text{ kV/cm}$ . The main feature of impurity breakdown in our samples is the absence of S-shaped part in the I-V characteristic. Usually, the S-shaped I-V curve at hydrogenic impurity ionization is ascribed to excited states with lower ionization field compared to that for the ground state. The high impurity breakdown field for diamond results in disappearance of localized excited states because of Pool-Frenkel effect. The influence of this effect on electric field dependence of impurity ionization coefficients is analyzed.

The work is supported in part by RFBR grant 18-02-01079.

# GROWTH OF THE $\text{LiSr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{AlF}_6:\text{Ce}^{3+}$ ( $x = 0,2$ ) FLUORIDE CRYSTALS BY BRIDGMAN TECHNIQUE

M.A. Marisov, A.A. Shavelev, A.A. Shakirov, E.V. Lukinova,  
A.S. Nizamutdinov, S.L. Korableva, V.V. Semashko  
*Kazan Federal University, Kazan, Russia*  
*E-mail: [m.a.marisov@gmail.com](mailto:m.a.marisov@gmail.com)*

The fluoride crystals are promising materials of the photonics [1, 2]. The advantages of these compounds in comparison with widespread oxide crystals are significantly lower melting temperature and wide band gap [3]. Laser sources of the close ultraviolet range, e. g. lasers based on the  $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}$  crystal, have a special place amongst possible applications. However, a low isomorphic capacity of the crystal lattice in case of rare-earth ions is a drawback of these compounds. This leads to the appearance of big amount of defects if one tries to obtain a highly concentrated sample. At the same time, it is a known fact that it is possible to improve the optical qualities of the crystal varying the chemical composition of the crystal, namely the combination of the cations in the crystal lattice [4]. Previously in the Kazan Federal University using a  $\text{Li-YLuF}_4$  crystal as an example it was determined that the quality of a crystal increases with the transition to a mixed structure [5]. That is why the goal of our work is growth of the mixed structure  $\text{LiSr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{AlF}_6$  ( $x = 0,2$ ) fluoride crystals activated with  $\text{Ce}^{3+}$  ions using Bridgman technique and control of their optical properties.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-32-00936.

1. V.A. Fromzel, C.R. Prasad et al., *Advances in Optical and Photonic Devices*, 101 (2010).
2. K. Watanabe, T. Yanagida et al., *Sensors and Materials* **27**, 269 (2015).
3. D. Alderighi et al., *Applied Physics B: Lasers and Optics* **83**, 51 (2006).
4. A.S. Nizamutdinov, V.V. Semashko et al., *Physics of the Solid State* **50**, 1648 (2008).
5. A.S. Nizamutdinov et al., *JETP letters* **91**, 21 (2010).

# **ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

## КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ ИНФРАКРАСНОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Г.С. Соколовский

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

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) с момента опубликования в 1971 году принципов их работы [1], а особенно после их первой практической реализации в 1994 году [2], привлекают огромное внимание научного сообщества: по этой тематике было опубликовано более 7 тыс. работ на которые по данным Web of Science сделано более 100 тыс. ссылок. К настоящему времени ККЛ были созданы и исследованы в широких спектральных диапазонах, а именно - в среднем инфракрасном (3-16 мкм) и в терагерцовом спектральном диапазоне. Основной характеристикой, которая отличает этот тип лазеров от обычных полупроводниковых лазеров на наногетероструктурах, использующих в своей работе рекомбинацию двух типов носителей – электрона и дырки с излучением фотона является то, что они униполярны, т. е. используют только один тип носителей – с излучением фотона при переходе электрона в зоне проводимости с одного квантоворазмерного уровня на другой.

Помимо достигнутых успехов, перспектив развития и применения ККЛ среднего ИК диапазона, в докладе будут обсуждаться два метода создания компактных источников ТГц-излучения: квантово-каскадный лазер (ККЛ) с прямой генерацией терагерцового излучения и нелинейное преобразование излучения на разностной частоте в двухчастотном ККЛ среднего ИК диапазона. Принцип действия ТГц-ККЛ прямой генерации аналогичен ККЛ среднего ИК диапазона в связи с чем они имеют принципиальный недостаток, связанный с тем, что энергия ТГц фотона мала по сравнению с тепловым уширением энергетических уровней при комнатной температуре, что делает невозможным создание инверсной заселенности уровней при повышенных температурах. Наибольшая сообщенная на сегодня рабочая температура ТГц-ККЛ этого типа составляет менее 200 К [3]. Этому недостатка лишены ТГц-ККЛ разностной генерации, поскольку их компонентами являются ККЛ, работающие в среднем ИК-диапазоне, где энергия оптического перехода на порядок превосходит тепловую энергию, что позволяет создавать лазерные источники ТГц-излучения при комнатной температуре [4]. К сожалению, из-за несоблюдения фазового синхронизма в ТГц-ККЛ разностной генерации используют так называемую Черенковскую схему фазового согласования, реализация которой требует создания скошенной выходной грани.

Автор благодарит Минобрнауки (идентификатор RFMEFI61617X0074).

1. Р.Ф. Казаринов, Р.А. Сурис, ФТП **5**, 797 (1971).
2. J. Faist et al., Science **264**, 553 (1994).
3. S. Fatholouloumi et al., Opt. Exp. **20**, 3866 (2012)
4. M.A. Belkin et al., IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron. **15**, 952 (2009).

# ИЗОТОПИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ПРИМЕСНЫЕ КРИСТАЛЛЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КВАНТОВОЙ ПАМЯТИ

А.А. Калачев

*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского, Казань*

*ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань*

*E-mail: [a.a.kalachev@mail.ru](mailto:a.a.kalachev@mail.ru)*

Создание эффективной твердотельной квантовой памяти является одной из важнейших задач в области оптических квантовых технологий. В настоящее время исследуется множество твердотельных систем, которые считаются перспективными носителями квантовой информации. Среди них: одиночные NV-центры в алмазе, холодные атомы, механические осцилляторы и ансамбли редкоземельных ионов. Будучи основой для современной лазерной и телекоммуникационной промышленности, твёрдые тела, легированные редкоземельными ионами, очень привлекательны для квантовой обработки информации, поскольку они обладают большими временами как оптической, так и спиновой когерентности [1-3].

В частности, большой интерес представляют изотопически чистые примесные кристаллы, демонстрирующие чрезвычайно малое ( $\sim 10$  МГц) неоднородное уширение оптических переходов примесных ионов [4-6]. Такие узкие оптические линии не требуют специального приготовления спектральных провалов и узких линий поглощения внутри них для реализации оптической квантовой памяти. Кроме того, изотопически чистые кристаллы с узкими линиями поглощения являются очень перспективными материалами для реализации широкополосной квантовой памяти на основе нерезонансного рамановского поглощения и испускания фотонов [7-11]. Основная идея такой техники состоит в том, чтобы отобразить квантовое состояние входящего фотона в долгоживущее сверхтонкое спиновое состояние, которое нечувствительно к флуктуациям магнитного поля, что соответствует полному часовому спиновому переходу или переходу с нулевым линейным эффектом Зеемана (ZEFOZ transition).

В настоящем докладе обсуждаются результаты недавних экспериментальных и теоретических исследований изотопически чистых примесных кристаллов, перспективных для реализации нерезонансной рамановской квантовой памяти [12-17]. Показана возможность выращивания высококачественных фторидных кристаллов с неоднородной шириной оптических линий, достигающей 13 МГц [16], что делает их перспективными для реализации нерезонансной рамановской квантовой памяти. В кристаллах, легированных ионами Er-167, впервые продемонстрировано увеличение времени оптической когерентности на порядок (с нескольких мкс до 300 мкс) за счет использования часовых оптических переходов и понижения температуры до  $\sim 100$  мК [15]. Таким образом, показана перспективность использования сверхнизких температур для увеличения времён когерентности в слабых магнитных полях. В кристаллах, легированных ионами Nd-143, впервые наблюдался эффект электромагнитно-

индуцированной прозрачности [17] с использованием сверхтонких ZEFOZ-переходов, что непосредственно подтверждает возможность реализации рамановских схем квантовой памяти в исследуемых материалах. Теоретические оценки, сделанные в работе [14], показывают возможность достижения большого отношения сигнал/шум при записи и воспроизведении однофотонных состояний в режиме нерезонансного рамановского поглощения и испускания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-12-00806).

1. A.K. Rebane et al., Proc. of SPIE **7611**, 76110H (2010).
2. C.W. Thiel, T. Böttger, R.L. Cone, J. Lumin. **131**, 353 (2011).
3. C.W. Thiel et al., J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **45**, 124013 (2012).
4. R.M. Macfarlane, A. Cassanho, R.S. Meltzer, Phys. Rev. Lett. **69**, 542 (1992).
5. R.M. Macfarlane, R.S. Meltzer, B.Z. Malkin, Phys. Rev. B **58**, 5692 (1998).
6. R.L. Ahlefeldt, M.R. Hush, M.J. Sellars, Phys. Rev. Lett. **117**, 250504 (2016).
7. S.A. Moiseev, W. Tittel, New J. Phys. **13**, 063035 (2011).
8. S.A. Moiseev, Phys. Rev. A **88**, 012304 (2013).
9. X. Zhang, A. Kalachev, O. Kocharovskaya, Phys. Rev. A **87**, 013811 (2013).
10. A. Kalachev, O. Kocharovskaya, Phys. Rev. A **88**, 033846 (2013).
11. X. Zhang, A. Kalachev, O. Kocharovskaya, Phys. Rev. A **90**, 052322 (2014).
12. R.A. Akhmedzhanov et al., Laser Phys. Lett. **13**, 015202 (2016).
13. R.A. Akhmedzhanov et al., Laser Phys. Lett. **13**, 115203 (2016).
14. А.Д. Бережной, А.А. Калачев, Квантовая электроника **47**, 790 (2017).
15. N. Kukharchyk et al., New J. Phys. **20**, 023044 (2018).
16. N. Kukharchyk et al., Opt. Lett. **43**, 935 (2018).
17. R. Akhmedzhanov et al., Phys. Rev. B **97**, 245123 (2018).

## АППАРАТЫ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ И ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРАХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕРАПИИ И ХИРУРГИИ

В.П. Минаев

*НТО «ИРЭ-Полус», Фрязино  
E-mail: [vMinaev@ntoire-polus.ru](mailto:vMinaev@ntoire-polus.ru)*

Первые успешные попытки использования лазерного излучения в медицине состоялись в 1961 г. на следующий год после создания первых лазеров, когда в США Leon Goldman показал, что рубиновый лазер может быть использован для удаления винных пятен и меланомы с кожи [1], а Charles J. Campbel скоагулировал опухоль сетчатки [2].

В СССР первая операция по привариванию сетчатки была выполнена в Одесском НИИ им. Филатова в июне 1964 г. Л. А. Линником [3] с помощью экспериментального аппарата, созданного в московском ОКБ-16 (КБ Точмаш) под руководством его директора А. Э. Нудельмана. На основе этого прибора был разработан и запущен в серийное производство в 1965 г. на Загорском ОМЗ лазерный фотокоагулятор ОК-1.

Следует отметить, что использованное при этом излучение красного диапазона оказалось оптимальным для подобных применений, однако мало подходило для использования в качестве лазерного скальпеля при хирургических операциях, поскольку слабо поглощалось мягкими тканями.

Идеальными для использования в качестве лазерного скальпеля стали созданные в 1964 г. Кумаром Пателом СО<sub>2</sub>-лазеры с длиной волны излучения 10,6 мкм. Такое излучение сильно поглощалось водой, благодаря чему обладало прекрасными режущими свойствами.



Леон Голдман  
(1905-1997)



Чарлз Кемпел  
(1926-2007)



Леонид Андреевич  
Линник  
(1927-2012)



Александр Эммануилович  
Нудельман  
(1912-1996)

Примечание. Термином «силовая лазерная терапия» (в отличие от низкоинтенсивной лазерной терапии) автор объединяет лазерные медицинские технологии, основанные на таком воздействии лазерного излучения на биоткани, которое с одной стороны приводит к изменению их физического состояния, с другой стороны, не связано с воздействием в виде сечения или удаления биоткани, характерным для хирургии.

Вместе с тем, коагулирующие свойства 10-микронного излучения оказываются недостаточными для надежного гемостаза во время операций.

Впрочем, под руководством О. К. Скобелкина были разработаны специальные зажимы, позволившие избегать нежелательных кровотечений при использовании таких лазеров. На этот раз наши соотечественники опередили иностранных коллег. Первый в СССР лазерный скальпель на CO<sub>2</sub>-лазере (рис. 1) был разработан под руководством академика Н. Д. Девяткова во Фрязинском «Истоке», возглавил разработку В. П. Беляев [4]. Установка была оснащена удобным для работы хирурга зеркальным манипулятором с несколькими степенями свободы движения наконечника.



Николай Дмитриевич  
Девятков (1907-2001)



Владислав Павлович Беляев  
(1930-1991)



Сергей Дмитриевич  
Плетнев (1923-2013)

Первое сообщение об использовании этой установки С.Д. Плетневым в МНИОИ им. Герцена [5] появилось в 1967 г., и заметно опередило использование углекислотного лазера G. J. Jako в США при операции на голосовых связках [6].

Появлялись новые лазерные аппараты для хирургии, показывающие свои преимущества по сравнению с традиционными хирургическими инструментами. Однако внедрению их в массовое здравоохранение препятствовали высокая стоимость, большие вес, габариты и энергопотребление, чувствительность к внешним воздействиям и необходимость постоянного инженерного обслуживания.

Ситуация изменилась в начале 90-х в связи с быстрым прогрессом в увеличении надежности и уровня выходной мощности полупроводниковых лазеров (лазерных диодов) при снижении их себестоимости. Немного позднее появились лазеры на активированном волокне, способные генерировать излучение мощностью в единицы, а затем десятки и сотни Ватт. Все это позволило создавать на основе полупроводниковых и волоконных лазеров медицинские аппараты для хирургии и силовой терапии с прекрасными эксплуатационными характеристиками: габаритами, массой (около 10 кг) и энергопотреблением (порядка 100 Вт). Поскольку диодные лазеры можно просто модулировать по питанию, с их помощью легко обеспечить как непрерывный, так и импульсно-периодический режим работы с изменением в широких пределах длительностей импульсов и пауз между ними.

С появлением современных портативных аппаратов стало возможным, например, разместить в одной эндоскопической стойке несколько недорогих аппаратов, по-разному воздействующих на биоткани. Немаловаж-

но, что такие аппараты надежны и просты при эксплуатации. Наконец, аппараты на основе полупроводниковых и волоконных лазеров оказываются дешевле аналогов на основе твердотельных и газовых лазеров. К этому добавляется более низкая стоимость эксплуатации, обусловленная отсутствием необходимости в периодическом инженерном обслуживании.

Первый отечественный диодный лазерный скальпель «Алто-хирург» с длиной волны 0,98 мкм и выходной мощностью 3 Вт был представлен малым предприятием «Алто» в 1994 г., однако не был зарегистрирован в России. Первым зарегистрированным (1999 г.) аппаратом стал «Лазон-10П» (0,97 мкм, 10 Вт) - совместная разработка ФНПЦ «Прибор» и НТО «ИРЭ-Полюс».



Рис. 1. Лазерный скальпель-коагулятор «Лазон-10П»

В настоящее время медицинские аппараты на основе полупроводниковых лазеров с характеристиками, не уступающими зарубежным аналогам выпускают несколько отечественных предприятий. Наиболее популярны аппараты, генерирующие излучение с длинами волн 0,81; 0,97 и 1,47 мкм.

Новые возможности открылись с началом разработок в НТО «ИРЭ-Полюс» аппаратов на основе волоконных лазеров [7]. В 2001 г. был зарегистрирован первый аппарат с лазером на эрбий (Er)-активированном волокне (1,55 мкм), который в дальнейшем вошел в семейство ЛСП-«ИРЭ-Полюс», зарегистрированное в 2004 г. и включающее также аппараты на основе иттербий (Yb) и тулий (Tm)-активированного волокна с длинами волн излучений соответственно 1,06 и 1,94 мкм. Кроме этого в семейство вошел двухволновый аппарат, в котором два независимо регулируемых по мощности излучения (0,97 и 1,55 мкм) выводятся через одно рабочее волокно. Это позволяет хирургу менять характер воздействия на биоткани в процессе операции.

Преимущества использования волоконных лазеров можно объяснить на основе аппаратов семейства ЛСП-«ИРЭ-Полюс».

На рис. 2 представлена упрощенная схема аппаратов семейства. Излучение пигтейлированных (с волоконным выводом) лазерных диодов суммируется в сварном волоконном сумматоре в единое волокно и может быть использовано в качестве выходного рабочего излучения, либо для накачки лазер на активированном волокне. Использование в качестве отражателей резонатора волоконного лазера брегговских решеток, сформированных непосредственно в волокне, снимает проблему юстировки резонатора. Таким образом, конструкция аппарата до оптического разъема представляет собой интегральное волоконное устройство, не нуждающееся в юстировке, не чувствительное к влиянию окружающей среды и механи-

ческим воздействиям. Выходное излучение лазера может быть использовано для накачки следующего лазера, генерирующего излучение с другой длиной волны.

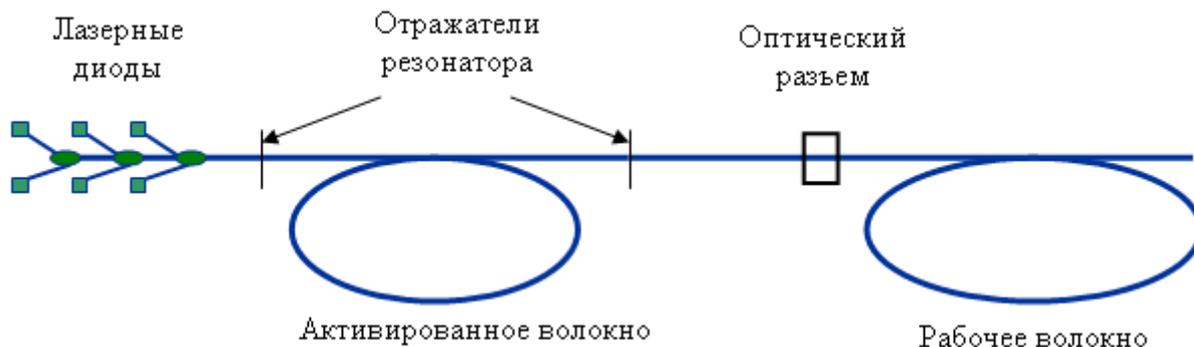


Рис. 2. Схема лазерного аппарата

Высокое качество лазерных диодов производства НТО «ИРЭ-Полус» позволяет обходиться при работе воздушным охлаждением без термоэлектрических холодильников, а значит, уменьшить вес, габариты и энергопотребление. Технология волоконных сумматоров позволяет объединять в выходное волокно излучения лазеров с разными длинами волн. Для обозначения места, в которое попадет при включении рабочее излучение, в выходной световод подается излучение видимого диапазона.

На рис. 3 представлена структура семейства лазерных аппаратов ЛСП-«ИРЭ-Полус», не включающая двухволновую версию аппарата.

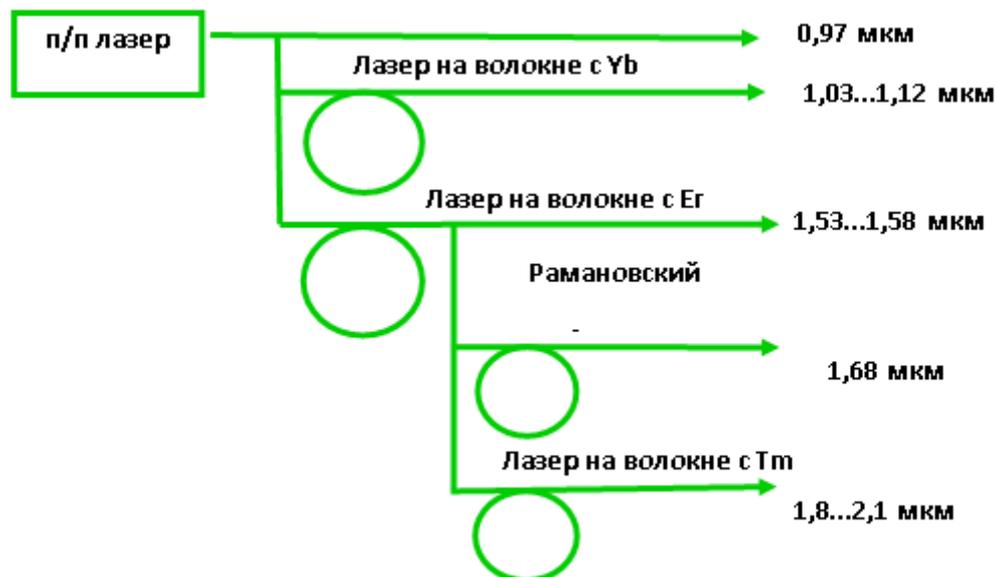


Рис. 3. Семейство лазерных аппаратов ЛСП-«ИРЭ-Полус»

Использованный подход обеспечивает высокую унификацию аппаратов семейства. Дело в том, что их основой является диодный лазер с длиной волны 0,97 мкм с обслуживающими его блоками питания, управления и вентиляторами охлаждения, от которого версии с волоконными лазерами отличаются привариваемыми к выходу базового лазера блоками, содержащими волоконные лазеры.

В табл. 1 представлены характеристики наиболее популярных моделей аппаратов семейства ЛСП- «ИРЭ-Полюс». выпускаемых в настоящее время.

Таблица 1

Длина волны, мкм	0,97	1,55	1,94	0,97/1,56
Выходная мощность, W	30(60)	15	5; 10	30/15
Режимы работы	Непрерывный, импульсный, импульсно-периодический			
Длительность импульсов и пауз, мс	10...10000			
Лазер целеуказатель, мкм	0,53 (0,67)			
Диаметр волокна, мкм	(200) 400...600			
Питание	220 (110)V, 50...60 Hz, до 200 VA			
Размеры, мм	120×260×330			
Масса, кг, не более	9			

Высокая эффективность аппаратов и их низкая чувствительность к внешним воздействиям позволила разработать версию ЛСП – «ИРЭ-Полюс», модель «Компакт» (рис. 4), находящаяся на стадии регистрации. В ней аппарат интегрирован в герметичный корпус и может работать от встроенных аккумуляторов в течение часа. Он может быть использован для оснащения машин скорой помощи, в быстро развертываемых госпиталях, а также при выезде врачей в медицинские учреждения, не имеющие подобного оборудования, например, для лечения варикозно расширенных вен методом ЭВЛК.



Рис. 4. ЛСП-«ИРЭ-Полюс», модель «Компакт»

Поскольку типичное сечение светонесущей сердцевины активного волокна составляет величину порядка 10 мкм, в отличие от диодных лазеров, излучение волоконных с мощностью до 100 и более Вт может быть введено в тонкое рабочее волокно. Эта возможность реализована в последней разработке НТО «ИРЭ-Полюс» - двухволновом аппарате повышенной мощности «Уролаз» (FiberLase U1), регистрационное удостоверение № РЗН 2017/5446, предназначенном для операций и литотрипсии в урологии.

Представленные в таблице 2 характеристики этого аппарата в сравнении с ближайшими зарубежными аналогами показывают преимущество используемых подходов. На рис. 5 представлены аппараты из табл. 2.

Таблица 2

Характеристики лазерных аппаратов, генерирующих лазерное излучение с длиной волны вблизи 2 мкм с максимальной выходной мощностью этого излучения 120 Вт.

Аппарат	Pulse 120H	RevoLix	Vela-XL	Уролаз
Активная среда	АИГ:Но	АИГ:Тm	Волокно, активированное Тm	
$\lambda$ , мкм	2,1	2,01	1,94	1,94 + 1,56
Мощность, Вт	120 (средняя)	120	120	120 + 15
Режим работы	Имп. 0,2-6Дж, 5-80 Гц	Имп.50мс-1с, непрерывный	Имп.1 мс, непрерывный	Имп. 0,2мс-1с, непрерывный
Лазер целеуказатель	0,53 мкм	0,53 мкм или 0,635 мкм	0,53 мкм	0,53 мкм
Масса, кг	245	150	150	< 40
Габариты, см	47×116×105	42×95×89	30×95×105	55×46×29
Питание	200-240В, < 46А	200-240В, < 15А	200-240В, < 16А	220±10 %, < 10А
Изготовитель	«Lumenis», Израиль	«Lisa laser», ФРГ	«Starmedtec», ФРГ	НТО «ИРЭ- Полюс», РФ



а



б



в



г

Рис. 5. Лазерные аппараты, работающие в диапазоне 2 мкм: а – «Pulse120H»; б – «Revolix»; в – «Vela-XL»; г – «Уролаз»

Следует отметить, что одновременно с разработкой аппаратов НТО «ИРЭ-Полюс» с партнерами развернуло активную работу с врачами по

разработки технологий их применения [8]. Результатом этой работы стали более 10 зарегистрированных медицинских технологий и пособий для врачей в разных областях медицины. Разрабатывались технологии и для других приборов. Тем самым был создан фундамент для внедрения в медицину лазерных методов, основанных на использовании доступных и надежных аппаратов.

Разнообразие длин волн рабочего излучения объясняется тем, что от их значения зависят оптические свойства биологических тканей (поглощения и рассеяния), а значит и характер воздействия лазерного излучения на биоткани.

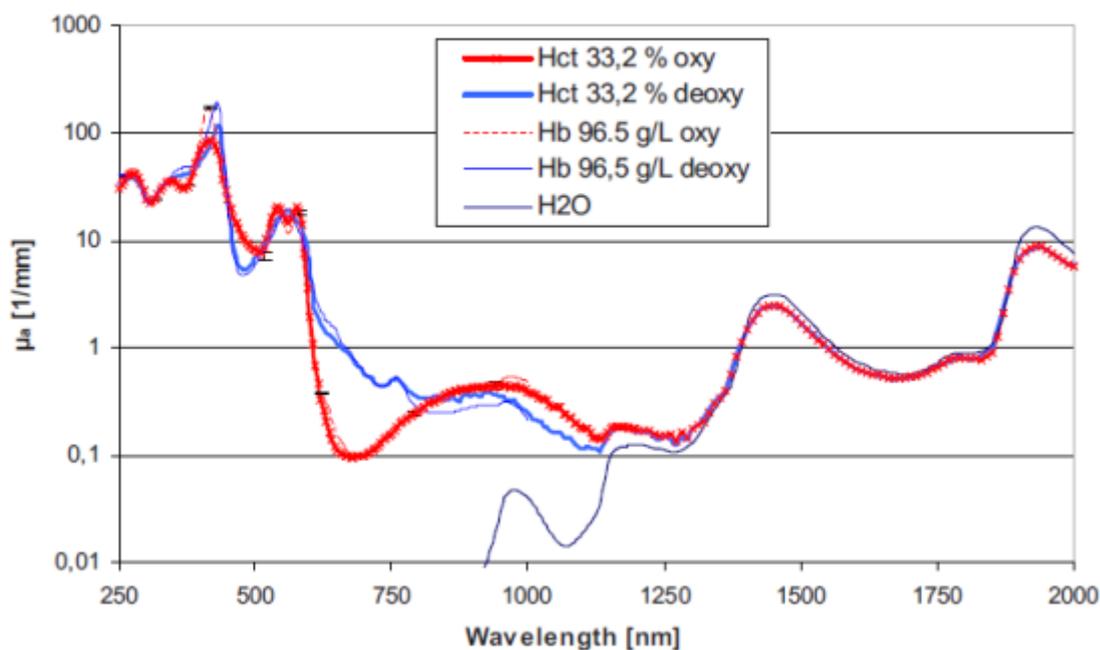


Рис. 6. Зависимости коэффициентов поглощения в воде, эмульсии эритроцитов и растворе гемоглобина, моделирующих кровь от длины волны излучения (стрелками показаны длины волн 0,97; 1,55 и 1,94 мкм)

Основными хромофорами в биотканях, поглощающими излучение в видимом и ближнем ИК диапазонах являются вода и гемоглобин. На рис. 6 представлены зависимости коэффициентов поглощения в воде, эмульсиях эритроцитов и растворах гемоглобина, моделирующих кровь с гематокритом Hct = 33,2 % от длины волны излучения [9].

Из рисунка видно, в частности, что при длинах волн меньше примерно 1,2 мкм поглощение гемоглобином крови больше, чем поглощение водой, излучение называют «гемоглобинпоглощаемым», а лазеры «H-лазерами». При более высоких значениях длины волны поглощение в воде начинает играть основную роль. Такое излучение получило название «водопоглощаемое», а лазеры «W-лазеры».

Знание этих зависимостей позволяет оптимизировать медицинские методики. Так, «H-лазеры» оказываются более эффективными для чрескожной коагуляции телеангиэктазий (см. напр. [10]), а «W-лазеры»

оказываются более эффективными при лечении варикозно расширенных вен методом ЭВЛК (эндовенозной лазерной коагуляции) [11].

Необходимо учитывать, что важными могут оказаться сравнительно небольшие изменения длины волны излучения. Например, для аппаратов, представленных в табл. 2 коэффициенты поглощения отличаются примерно в 2 и 4 раза (рис. 7 на основе [12]).

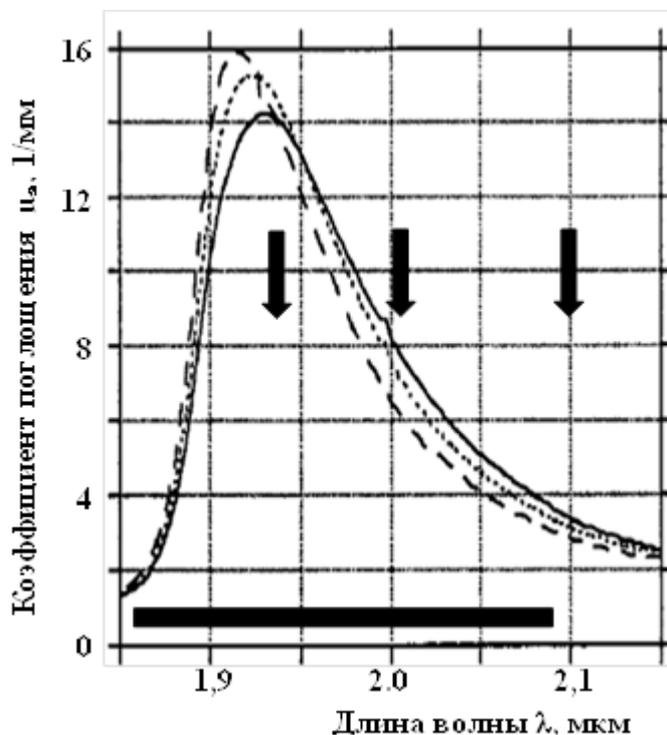


Рис. 7. Зависимость коэффициента поглощения в воде от длины волны излучения и температуры: сплошная линия -  $22 \pm 1$  °C, пунктир -  $49 \pm 5$  °C, штриховая линия -  $70 \pm 5$  °C.

Благодаря этому удастся неинвазивно осуществлять коррекцию формы носовой перегородки и ушных раковин. На рис. 8 представлена фотография уха кролика загнутое методом лазерной термопластики. Видно, что осталась неповрежденной шерсть в месте изгиба.

При использовании сильно поглощаемого в водной среде или среде физиологического раствора излучения, вблизи выходного торца световода наблюдается сверхинтенсивное кипение [14], в результате которого может формироваться двухфазная (из парогазовых микропузырей и горячей воды) струя, которая может неконтактно рассекать мягкие ткани [15] с коагуляцией краев разреза и минимумом карбонизации.



Рис. 8. Ухо кролика, загнутое методом лазерной термопластики

Этот рисунок оказывает также еще одно преимущество волоконных лазеров по сравнению с кристаллическими: полосой показан диапазон, в котором могут работать лазеры на Tm-активированном волокне.

С использованием излучения волоконных лазеров реализуются биофизические эффекты, позволившие реализовать новые медицинские методики. В частности, излучение с длиной волны 1,55 мкм позволяет реализовать лазерную термопластику хрящей, основанную на явлении обратной потери упругости хрящей при кратковременном нагреве до температуры около 70 °C [13].

На рис. 9 представлены из [15] фотографии реализации гидродинамического рассечения при резекции опухоли мочевого пузыря и энуклеации простаты.

Когда микропузыри сливаются, образуется парогазовый макропузырь (рис. 9в), через который практически без поглощения проходит излучение – эффект, получивший название «эффекта Моисея» (Moses effect) (см. напр. [16]). Использование этого явления позволяет повысить скорость дробления камней и уменьшить их миграцию (ретропульсию) в урологии.



Рис. 9. Гидродинамическое рассечение ткани при резекции «единым блоком» опухоли мочевого пузыря (а) и энуклеации аденомы предстательной железы (б), «эффект Моисея» (в), (1 – конец световода, 2 – струя, 3 - раковая опухоль, 4 - макропузырь)

Перечень методик лечения с использованием аппаратов на основе волоконных и полупроводниковых лазеров может быть продолжен, но это выходит за рамки настоящего сообщения.

Подводя итог представленному обзору, можно сказать, что появление медицинских аппаратов на основе полупроводниковых и волоконных лазеров, не только открыло возможность широкого внедрения лазерных технологий в массовое здравоохранение, но и позволило разработать высокоэффективные малоинвазивные технологии, многие из которых, в отличие от традиционных, позволяют осуществлять лечение без госпитализации в условиях поликлиники или дневного стационара.

1. J. Necht, *Laser Focus World*, 53 (1994).
2. С.Ј. Koester et al., *J. Opt. Soc. Am.* **607**, 52 (1962).
3. А.Э. Нудельман, *ВИЭТ №1*, 115 (1994).
4. Н.Д. Девятков, *Воспоминания*, М.: ЗАО ИПРЖР, 1998.
5. С.Д. Плетнев, *Материалы 24-й научной сессии МНИОИ им. П.А. Герцена и сочинского диспансера*, М.:1967.
6. G.J. Jako, *Laryngoscope* **82 (12)**, 2204 (1972). По Stanley M. Shapshay, *Laryngoscope* **106**, 935 (1996).
7. В.П. Гапонцев и др., *Квантовая электроника* **32 (11)**, 1003 (2002).
8. В.П. Минаев, *Квантовая электроника* **35 (11)**, 976 (2005).
9. M. Friebel et al., *Journal of Biomedical Optics* **14 (3)**, 034001 (2009).
- 10.Е.О. Белянина, В.П. Минаев, *Пластическая хирургия и косметология* **161 (2)**, 1 (2014).
- 11.К.М. Жилин, В.П. Минаев, А.Л. Соколов, *Квант. электроника* **39 (8)**, 781 (2009).

12. E.D. Jansen et al., *Lasers Surg. Med.* **14**,:258 (1994).
13. В.Н. Баграташвили, Э.Н. Соболев, А.Б. Шехтер, *Лазерная инженерия хрящей*, М.:ФИЗМАТЛИТ, 2006.
14. V.I. Yusupov, V.M. Chudnovskii, V.N. Bagratashvili, *Laser Physics* **20** (7), 1 (2010).
15. A.Z. Vinarov et al., *KnE Energy & Physics*, VII International Conference on Photonics and Information Optics (PhIO), 407 (2018).
16. M.M. Elhilali, et al., *J Endourol.* **31**(6), 598 (2017).

# НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДИНАМИКА НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ: ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ ОДИНОЧНЫХ МОЛЕКУЛ

Ю.Г. Вайнер

*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

*E-mail: [vainer@isan.troitsk.ru](mailto:vainer@isan.troitsk.ru)*

Динамические процессы в неупорядоченных твердотельных веществах изучены в существенно меньшей степени, чем в случае хорошо упорядоченных кристаллов, что объясняется намного более сложной внутренней структурой таких веществ. Особенно мало мы знаем о процессах внутренней динамики в органических неупорядоченных веществах, например, в разнообразных полимерах, которые широко применяются. Локальная неупорядоченность указанных веществ значительно усложняет теоретическое описание процессов внутренней динамики в них и предъявляет жесткие требования к применяемой для этого экспериментальной технике и методикам. В частности, для получения новой важной информации о динамике неупорядоченных сред на микроуровне и в максимально широком диапазоне времен крайне желательно применять методы, позволяющие устранить различные типы усреднения, присущие экспериментальным методам, такие как временное, пространственное и ансамблевое усреднение. Указанная задача может быть выполнена с использованием новых методов спектроскопии примесного центра. Одним из таких методов является метод спектроскопии одиночных молекул, который позволяет устранить два последних из выше перечисленных видов усреднения.

Данная лекция будет посвящена изложению результатов систематического изучения низкотемпературной динамики неупорядоченных органических веществ с применением метода спектроскопии одиночных примесных молекул на примере исследований высокомолекулярного аморфного полиизобутилена. Будут кратко изложены основные физические принципы метода спектроскопии одиночных молекул и основы его применения для изучения динамики полимеров при гелиевых температурах. Будет продемонстрировано, какие новые знания о процессах внутренней динамики в неупорядоченных органических полимерах были получены в результате проведенных исследований и каковы дальнейшие перспективы подобных исследований.

# ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ГЕОМЕТРИИ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЛАЗЕРОВ С ОДНОВРЕМЕННО ВЫСОКОЙ ПИКОВОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТЬЮ

О.В. Палашов

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

*E-mail: [palashov@appl.sci-nnov.ru](mailto:palashov@appl.sci-nnov.ru)*

Одним из наиболее значимых направлений квантовой электроники является создание лазеров с одновременно высокой пиковой и средней по времени мощностью. Одной из главных фундаментальных научных проблем, ограничивающих среднюю мощность лазеров, работающих как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме, является неизбежное тепловыделение в лазерных элементах (как активных – в квантовых усилителях, так и магнитоактивных – в оптических изоляторах). Возникающее неравномерное распределение температуры по объему элемента может приводить к появлению целого ряда негативных эффектов: тепловой линзе (из-за фазовых искажений); термонаведенной деполяризации (из-за механических напряжений, приводящих к линейному двулучепреломлению) [1]; деформациям оптических элементов (вплоть до их разрушения) и др. Увеличение средней по объему температуры может приводить к расширению и смещению линий поглощения, уменьшению сечения переходов [2] и т. п.

Наиболее сильным источником тепла в активных элементах (АЭ) твердотельных лазеров является излучение накачки. Начало XXI века, благодаря бурному развитию диодной накачки, ознаменовано существенным прогрессом в области средней мощности лазеров с одновременно высокой средней по времени и пиковой мощностью. В лазерах на ионе неодима мощность тепловыделения составляет десятки процентов [3] из-за большого дефекта кванта накачки и паразитных процессов поглощения в возбужденном состоянии, кросс-релаксации и т. п. [4]. В связи с этим в качестве активного иона широко используется сегодня ион иттербия, характеризующийся небольшим дефектом кванта [5], большим временем жизни инверсии (верхнего уровня) и отсутствием поглощения из возбужденного состояния [2].

Методом подавления паразитных тепловых эффектов может служить охлаждение АЭ, например, до температуры жидкого азота [6]. При этом, для иттербий содержащих сред, увеличивается теплопроводность, уменьшается коэффициент теплового расширения и температурный градиент изменения показателя преломления [7], увеличивается сечение поглощения на рабочем переходе и переходе накачки, и практически полностью опустошается нижний рабочий уровень (среда становится четырехуровневой) [2].

В предлагаемой лекции более подробно излагается другой метод борьбы с тепловыми эффектами – при помощи придания АЭ лазеров новых/перспективных форм/геометрий. Это очень значимый параметр. Дей-

ствительно, появление в конце прошлого века новой геометрии АЭ – «волокна» (аспектное соотношение – отношение длины к диаметру  $A > 1000$ ), в считанные годы сделала волоконные лазеры лидером по средней мощности (в десятки киловатт!) при высоком качестве лазерного излучения и надежности самих устройств. Однако в их силе и слабость. Из-за особенностей геометрии активной среды (главным образом, протяженности) импульсные волоконные лазеры существенно ограничены по пиковой мощности нелинейными эффектами и, как правило, их средняя мощность (при длительностях импульсов  $< 1$  пс) ограничена на уровне десятка ватт. Энергия в импульсе одномодовых волоконных лазеров ограничена долями мДж и, поэтому, для достижения энергии даже джоульного уровня необходимо когерентное сложение тысяч таких каналов излучения (что представляет собой чрезвычайно сложную задачу, которая, тем не менее, рассматривается в ряде крупных проектов, например, проекте XCAN – Coherent Amplification Network [8]).

В предлагаемой лекции подробно рассматриваются АЭ в геометрии «тонкий стержень» (включая конусный), «тонкий слэб» и «тонкий диск» (включая композитные варианты «сэндвич» и «кладдинг»). Эти три геометрии выглядят сегодня наиболее перспективно для лазеров с одновременно высокой пиковой и средней по времени мощностью и могут быть использованы как для квантронов задающих генераторов, так и в качестве усилителей волоконных лазеров.

Геометрия «тонкий стержень» [9] по аспектному соотношению занимает промежуточное положение между волокном ( $A > 1000$ ) и традиционными стержнями ( $A \sim 10$ ) и составляет  $\sim 100$ . Характерные размеры: диаметр до 1 мм при длине 3...4 см. Благодаря существенно меньшему, чем у стержневого АЭ диаметру ( $\sim 1$  см), тонкостержневые АЭ позволяют работать при более высоких средних мощностях, а благодаря существенно большему, чем у волокна диаметру ( $< 100$  мкм), тонкостержневые АЭ позволяют работать при более высоких энергиях в импульсе. Особенностью такой геометрии является волноводное распространение излучения накачки и, одновременно, свободное распространения лазерного излучения в АЭ. Энергия в наносекундном импульсе на выходе «тонкого стержня» может достигать нескольких мДж, а коэффициент усиления по слабому сигналу  $> 100$ , что делает перспективным использование такого квантрона в качестве разгонного усилителя в гибридном лазере.

Геометрию «тонкий слэб» [10] можно рассматривать как одномерный случай «тонкого стержня». «Тонкий слэб» представляет собой тонкую ( $< 1$  мм) пластину из активной среды с двумя полированными торцами для прохождения излучения накачки и сигнала аналогично геометрии «тонкий стержень». Ширина пластины на порядок больше ( $\sim 1$  см), что позволяет получать энергию в импульсе также более чем на порядок, не усложняя при этом оптическую схему лазера.

Старшей по возрасту из перечисленных геометрий является геометрия «тонкий диск» [11]. Такая геометрия существенно уменьшает тепло-

вые искажения излучения благодаря торцевому теплоотводу, при котором градиент температуры направлен вдоль, а не поперек распространения излучения. Кроме того, дополнительным преимуществом такой геометрии является малая длина/толщина АЭ (200...300 мкм), которая позволяет усиливать мощные короткие импульсы, не опасаясь эффекта самофокусировки.

Внедрение в индустрию мощного лазеростроения перспективных геометрий АЭ должно позволить создать новый класс компактных и надежных импульсных лазеров со средней по времени мощностью в единицы и десятки киловатт. Такие лазеры уже сегодня востребованы на потребительском рынке для решения разного рода задач. В лекции описывается одно из новых ярких приложений – орбитальный лазер для удаления космического мусора, в разработке концепции которого принимают участие сотрудники ИПФ РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ No. 14.607.21.0201 (уникальный идентификатор RFMEFI60718X0201).

1. А.В. Мезенов, Л.Н. Сомс, А.И. Степанов, *Термооптика твердотельных лазеров*, Л.: Машиностроение, 1986.
2. J. Dong, et al., *J. of the Optical Society of America* **В 20**, 1975 (2003).
3. W. Krupke, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **6**, 1287 (2000).
4. D.C. Brown, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **34**, 560 (1998).
5. T.Y. Fan, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **29**, 1457 (1993).
6. P.A. Schulz, S.R. Henion, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **27**, 1039 (1991).
7. D.C. Brown, *IEEE Journal of Selected Topic In Quantum Electronics* **11**, 587 (2005).
8. G. Mourou et al., *Nature Photonics* **7**, 258 (2013).
9. I.I. Kuznetsov et al., *Applied Optics* **54 (25)**, 7747 (2015).
10. P. Russbuedt et al., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **21 (1)**, 447 (2015).
11. D.C. Brown et al., *Applied Optics* **25**, 612 (1986).

## МНОГОЧАСТОТНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ YAP:Nd ЛАЗЕРА

П.Г. Зверев<sup>1,2</sup>, И.В. Смирнов<sup>2</sup>, Г.В. Шилова<sup>1</sup>, А.А. Сироткин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>2</sup>Московский энергетический институт (ТУ), Москва

E-mail: [zverev@lst.gpi.ru](mailto:zverev@lst.gpi.ru)

Лазеры, одновременно работающие на двух и более длинах волн, могут использоваться для различных практических целей, в частности в системах экологического мониторинга, зондирования атмосферы, оптической связи. При генерации разностной частоты в нелинейном кристалле такие лазеры дают терагерцовое излучение. Поэтому представляет большой интерес создание компактных эффективных многочастотных твердотельных лазеров на одном активном элементе. Известно, что спектр люминесценции примесных редкоземельных ионов в анизотропном кристалле изменяется в зависимости от его ориентации [1]. В работе [2] было показано, что в анизотропном кристалле Nd<sup>3+</sup>:GdVO<sub>4</sub> максимум люминесценции отличается для разных ориентаций, и что существует возможность получения лазерной генерации одновременно на двух длинах волн в двух взаимно ортогональных поляризациях.

В настоящей работе проведено исследование многочастотной генерации лазера на кристалле Nd<sup>3+</sup>:YAP. В спектрах люминесценции ионов Nd<sup>3+</sup> в анизотропном кристалле YAP на переходе  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  наблюдаются три интенсивные линии на длинах волн 1064, 1072 и 1079 нм. В экспериментах по получению лазерной генерации использовался непрерывный диодный лазер с волоконным выводом, работающий на длине волны 808 нм и мощностью до 12 Вт. В качестве активной среды использовался кристалл Nd<sup>3+</sup>:YAP (a-cut) размером 3×3×12 мм с концентрацией ионов Nd<sup>3+</sup> равной 0,9 ат. %. Резонатор неодимового лазера длиной 43 мм состоял из сферического (R = 500 мм) входного зеркала, отражающего в области 1÷1,2 мкм и прозрачного для излучения накачки и плоского зеркала с пропусканием 13,5 % в области 1,05÷1,1 мкм. Для управления длиной волны генерируемого излучения в резонатор помещалась фазовая пластинка ( $\lambda/2$  для 1,064 мкм), которая давала спектрально селективные анизотропные потери. Была получена двухволновая генерация лазера на кристалле Nd<sup>3+</sup>:YAP на комбинациях 1064+1072, 1064+1079, 1072+1079 нм и трехчастотная в зависимости от ориентации фазовой пластинки. Выходная мощность лазера была 1,8 Вт и дифференциальный КПД достигал 33 % при мощности накачке 6,7 Вт.

1. G.V. Shilova, P.G. Zverev, A.A. Sirotkin, ЖПС **83**, 585 (2016).
2. А.А. Сироткин, С.В. Гарнов, В.И. Власов и др., Квант. Электрон. **42**, 420 (2012).

# РАСПЕРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ZnSe:Fe

А.А. Гладилин<sup>1</sup>, С.И. Ченцов<sup>2</sup>, В.С. Кривобок<sup>2</sup>, О.В. Уваров<sup>1</sup>,  
В.П. Калинушкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

E-mail: [agladilin@kapella.gpi.ru](mailto:agladilin@kapella.gpi.ru)

Кристаллы селенида цинка, легированные железом, представляют интерес в качестве активных лазерных сред для среднего ИК диапазона. Процесс диффузии примеси неизбежно сопровождается образованием различных дефектов, которые оказывают влияние на генерационные свойства материала. В настоящем исследовании для определения типа дефектов и их свойств использовались технологии двухфотонной конфокальной микроскопии (ДКМ) и низкотемпературной люминесценции (НЛ).

В качестве образцов использовались кристаллы селенида цинка, легированные с поверхности железом. Концентрация допанта у поверхности превышала  $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Эксперименты проводились при комнатной температуре (ДКМ) и жидком гелии (НЛ). При исследовании люминесценции были получены:

- спектры в видимом диапазоне и ближней ИК области;
- пространственное распределение вдоль направления диффузии на различных длинах волн.

Обнаружено, что в процессе легирования в видимом диапазоне образуется «мертвая область» - область, в которой подавлена люминесценция (рис. 1). При этом в спектре люминесценции формируются полосы (рис. 2), которые напрямую не зависят от типа примеси [1]. Предполагается, что их природа связана с вводимыми дефектами и с образованием комплексов атомов исходного кристалла и примеси.

Максимумы интенсивности линии (541, 628 нм) примесно-дефектной полосы люминесценции разнесены в пространстве (рис. 1). Скорее всего это связано с неоднородным распределением дефектов в объеме кристалла после легирования железом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00113.

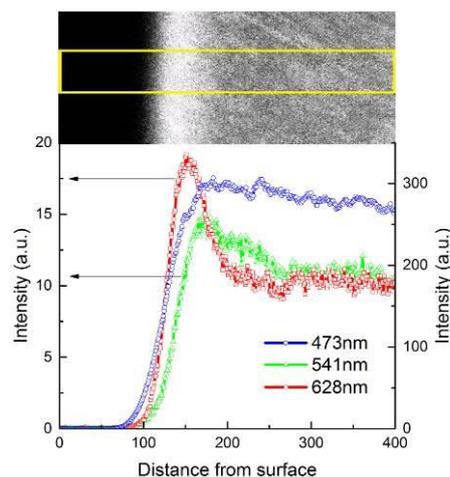


Рис. 1. Пространственное распределение люминесценции в кристалле ZnSe:Fe

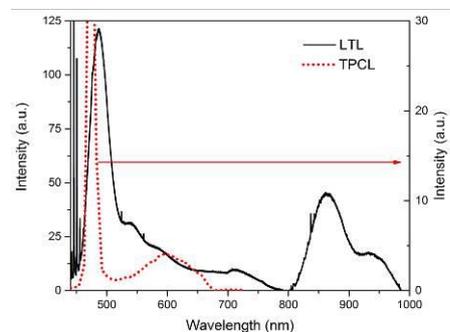


Рис. 2. Спектры люминесценции: LTL – НЛ при гелии; TPCL – ДКМ

1. L.L. Kulyuk et al., Physica **B 40**, 4330 (2010).

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ГЕРМАНОСИЛИКАТНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ, СОЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ И ЭРБИЕМ

С.В. Алышев<sup>1</sup>, А.М. Хегай<sup>1</sup>, С.В. Фирстов<sup>1,2</sup>, М.А. Мелькумов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

E-mail: [alyshs@fo.gpi.ru](mailto:alyshs@fo.gpi.ru)

Увеличение пропускной способности волоконных линий связи по-прежнему остаётся острой проблемой современности [1]. Одним из наиболее очевидных путей решения является расширение спектральной полосы, в которой осуществляется передача информации, что требует создания новых типов волоконных усилителей.

Некоторое время назад мы реализовали волоконный усилитель на основе волоконного световода солегированного висмутом и эрбием, который обеспечивал усиление в широком диапазоне длин волн от 1,53 до 1,78 мкм [2]. С целью проведения оптимизации данной активной среды мы провели численное моделирование её усилительных свойств в зависимости от относительной концентрации висмута и эрбия и длины волны накачки. Рис. 1 демонстрирует характерные расчётные спектральные зависимости усиления и шум-фактора.

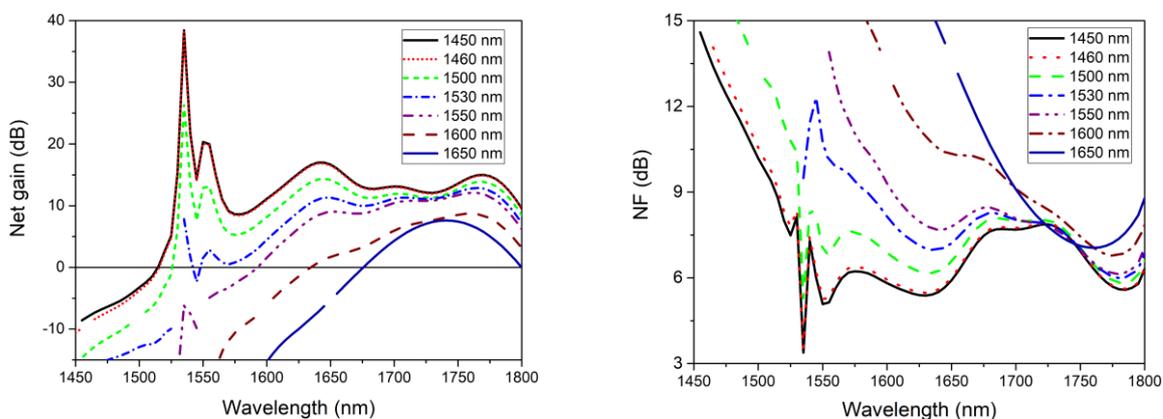


Рис. 1. Расчётные спектральные зависимости усиления и шум-фактора волоконного усилителя, солегированного Вi и Er для разных длин волн накачки

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ) (грант 16-02-00440).

1. D. Payne, 41<sup>st</sup> ECOC, WS.6 (2015).
2. S.V. Firstov et al., 7<sup>th</sup> EPS-QEOD Europhoton, FWG-4.1 (2016).

# ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ, ЗАПИСАННЫХ В ФОСФАТНОМ СТЕКЛЕ МЕТОДОМ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ

Д.А. Гурьев

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

*E-mail: [guryevden@gmail.com](mailto:guryevden@gmail.com)*

В последнее время было опубликовано много работ, посвященных записи оптических волноводов методом фемтосекундной лазерной записи в различных диэлектрических средах, являющихся активными средами твердотельных лазеров, с последующим их использованием в схемах волноводных лазеров или усилителей. Но не во всех работах указываются характеристики записанных волноводных структур.

Целью данной работы являлось исследование характеристик волноводов (поперечные размеры, разница показателей преломления), записанных с помощью метода лазерной фемтосекундной записи. Волноводы записывались в фосфатном стекле легированном ионами  $\text{Nd}^{3+}$  (ГЛС-24) с помощью лазера ( $\lambda = 1040$  нм,  $\tau_p = 300$  фс) с различными энергиями импульсов (200-400 нДж) и частотой повторения импульсов (100-400 кГц) и представляли собой набор уединенных треков на глубине 0,8 мм на расстоянии 0,1 мм друг от друга.

Исследование характеристик волноводов проводилось следующими методами: микроскопия, методы ближнего и дальнего поля. При помощи микроскопии исследовались поперечные размеры записанных треков, при помощи методов ближнего и дальнего поля исследовалась разница показателей преломления между записанным волноводом и стеклом.

Исследование проводилось для установления набора характеристик волноводов благоприятного для осуществления последующей генерации в них, а именно, позволяющих осуществить удобный и эффективный ввод излучения накачки, а также поддерживающих распространение основной моды излучения ( $\text{TEM}_{00}$ ).

## 9,8 ГГц ВОЛНОВОДНЫЙ Nd:YAG ЛАЗЕР, РАБОТАЮЩИЙ В РЕЖИМЕ ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД

М.В. Понарина, А.Г. Охримчук, М.Г. Рыбин, А.А. Таракановский,  
Т.В. Долматов, В.В. Букин, И.В. Жлуктова, В.А. Камынин, П.А. Образцов  
*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*  
*E-mail: [ponarinamariya@gmail.com](mailto:ponarinamariya@gmail.com)*

В настоящее время особое внимание привлекают лазерные источники, обеспечивающие генерацию ультракоротких импульсов (УКИ) с высокой частотой повторения (более 1 ГГц) [1]. Высокостабильные генераторы частоты применяются в таких направлениях, как метрология частоты, телекоммуникации и фундаментальные исследования.

При разработке данных лазеров одной из ключевых проблем является повышение и контроль стабильности частоты следования УКИ.

Для стабилизации синхронизации продольных мод, необходимо обеспечить генерацию на основной поперечной моде ( $TEM_{00}$ ). В данной работе представлен твердотельный лазер, обеспечивающий генерацию < 20 пс импульсов с гигагерцовой частотой повторения. В качестве активной среды используется трубчатый волновод с диаметром 30 мкм, созданный в объеме кристалла Nd:YAG [2]. Накачкой служит Ti-Sa лазер с длиной волны 808 нм (600 мВт). Резонатор волноводного лазера (8,4 мм) образован глухим зеркалом, нанесенным на один из торцов кристалла, и выходного зеркала с насыщающимся поглотителем на основе графена.

В ходе эксперимента выходное зеркало было оснащено пьезоэлектрическим элементом. Длина резонатора изменялась с шагом 0,04 мкм. За счет того, что между торцом кристалла и выходным зеркалом внутри резонатора образуется интерферометр Фабри-Перо, наблюдается периодическая зависимость режима работы лазера (генерация на одной длине волны или на двух) от длины резонатора.

Таким образом, при изменении длины резонатора наблюдается генерация на дополнительной длине волны 1061 нм, помимо генерации на основной длине волны 1064 нм. Одновременная генерация на двух длинах волн препятствует достижению стабильной работы лазера в режиме синхронизации мод. Для стабилизации режима работы лазера было предложено использование узкополосного спектрального фильтра, обеспечивающего выделение генерации на одной из длин волн для последующего усиления сигнала в волоконном Yb усилителе. Благодаря такому подходу, на длине волны 1061 нм была получена стабильная гребенка импульсов с длительностью < 20 пс и частотой повторения 9,8 ГГц.

1. S.Y. Choi et al., Opt. Express **26**, 5140 (2018).
2. A.G. Okhrimchuk, P.A. Obratsov, Scientific Reports **5**, 11172 (2015).

АП-КОНВЕРСИОННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОГО  
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ФТОРИДНЫХ ПОРОШКАХ,  
ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ  $\text{Er}^{3+}$  И  $\text{Yb}^{3+}$

С.В. Гушин<sup>1</sup>, А.А. Ляпин<sup>1</sup>, С.В. Кузнецов<sup>2</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>,  
В.Ю. Пройдакова<sup>2</sup>, А.С. Ермаков<sup>1</sup>, П.П. Федоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
E-mail: [serg.guschin1703@gmail.com](mailto:serg.guschin1703@gmail.com)

За последние несколько лет, интерес к ап-конверсионным порошкам растет непрерывно. В медицине и биологии они используются в качестве биомаркеров, биометок и температурных сенсоров. В солнечной энергетике используются для повышения эффективности солнечных батарей. В лазерной физике ап-конверсионные порошки применяются в качестве визуализаторов инфракрасного излучения [1-3].

В настоящей работе объектами исследования являлись концентрационные серии фторидных порошков со структурой флюорита  $\text{SrF}_2:\text{Er}$  и  $\text{SrF}_2:\text{Yb},\text{Er}$  синтезированные методом соосаждения из водных растворов.

При возбуждении на уровень  $^4\text{I}_{13/2}$  в порошках  $\text{SrF}_2:\text{Er}$  и  $\text{SrF}_2:\text{Yb},\text{Er}$  были зарегистрированы спектры ап-конверсионной люминесценции в видимой и инфракрасной области спектра, соответствующие электронным переходам  $^4\text{G}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ,  $^2\text{H}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ,  $^4\text{F}_{5/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ,  $^4\text{F}_{7/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ,  $^2\text{H}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ,  $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ,  $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ,  $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ,  $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$  ионов  $\text{Yb}^{3+}$ . Также был проведен анализ зависимости интенсивности люминесценции от концентрации редкоземельных ионов. С помощью установки на базе интегрирующей сферы был измерен абсолютный квантовый выход ап-конверсионной люминесценции. Для порошков  $\text{SrF}_2:\text{Er}$  и  $\text{SrF}_2:\text{Yb},\text{Er}$  были определены цветовые координаты и цветовая температура ап-конверсионного излучения. Проведенное исследование показывает, что люминофоры  $\text{SrF}_2:\text{Er}$  и  $\text{SrF}_2:\text{Yb},\text{Er}$  являются эффективными ап-конверсионными материалами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-72-10163).

1. F. Auzel, Chem. Rev. **104**, 139 (2004).
2. D.C. Rodriguez Burbano, R. Naccache, J.A. Capobianco, Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths **47**, 273 (2015).
3. A. Ivaturi, S. Macdougall, R. Martin-Rodriguez et al., J. Appl. Phys. **114**, 013505 (2013).

# СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ CaF<sub>2</sub>-SrF<sub>2</sub>, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Tm<sup>3+</sup>

А.С. Ермаков<sup>1</sup>, А.А. Ляпин<sup>1</sup>, С.В. Кузнецов<sup>2</sup>, В.А. Конюшкин<sup>2</sup>,  
А.Н. Накладов<sup>2</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, П.П. Федоров<sup>2</sup>, С.В. Гушин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
E-mail: [sasha41450@gmail.com](mailto:sasha41450@gmail.com)

Двухмикронные твердотельные лазеры, легированные ионами Tm<sup>3+</sup> применяются во многих отраслях: в медицине для лазерной хирургии, в промышленности для обработки материалов, в науке для накачки лазерных источников и др. [1-3].

Известным фактом является получение двухмикронной лазерной генерации на переходе <sup>3</sup>F<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub> ионов Tm<sup>3+</sup> с помощью различных оксидных материалов. Однако фторидные материалы также являются очень перспективными материалами для создания двухмикронного лазерного излучения [1-5]. Они характеризуются высоким значением пропускания излучения в спектральной области от 0,16 до 11 мкм, низким значением энергии фоонов, легкостью введения значительных концентрации редкоземельных ионов и их склонностью образовывать кластеры.

В настоящей работе мы исследовали спектрально-люминесцентные и спектрально-кинетические свойства монокристаллов CaF<sub>2</sub>-SrF<sub>2</sub>:Tm. Данные кристаллы были выращены методом вертикальной направленной кристаллизации (метод Бриджмена). Кроме того, были рассчитаны сечения поглощения для перехода <sup>3</sup>H<sub>6</sub>→<sup>3</sup>H<sub>4</sub>, сечения люминесценции и усиления для перехода <sup>3</sup>F<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub> ионов Tm<sup>3+</sup>. Диапазон усиления у кристалла CaF<sub>2</sub>-SrF<sub>2</sub>: Tm (4 %) составляет 1692-2000 нм для параметра относительной инверсной населенности 0,3. Также были зарегистрированы кинетики затухания люминесценции уровня накачки <sup>3</sup>H<sub>4</sub> ионов Tm<sup>3+</sup> при T = 300 К. Время затухания этого уровня составляло в среднем 1,2 мкс для различных концентраций легирующего редкоземельного иона.

1. M. Jelínek, V. Kubeček, W. Ma et al., Laser Phys. Lett. **13**, 1 (2016).
2. A. Sottile, E. Damiano, M. Rabe, et al., Opt. Express **26**, 5368 (2018).
3. M. Doroshenko, J. Sulc, P. Fedorov et al., Proceedings of the SPIE **8959**, 1 (2014).
4. A. Lyapin, P. Fedorov, E. Garibin et al., Opt. Mater. **35**, 1859 (2013).
5. J. Ding, B. Zhao, W. Ma et al., Int. J. Opt. **2018**, 1 (2017).

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ $\text{Yb}^{3+}$ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ЭФФЕКТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА БИОТКАНЬ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ БЛИЖНЕЙ ИК-ОБЛАСТИ СПЕКТРА

С.А. Хрущалина, П.А. Рябочкина, А.Н. Беляев, О.С. Бушукина,  
И.А. Юрлов, М.А. Дворянчикова, О.А. Кузнецова  
*Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*  
*E-mail: [anabel-2005@yandex.ru](mailto:anabel-2005@yandex.ru)*

Взаимодействие лазерного излучения с биологическими тканями является сложным процессом и может приводить к различными результатам, одним из которых является повышение температуры биотканей [1]. Однако для ряда биомедицинских применений требуется дополнительное усиление данного теплового эффекта. С этой целью при реализации контактной методики воздействия осуществляется модификация оптического волокна, подразумевающая введение в его состав сильно поглощающих примесей [2]. Наличие подобных примесей вблизи торца волокна позволяет достичь более высоких значений температур в месте его контакта с биотканью и, как следствие, повышает эффективность процедуры [2].

В настоящей работе нами предлагается альтернативный способ увеличения теплового эффекта при бесконтактном воздействии лазерного излучения ближней ИК-области спектра на поверхность биологических тканей. Данная методика не предусматривает модификации оптического волокна и заключается в предварительной инициации самой биоткани с использованием наноразмерных диэлектрических частиц, легированных ионами  $\text{Yb}^{3+}$ . Процессы нагрева указанных частиц при их возбуждении лазерным излучением, соответствующим поглощению ионов  $\text{Yb}^{3+}$ , и ответственные за них механизмы были ранее описаны нами в работе [3].

Нами были проведены эксперименты *in-vitro* и *in-vivo* по воздействию лазерного излучения с длиной волны 970 нм и мощностью  $\sim 1$  Вт на биологические ткани, предварительно покрытые  $\text{Yb}$ -содержащими наночастицами, и без предварительного покрытия. Показано, что в случае использования данных наночастиц во время процедуры тепловой эффект проявлялся в значительно большей степени, чем без применения наночастиц.

1. A. Klein, W.B. Umler, M. Landthaler, P. Babilas, *Int. J. Hyperthermia* **27** (8), 762 (2011).
2. A.V. Belikov, M.L. Gelfond, K.V. Shatilova et al., *Proc. of SPIE-OSA Biomedical Optics* **9542**, 95420J (2015).
3. P.A. Ryabochkina, S.A. Khrushchalina, V.M. Kyashkin et al., *JETP Letters* **103** (12), 743 (2016).

# ИМПУЛЬСНАЯ ДВУХМИКРОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НА КРИСТАЛЛАХ $ZrO_2-Y_2O_3$ , ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ $No^{3+}$

С.А. Артемов<sup>1</sup>, А.А. Ляпин<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, А.Н. Чабушкин<sup>2</sup>,  
Е.Е. Ломонова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

<sup>2</sup>Российский федеральный ядерный центр Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

<sup>3</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
E-mail: [sergey560113@gmail.com](mailto:sergey560113@gmail.com)

Применение твердотельных лазеров, генерирующих излучение в двухмикронном диапазоне спектра, в медицине, для детектирования газов ( $CO_2$ ,  $NH_3$ ,  $CO$  и др.), для накачки лазеров среднего ИК-диапазона спектра, стимулирует поиск новых активных сред и разработку на их основе лазеров данного диапазона.

Несмотря на то, что лазерная генерация в двухмикронном диапазоне спектра получена на многих кристаллах и стеклах, легированных ионами  $Tm^{3+}$ ,  $No^{3+}$ , задачи по поиску активных лазерных сред, обеспечивающих возможность расширения спектрального диапазона генерации, перестройки излучения генерации по частоте, а также получения импульсов малой длительности, по-прежнему являются актуальными.

В настоящей работе при накачке тулиевым волоконным лазером на кристаллах  $ZrO_2-Y_2O_3-No_2O_3$  с использованием акустооптического модулятора была получена лазерная генерация в импульсно-периодическом режиме с  $\lambda_{ген.} = 2130$  нм. Частота повторения импульсов лазерной генерации составила 1 кГц, 10 кГц, а длительность 140 нс и 310 нс, соответственно.

Форма и последовательность импульсов лазерной генерации с  $\lambda_{ген.} = 2130$  нм и частотой повторения 1 кГц и 10 кГц представлена на рис. 1. Для частоты повторения импульсов менее  $f \leq 100$  Гц их длительность не превышала 50 нс.

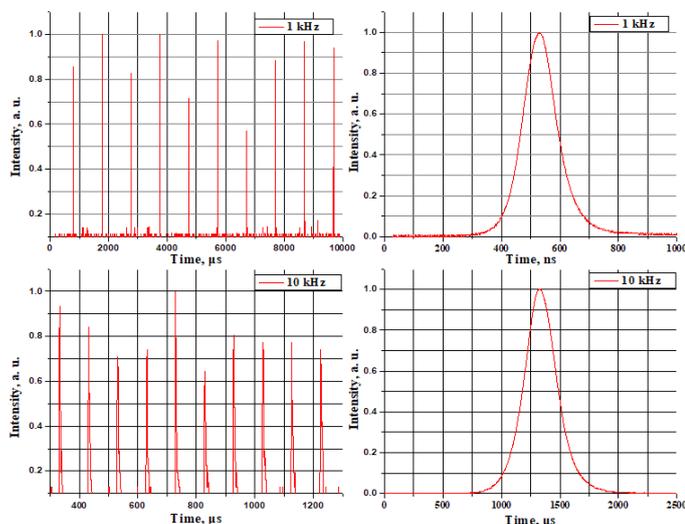


Рис. 1. Форма и последовательность импульсов твердотельного лазера на кристаллах  $ZrO_2-Y_2O_3-No_2O_3$ ,  $\lambda = 2130$  нм

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРОВ ИОНОВ  $\text{Ce}^{3+}$   
В КРИСТАЛЛАХ СМЕШАННОЙ СТРУКТУРЫ  $\text{LiSr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{AlF}_6$

Э.И. Мадиров, А.А. Шакиров, А.А. Шавельев, А.С. Низамутдинов,  
В.В. Семашко

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*  
*E-mail: [ed.madirov@gmail.com](mailto:ed.madirov@gmail.com)*

Фторидные кристаллы со структурой кольквириита, например  $\text{LiCaAlF}_6$ , являются перспективными диэлектрическими материалами, которые используются в качестве активных сред, усиливающих УФ излучение твердотельных лазеров. Преимуществом является чрезвычайно широкая запрещенная зона (около 11 эВ). Значительное неоднородное колебательное уширение рабочих лазерных переходов этих ионов обуславливает широкую полосу перестройки лазерной генерации, а также возможность генерации импульсов ультракороткой длительности [1, 2]. Однако с точки зрения применений в качестве активной среды проблемой является низкая изоморфная емкость по отношению к ионам  $\text{Ce}^{3+}$ , сопровождающаяся многоцентровым характером замещения катионов матрицы, то есть при выращивании кристаллов  $\text{LiCaAlF}_6$  или  $\text{LiSrAlF}_6$ , активированных ионами  $\text{Ce}^{3+}$ , в кристалле образуется три оптически неэквивалентных типа центров, между которыми распределяется энергия накачки. Но известно, что варьируя химический состав, а именно набор катионов кристаллической решетки, можно добиться повышения оптического качества кристалла [3]. С другой стороны, возможность сосредоточить энергию, как можно больше именно в одном типе центров, является актуальной задачей. Поэтому целью настоящей работы является исследование свойств образцов смешанных кристаллов  $\text{LiSr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{AlF}_6$ , активированных ионами  $\text{Ce}^{3+}$ , методами оптической спектроскопии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-32-00936.

1. V.A. Fromzel, C.R. Prasad et al., *Advances in Optical and Photonic Devices*, 101 (2010).
2. M.H. Pham et al., *Japanese Journal of Applied Physics* **53**, 062701 (2014).
3. A.S. Nizamutdinov, V.V. Semashko et al., *Physics of the Solid State* **50**, 1648 (2008).

ПОЛУЧЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА СМЕШАННЫХ  
КРИСТАЛЛАХ  $\text{LiSr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{AlF}_6:\text{Ce}^{3+}$

И.И. Фарухшин, Э.И. Мадиров, А.А. Шакиров, А.С. Низамутдинов,  
А.А. Шавельев, В.В. Семашко  
*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*  
*E-mail: [burusha16@gmail.com](mailto:burusha16@gmail.com)*

Фторидные кристаллы, например  $\text{LiCaAlF}_6$ , обладают широкой запрещенной зоной и, будучи активированными различными ионами, являются эффективными активными средами твердотельных лазеров разных типов. Данные соединения применяются в различных отраслях: в медицине - при борьбе с кожными заболеваниями витилиго и псориаз, экологии - в системах зондирования LIDAR и обработке материалов [1, 2]. Главным недостатком является низкая изоморфная емкость, т. е. при попытке повысить концентрацию ионов Ce в кристаллах  $\text{LiCaAlF}_6$ , мы сталкиваемся с проблемой низкой вероятности замещения ионов Ca ионами Ce, что, в свою очередь, не позволяет получить высококонцентрированные кристаллы (более 1 ат. %) из-за возникновения различных дефектов и это может сильно отразиться на качестве образца [3]. При этом, на примере образцов  $\text{LiLuYF}_4$ , из выполненных ранее экспериментов в Казанском государственном университете, были сделаны выводы, что варьирование химического состава, а именно переход к смешанной структуре, значительно улучшает лазерные характеристики, благодаря увеличению изоморфной емкости [4]. Поэтому целью нашей работы является проведение лазерных экспериментов в кристаллах  $\text{LiSr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{AlF}_6$  ( $x = 0,2$ ), активированных редкоземельными ионами  $\text{Ce}^{3+}$  в поисках оптимального соотношения Ca/Sr для повышения КПД лазерной генерации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-32-00936.

1. M.H. Pham et al., Japanese Journal of Applied Physics **53**, 062701 (2014).
2. N. Sarukura, Z. Lie, H. Ohtake, Optics letters **22**, 994 (1997).
3. И.Н. Куркин, Л.Л. Седов, Ш.И. Ягудин, ФТТ **9**, 2779 (1991).
4. A.S. Nizamutdinov, V.V. Semashko et al., Physics of the Solid State **50**, 1648 (2008).

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ  
 $\text{LaGa}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{O}_6$ , ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ  $\text{Pr}^{3+}$

А.Д. Таратынова<sup>1</sup>, А.А. Берсенева<sup>2</sup>, А.В. Егорышева<sup>2</sup>, О.М. Гайтко<sup>2</sup>,  
П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, С.А. Хрушалина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

<sup>2</sup>*Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН,  
Москва*

*E-mail: [alina.taratynova@mail.ru](mailto:alina.taratynova@mail.ru)*

К настоящему времени разработано множество типов люминофоров на основе различных органических и неорганических соединений [1, 2]. Несмотря на значительное количество научных публикаций, посвященных данной теме, работы по поиску и исследованию новых люминофоров с высоким значением квантового выхода остаются актуальными.

В качестве одного из перспективных материалов данного класса могут рассматриваться наноразмерные сложные оксиды  $\text{LnGa}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{O}_6$  и  $\text{BiGeSbO}_6$  со структурой типа розиита, легированные РЗ ионами. Соединения с подобной структурой характеризуются значительными расстояниями между ближайшими РЗ ионами [3], что будет способствовать уменьшению вероятности безызлучательного переноса энергии от возбужденных ионов к невозбужденным и может приводить к повышению пороговой концентрации тушения люминесценции. Несмотря на то, что данный тип соединений известен достаточно давно, детального изучения их спектрально-люминесцентных свойств до настоящего не проводилось.

В настоящей работе представлены результаты исследования спектрально-люминесцентных характеристик наноразмерных частиц  $\text{LaGa}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{O}_6$ , легированных ионами  $\text{Pr}^{3+}$ . Выполнен анализ влияния концентрации РЗ ионов на указанные свойства.

1. V. Kumar, O.M. Ntwaeaborwa, T. Soga et al., ACS Photonics **4** (11), 2613 (2017).
2. A. Escudero, A.I. Becerro, C. Carrillo-Carrión et al., Nanophotonics **6** (5), 881 (2017).
3. A.V. Egorysheva, O.G. Ellert, O.M. Gajtko et al., Ceram. International **42**, 13976 (2016).

# ВИЗУАЛИЗАТОРЫ ИНФРАКРАСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФТОРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ

М.В. Чернов<sup>1</sup>, А.А. Ляпин<sup>1</sup>, С.В. Кузнецов<sup>2</sup>, С.В. Гуцин<sup>1</sup>, А.С. Ермаков<sup>1</sup>,  
В.Ю. Пройдакова<sup>2</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, П.П. Федоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
E-mail: [chernov\\_maxim@inbox.ru](mailto:chernov_maxim@inbox.ru)

Визуализаторы излучения используются для юстировки оптических и лазерных систем, безопасной работы с лазером, визуализации невидимого пятна лазера, регулирования профиля лазерного пятна. В настоящее время на рынке представлено большое количество визуализаторов на основе антистоксовых люминофоров. Данные визуализаторы позволяют безынерционно получить картину распределения ИК-излучения при высоком контрасте и высокой разрешающей способности. Однако они обладают ограниченным спектральным диапазоном работы (до 1,7 мкм).

В настоящей работе представлены результаты разработки визуализаторов инфракрасного лазерного излучения, способных работать в диапазоне 780-2120 нм. Визуализаторы разработаны на основе антистоксового люминофора и выполнены в виде керамического диска и ламинированной карточки. На рис. 1 представлены спектры излучения визуализатора при возбуждении лазерами на длинах волн 972 нм, 1532 нм и 1912 нм.

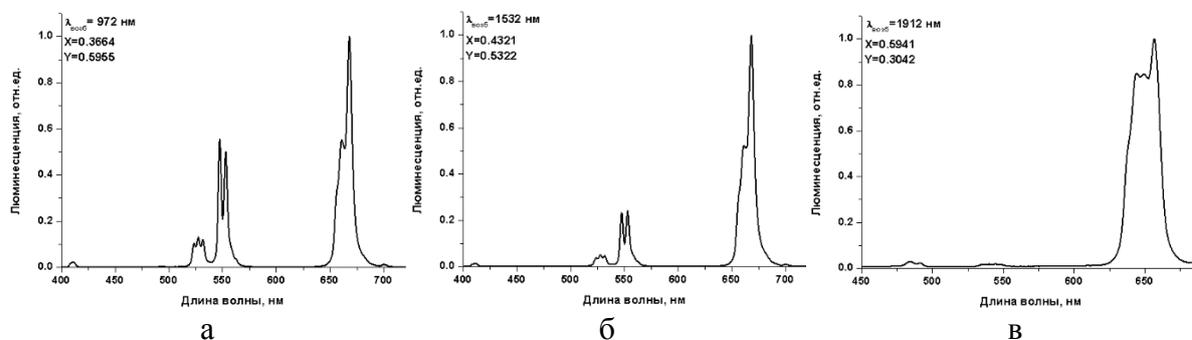


Рис. 1. Спектр излучения визуализатора при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 972 нм (а), 1532 нм (б) и 1912 нм (в)

Исследование выполнено за счет гранта Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор № 2065ГС1/35333).

## ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ $\text{Ca}_{2-x}\text{Li}_{2x}\text{GeO}_4$

Д.В. Симановский, В.А. Иванов, М.О. Марычев, В.С. Николов,  
А.Е. Егорова

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: [dmitrysimanovsky@yandex.ru](mailto:dmitrysimanovsky@yandex.ru)*

Известно, что кристаллы  $\text{Li}_2\text{CaGeO}_4$  в настоящее время являются одними из наиболее перспективных соединений для использования в LED устройствах. Эмиссионный спектр кристаллов  $\text{Li}_2\text{CaGeO}_4$ , допированных некоторыми редкоземельными ионами, характеризуется яркими линиями на длинах волн 473 нм, 485 нм и 575 нм [1-3]. Целью нашей работы является выращивание монокристаллов  $\text{Ca}_{2-x}\text{Li}_{2x}\text{GeO}_4$ , пригодных для изучения их оптических свойств.

Кристаллы  $\text{Ca}_{2-x}\text{Li}_{2x}\text{GeO}_4$  выращивались из высокотемпературного раствора (flux-метод) методом спонтанной кристаллизации на узкой платиновой палочке в цилиндрическом тигле диаметром 5 см и высотой 5 см. В течение всего времени роста (6 суток) происходило равномерное вращение платиновой палочки. В процессе роста температура нелинейно снижалась с 952 °С до 932 °С. По прошествии указанного времени на палочке образовалась друза, состоящая из нескольких кристаллов с размерами около 1 см. Полученные кристаллы были использованы впоследствии как затравочные.

Максимум измеренного спектра фотолюминесценции расположен на длине волны 1222 нм, что соответствует ионам  $\text{Cr}^{4+}$  (см. рис. 1). Таким образом, полученный кристалл представляется перспективным для использования в твердотельных лазерах диапазона 1,1 - 1,6 мкм.

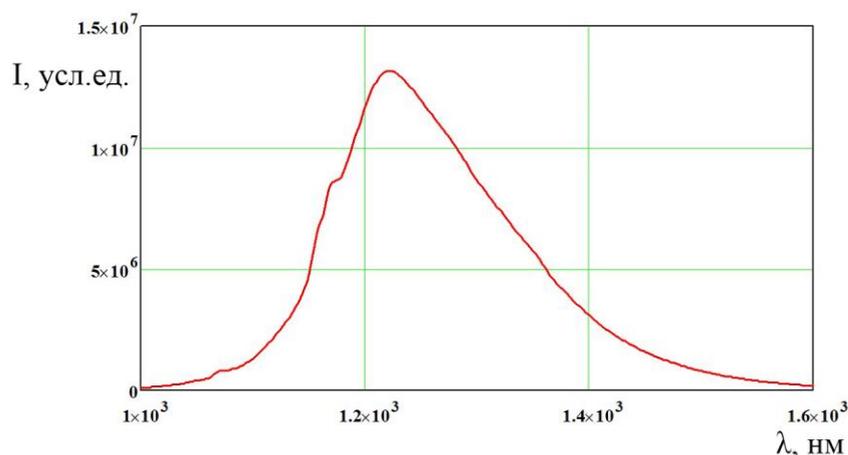


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции образца монокристалла  $\text{Ca}_{1,85}\text{Li}_{0,3}\text{GeO}_4$

1. J.X. Meng, C.T. Yang, Q.Q. Chen, J. Lumin. **130** (7), 1320 (2010).
2. I.V. Berezovskaya et al., Ceram. Int. **39** (6), 6835 (2013).
3. V.A. Ivanov, D.V. Simanovskiy, M.O. Marychev et al., J. Non-Cryst. Solids **456**, 76 (2017).

# **LASER MATERIALS AND TECHNOLOGY**

# QUANTUM CASCADE LASERS FOR MID-INFRARED AND TERAHERZ RANGE

G.S. Sokolovskii

*Ioffe Institute RAS, Saint-Petersburg, Russia*

*E-mail: [gs@mail.ioffe.ru](mailto:gs@mail.ioffe.ru)*

Quantum-cascade lasers (QCL) since the first proposal in 1971 [1], and realization in 1994 [2], attract great attention of the research community resulting in more than 7 thousand publications with over 100 thousand citations according to Web of Science. To date, QCLs cover extremely wide spectral range including mid-infrared (3-16  $\mu\text{m}$ ) and terahertz. The main QCL feature distinguishing them from the conventional semiconductor lasers is their unipolarity resulting in the photon emission in the transition of an electron in the conduction band from one quantum level to another instead of recombination of an electron-hole pair.

The report will discuss not only the success of the mid-IR QCLs, but also two approaches to QCLs in THz range - direct THz and difference frequency generation in mid-IR. The principles of the direct THz-QCLs are similar to the IR-QCLs. This results in their fundamental drawback due to the fact that the THz photon energy is small in comparison with the thermal broadening of the energy levels at room temperature, which makes it impossible to create an inverse population of levels at non-cryogenic temperatures. The highest reported operating temperature of the direct THz-QCL is still below 200 K [3]. This disadvantage can be overcome in difference frequency THz-QCLs (DFG-QCL) since their components operate in mid-IR, which makes it possible to create laser sources of THz radiation at room temperature [4]. Unfortunately, only the Cherenkov phase matching is available for DFG-QCLs which requires the angled output surface to avoid the total internal reflection.

Supported by Ministry of science and education (ID: RFMEFI61617X0074).

1. R.F. Kazarinov, R.A. Suris, *Semiconductors* **5**, 797 (1971).
2. J. Faist et al., *Science* **264**, 553 (1994).
3. S. Fatholouloumi et al., *Opt. Exp.* **20**, 3866 (2012)
4. M.A. Belkin et al., *IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron.* **15**, 952 (2009).

# ISOTOPICALLY PURIFIED DOPED CRYSTALS AS PROMISING MATERIALS FOR QUANTUM MEMORIES

A.A. Kalachev

*Kazan E.K. Zavoisky Physical-Technical Institute, Kazan, Russia*

*Kazan Scientific Center RAS, Kazan, Russia*

*E-mail: [a.a.kalachev@mail.ru](mailto:a.a.kalachev@mail.ru)*

One of the topical problems of optical quantum technologies is related to creation of effective solid-state quantum memory. At present, many solid-state systems are being studied as promising carriers of quantum information. Among them are single NV-centers in diamond, cold atoms, mechanical oscillators and ensembles of rare-earth ions. Being the basis for the modern laser and telecommunications industry, rare-earth-ion doped solid-state materials are very attractive for quantum information processing, since they have long times of both optical and spin coherence [1-3].

In particular, isotopically purified doped crystals demonstrating ultra-narrow ( $\sim 10$  MHz) optical inhomogeneous broadening are of interest [4-6]. Such narrow optical lines will require no additional optical spectral tailoring/ensemble preparation for the implementation of optical quantum memory. Yet, isotopically purified materials with ultra-narrow lines are very promising ones for the implementation of broadband off-resonant Raman quantum memory [7-11]. The basic idea of such a technique is to map a quantum state of an incoming photon into a long-lived hyperfine spin state that is insensitive to magnetic field fluctuations, which corresponds to the so called full clock spin transition or zero-first-order-Zeeman (ZEFOZ) spin transition.

In the present work, the recent progress in experimental and theoretical studying these materials is discussed [12-17]. The possibility of growing high-quality fluoride crystals with an inhomogeneous width of optical transitions as small as 13 MHz has been demonstrated [16]. This makes these materials extremely attractive for implementing off-resonant Raman schemes of quantum memory. An increase in the optical coherence time by an order of magnitude (from several  $\mu\text{s}$  to 300  $\mu\text{s}$ ) has been demonstrated for the first time in the crystals doped with Er-167 ions by using optical clock transitions and cooling the crystals down to  $\sim 100$  mK [15]. Thus, the feasibility of using ultra-low temperatures to increase the coherence time in weak magnetic fields has been demonstrated. In crystals doped with Nd-143 ions, the effect of electromagnetically induced transparency was observed [17] with the use of hyperfine ZEFOZ transitions, which directly confirms the possibility of realizing Raman quantum memory schemes in the materials under study. Theoretical estimations made in [14] show the possibility of achieving a large signal-to-noise ratio when storage and retrieval of single-photon states is performed via off-resonant Raman absorption and emission.

The work is supported by RSF (project No. 14-12-00806).

1. A.K. Rebane et al., Proc. of SPIE **7611**, 76110H (2010).

2. C.W. Thiel, T. Böttger, R.L. Cone, J. Lumin. **131**, 353 (2011).
3. C.W. Thiel et al., J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **45**, 124013 (2012).
4. R.M. Macfarlane, A. Cassanho, R.S. Meltzer, Phys. Rev. Lett. **69**, 542 (1992).
5. R.M. Macfarlane, R.S. Meltzer, B.Z. Malkin, Phys. Rev. B **58**, 5692 (1998).
6. R.L. Ahlefeldt, M.R. Hush, M.J. Sellars, Phys. Rev. Lett. **117**, 250504 (2016).
7. S.A. Moiseev, W. Tittel, New J. Phys. **13**, 063035 (2011).
8. S.A. Moiseev, Phys. Rev. A **88**, 012304 (2013).
9. X. Zhang, A. Kalachev, O. Kocharovskaya, Phys. Rev. A **87**, 013811 (2013).
10. A. Kalachev, O. Kocharovskaya, Phys. Rev. A **88**, 033846 (2013).
11. X. Zhang, A. Kalachev, O. Kocharovskaya, Phys. Rev. A **90**, 052322 (2014).
12. R.A. Akhmedzhanov et al., Laser Phys. Lett. **13**, 015202 (2016).
13. R.A. Akhmedzhanov et al., Laser Phys. Lett. **13**, 115203 (2016).
14. A.D. Berezhnoy, A.A. Kalachev, Quantum Electronics **47**, 790 (2017).
15. N. Kukharchyk et al., New J. Phys. **20**, 023044 (2018).
16. N. Kukharchyk et al., Opt. Lett. **43**, 935 (2018).
17. R. Akhmedzhanov et al., Phys. Rev. B **97**, 245123 (2018).

# PROSPECTIVE GEOMETRIES OF ACTIVE ELEMENTS FOR LASERS WITH HIGH PEAK AND HIGH AVERAGE POWER

O.V. Palashov

*Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod, Russia*

*E-mail: [palashov@appl.sci-nnov.ru](mailto:palashov@appl.sci-nnov.ru)*

Creation of lasers with high peak and high average power is one of the most significant trends in quantum electronics. One of the principal fundamental scientific problems limiting the average power of lasers operating in the cw as well as in the pulse-periodic regime is inevitable heat release in laser elements (active elements in quantum amplifiers, and magneto-active elements in optical isolators). Non uniform temperature distribution over the volume of the element may give rise to a whole number of negative effects, such as thermal lens (due to phase distortions), thermally induced depolarization (caused by mechanical strain leading to linear birefringence) [1], deformation of optical elements (up to their destruction), and others. An increase of the average temperature may result in absorption line broadening and shifting, a decrease of the transition cross-sections [2], and so on.

Pump radiation is the strongest heat source in the active elements (AE) of solid-state lasers. Thanks to the rapid advance of diode pumping at the beginning of the 21-st century, significant progress has been made in the region of average power of lasers with high average and high peak power. In lasers based on neodymium ion the heat release power reaches tens of percent [3] due to a large quantum defect of the pump and parasitic absorption processes in excited state, cross-relaxation, and so [4]. Consequently, an ytterbium ion having a small quantum defect [5], long inversion lifetime (of the upper level) and no absorption from excited state [2] is currently actively used as an active ion.

A possible method of suppressing parasitic thermal effects is AE cooling, for example, to liquid nitrogen temperature [6]. In this case, heat conductivity is increased, thermal expansion coefficient and temperature gradient of refractive index changes are reduced for ytterbium containing media [7], the absorption cross-section on the operating transition and pump transition are increased, and the lower operating level is almost fully depleted (the medium becomes a four-level one) [2].

In this talk we will consider in more detail another method of controlling thermal effects using new, promising geometries of active elements. The AE geometry is a very important parameter. For example, when the new, fiber geometry of the active element appeared at the end of the 20<sup>th</sup> century (aspect ratio – the length to diameter ratio  $A > 1000$ ), fiber lasers rapidly became leaders in average power (tens of kilowatts!) with high laser radiation quality and reliability of the devices. However, their strength is at the same time their weakness. Because of the specific features of the active medium geometry (mainly, length) the peak power of pulsed fiber lasers is significantly restricted by nonlinear effects and their average power at pulse durations  $< 1$  ps is, as a rule, limited by tens of watts. Pulse energy of single mode fiber lasers is limited to fractions of

mJ. Hence, for achieving an energy even of a Joule level coherent combining of thousands of such radiation channels is demanded. This is a very difficult task which, however, is considered in a number of major projects, for instance, XCAN – Coherent Amplification Network [8]).

In the proposed talk we will address in ample detail AEs with thin rod (including cone), thin slab, and thin disk (including composite variants: sandwich and cladding) geometry. At present these three geometries are regarded to be most promising for lasers with high peak power and high average power and may be used for laser heads of master oscillators as well as for fiber laser amplifiers.

By its aspect ratio that is about 100, the thin rod geometry [9] occupies an intermediate position between the fiber ( $A > 1000$ ) and the traditional rods ( $A \sim 10$ ). The typical dimensions of a thin rod are the diameter up to 1 mm and length of 3...4 cm. As the diameter of a thin rod AE ( $\sim 1$  cm) is much smaller than that of a rod AE, operation at higher average power is possible. On the other hand, the diameter of a thin rod AE is much larger than that of a fiber ( $< 100 \mu\text{m}$ ), so thin rod AEs enable operation at higher pulse energies. A specific feature of this geometry is waveguide propagation of pump radiation and, at the same time, free propagation of laser radiation in the AE. The nanosecond pulse energy at the output of a thin rod can reach several mJ and small signal gain is  $> 100$ , which makes such a laser head promising for an accelerating amplifier in a hybrid laser.

The thin slab geometry [10] may be regarded to be a one-dimensional case of a thin rod. A thin slab is a thin ( $< 1$  mm) plate of active medium with two polished ends for transmission of pump radiation and signal, analogously to the thin rod geometry. The plate width is an order of magnitude larger ( $\sim 1$  cm), which allows obtaining pulse energy also more than an order of magnitude higher without complicating laser optical scheme.

The thin disk geometry is the oldest of the considered geometries [11]. It permits reducing thermal radiation distortions substantially due to the end heat sink at which the temperature gradient is directed along rather than across the radiation propagation direction. Besides, an additional advantage of this geometry is small AE length/thickness ( $200\dots300 \mu\text{m}$ ) that allows amplifying powerful short pulses without danger of the self-focusing effect.

Implementation of prospective AE geometries in high-power laser engineering will enable creating a new class of compact and reliable pulsed lasers with an average power of units and tens of kilowatts. Such lasers are already demanded in consumer market for solution of various tasks. In this lecture we will describe one of the new bright applications – an orbital laser for space debris removal, the concept of which is currently being developed with participation of IAP RAS researchers.

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of Russia, contract No. 14.607.21.0201 (RFMEFI60718X0201).

1. A.V. Mezenov, L.N. Soms, A.I. Stepanov, *Thermal Optics of Solid-State Lasers*, Leningrad: Mashinostroenie, 1986.
2. J. Dong, et al., *J. of the Optical Society of America* **B 20**, 1975 (2003).
3. W. Krupke, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **6**, 1287 (2000).
4. D.C. Brown, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **34**, 560 (1998).
5. T.Y. Fan, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **29**, 1457 (1993).
6. P.A. Schulz, S.R. Henion, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **27**, 1039 (1991).
7. D.C. Brown, *IEEE Journal of Selected Topic In Quantum Electronics* **11**, 587 (2005).
8. G. Mourou et al., *Nature Photonics* **7**, 258 (2013).
9. I.I. Kuznetsov et al., *Applied Optics* **54 (25)**, 7747 (2015).
10. P. Russbuehdt et al., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **21 (1)**, 447 (2015).
11. D.C. Brown et al., *Applied Optics* **25**, 612 (1986).

## MULTIFREQUENCY OSCILLATION OF YAP:Nd LASER

P.G. Zverev<sup>1,2</sup>, I.V. Smirnov<sup>2</sup>, G.V. Shilova<sup>1</sup>, A.A. Sirotkin<sup>1</sup>

*Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia*

*Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia*

*E-mail: [zverev@lst.gpi.ru](mailto:zverev@lst.gpi.ru)*

Two and multiwavelength lasers can be used for various practical applications, particularly ecology monitoring, laser ranging, optical communications. The difference frequency generation of such laser radiation in nonlinear crystals provides terahertz radiation. Thus development of compact efficient multifrequency solid state lasers that use one active element is of great scientific interest for laser physics. It is well known that the emission spectra of impurity doped rare earth ions in anisotropic crystals depends on its crystallographic orientation [1]. Recently it was shown that maximum of the luminescence spectra of Nd<sup>3+</sup>:GdVO<sub>4</sub> crystal was different for various crystal orientations [2]. The laser oscillation at two wavelengths with two mutually orthogonal polarizations was demonstrated.

Multifrequency oscillation of diode pumped Nd<sup>3+</sup>:YAlO<sub>3</sub> laser is investigated in this report. The luminescence spectra of Nd<sup>3+</sup> ions in YAlO<sub>3</sub> (YAP) crystal at  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  optical transition possess three intensive peaks at the wavelengths of 1064, 1072 and 1079 nm. Fiber coupled diode laser operating at the wavelength of 808 nm with 12 W output power was used as a pump source in laser experiments. The gain medium was 0,9 at. % *b*-cut Nd<sup>3+</sup>:YAlO<sub>3</sub> crystal with the aperture of 3×3 mm<sup>2</sup> and the length of 12 mm. The laser cavity was composed of concave input mirror (R = 500 mm) with high reflectivity at the wavelengths of 1÷1,2 μm and high transmission at the pump wavelength and a flat output coupler with the transmission of T<sub>1,05÷1,1</sub>=13,5 %. The spectrally selective losses were introduced by installing λ/2 phase plate for 1,06 μm between the gain medium and the output coupler. Dual frequency oscillation at two wavelengths combinations of 1064 + 1072, 1064 + 1080 or 1072 + 1080 nm and three wavelengths was obtained for an appropriate orientation of the phase plate. The output power of the laser reached 1,8 W with slope efficiency of 33 % at the input pump power of 6,7 W.

1. G.V. Shilova, P.G. Zverev, A.A. Sirotkin, *Journal of Applied Spectroscopy* **83**, 585 (2016).
2. A.A. Sirotkin, S.V. Garnov, V.I. Vlasov et al., *Quantum Electron.* **42**, 420 (2012).

## DISTRIBUTION OF LUMINESCENCE CENTERS IN ZnSe:Fe

A.A. Gladilin<sup>1</sup>, S.I. Chentsov<sup>2</sup>, V.S. Krivobok<sup>2</sup>, O.V. Uvarov<sup>1</sup>,  
V.P. Kalinushkin<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: agladilin@kapella.gpi.ru*

Zinc selenide crystals doped with iron are of interest as active laser media for the mid-IR range. The process of impurity diffusion is inevitably accompanied with the formation of various defects that affect the optical properties of the material. In the present study, two-photon confocal microscopy (TPCM) and low-temperature luminescence (LTL) methods were used to determine the type of defects and their properties.

Zinc selenide crystals doped from the surface with iron were used as the samples. The concentration of dopant at the surface exceeded  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . The experiments were carried out at room temperature (TPCM) and liquid helium (LTL). In the study of luminescence were obtained:

- spectra in the visible range and near-IR region;
- spatial distribution along the direction of diffusion at different wavelengths.

It was found that in the doping process suppressed the luminescence in the visible range and a so called "dead region" is formed (fig. 1). Therewith bands are formed in the luminescence spectrum (fig. 2), which do not directly depend on the type of impurity [1]. It is estimated that nature of bands is associated with the introduced defects and with the formation of complexes of atoms of the host and impurity.

The intensity maxima of the line (541, 628 nm) of the impurity-defective luminescence band are located at different distances from doping surface (fig. 1). Most likely, this is due to the spatially-inhomogeneous distribution of defects in the bulk of the crystal after doping with iron.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-32-00113

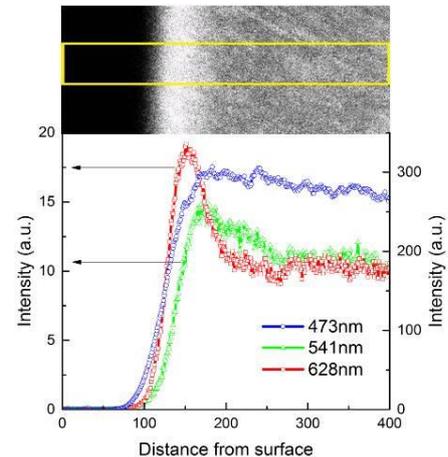


Fig. 1. Luminescence spatial distribution of ZnSe:Fe

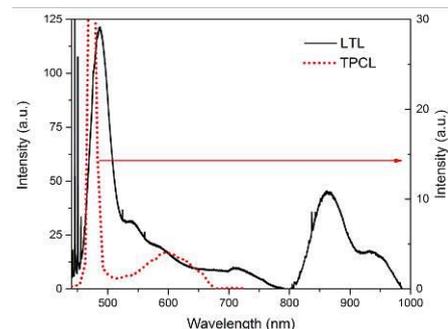


Fig. 2. Luminescence spectra of ZnSe:Fe crystal: LTL – black line

1. L.L. Kulyuk et al., *Physica* **B 40**, 4330 (2010).

# NUMERICAL SIMULATION OF THE AMPLIFYING PROPERTIES OF BISMUTH AND ERBIUM CO-DOPED GERMANOSILICATE FIBERS

S.V. Alyshev<sup>1</sup>, A.V. Khegai<sup>1</sup>, S.V. Firstov<sup>1,2</sup>, M.A. Melkumov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Fiber Optics Research Center RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

*E-mail: [alyshe@fo.gpi.ru](mailto:alyshe@fo.gpi.ru)*

The limitations of the information carrying capacity of the fiber telecommunication systems still remain a pressing issue of modernity [1]. Probably the most obvious approach in tackling with this problem is widening the spectral range for information transmission. However, this will require the development of new types of fiber amplifiers.

Some time ago we reported bismuth and erbium co-doped fiber amplifier capable of amplifying light in the wide range from 1,53 to 1,78  $\mu\text{m}$  [2]. In order to gain a better understanding as well as to optimize the active medium in terms of relative bismuth and erbium concentration and pumping wavelength we performed a numerical simulation of its amplifying properties. Fig. 1. demonstrates calculated typical spectral dependencies of the net gain and noise figure versus the pumping wavelength.

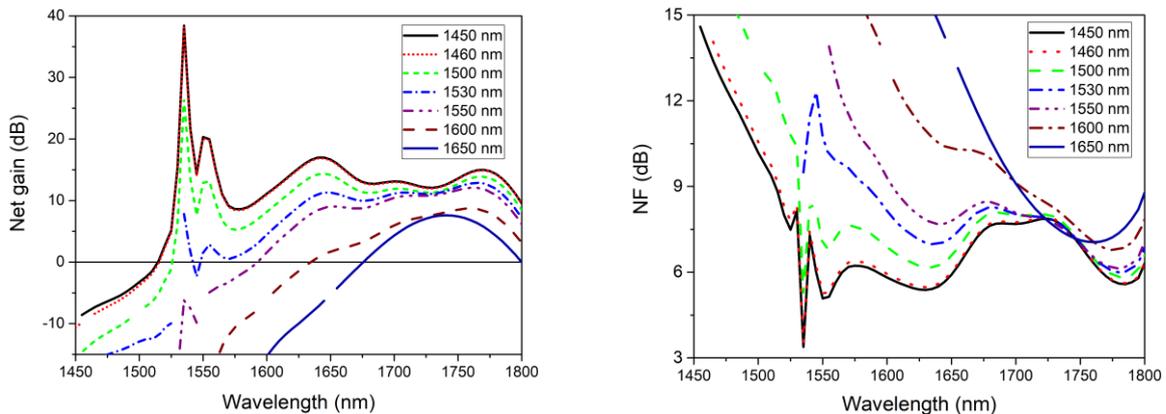


Fig. 1. Typical calculated spectral dependencies of the net gain and noise figure of a Bi/Er co-doped fiber amplifier versus the pumping wavelength

The research was supported by Russian Foundation for Basic Research (grant 16-02-00440).

1. D. Payne, 41<sup>st</sup> ECOC, WS.6 (2015).
2. S.V. Firstov et al., 7<sup>th</sup> EPS-QEOD Europhoton, FWG-4.1 (2016).

# CHARACTERIZATION OF WAVEGUIDES FABRICATED IN PHOSPHATE GLASS BY ULTRAFAST LASER INSCRIPTION

D.A. Guryev

*Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: [guryevden@gmail.com](mailto:guryevden@gmail.com)*

In recent years, many works have been published on the fabricating of waveguides by ultrafast laser inscription in various dielectric media, including active media of solid-state lasers. The most part of the research in this field is devoted to application of the waveguides as laser oscillators and amplifiers. Unfortunately optical characteristics of the recorded waveguide structures are rarely presented.

The goal of this work was the study of the characteristics of waveguides (transverse dimensions, the difference in refractive indices), fabricated by the laser femtosecond inscription method. Waveguides were fabricated in Nd<sup>3+</sup>-doped phosphate glass (GLS-24). The inscribing was done by Yb-laser ( $\lambda = 1040$  nm,  $\tau_p = 300$  fs) with different pulse energies (200-400 nJ) and pulse repetition rate (100-400 kHz). Inscribed waveguides were like a set of isolated tracks at a depth of 0,8 mm separated by the distance of 0,1 mm from each other.

The study of waveguide characteristics was carried out by the following methods: microscopy, near-field and far-field methods. Transverse dimensions of fabricated tracks were investigated by microscopy, the difference of refractive indices between the inscribed waveguide and the glass was investigated by near-field and far-field methods.

The study was conducted to establish a set of characteristics of waveguides favorable for the laser action namely, allowing for convenient and efficient injection of pumping radiation, and also supporting the propagation of the fundamental radiation mode (TEM<sub>00</sub>).

## 9,8 GHz MODE-LOCKING OF WAVEGUIDE Nd:YAG LASER WITH GRAPHENE

M.V. Ponarina, A.G. Okhrimchuk, M.G. Rybin, A.A. Tarakanovsky,  
T.V. Dolmatov, V.V. Bukin, I.V. Zhluktova, V.A. Kamynin, P.A. Obraztsov  
*Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia*  
*E-mail: [ponarinamariya@gmail.com](mailto:ponarinamariya@gmail.com)*

Over the last few years much attention is paid to high repetition rate (over 1 GHz) ultrafast lasers [1]. These lasers are important for applications in telecommunications, frequency metrology and in fundamental physics. There are different approaches to achieve generation of ultrashort pulses with GHz repetition rates such as passive and active mode-locking of bulk or fiber solid-state lasers, semiconductor waveguide lasers and VCSELs. However, one of the simplest and compact design of mode-locked lasers with GHz repetition rate is based on a short plane parallel mirrors cavity, completely or almost completely filled with gain medium. An important condition for achievement of a stable mode-locking regime is operation in a fundamental transversal mode ( $TEM_{00}$ ). The purpose of this work was to improve the stability of GHz mode-locking in a compact Nd:YAG laser by applying the appropriate waveguide geometry.

The tubular single-mode waveguide with diameter of 30  $\mu\text{m}$  is fabricated inside Nd:YAG crystal by the fs-laser inscription technique [2]. The waveguide is pumped by CW Ti-Sa laser with a wavelength of 808 nm (600 mW). The laser cavity is formed by an input HR-mirror deposited on the edge of crystal and an output saturable absorber mirror (SAM) with single-layer graphene. The length laser cavity is 8,4 mm, which provides 9,8 GHz repetition rate of mode-locked pulses.

During the experiment the output SAM mirror was attached to the piezo-stage which provided precise control of the cavity length with a step of 0,04  $\mu\text{m}$ . The applied 60V voltage corresponds to 2,2  $\mu\text{m}$  displacement of SAM. The periodical dependence appears due to the Fabry-Perot interferometer's formation between the crystal's edge and the output mirror. We observe laser generation at 1061 nm and 1064 nm. Two-frequency generation is the main problem to achieve stable laser regime. Filtration and amplify the output laser signal were proposed for solution this problem. Due to this fact we obtain 9,8 GHz stable repetition rate at 1061 nm.

1. S.Y. Choi et al., Opt. Express **26**, 5140 (2018).
2. A.G. Okhrimchuk, P.A. Obraztsov, Scientific Reports **5**, 11172 (2015).

# UPCONVERSION LUMINESCENCE IN FLUORIDE POWDERS DOPED WITH Er<sup>3+</sup> AND Yb<sup>3+</sup> IONS UPON EXCITATION BY INFRARED LASER RADIATION

S.V. Gushchin<sup>1</sup>, A.A. Lyapin<sup>1</sup>, S.V. Kuznetsov<sup>2</sup>, P.A. Ryabochkina<sup>1</sup>,  
V.Yu. Proydakova<sup>2</sup>, A.S. Ermakov<sup>1</sup>, P.P. Fedorov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

<sup>2</sup>Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia

E-mail: [serg.guschin1703@gmail.com](mailto:serg.guschin1703@gmail.com)

Over the past few years, interest in upconversion powders has been growing continuously. In medicine and biology, they are used as bioimaging, biometrics and temperature sensors. In solar energy are used to improve the efficiency of solar cell. In laser physics, upconversion powders are used as visualizers of infrared radiation [1-3].

In the present paper, we investigated strontium fluoride powders with different concentration of Er<sup>3+</sup> and Yb<sup>3+</sup> ions. Fluorite-type SrF<sub>2</sub>:Er and SrF<sub>2</sub>:Yb,Er powders were synthesized by using a co-precipitation from aqueous nitrate solution technique.

Upon excitation of the <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> level the upconversion luminescence (UCL) in SrF<sub>2</sub>:Er and SrF<sub>2</sub>:Yb,Er powders in the visible and near-infrared spectral region corresponding to <sup>4</sup>G<sub>11/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>2</sup>H<sub>9/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>F<sub>5/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>F<sub>7/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> ions Er<sup>3+</sup> and <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>→<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> ions Yb<sup>3+</sup> transitions were recorded. We have studied the intensity UCL dependent concentration rare-earth. The integrating sphere method was used to measure the absolute photoluminescence quantum yield. Chromaticity coordinates and color temperature of UCL of SrF<sub>2</sub>:Er and SrF<sub>2</sub>:Yb,Er were calculated. The conducted research indicate that SrF<sub>2</sub>:Er and SrF<sub>2</sub>:Yb,Er phosphors is a promising upconversion materials.

This work is supported by the Russian Science Foundation under grant 17-72-10163.

1. F. Auzel, Chem. Rev. **104**, 139 (2004).
2. D.C. Rodriguez Burbano, R. Naccache, J.A. Capobianco, Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths **47**, 273 (2015).
3. A. Ivaturi, S. Macdougall, R. Martin-Rodriguez et al., J. Appl. Phys. **114**, 013505 (2013).

SPECTRAL-LUMINESCENCE PROPERTIES OF CaF<sub>2</sub>-SrF<sub>2</sub>  
SINGLE CRYSTALS DOPED WITH Tm<sup>3+</sup> IONS

A.S. Ermakov<sup>1</sup>, A.A. Lyapin<sup>1</sup>, S.V. Kuznetsov<sup>2</sup>, V.A. Konyushkin<sup>2</sup>,  
A.N. Nakladov<sup>2</sup>, P.A. Ryabochkina<sup>1</sup>, P.P. Fedorov<sup>2</sup>, S.V. Gushchin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

<sup>2</sup>*Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: [sasha41450@gmail.com](mailto:sasha41450@gmail.com)*

Two-micron solid-state lasers doped Tm<sup>3+</sup> ions are used in many fields: in medicine for laser surgery, in the industry for processing materials, in science for pumping laser sources et al. [1-3].

A well-known fact is the obtaining of two-micron laser generation at the <sup>3</sup>F<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub> transition of Tm<sup>3+</sup> ions with the help of various oxide materials. However, fluoride materials are also very promising materials for creating two-micron laser radiation [1-5]. They are characterized by a high transmission of radiation in the spectral range from 0,16 to 11 μm, a low phonon energy, the ease of introducing a significant concentration of rare-earth ions, and their tendency to form clusters et al.

In the present paper, we investigated the spectral-luminescence and spectral-kinetic properties of CaF<sub>2</sub>-SrF<sub>2</sub>:Tm single crystals. Fluoride crystals were grown by the method of vertical directional crystallization (Bridgman's method). In addition, the absorption cross-sections for the transition <sup>3</sup>H<sub>6</sub>→<sup>3</sup>H<sub>4</sub>, the luminescence cross-sections and gain cross-sections for the transition <sup>3</sup>F<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub> of Tm<sup>3+</sup> ions were calculated. The gain band of CaF<sub>2</sub>-SrF<sub>2</sub>:Tm (4 %) crystal is 1692-2000 nm according to relative inverted population 0,3. The kinetics of the luminescence decay of the pump level of <sup>3</sup>H<sub>4</sub> of Tm<sup>3+</sup> ions at T = 300 K was also recorded. The decay time of this level averaged 1,2 μs for various concentrations of the rare-earth doping ion.

1. M. Jelínek, V. Kubeček, W. Ma et al., *Laser Phys. Lett.* **13**, 1 (2016).
2. A. Sottile, E. Damiano, M. Rabe, et al., *Opt. Express* **26**, 5368 (2018).
3. M. Doroshenko, J. Sulc, P. Fedorov et al., *Proceedings of the SPIE* **8959**, 1 (2014).
4. A. Lyapin, P. Fedorov, E. Garibin et al., *Opt. Mater.* **35**, 1859 (2013).
5. J. Ding, B. Zhao, W. Ma et al., *Int. J. Opt.* **2018**, 1 (2017).

APPLICATION OF NANOSIZED DIELECTRIC PARTICLES  
DOPED BY  $\text{Yb}^{3+}$  IONS FOR ENHANCEMENT OF THERMAL EFFECTS  
DURING THE IRRADIATION OF BIOLOGICAL TISSUES  
BY NEAR IR LASER RADIATION

S.A. Khrushchalina, P.A. Ryabochkina, A.N. Belyaev, O.S. Bushukina,  
I.A. Yurlov, M.A. Dvoryanchkova, O.A. Kuznetsova  
*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*  
*E-mail: [anabel-2005@yandex.ru](mailto:anabel-2005@yandex.ru)*

The interaction of laser radiation with biological tissues is a complex process and can lead to different results, one of which is an increase in the temperature of biological tissues [1]. However, for some biomedical applications, additional enhancement of this thermal effect is required. For this purpose when the contact exposure technique is realized, the optical fiber is modified by the introduction of highly absorbing impurities into its composition [2]. The presence of such impurities near the fiber endface allows to reach higher temperatures at the contact point with the biological tissue and, consequently, increases the effectiveness of the procedure [2].

In this paper, we propose an alternative method of increasing the thermal effect in the case of the noncontact action of near infrared laser radiation on the surface of biological tissues. This technique does not include of modification of the optical fiber and consists in pre-initiation of the tissue itself using nanoscale dielectric particles doped with  $\text{Yb}^{3+}$  ions. The heating processes of these particles when excited by laser radiation corresponding to the absorption of  $\text{Yb}^{3+}$  ions and the mechanisms responsible for them were previously described by us in [3].

We conducted in-vitro and in-vivo experiments on the effect of laser radiation with a wavelength of 970 nm and a power of  $\sim 1$  W on biological tissues preliminarily coated with Yb-containing nanoparticles and without preliminary coating. It was shown that in the case of using these nanoparticles during the procedure, the thermal effect was manifested to a much greater extent than without the use of nanoparticles.

1. A. Klein, W.B. Umler, M. Landthaler, P. Babilas, *Int. J. Hyperthermia* **27** (8), 762 (2011).
2. A.V. Belikov, M.L. Gelfond, K.V. Shatilova et al., *Proc. of SPIE-OSA Biomedical Optics* **9542**, 95420J (2015).
3. P.A. Ryabochkina, S.A. Khrushchalina, V.M. Kyashkin et al., *JETP Letters* **103** (12), 743 (2016).

# Q-SWITCHED TWO-MICRON LASER GENERATION ON THE $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ CRYSTALS DOPED BY $\text{Ho}^{3+}$ IONS

S.A. Artemov<sup>1</sup>, A A Lyapin<sup>1</sup>, P A Ryabochkina<sup>1</sup>, A.N. Chabushkin<sup>2</sup>,  
E.E. Lomonova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

<sup>2</sup>*Russian Federal Nuclear Center All Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia*

<sup>3</sup>*Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: [sergey560113@gmail.com](mailto:sergey560113@gmail.com)*

Two-microns solid-state lasers are widely used in medicine, for detecting gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$ , etc.), as pumping sources for medium-IR lasers. This fact stimulates the search of new active media, and the development lasers of two-microns spectral range on their basis.

At the present time, laser generation of 2- $\mu\text{m}$  spectral range had been obtained on many crystals and glasses doped by  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ . However, search of new materials providing the possibility of increasing the spectral range of generation, tuning of the laser frequency, and also obtaining pulses of short duration, are still urgent.

In present work we were obtained laser generation with  $\lambda_{\text{gen.}} = 2130 \text{ nm}$  on  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Ho}_2\text{O}_3$  crystals pumped by a thulium fiber laser in Q-switch mode with a pulse repetition frequency of 1 kHz, 10 kHz and a duration of 140 ns and 310 ns, respectively.

Typical waveforms of the oscillation pulses and pulse train of laser generation with  $\lambda_{\text{gen.}} = 2130 \text{ nm}$  and repetition rates of 1 kHz and 10 kHz are presented in fig. 1. The pulse duration did not exceed 50 ns for repetition rate less than  $f \leq 100 \text{ Hz}$ .

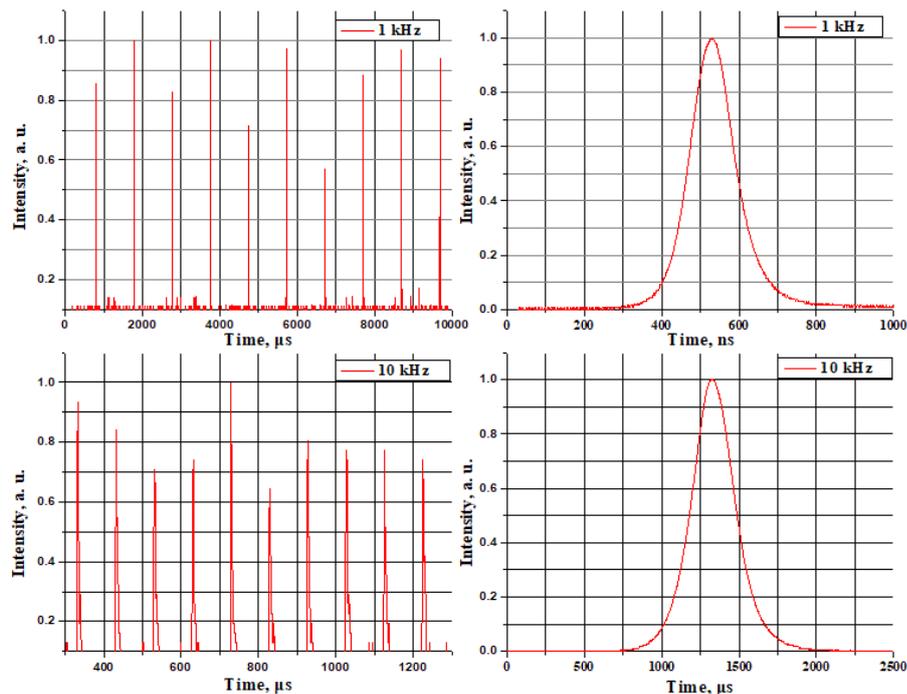


Fig. 1. Typical waveforms of the oscillation pulses and pulse train of solid-state laser on  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Ho}_2\text{O}_3$  crystals

STUDY OF THE IMPURITY CENTERS OF THE  $\text{Ce}^{3+}$  IONS  
IN THE MIXED CRYSTALS WITH THE  $\text{LiSr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{AlF}_6$  STRUCTURE

E.I. Madirov, A.A. Shakirov, A.A. Shavelev, A.S. Nizamutdinov,  
V.V.Semashko

*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

*E-mail: [ed.madirov@gmail.com](mailto:ed.madirov@gmail.com)*

Fluoride crystals with a colquiriite structure, e.g.  $\text{LiCaAlF}_6$ , are promising dielectric materials that are used as active media capable of amplifying UV radiation of the solid-state lasers. The advantage of these materials is a wide band gap (approximately 11 eV). Significant inhomogeneous vibrational broadening of the operational laser transitions of these ions defines a wide tuning range of the laser generation and provides the opportunity to generate ultra-short pulses [1, 2]. However, a low isomorphic capacity accompanied by multicenter substitution of the cations of the matrix in case of  $\text{Ce}^{3+}$  ions can interfere with the application as a laser active medium, i. e. during growth of either  $\text{LiCaAlF}_6$  or  $\text{LiSrAlF}_6$  crystal activated with  $\text{Ce}^{3+}$  ions three optically inequivalent types of centers, which divide the pumping energy between each other form in a crystal. Nevertheless, it is a known fact that it is possible to improve the optical qualities of the crystal varying the chemical composition of the crystal, namely the combination of the cations in the crystal lattice [3]. On the other hand, the ability to concentrate most of the pumping energy in one type of the centers is a current goal. That is why the goal of the current work is optical spectroscopy study of the properties of the  $\text{LiSr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{AlF}_6$  mixed crystals activated with  $\text{Ce}^{3+}$  ions.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-32-00936.

1. V.A. Fromzel, C.R. Prasad et al., *Advances in Optical and Photonic Devices*, 101 (2010).
2. M.H. Pham et al., *Japanese Journal of Applied Physics* **53**, 062701 (2014).
3. A.S. Nizamutdinov, V.V. Semashko et al., *Physics of the Solid State* **50**, 1648 (2008).

## LASER ACTION IN $\text{LiSr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{AlF}_6:\text{Ce}^{3+}$ CRYSTALS

I.I. Farukhshin, E.I. Madirov, A.A. Shakirov, A.S. Nizamutdinov,  
A.A. Shavelev, V.V. Semashko  
*Kazan Federal University, Kazan, Russia*  
*E-mail: [burusha16@gmail.com](mailto:burusha16@gmail.com)*

Fluoride crystals, e. g.  $\text{LiCaAlF}_6$ , have a wide band gap, and if activated with various ions can be efficient active media of the different kinds of solid-state lasers. These compounds are utilized in many areas: in medicine as means to treat skin diseases such as vitiligo and psoriasis, in ecology as part of the LIDAR systems and in material treatment [1, 2]. The main drawback of these materials is low isomorphous capacity, i. e. if one tries to increase the concentration of the Ce ions in the  $\text{LiCaAlF}_6$  crystals; the problem of low probability of substitution of the Ca ions with the Ce ions arises. This problem does not allow obtaining highly concentrated samples (more than 1 at. %) because of the big amount of defects that can affect the quality of the sample [3]. However, earlier experiments in the Kazan Federal University using  $\text{LiLuYF}_4$  samples showed that variation of the chemical composition, namely transition to a mixed structure, significantly improves lasing properties thanks to increased isomorphous capacity [4]. That is why the goal of our work is realization of the lasing experiments with the  $\text{LiSr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{AlF}_6$  ( $x = 0,2$ ) crystals activated with rare-earth  $\text{Ce}^{3+}$  ions in order to find the optimal ratio between Ca and Sr ions to increase the laser generation efficiency.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-32-00936.

1. M.H. Pham et al., Japanese Journal of Applied Physics **53**, 062701 (2014).
2. N. Sarukura, Z. Lie, H. Ohtake, Optics letters **22**, 994 (1997).
3. И.Н. Куркин, Л.Л. Седов, Ш.И. Ягудин, ФТТ **9**, 2779 (1991).
4. A.S. Nizamutdinov, V.V. Semashko et al., Physics of the Solid State **50**, 1648 (2008).

SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES OF  $\text{LaGa}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$   
NANOPARTICLES, DOPED BY  $\text{Pr}^{3+}$  IONS

A.D. Taratynova<sup>1</sup>, A.A. Berseneva<sup>2</sup>, A.V. Egorysheva<sup>2</sup>, O.M. Gaitko<sup>2</sup>,  
P.A. Ryabochkina<sup>1</sup>, S.A. Khrushchalina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

<sup>2</sup>*Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: [alina.taratynova@mail.ru](mailto:alina.taratynova@mail.ru)*

To date, many types of phosphors have been developed based on various organic and inorganic compounds [1, 2]. Despite a significant number of scientific publications devoted to this topic, the work to find and study new phosphors with a high quantum yield remains topical.

One of the promising materials of this class can be considered nanoscale complex oxides  $\text{LnGa}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  and  $\text{BiGeSbO}_6$  with a structure of rosiaite type doped with RE ions. Compounds with a similar structure are characterized by considerable distances between the nearest RE ions [3], which will help reduce the probability of nonradiative energy transfer from excited ions to unexcited ions and may lead to an increase in the threshold concentration of quenching of the luminescence. Despite the fact that this type of compounds has been known for a long time, a detailed study of their spectral-luminescent properties has not been carried out to the present.

In this paper, we present the results of an investigation of the spectral-luminescent characteristics of  $\text{LnGa}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  nanosized particles doped with  $\text{Pr}^{3+}$  ions. The effect of the RE ions concentration on these properties is analyzed.

1. V. Kumar, O.M. Ntwaeaborwa, T. Soga et al., *ACS Photonics* **4** (11), 2613 (2017).
2. A. Escudero, A.I. Becerro, C. Carrillo-Carrión et al., *Nanophotonics* **6** (5), 881 (2017).
3. A.V. Egorysheva, O.G. Ellert, O.M. Gajtko et al., *Ceram. International* **42**, 13976 (2016).

# VISUALIZERS OF INFRARED LASER RADIATION BASED ON FLUORIDE MATERIALS DOPED BY RARE-EARTH IONS

M.V. Chernov<sup>1</sup>, A.A. Lyapin<sup>2</sup>, S.V. Kuznetsov<sup>3</sup>, S.V. Gushchin<sup>1</sup>,  
A.S. Ermakov<sup>1</sup>, V.Yu. Proydakova<sup>3</sup>, P.A. Ryabochkina<sup>1</sup>, P.P. Fedorov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National Research Mordovia State University, Saransk, Russia

<sup>2</sup>OOO «Photonic Technology Systems», Saransk, Russia

<sup>3</sup>Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia

E-mail: [chernov\\_maxim@inbox.ru](mailto:chernov_maxim@inbox.ru)

Radiation visualizers are used to align optical and laser systems, safe work with laser, visualization of an invisible laser spot, adjustment of the laser spot profile. Currently, a large number of visualizers based on anti-stokes phosphors are on the market. These visualizers make it possible to obtain a picture of the IR radiation distribution at high contrast and high resolution without inertia. However, they have a limited spectral range of operation (up to 1,7  $\mu\text{m}$ ).

In this paper we present the results of the development of visualizers for infrared laser radiation capable of operating in the range of 780-2120 nm. Visualizers are developed on the basis of anti-stokes phosphor and are made in the form of a ceramic disc and a laminated card. Figure 1 shows the emission spectra of the visualizer when excited by lasers at wavelengths of 972, 1532 and 1912 nm.

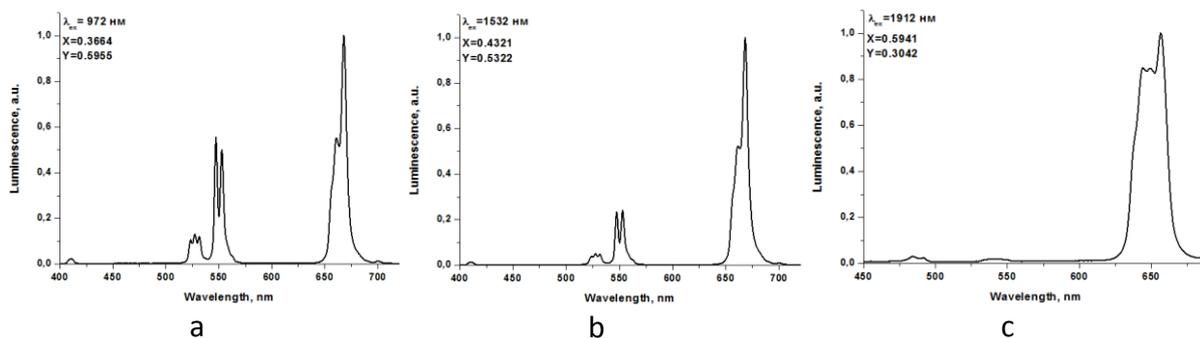


Fig. 1. The emission spectrum of the visualizer when excited by laser radiation with a wavelength of 972 nm (a), 1532 nm (b) and 1912 nm (c)

This work is supported by the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology under grant № 2065ГC1/35333.

## THE SYNTHESIS AND PROPERTIES OF $\text{Ca}_{2-x}\text{Li}_{2x}\text{GeO}_4$ CRYSTALS

D.V. Simanovsky, V.A. Ivanov, M.O. Marychev, V.S. Nikolov, A.E. Egorova  
*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod*  
*E-mail: [dmitrysimanovsky@yandex.ru](mailto:dmitrysimanovsky@yandex.ru)*

It is known that  $\text{Li}_2\text{CaGeO}_4$  is among of the most perspective phosphors for LED (light emitting diode) applications. It is shown that  $\text{Li}_2\text{CaGeO}_4$  doped with different rare earth element emits intensely at 473 nm, at 485 nm and at 575 nm [1-3]. The main aim of this work is the growth of  $\text{Ca}_{2-x}\text{Li}_{2x}\text{GeO}_4$  monocrystals suitable for studying of their optical properties.

High temperature solutions (flux-method) were used for  $\text{Ca}_{2-x}\text{Li}_{2x}\text{GeO}_4$  crystal growth by spontaneous crystallization on a narrow platinum stick in a cylindrical crucible with a diameter of 5 cm and a height of 5 cm. During the whole time of growth (6 days) there was a uniform rotation of a platinum stick. Temperature was changing from 952 °C to 932 °C. After the expiration of the specified time it was formed the druse on a stick, that consist of a several crystals with sizes about 1 cm. These crystals were used as seed crystals in other growths.

The measured spectrum of photoluminescence has maximum at wavelength 1222 nm (see fig. 1). It's mean that crystals are doped with ions  $\text{Cr}^{4+}$ . So crystals  $\text{Ca}_{2-x}\text{Li}_{2x}\text{GeO}_4$  are perspective for using them in solid-state lasers in spectral region 1,1-1,6  $\mu\text{m}$ .

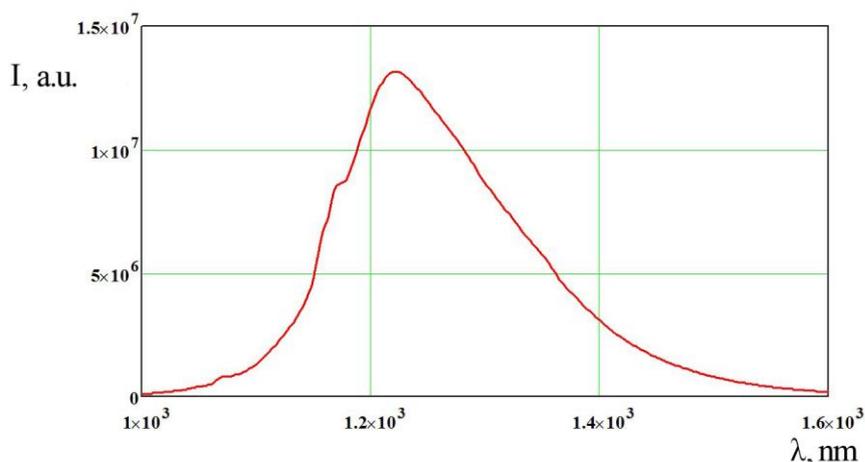


Fig. 1. Spectrum of photoluminescence of grown crystals of  $\text{Ca}_{2x}\text{Li}_{2-x}\text{GeO}_4$

1. J.X. Meng, C.T. Yang, Q.Q. Chen, *J. Lumin.* **130** (7), 1320 (2010).
2. I.V. Berezovskaya et al., *Ceram. Int.* **39** (6), 6835 (2013).
3. V.A. Ivanov, D.V. Simanovskiy, M.O. Marychev et al., *J. Non-Cryst. Solids* **456**, 76 (2017).



# **НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ**

# ТОНКИЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И ГРАФЕНА ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Е.Д. Образцова

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
Московский физико-технический институт, Долгопрудный  
E-mail: [elobr@kapella.gpi.ru](mailto:elobr@kapella.gpi.ru)*

Существование одностенных углеродных нанотрубок – наноцилиндров различной геометрии (рис. 1), свернутых из полосы графенового листа толщиной в 1 атом, было продемонстрировано более 20 лет назад [1-3]. Характерные параметры нанотрубок (диаметр 0,3 – 3 нм, длина 1-10 мкм) позволили считать их одномерным наноуглеродным материалом, для которого плотность одноэлектронных состояний представляет собой набор симметричных относительно уровня Ферми сингулярностей ван Хофа [4, 5] (рис. 2). Параметры электронной структуры изменяются с изменением геометрии нанотрубки.

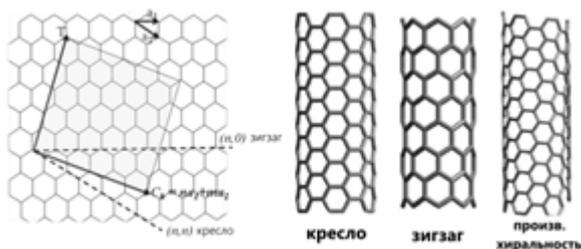


Рис. 1. Схема формирования углеродной нанотрубки и два специфических типа спиральности (хиральности) нанотрубки – кресло ( $n = m$ ) и зигзаг ( $m = 0$ )

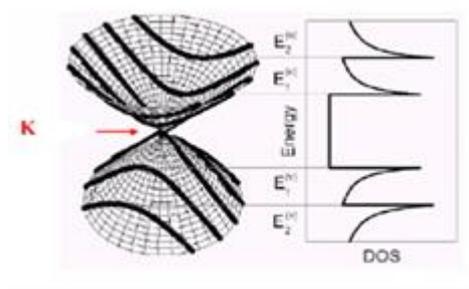


Рис. 2. Иллюстрация формирования дисперсионных кривых и одномерной плотности одноэлектронных состояний при переходе от двумерного графена к одностенным углеродным нанотрубкам [5]

Уникальной особенностью нанотрубок оказалось то, что в зависимости от геометрии они могут иметь полупроводниковый или металлический тип проводимости. Вскоре это было подтверждено экспериментально [6].

Каждый тип нанотрубок имеет свою область применения. Металлическая фракция используется для создания сверхлегких проводящих шин. Большие надежды возлагаются на применение чисто полупроводниковой фракции для создания транзисторов и сенсоров транзисторного типа [7]. Полупроводниковые нанотрубки уже нашли применение в нелинейной оптике – для создания сверхбыстрых модуляторов световых пучков (насыщающихся поглотителей) в лазерах. Широкий рабочий спектральный диапазон (800 нм – 3 мкм) и короткие времена релаксации электронных возбуждений (десятки фемтосекунд) позволяют при помещении нанотрубчатого насыщающегося поглотителя внутрь резонаторов различных лазеров реализовывать режим самосинхронизации мод и получать на выходе цуги фемтосекундных импульсов [8-11]. Использование графена в качестве

насыщающегося поглотителя расширяет спектральную область применения углеродных насыщающихся поглотителей до 10 мкм [12, 13].

В последнее время возник большой интерес к тонким (с толщиной менее 100 нм) пленкам из одностенных углеродных нанотрубок (рис. 3), заполненным молекулами – акцепторами электронов (рис. 4) [14-21]. Они являются макроскопическим объектом и обладают прозрачностью около 90 % и поверхностным сопротивлением 50 Ом/квadrat. Эти параметры делают их реальным претендентом на замещение наиболее популярного сегодня материала для прозрачных электродов - ИТО (оксида индия-олова) в оптоэлектронике.

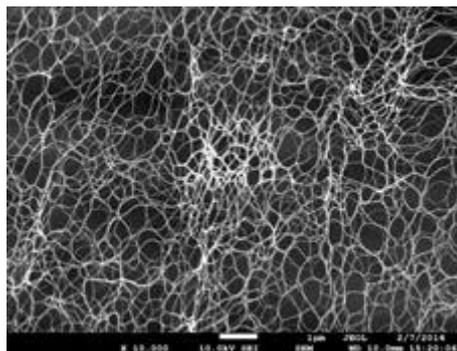


Рис. 3. Изображение тонкой пленки из одностенных углеродных нанотрубок, полученное методом сканирующей электронной микроскопии

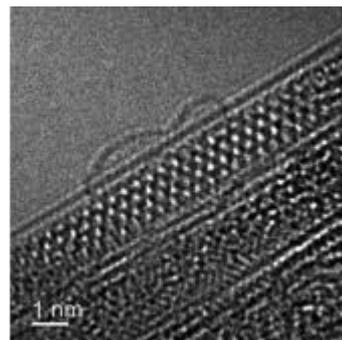


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение одномерного кристалла CuCl, сформированного в канале одностенной углеродной нанотрубки

Обнаружено, что заполнение нанотрубок приводит к их легированию *p*-типа, подтвержденному сдвигом положения тангенциальной моды ( $1592 \text{ см}^{-1}$ ) в спектрах комбинационного рассеяния света и подавлением полос  $E_{11}$  и  $E_{22}$  в спектрах оптического поглощения света. Оцененный сдвиг уровня Ферми в валентную зону составляет около 1 эВ. После легирования электрическое сопротивление трубок падает почти на порядок, а оптическое пропускание увеличивается на 3-5 % [17, 18]. Эффект проявляется сильнее во фракциях трубок, разделенных по типу проводимости [19].

Термозависимое электрическое сопротивление пленок удалось достаточно точно аппроксимировать с помощью модели, учитывающей 2 вклада – сопротивление самих пучков как одномерного объекта и туннелирование с термозависимой высотой барьера между пучками нанотрубок. Изменение температуры точки перегиба определяется тем фактом, что при сдвиге уровня Ферми в валентную зону, в процессе рассеяния электронов, определяющем электрическое сопротивление материала, начинают участвовать дополнительные фононы, запрещенные в чистых нанотрубках (рис. 5).

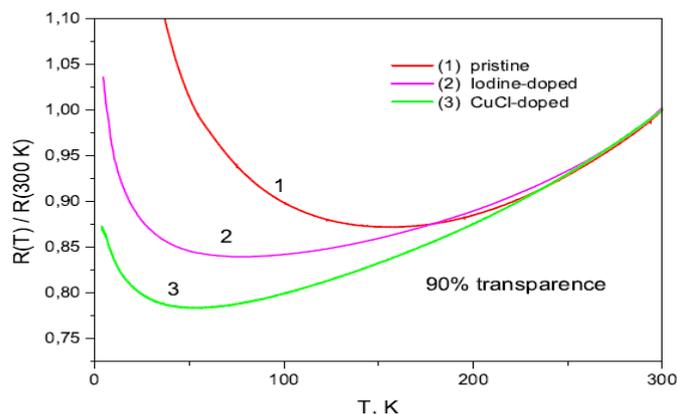


Рис. 5. Температурная зависимость электрического сопротивления пленок из одностенных углеродных нанотрубок, заполненных различными акцепторами (йод, CuCl)

Эффекты оптического просветления и падения электрического сопротивления наблюдаются также при газофазном легировании пленок графена.

1. S. Iijima, *Nature* **354**, 56 (1991).
2. S. Iijima, T. Ichinashi, *Nature* **363**, 603 (1993).
3. D.S. Bethune, C-H. Kiang, M.S. de Vries et al., *Nature* **363**, 605 (1993).
4. W. Mintwire, C.T. White, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 2506 (1998).
5. R. Saito, G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus, *Physical Properties of Carbon Nanotubes*, London: Imperial College Press, 1998.
6. H. Kataura, Y. Kumazawa et al., *Synthetic Metals* **103**, 2555 (1999).
7. A.E. Islam, J.A. Rogers, M.A. Alam, *Adv. Mater.* **27**, 7908 (2015).
8. Н.Н. Ильичев, Е.Д. Образцова и др., *Квантовая электроника* **34**, 572 (2004).
9. A.V. Tausenev, E.D. Obraztsova, A.S. Lobach et al., *Appl. Phys. Lett.* **92** (18), 171113 (2008).
10. М.А. Solodyankin, E.D. Obraztsova, A.S. Lobach et al., *Optics Letters* **33**, 1336 (2008).
11. Y. Wang, S. Alam, E.D. Obraztsova et al., *Optics Letters* **41**, 3864 (2016).
12. Р.А. Obraztsov, M.G. Rybin, A.V. Tyurnina et al., *NanoLetters* **11** (4), 1540 (2011).
13. В.Р. Сороченко, Е.Д. Образцова и др., *Квантовая электроника* **42** (10), 907 (2012).
14. M. Monthieux, *Carbon Meta-Nanotubes*, UK: John Willey & Sons Ltd., 2012.
15. A. Eliseev, L. Yashina et al., *One-dimensional crystals inside single-walled carbon nanotubes: Growth, structure and electronic properties*, Croatia: In-Tech, 2011.
16. А.А. Tonkikh, E.D. Obraztsova, E.A. Obraztsova et al., *Physica Status Solidi B* **249**, 2454 (2012).

- 17.A.A. Tonkikh, V.I. Tsebro, E.A. Obraztsova et al., Carbon **94**, 768 (2015).
- 18.V.I. Tsebro, A.A. Tonkikh, D.V. Rybkovskiy et al., Phys. Rev. **B 94**, 245438 (2016).
- 19.P.V. Fedotov, V.A. Eremina, A.A. Tonkikh et al., Phys. Status Solidi **B 253**, 2400 (2016).

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО С ПОМОЩЬЮ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

А.А. Никольская, Д.С. Королев, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.А. Сушков,  
Д.А. Павлов, Д.И. Тетельбаум

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

*E-mail: [alena.nikolskaya.1994@mail.ru](mailto:alena.nikolskaya.1994@mail.ru)*

Внедрение оптических каналов связи в твердотельную электронику стимулировало поиск светоизлучающих материалов, совместимых с кремниевой технологией. Синтез гексагонального кремния с помощью ионной имплантации решает сразу две глобальные проблемы. Во-первых, теоретически предсказано, данная модификация должна обладать лучшими светоизлучающими свойствами по сравнению с кубическим кремнием. Во-вторых, синтез данной фазы с помощью ионной имплантации - традиционной технологии микроэлектроники, легко решает проблему интеграции. Настоящей работа посвящена формированию гексагональной фазы кремния с помощью ионной имплантации, изучению структурных и люминесцентных свойств синтезируемой фазы.

Ранее нами сообщалось [1] о формировании включений гексагональной фазы 9R-Si в подложке кремния на границе с плёнкой SiO<sub>2</sub> (160 нм) при имплантации ионов Ga<sup>+</sup> и N<sub>2</sub><sup>+</sup>. Для выяснения влияния толщины плёнки SiO<sub>2</sub> и сорта имплантируемых атомов, в данной работе было выполнено облучение ионами Kr<sup>+</sup> с энергией 80 кэВ и дозой 5·10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup> в систему SiO<sub>2</sub>/Si (100) с толщинами пленки d = 120, 160 и 300 нм с последующим отжигом при 800 °С. Исследование структуры поперечного среза проводилось на электронном микроскопе JEOL JEM-2100F. Для возбуждения фотолюминесценции (ФЛ) использовался полупроводниковый лазер (λ = 980 нм).

Для образцов с толщиной плёнки 120 и 160 нм наблюдается полоса при 1240 нм, которая предположительно относится к излучению фазы 9R-Si. Образование включений фазы 9R на границе с плёнкой подтверждается данными электронной микроскопии. Предполагается, что образование данной фазы происходит за счет релаксации механических напряжений, возникающих в плёнке при имплантации. Для образца с d = 300 нм образование гексагональной фазы и ФЛ при 1240 нм не выявлены, что связано, по-видимому, с недостаточным уровнем напряжений, проникающих из имплантированного слоя (согласно расчетам по TRIM его толщина ~ 50 нм) в подложку Si.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания (№ 16.2737.2017/4.6). Никольская А. А. признательна за поддержку в рамках программы «УМНИК».

1. D.S. Korolev, A.A. Nikolskaya, N.O. Krivulin et al., Tech. Phys. Lett. **43(8)**, 767 (2017).

## РАСШИФРОВКА ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ ФАЗЫ AlAs НА Ge/Si(112)

А.А. Сушков<sup>1</sup>, Д.А. Павлов<sup>1</sup>, Н.В. Байдусь<sup>2</sup>, А.В. Рыков<sup>2</sup>, А.В. Новиков<sup>3</sup>,  
Д.В. Юрасов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

<sup>2</sup>*Научно-исследовательский физико-технический институт,  
Нижний Новгород*

<sup>3</sup>*Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород  
E-mail: [sushkovartem@gmail.com](mailto:sushkovartem@gmail.com)*

AlAs традиционно используется в качестве одного из буферных слоев для выращивания GaAs на подложках Si [1]. При нормальных условиях широкозонный полупроводник AlAs является непрямозонным и имеет структурный тип сфалерит. В процессе роста одного полупроводника на другом из-за рассогласования параметров решеток формируется большое количество дефектов, в том числе дефекты упаковки. При высокой плотности дефектов упаковки возможно изменение структурного типа материала, следовательно, и зонной структуры.

В работе исследовалась кристаллическая структура слоев AlAs на подложке Si(112) с буферным слоем Ge. Исследование поперечного среза структуры проводилось на просвечивающем электронном микроскопе высокого разрешения JEM-2100F (200 кВ).

На изображениях высокого разрешения поперечного среза данной структуры, полученных с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ВРПЭМ-изображения), в слое AlAs обнаружены области с высокой концентрацией дефектов упаковки, что свидетельствует о гексагонализации материала. Согласно теоретическим расчетам, описанным в работе [2], вюрцитная фаза AlAs (2H) должна обладать прямозонной структурой. Расшифровка гексагональной фазы AlAs на ВРПЭМ-изображениях с помощью Фурье-преобразований указывает на преобладание политипа 9R, который согласно работе [3] имеет долю гексагонализации 66,66 %.

Таким образом, впервые на относительно дешевой подложке Si(112) была получена гексагональная кристаллическая структура широкозонного полупроводника AlAs. Следовательно, для создания оптических приборов на подложке Si не обязательно выращивать сложные структуры с различными буферными слоями, а вполне достаточно добиться гексагонализации самого буферного слоя AlAs.

1. V.Y. Aleshkin, N.V. Baidus, A.A. Dubinov et al., Appl. Phys. Lett. **109**, 061111 (2016).
2. A. De, C.E. Pryor, Phys. Rev. **81**, 155210 (2010).
3. B. Wen, J. Zhao, M.J. Bucknum et al., Diamond Relat. Mater. **17**, 356 (2008).

## ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Г.В. Тихомирова, Т.К. Петросян, Я.Ю. Волкова, А.В. Тебеньков  
*Уральский федеральный университет им. первого Президента России*  
*Б.Н. Ельцина, Екатеринбург*  
*E-mail: [galina.tikhomirova@urfu.ru](mailto:galina.tikhomirova@urfu.ru)*

Исследованы явления переноса в углеродных материалах (фуллерене  $C_{60}$  в мономерной, ромбоэдрической и тетрагональной фазах, в одностенных и двустенных углеродных нанотрубках (ОУНТ и ДУНТ), в графене и графите) при давлениях до 35 ГПа. Изучена кинетика релаксации этих материалов при изменении давления. Измерения проводились в камере высокого давления с алмазными наковальнями из синтетических алмазов «карбонадо».

В процессе обработки давлением и температурой фуллерен испытывает последовательность фазовых превращений. Эти фазы сильно отличаются как по величине сопротивления (от сотен Ом до сотен МОм), так и по его температурной зависимости. Идентифицированы особенности, соответствующие известным из литературы фазовым превращениям фуллерена. Предложена схема последовательности фазовых превращений фуллерена под действием высоких давлений. Определено время релаксации сопротивления всех фаз фуллерита после изменения давления: оно составляет более двух часов.

Исследуемые образцы однослойных углеродных нанотрубок были получены методом химического парофазного осаждения CVD и очищены методом HiPCO (High pressure CO). Диаметр ОУНТ был оценен при помощи просвечивающего электронного микроскопа и составил 0,8 - 1,2 нм. Обнаружена сильная зависимость сопротивления жгутов ОУНТ от давления. Обнаружена сложная зависимость сопротивления жгутов двустенных углеродных нанотрубок (ДУНТ) от давления, которая связывается с процессами деформации их углеродной структуры. Из-за большого диаметра внешней трубки, и, соответственно, большего количества дефектов, двустенная структура разрушается при гораздо меньших давлениях, чем одностенная. Тем не менее, полного разрушения нанотрубок не происходит вплоть до давлений порядка 30 ГПа.

Исследованы проводимость, магнетосопротивление и термоэдс графита и графена в зависимости от давления при комнатной температуре, а также кинетика их релаксации. Наблюдавшиеся особенности связываются с фазовыми переходами в графите при этих давлениях. Исследовалась возможность возникновения новых фаз углерода из графита при длительной (сутки) выдержке под давлением. от 18 до 45 ГПа. Обнаружены особенности сопротивления, термоэдс и времен релаксации сопротивления в области 27-35 ГПа, по-видимому, связанные с зародышами новой фазы, сохраняющимися после снятия нагрузки.

Работа частично поддержана РФФИ (грант 16-02-01137).

**ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ IN VITRO С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АП-КОНВЕРСИОННЫХ НАНОЧАСТИЦ  
 $\text{NaGdF}_4:\text{Yb}^{3+}\text{-Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}\text{-Tm}^{3+}$**

Д.В. Поминова, А.В. Рябова, И.Д. Романишкин, П.В. Грачев,  
В.Ю. Пройдакова, С.В. Кузнецов, В. В. Воронов  
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
E-mail: [pominovdv@gmail.com](mailto:pominovdv@gmail.com)

Работа посвящена исследованию ап-конверсионных наночастиц  $\text{NaGdF}_4$ , допированных ионами  $\text{Yb}^{3+}\text{-Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}\text{-Tm}^{3+}$ , для бесконтактной оценки температуры *in vitro* по изменению спектров люминесценции.

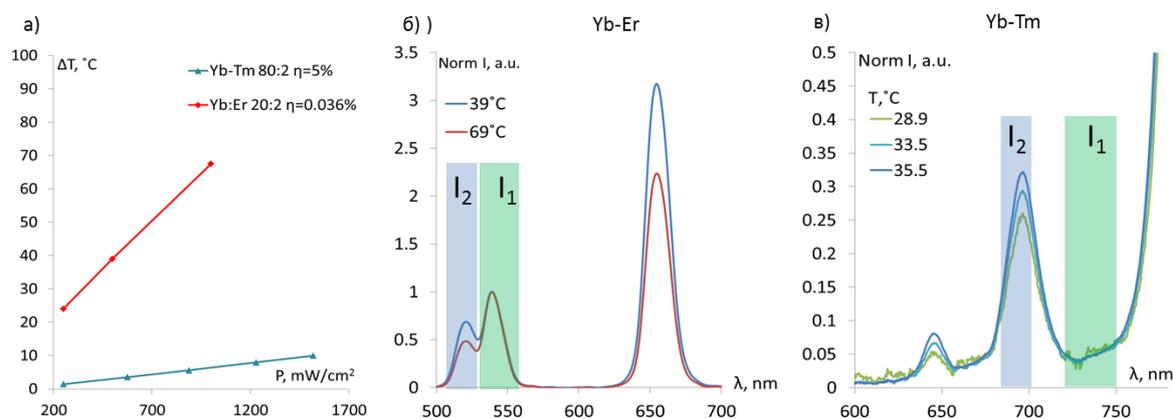


Рис. 1. а) Зависимость температуры нагрева ап-конверсионных наночастиц  $\text{NaGdF}_4$ , допированных ионами Yb-Er и Yb-Tm, от плотности мощности возбуждающего излучения; б), в) температурная зависимость спектров ап-конверсионной люминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Tm}^{3+}$  и спектральные диапазоны, используемые для термометрии ( $I_2$ ,  $I_1$ )

Показано, что наночастицы  $\text{NaGdF}_4$ , допированные ионами Yb-Er нагреваются под действием лазерного излучения существенно сильнее, чем наночастицы  $\text{NaGdF}_4$ , допированные ионами Yb-Tm (67,5 и 6,2 °C соответственно при  $P = 1 \text{ Вт/см}^2$ ). Проанализирована зависимость температурной чувствительности от спектрального диапазона, используемого для термометрии. Показано, что для наночастиц, допированных Yb-Er, максимальная чувствительность в исследуемом диапазоне температур достигается при использовании отношения площадей под пиками люминесценции, соответствующими переходам ионов  $\text{Er}^{3+}$   ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  ( $I_2$ ) и  ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  ( $I_1$ ) и составляет  $1,34 \% \cdot \text{C}^{-1}$ . Для наночастиц, допированных Yb-Tm, максимальная чувствительность была получена при использовании для термометрии отношения площади под пиком люминесценции, соответствующим переходом  ${}^1\text{F}_{2,3} \rightarrow {}^3\text{H}_6$  ( $I_2$ ) к площади под впадиной между пиками, рис. 1в)  $I_1$ , и составила  $4,11 \% \cdot \text{C}^{-1}$ .

Проведено исследование гипертермии *in vitro* на различных клеточных линиях и анализ влияния температуры на здоровые и раковые клетки. Показано, что за счет различной чувствительности клеточных линий к температуре можно обеспечить селективную гипертермию.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-72-20186).

# СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИЗ РАСТВОРОВ АМИНОКАПРОНОВОЙ КИСЛОТЫ

И.А. Юрлов, П.А. Рябочкина, С.А. Хрущалина

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

*Email: [ivanuyrlov@gmail.com](mailto:ivanuyrlov@gmail.com)*

Коллоиды люминесцентных наночастиц на основе редкоземельных и тяжелых металлов, в настоящее время привлекают к себе значительное внимание. Наличие спектрально-люминесцентных свойств у таких систем делает их перспективными для различных применений. Однако серьезным недостатком подобных систем является токсичность для биообъектов [1]. Углеродные наночастицы (УНЧ), которые характеризуются интенсивной люминесценцией в видимой области спектра [2], могут быть рассмотрены в качестве нетоксичной альтернативы коллоидам люминесцентных наночастиц на основе тяжелых металлов.

Люминесцентные характеристики УНЧ зависят от метода синтеза и типа исходного вещества, используемого для их получения. Благодаря разработке простых одностадийных методов синтеза УНЧ, стало возможно получать коллоиды в больших объемах за короткое время.

В спектрах люминесценции коллоидного раствора УНЧ наблюдается смещение положения максимума люминесценции в зависимости от длины волны возбуждения. Данный характер спектрально-люминесцентных свойств наблюдается благодаря наличию  $\pi$ -доменной структуры и присутствию функциональных групп на поверхности УНЧ [3]. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов получения и поиск новых материалов для синтеза УНЧ с контролируруемыми размерными и люминесцентными свойствами.

В данной работе методом гидротермальной обработки в микроволновом реакторе из раствора аминокaproновой кислоты впервые получены коллоиды УНЧ. Методом динамического рассеяния света оценены средние размеры полученных УНЧ.

Результаты исследования люминесцентных свойств коллоидов УНЧ, полученных из раствора аминокaproновой кислоты, свидетельствуют о наличии у них перестраиваемой люминесценции в диапазоне 300-600 нм при возбуждении излучением с  $\lambda_{\text{ex.}} = 280\text{-}520$  нм.

1. L. Cao, X. Wang, M.J. Meziani et al., J. Am. Chem. Soc. **129**, 11318 (2007).
2. C.K. Chua, Z. Sofer, P. Simek et al., ACS nano **93**, 2548 (2015).
3. S.Y. Lim, W. Shen, Z. Gao, Chem. Soc.Rev. **44**, 362 (2015).

# ТЕРМОПРОГРАММИРУЕМЫЙ СИНТЕЗ МОНОКРИСТАЛЛОВ АЗОТИРОВАННОГО ГРАФЕНА ИЗ МОЛЕКУЛ АЦЕТОНИТРИЛА

С.Л. Коваленко<sup>1</sup>, Т.В. Павлова<sup>1</sup>, О.И. Канищева<sup>1,2</sup>, К.Н. Ельцов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт, Москва*

*E-mail: [stanislav.l.kovalenko@gmail.com](mailto:stanislav.l.kovalenko@gmail.com)*

Использованный термопрограммируемый синтез эпитаксиального N-легированного монослойного графена включал в себя: 1) насыщение приповерхностной области образца Ni(111) углеродом с сохранением чистоты самой поверхности; 2) адсорбцию ацетонитрила (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>N) при температуре от -15 °C до 0 °C дозой около 2000 Ленгмюр; 3) быстрый (флэш) прогрев образца до 140 °C; 4) отжиг образца при 400 °C. Для получения квазисвободного графена использовалась интеркаляция золота в интерфейс графен/Ni(111) в соответствии с работой [1]. Интеркаляция проводилась путем напыления золота на поверхность при комнатной температуре и последующего отжига в течение 15 мин при 450 °C. Все технологические операции, анализ структуры и элементного состава поверхности проводились в единой сверхвысоковакуумной установке, оснащенной электронным оже-спектрометром, дифрактометром медленных электронов, сканирующим туннельным микроскоп (СТМ), квадрупольным масс-спектрометром, системой напуска газов и системой прогрева образцов. СТМ-изображения записывались в широком диапазоне туннельных напряжений  $U_t = (-1,30 \div +1,00)$  В.

Предложенный метод синтеза обеспечивает формирование монослойного эпитаксиального монокристалла графена, легированного атомами азота, на поверхности Ni(111). Совместное использование сканирующей туннельной микроскопии и расчетов на основе теории функционала плотности позволяет говорить, что атомы азота, в основном, замещают атомы углерода в решетке графена или находятся в бивакансии (пиридиновый дефект) с общей концентрацией около 0,3 %. Анализ проводился путем сравнения экспериментальных и расчетных СТМ-изображений: анализировалась плотность электронных состояний и симметрия дефектов. После интеркаляции монослоя золота в интерфейс между N-графеном и поверхностью Ni(111) целостность графена не нарушалась, а концентрация азота в графене сохранялась на исходном уровне, 0,3 %.

1. D. Usachov et al., Nano Letters **11**, 5401 (2011).

СИНТЕЗ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИПОСОМ,  
СОДЕРЖАЩИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ НАНОРАЗМЕРНЫЕ ЧАСТИЦЫ  
 $\text{CaF}_2: \text{Yb}^{3+}, \text{Re}^{3+}$  ( $\text{Re} = \text{Er}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$ ), ДЛЯ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ  
ТЕРАПИИ

М.Н. Жарков, А.А. Ляпин, В.П. Агеев, С.А. Хрущалина, О.А. Куликов,  
П.А. Рябочкина

*Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск  
E-mail: [mikhail.zharkov.92@mail.ru](mailto:mikhail.zharkov.92@mail.ru)*

Фотодинамическая терапия (ФДТ) является наиболее щадящей формой лечения рака из-за её большей избирательности действия на опухолевую ткань по сравнению с традиционной химиотерапией и отсутствия тяжёлых местных и системных осложнений, которые могут возникнуть при хирургическом вмешательстве. Данный метод лечения включает в себя непосредственную активацию молекул фотосенсибилизатора (ФС) при воздействии на них лазерным излучением видимого диапазона спектра. Описанный процесс сопровождается образованием активного синглетного кислорода и свободных радикалов, которые вызывают некроз и апоптоз раковых клеток. В настоящее время в клинической практике для ФДТ применяется целый ряд ФС, характеризующихся максимумом поглощения в красной области спектра (650-800 нм). Однако, данный диапазон не соответствует максимуму пропускания ( $\sim 1$  мкм) биологических тканей, что затрудняет процесс ФДТ при лечении глубоко расположенных опухолей.

В настоящей работе предлагается липосомальная форма ФС для проведения ФДТ глубокозалегающих опухолей (до  $\approx 7$  см) с использованием лазерного излучения ближнего инфракрасного (ИК) диапазона спектра. Разработанная система представляет собой химически стабилизированное ядро на основе наноразмерных частиц  $\text{CaF}_2: \text{Yb}^{3+}, \text{Re}^{3+}$  ( $\text{Re} = \text{Er}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$ ), которое покрыто липидным бислоем, содержащим молекулы ФС. Ионы  $\text{Yb}^{3+}$ , содержащиеся в составе наночастиц, обеспечивают эффективное поглощение лазерного излучения с длинами волн  $\sim 980$  нм. Посредством процессов безызлучательного переноса поглощённая энергия может быть передана на энергетические уровни других редкоземельных ионов ( $\text{Er}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$ ), что будет приводить к возникновению их люминесценции в видимой области спектра по механизму ап-конверсии. Таким образом, будет осуществляться преобразование ИК-излучения в более коротковолновое, соответствующее видимому диапазону спектра и поглощению его ФС. Важной особенностью предлагаемой липосомальной системы является возможность придания дополнительных «векторных» свойств с помощью различных рецепторов и специфических антител, что может увеличить эффективность ФДТ.

В работе предложен метод синтеза указанных наноструктур и описаны их некоторые физико-химические свойства.

## УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Е.С. Климов<sup>1</sup>, М.В. Бузаева<sup>1</sup>, И.А. Макарова<sup>1</sup>, О.А. Давыдова<sup>1</sup>,  
Е.С. Ваганова<sup>1</sup>, Н.А. Бунаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск

<sup>2</sup>Ульяновский государственный университет, Ульяновск

E-mail: [eugen1947@mail.ru](mailto:eugen1947@mail.ru)

Многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) получены на лабораторной установке методом МОСVD с использованием прекурсоров ферроцена и толуола [1]. Диаметр нанотрубок 20-120 нм, большая часть которых 40-60 нм, длина несколько десятков мкм. Пористость углеродных нанотрубок определяли методом капиллярной конденсации азота. Удельную площадь поверхности определяли методом ВЕТ (Брунауэра-Эммета-Теллера), Распределение пор по размерам и удельный объем пор определяли по методу ВЖН (Баррета-Джойнера-Халенды) [2]. Полученные изотермы адсорбции соответствуют изотермам II типа и характерны для непористых адсорбентов (рис. 1).

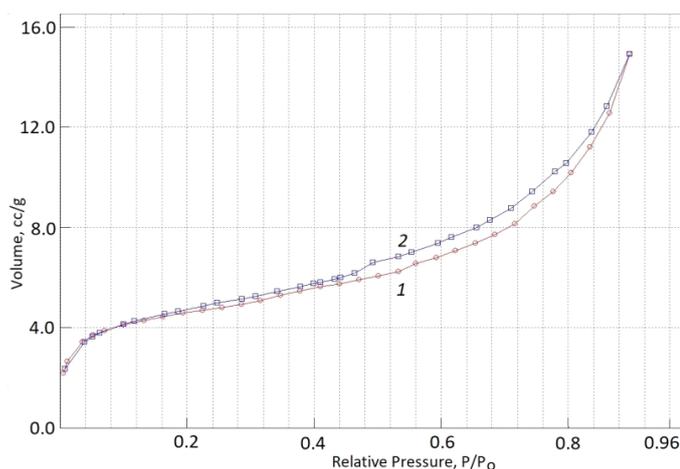


Рис. 1. Изотермы адсорбции-десорбции азота для МУНТ: 1 - адсорбция; 2 - десорбция. Анализатор Quantachrome NOVA 1000 e

Удельная площадь поверхности МУНТ составляет 16,33 м<sup>2</sup>/г, диаметр пор с узким распределением 19, 23 нм, удельный объем пор 0,019 мл/г, что сравнимо с литературными данными [3].

1. Е.С. Климов, М.В. Бузаева, О.А. Давыдова и др., ЖПХ **87**, 1128 (2014).
2. А.С. Вячеславов, Е.А. Померанцева, *Измерение площади и пористости методом капиллярной конденсации азота*, М.: МГУ, 2006.
3. M. Maryam, *Advanted Materials Research* **626**, 289 (2013).

## СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЦЕОЛИТА, ДОПИРОВАННОГО УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Т.Ю. Дьячкова, М.В. Бузаева, И.А. Макарова, О.А. Давыдова, Е.С. Климов  
*Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск*  
*E-mail: [m.buzaeva@mail.ru](mailto:m.buzaeva@mail.ru)*

Введение в природные минералы наноуглеродных структур может значительно улучшить сорбционные свойства природных минералов, и на этой основе можно создавать новое поколение композитных материалов для сорбционной очистки производственных сточных вод от нефтепродуктов и тяжелых металлов. В качестве сорбентов использовали природные минералы месторождений Ульяновской области. Модифицирование сорбентов многостенными углеродными нанотрубками проводили (МУНТ) при соотношении твердой и жидкой фаз Т: Ж = 1:10. 100 мл водной суспензии, образованной углеродными нанотрубками и водой, обрабатывали ультразвуком в течение 6-8 мин, последовательно вводили 1 г сульфата алюминия, 10 г очищенного от примесей сорбента (диатомит, опока, цеолит) и подвергали ультразвуковому воздействию еще 2-3 мин. После прекращения ультразвукового воздействия в течение 20-60 мин. осаждается однородный светло-серый мелкодисперсный порошок. Сорбционные свойства минералов определяли статическим методом при соотношении Т: Ж = 1:50. В фильтрате определяли остаточную концентрацию загрязняющих веществ. При различных концентрациях ионов металлов в растворе были построены изотермы адсорбции и определены основные параметры процессов адсорбции ионов на цеолите для модифицированного (0,2 мас. % МУНТ) и немодифицированного цеолита при воздействии ультразвука в течение 120 с.

Графический анализ изотерм адсорбции ионов металлов свидетельствует о лучших сорбционных свойствах модифицированного цеолита по отношению к ионам цинка. Значение же максимальной адсорбции наблюдается для меди при использовании модифицированного цеолита. По сравнению с немодифицированным цеолитом степень извлечения увеличивается на 25 %.

Интенсификация процессов сорбции при применении модифицированного цеолита и ультразвукового воздействия (по сравнению с сорбцией на цеолите в обычных статических условиях) позволила снизить время обработки растворов, загрязненных ионами цинка и меди, с 4 ч до 120 с. Степень извлечения ионов тяжелых металлов достигает 98 %. Сорбционная очистка экономически целесообразна при суммарном содержании ионов тяжелых металлов в сточных водах менее 20 мг/л.

# СИНТЕЗ И ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И НАНОПОКРЫТИЙ $\text{Al}_2\text{O}_3$ И $\text{ZrO}_2$

И.В. Вилков<sup>1</sup>, К.В. Кремлев<sup>2</sup>, П.В. Андреев<sup>1</sup>, Г.С. Забродина<sup>2</sup>,  
А.М. Объедков<sup>2</sup>, Б.С. Каверин<sup>2</sup>, Н.М. Семенов<sup>2</sup>, С.Ю. Кетков<sup>2</sup>,  
М.А. Фаддеев<sup>1</sup>, С.А. Гусев<sup>3</sup>, Д.А. Татарский<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород*

<sup>2</sup>*Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН,  
Нижний Новгород*

<sup>3</sup>*Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород  
E-mail: [mr.vilkof@yandex.ru](mailto:mr.vilkof@yandex.ru)*

Гибридные материалы на основе многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), поверхность которых декорирована наночастицами оксидов металлов, представляют собой новый класс функциональных наноматериалов, имеющих широкий спектр применений в различных областях науки и промышленности. Такого рода материалы вызвали огромный интерес в связи с перспективами их введения в качестве компонентов в высокотемпературные керамоматричные композиты для улучшения их механических и электронных свойств, а также с наличием у них исключительных фотокаталитических, электрокаталитических и сенсорных свойств.

Для синтеза гибридных материалов на основе МУНТ и нанопокровтий оксидов металлов, в частности  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{ZrO}_2$ , нами был применен метод осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений (МОСVD) на специально разработанной для этого экспериментальной установке. Данная установка представляет собой вертикальный трубчатый кварцевый реактор с системой нагревательных печей. В зону печи испарителя помещается прекурсор нанопокровтия (ацетилацетонат алюминия или ацетилацетонат циркония). В зону печи пиролиза помещаются МУНТ, на которые происходит осаждение покрытия при разложении прекурсора. Синтез происходит при постоянной откачке реактора с постепенным нагревом печей до необходимых температур испарения и разложения прекурсоров.

Полученные таким образом гибридные материалы были исследованы при помощи сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss SUPRA 50 VP и просвечивающего электронного микроскопа Carl Zeiss LIBRA 200MC. Анализ синтезированных гибридных материалов данными методами позволил установить не только морфологию исследуемых объектов, но и определить структуру и состав материалов на различных участках образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-33-00776).

## ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ В РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

В.В. Грибко, В.Н. Трушин, А.С. Маркелов

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,*

*Нижний Новгород*

*E-mail: [gribkovaldimir@icloud.com](mailto:gribkovaldimir@icloud.com)*

В настоящее время для управления параметрами рентгеновского пучка наряду со стационарными рентгенооптическими элементами все большее применение находят элементы адаптивной рентгеновской оптики [1-4]. Интерактивное управление параметрами сходимости рентгеновского пучка имеет важное значение для решения задач фокусировки и коллимации рентгеновских пучков и может быть использовано в таких областях как медицина, астрономия, исследование биологических объектов, а также в микро- и наноэлектронике.

В работе [5] предложен метод фокусировки рентгеновского излучения, основанный на использовании кристаллов с переменным периодом. Указывается, что в таких кристаллах ширина края области дифракционного отражения зависит от вида профиля деформации, что и позволяет создавать фокусирующие системы. Данные исследования указывают на необходимость учета деформационных полей при фокусировке рентгеновских пучков с использованием изогнутых кристаллов.

В данной работе приведены результаты исследования деформаций дифракционного элемента (монокристаллической пластине Si) возникших при формировании изгибного модуля, возможность применения которого в качестве адаптивного рентгенооптического элемента показана в [3, 4]. Профиль деформаций определялся по смещению брегговского положения пика (400) определяемому при сканировании образца с помощью измерения кривых дифракционного отражения в различных его точках. Измерения осуществлялись на дифрактометре Bruker D8 Discover.

Согласно данным эксперимента и расчетным данным относительные деформации, возникающие при изгибе пластины Si, не превышают  $5,5 \cdot 10^{-6}$ . Из полученных данных можно сделать вывод о малом влиянии деформаций возникающих в дифракционном элементе при формировании изгибного модуля на управление сходимостью рентгеновского пучка.

1. С. Atkins et al., Proc. of SPIE **6721**, 67210T-2 (2008).
2. В.Н. Трушин, Е.В. Чупрунов и др., Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтронные исслед. **5**, 28 (2017).
3. В.В. Грибко, В.Н. Трушин и др., Нанофизика и наноэлектроника. Материалы XX Международного симпозиума **1**, 387 (2017).
4. А.В. Андреев, Письма в ЖЭТФ **74**, 8 (2001).

# ОПТИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В УСИЛИВАЮЩЕМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ С МОНОСЛОЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ

И.А. Глухов<sup>1</sup>, С.Г. Моисеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский государственный университет, Ульяновск

<sup>2</sup>Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск

*E-mail: [glukhov91@yandex.ru](mailto:glukhov91@yandex.ru)*

В работе исследованы спектральные характеристики фотонно-кристаллической структуры с монослоем серебряных наночастиц эллиптической формы.

Для расчета отражательной и пропускной способностей рассматриваемой структуры в работе применяется матричный метод для интерфейсов. Оптические характеристики границы раздела двух материальных сред определяются френелевскими коэффициентами отражения и пропускания. Поскольку массив наноразмерных частиц, расположенных в одной плоскости, взаимодействует с электромагнитной волной подобно плоской границе раздела двух сред, он также рассматривается как интерфейс с некоторыми собственными коэффициентами отражения и пропускания. Амплитудные коэффициенты отражения и преломления монослоя рассчитываются при помощи численного метода, реализованного в пакете специализированных программ физического моделирования.

Показана возможность выборочной генерации поляризованного света в фотонно-кристаллической структуре с монослоем металлических наночастиц. Коэффициенты отражения и пропускания монослоя определяются плазмонным резонансом в наночастицах и зависят от поверхностной концентрации и формы наночастиц. Благодаря этому, в зависимости от ориентации оси анизотропии монослоя и направления поляризации света достигается сепарация мод фотонно-кристаллической структуры.

1. Y. Dadoenkova, I. Glukhov, S. Moiseev et al., *Optics Communications* **389**, 1 (2017).
2. S.G. Moiseev, V.A. Ostatochnikov, *Quantum Electron.* **46**, 743 (2016).

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА  
И ЦИТОКСИЧНОСТЬ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ (YEr)PO<sub>4</sub>

А.В. Щучкина, С.А. Хрущалина, П.А. Рябочкина, О.В. Минаева,  
М.Н. Жарков

*Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

*E-mail: [nastenka1220@gmail.com](mailto:nastenka1220@gmail.com)*

В научной литературе имеется значительное количество работ, посвященных исследованию морфологии, фазового состава, спектрально-люминесцентных свойств наноразмерных частиц ортофосфатов, легированных РЗ ионами [1-3]. Интерес к ним обусловлен тем, что во многих работах позиционируется их использование для биомедицинских приложений.

В настоящей работе выполнены исследования апконверсионной люминесценции частиц концентрационного ряда Y<sub>1-x</sub>Er<sub>x</sub>PO<sub>4</sub> (x = 0,25; 0,5; 0,75; 1) при возбуждении уровня <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> (λ = 1,5 мкм) ионов Er<sup>3+</sup>. При данном способе возбуждения апконверсионная люминесценция наблюдалась с уровней <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub>, <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub>, <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub> и <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> ионов Er<sup>3+</sup>.

При увеличении плотности мощности излучения возбуждения выше 1929 Вт/см<sup>2</sup> для частиц Y<sub>1-x</sub>Er<sub>x</sub>PO<sub>4</sub> (x = 0,25; 0,5; 0,75; 1) наблюдалось широкополосное излучение в видимом диапазоне спектра. Анализ характеристик данного излучения свидетельствует о его тепловой природе.

Важным условием, определяющим применение наночастиц в биомедицине, является степень их токсичности. В работе была выполнена оценка токсичности данных наноразмерных диэлектрических частиц (YEr)PO<sub>4</sub>, согласно которой они характеризуются как умеренно токсичное вещество.

При внесении исследуемых порошков с концентрацией ионов Er<sup>3+</sup> от 0,15 мг/мл и выше к клеткам жизнеспособными оставалось 55 % от их количества. Полумаксимальная ингибирующая концентрация IC<sub>50</sub> наночастиц (YEr)PO<sub>4</sub> составила - 0,894 мг/мл (48 ч инкубации); 1,383 мг/мл (24 ч инкубации).

1. R. Balakrishnaiah, D. Kim, S. Yi et al., Thin Solid Films **518**, 6145 (2010).
2. С. Хрущалина, П. Рябочкина, В. Кяшкин и др., Письма в ЖЭТФ **103**, 342 (2016).
3. Yu.V. Orlovskii, Optics Express **5**, 1230 (2015).

ЛЮМИНЕСЦЕНТАЯ НАНОТЕРМОМЕТРИЯ НА ОСНОВЕ  
НАНОЧАСТИЦ  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$  ОДНОЯДЕРНОЙ СТРУКТУРЫ  
И НАНОЧАСТИЦ  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3/\text{LaF}_3$  СТРУКТУРЫ ЯДРО/ОБОЛОЧКА

М.С. Пудовкин, О.А. Морозов, Д.А. Коряковцева, Р.Ш. Хуснутдинова,  
А.Г. Киямов, А.С. Низамутдинов, В.В. Семашко  
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань  
E-mail: jaz7778@list.ru

Нанопластины  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$  ( $C_{\text{Pr}} = 1\%$ ),  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$  ( $C_{\text{Pr}} = 1\%$ )@ $\text{LaF}_3$  нанопластины ядро/оболочка, наносферы  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$  ( $C_{\text{Pr}} = 1\%$ ) SNPs и  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$  ( $C_{\text{Pr}} = 1\%$ )@ $\text{LaF}_3$  наносферы ядро/оболочка были синтезированы методом соосаждения из водных растворов

Уменьшение интенсивности излучения с состояния  $^3\text{P}_0$  (на длинах волн 487 и 537 нм) и одновременное увеличение интенсивности излучения с состояния  $^3\text{P}_1$  объясняется тем, что электронные населенности уровней  $^3\text{P}_1$  и  $^3\text{P}_0$  соотносятся друг с другом в соответствии с распределением Больцмана, которое зависит от температуры известным образом [1].

Значение абсолютной чувствительности для всех наночастиц составляет  $S_a = 0,01 \text{ K}^{-1}$  при 300 К и не зависит от размера, формы и структуры наночастиц.

Кинетики люминесценции состояния  $^3\text{P}_0$ , записанные в диапазоне температур приведены на рис. 1.

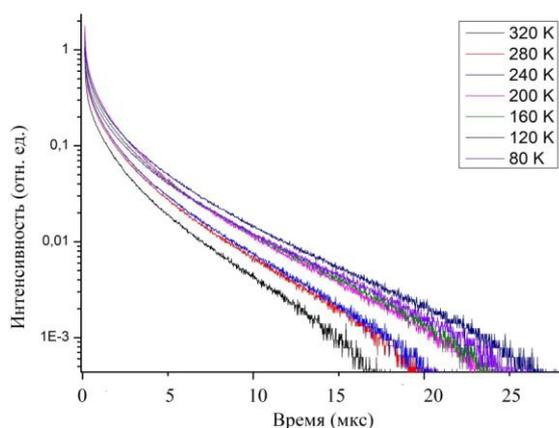


Рис. 1. Кинетики люминесценции  $^3\text{P}_0$  состояния ионов  $\text{Pr}^{3+}$  для случая наносфер

Для исследуемых систем не наблюдаются безызлучательные переходы с  $^3\text{P}_0$  на  $^1\text{D}_2$  состояния. Времена жизни  $^3\text{P}_0$  меняются с температурой вследствие зависимых от температуры процессов тушения на дефектах в наночастицах.

1. M.J. Weber, The Journal of Chemical Physics **48**, 10 (1968).



# **NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGY**

## SMALL SIZE CHARGED NANOPARTICLES ACTIVATE TUMOR CELL GROWTH

A.C. Cefalas<sup>1,2</sup>, V.V. Semashko<sup>1</sup>, M.S. Pudovkin<sup>1</sup>, P.V. Zelenikhin,  
V.E. Gavriil<sup>2</sup>, A.S. Nizamutdinov<sup>1</sup>, Z. Kollia<sup>2</sup>, A. Ferraro<sup>1,2</sup>, E. Sarantopoulou<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

<sup>2</sup>*National Hellenic Research Foundation, Theoretical and Physical Chemistry  
Institute, Athens, Greece  
E-mail: [ccefalas@eie.gr](mailto:ccefalas@eie.gr)*

Localized extracellular interactions between nanoparticles and transmembrane signal receptors may well activate cancer cell growth. Herein, tiny LaF<sub>3</sub> and PrF<sub>3</sub> nanoparticles in DMEM+FBS suspensions, stimulated tumor cell growth in three different human cell lines (A549, SW837 and MCF7). Size distribution of nanoparticles, activation of AKT and ERK signaling pathways and viability tests pointed to mechanical stimulation of ligand adhesion binding sites of integrins and EGFR via a synergistic action of an ensemble of tiny size nanoparticles (< 10 nm). While very small size nanoparticles may well associated with the activation of EGFR, integrin interplay with nanoparticles remains a multifaceted issue. A theoretical motif shows that, within the requisite pN force scale, each ligand adhesion binding site can be activated by a tiny size dielectric nanoparticle via electrical dipole interaction. The size of the active nanoparticle stayed specified by the amount of the surface charges on the ligand adhesion binding site and the nanoparticle, and also on the separating distance between them. The electrical dipole force remained inversely proportional to the second power of nanoparticle's size, evincing that only tiny size dielectric nanoparticles might stimulate cancer cell growth via electrical dipole interactions. The work contributes towards recognizing different cytoskeletal stressing modes of cancer cells.

## INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF HEXAGONAL SILICON OBTAINED BY ION IMPLANTATION

A.A. Nikolskaya, D.S. Korolev, A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, A.A. Sushkov,  
D.A. Pavlov, D.I. Tetelbaum

*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*  
*E-mail: [alena.nikolskaya.1994@mail.ru](mailto:alena.nikolskaya.1994@mail.ru)*

The implementation of optical communication channels into solid-state electronics requires the search for light-emitting materials which are compatible with silicon technology. Synthesis of hexagonal silicon by ion implantation solves two global problems. First, as it is theoretically predicted, this modification would have better optical properties than cubic silicon. Second, ion implantation is a traditional technology of microelectronics, so the synthesis of this phase by ion implantation easily solves the problem of integration. In this work, the formation of the hexagonal phase of silicon by ion implantation has been studied, and the structural and optical properties of the synthesized phase have been determined.

Earlier, we reported the formation of inclusions of hexagonal phase 9R-Si in a silicon substrate at the interface with a SiO<sub>2</sub> film (160 nm) upon implantation of Ga<sup>+</sup> and N<sub>2</sub><sup>+</sup> ions [1]. There to determine the influence of the SiO<sub>2</sub> thickness (d) and the type of implanted ions, irradiation by Kr<sup>+</sup> with energy of 80 keV and a dose of 5·10<sup>16</sup> cm<sup>-2</sup> was performed in the SiO<sub>2</sub>/Si system with 120, 160 and 300 nm thick SiO<sub>2</sub> films, followed by annealing at 800 °C. The cross-sections of the synthesized samples were studied by transmission electron microscopy (X-TEM) using the JEOL JEM-2100F microscope. A semiconductor laser (λ = 980 nm) was used to excite photoluminescence (PL).

For samples with d = 120 and 160 nm, a PL peak at 1240 nm was observed, which presumably refers to emission from the 9R-Si phase. The formation of this phase in a silicon substrate at the interface with the film was confirmed by X-TEM. It is assumed that the relaxation of mechanical stresses arising in the film during implantation is responsible for the formation of this phase. For a sample with a film thickness of 300 nm, the formation of a hexagonal phase and PL at 1240 nm were not revealed, which is apparently due to the insufficient magnitude of stress penetrating from the implanted layer (~ 50 nm) into the Si substrate.

The work is supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (State Assignment № 16.2737.2017/4.6). A.A. Nikolskaya acknowledges the support in the framework of UMNIK program.

1. D.S. Korolev, A.A. Nikolskaya, N.O. Krivulin et al., *Tech. Phys. Lett.* **43(8)**, 767 (2017).

## DECIPHERING OF THE HEXAGONAL PHASE OF AlAs ON Ge/Si(112)

A.A. Sushkov<sup>1</sup>, D.A. Pavlov<sup>1</sup>, N.V. Baidus<sup>2</sup>, A.V. Rykov<sup>2</sup>, A.V. Novikov<sup>3</sup>,  
D.V. Yurasov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>2</sup>*Physical-Technical Research Institute, Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>3</sup>*Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhny Novgorod, Russia*

*E-mail: [sushkovartem@gmail.com](mailto:sushkovartem@gmail.com)*

Traditionally AlAs is used as one of the buffer layers for growing GaAs on Si substrates [1]. Under normal conditions, the wide-gap-AlAs semiconductor is an indirect gap semiconductor and has the sphalerite structural type. A large number of defects including packaging defects are formed during the growth of one semiconductor layer to the other due to mismatch of the lattice parameters. In the case of high packing defect density, it is possible to change the structural type of the material, and its band structure.

The crystal structure of AlAs layers on a Si(112) substrate with a Ge buffer layer was investigated. The cross section of the structure was analyzed by a high resolution transmission electron microscope (HRTEM) (JEOL JEM-2100F microscope operated at 200 kV).

Due to TEM investigations regions with a high concentration of packaging defects were found in the AlAs layer, which indicates the hexagonalization of the material. The wurtzite phase of AlAs (2H) has to possess a direct band structure according to the theoretical calculations described in [2]. Deciphering the hexagonal phase of AlAs in HRTEM images, by means of Fourier transforms, indicates that the polytype 9R with share of hexagonalization about 66,66 % [3] dominates.

Thus, a hexagonal crystal structure of the wide-gap-AlAs semiconductor was obtained on a relatively cheap Si(112) substrate for the first time. Therefore, it is not necessary to grow complex structures with different buffer layers, but it is quite sufficient to achieve the hexagonalization of the AlAs buffer layer itself to create optical devices on a Si substrate.

1. V.Y. Aleshkin, N.V. Baidus, A.A. Dubinov et al., *Appl. Phys. Lett.* **109**, 061111 (2016).
2. A. De, C.E. Pryor, *Phys. Rev.* **81**, 155210 (2010).
3. B. Wen, J. Zhao, M.J. Bucknum et al., *Diamond Relat. Mater.* **17**, 356 (2008).

## PHASE TRANSITIONS IN CARBON MATERIALS AT HIGH PRESSURES

G.V. Tikhomirova, T.K. Petrosyan, Ya.Yu. Volkova, A.V. Tebenkov  
*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Yekaterinburg, Russia*  
*E-mail: [galina.tikhomirova@urfu.ru](mailto:galina.tikhomirova@urfu.ru)*

Transport phenomena in carbon materials (monomeric, rhombohedral and tetragonal phases of fullerene C<sub>60</sub>, single-wall and double-wall carbon nanotubes (SWNT and DWNT), graphene and graphite) have investigated at pressures up to 35 GPa. Relaxation kinetics of these materials at changing pressure was studied. The measurements were performed using the high-pressure chamber with anvils made of synthetic carbonado diamonds.

In the course of treatment by high pressure and temperature, fullerene undergoes consequent phase transformations. These phases have quite different both resistivities (from hundreds Ohm to hundreds MOhm) and their temperature dependences. Resistivity peculiarities were identified with the known phase transitions of fullerene. The scheme of sequence of phase transformations under high pressures is suggested. Resistivity relaxation times for all fullerite phases are determined as more than two hours.

Samples of single-wall carbon nanotubes (SWNT) under study were grown by CVD and cleaned by HiPCO (High pressure CO) method. The SWNT diameters estimated by means of TEM (transmission electron microscope) were 0,8 to 1,2 nm. Strong pressure dependence of the SWNT bundles was found. The complicated pressure dependence of resistivity of double-wall carbon nanotubes (DWNT) is attributed to deformation of their structure. Destruction of DWNT begins at essentially lower pressures than SWNT because of larger diameter of outer tube and respectively larger number of defects. Nevertheless, there is no complete collapse of DWNT up to 30 GPa.

Conductivity, magnetoresistance and thermoelectromotive force of graphite and graphene, as well as their relaxation kinetics, in dependence on pressures were studied. The features observed are attributed to phase transitions.

The possibility of formation of new carbon phases from graphite at continuous exposure (24 hrs) under pressures of 18 GPa to 45 GPa was examined. The features in the pressure dependence of resistance as well as its relaxation times observed in the range 27-35 GPa are connected likely with the inclusion of a new phase, which did not disappear after removal of the load.

The work is supported in part by RFBR grant 16-02-01137.

# LUMINESCENT THERMOMETRY IN VITRO USING UPCONVERSION NANOPARTICLES NaGdF<sub>4</sub>:Yb<sup>3+</sup>-Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>-Tm<sup>3+</sup>

D.V. Pominova, A.V. Ryabova, I.D. Romanishkin, P.V. Grachev,  
 V.Yu. Proydakova, S.V. Kuznetsov, V.V. Voronov  
*Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia*  
*E-mail: [pominovdv@gmail.com](mailto:pominovdv@gmail.com)*

The work is devoted to upconversion nanoparticles NaGdF<sub>4</sub> doped with Yb<sup>3+</sup>-Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>-Tm<sup>3+</sup> study, used for contactless temperature estimation by change of the luminescence spectra.

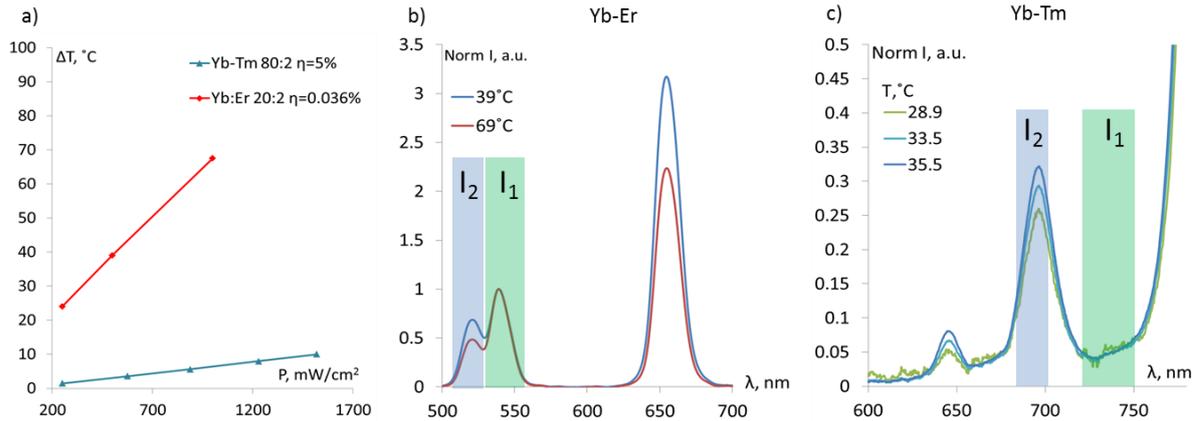


Fig. 1. a) Pumping power dependence of upconversion nanoparticles NaGdF<sub>4</sub> doped with Yb<sup>3+</sup>-Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>-Tm<sup>3+</sup> ions heating temperature; b), c) temperature dependence of Er<sup>3+</sup> and Tm<sup>3+</sup> ions upconversion luminescence spectra and spectral regions, used for thermometry (I<sub>2</sub>, I<sub>1</sub>)

It was shown that NaGdF<sub>4</sub> nanoparticles doped with Yb-Er ions were heated under laser radiation much stronger than NaGdF<sub>4</sub> nanoparticles, doped with Yb-Tm ions (67,5 and 6,2 °C correspondingly under P = 1 W/cm<sup>2</sup>). The dependence of temperature sensitivity on used for thermometry spectral region was analyzed. The maximal sensitivity in studied temperature region was achieved by using the ratio of areas under luminescence peaks, which correspond to Er<sup>3+</sup> <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> (I<sub>2</sub>) and <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> (I<sub>1</sub>) transitions and is 1,34 % · C<sup>-1</sup>. For Yb-Tm doped nanoparticles the maximal sensitivity was obtained by using for thermometry the ratio of area under luminescence peak, which corresponds to <sup>1</sup>F<sub>2,3</sub> → <sup>3</sup>H<sub>6</sub> (I<sub>2</sub>) transition and area under valley, fig. 1c) I<sub>1</sub>, and is 4,11 % · C<sup>-1</sup>.

The study of *in vitro* hyperthermia on various cell lines and an analysis of the effect of temperature on healthy and cancer cells were carried out. It was shown that due to the different sensitivity of the cell lines to the temperature, selective hyperthermia could be performed.

Funding for this research was provided by Russian Science Foundation (project N17-72-20186).

SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES  
OF CARBON NANOPARTICLES SYNTHESIZED FROM SOLUTIONS  
OF AMINOCAPRONIC ACID

I.A. Yurlov, P.A. Ryabochkina, S.A. Khrushchalina

*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

*Email: [ivanuyrlov@gmail.com](mailto:ivanuyrlov@gmail.com)*

Colloids of luminescent nanoparticles based on rare-earth and heavy metals currently attract considerable attention. The presence of spectral-luminescent properties in such systems makes them promising for various applications. However, a serious disadvantage of such systems is toxicity for bioobjects [1]. Carbon nanoparticles (CNPs), which are characterized by intense luminescence in the visible spectral range [2], can be considered as a non-toxic alternative to colloids of luminescent nanoparticles based on heavy metals.

The luminescence characteristics of the CNPs depend on the synthesis method and the type of the starting material used to prepare them. Due to the development of a simple one-stage methods of CNPs synthesis, it became possible to obtain large volumes of colloids in a short time.

In the luminescence spectra of a CNPs colloidal solution, the position of the luminescence maximum is shifted, depending on the excitation wavelength. This character of the spectral-luminescent properties is due to the existence of the  $\pi$ -domain structure and the presence of functional groups on the CNPs surface [3]. In connection with this, the urgent task is to develop methods for obtaining and searching for new materials for the synthesis of CNPs with controlled dimensional and luminescent properties.

In this study, colloidal CNPs was first obtained from the aminocaproic acid solution by hydrothermal treatment in a microwave reactor. The method of dynamic light scattering was used to estimate the average sizes of the obtained CNPs.

The results of the investigation of the luminescent properties of CNPs colloids obtained from an aminocaproic acid solution indicate the presence of a tunable luminescence in the 300-600 nm range when excited by radiation with  $\lambda_{\text{ex.}} = 280\text{-}520$  nm.

1. L. Cao, X. Wang, M.J. Meziani et al., *J. Am. Chem. Soc.* **129**, 11318 (2007).
2. C.K. Chua, Z. Sofer, P. Simek et al., *ACS nano* **93**, 2548 (2015).
3. S.Y. Lim, W. Shen, Z. Gao, *Chem. Soc.Rev.* **44**, 362 (2015).

## THERMOPROGRAMMED SYNTHESIS OF NITROGEN DOPED MONOCRYSTALLINE GRAPHENE FROM ACETONITRILE

S.L. Kovalenko<sup>1</sup>, T.V. Pavlova<sup>1</sup>, O.I. Kanischeva<sup>1,2</sup>, K.N. Eltsov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

*E-mail: [stanislav.l.kovalenko@gmail.com](mailto:stanislav.l.kovalenko@gmail.com)*

The used thermoprogrammed synthesis of epitaxial N-doped monolayer graphene includes: 1) saturation of the near surface region of the Ni(111) with carbon while preserving purity of the surface; 2) adsorption of acetonitrile (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>N) dose about 2000 Langmuir at a temperature of -15 °C to 0 °C; 3) flash annealing of the sample to 140 °C; 4) annealing the sample at 400 °C. To obtain quasi-free standing graphene, gold was intercalated into the graphene/Ni(111) interface in accordance with the paper [1]. Intercalation has been carried out by evaporation of gold on the surface at room temperature and then annealing for 15 min at 450 °C. All technological operations, analysis of the structure and elemental composition of the surface have been carried out in ultrahigh vacuum setup equipped with an electron Auger spectrometer, scanning tunneling microscope (STM), quadrupole mass spectrometer, the gas inlet and the sample heating systems. STM images have been recorded over a wide range of tunnel bias  $U_t = (-1,30 \div +1,00)$  V.

The proposed method of synthesis provides formation of N-doped epitaxial monocrystalline graphene on the Ni(111). STM and density functional theory calculations used jointly allow us to say that the nitrogen atoms basically substitute carbon atoms in graphene lattice or are in bivacancy (pyridine defect) with a total concentration about 0,3 %. The experimental and calculated STM images analysis has been used to determine density of electron states and symmetry of atomic defects. After intercalation of gold monolayer into the graphene/Ni(111) interface, the graphene continuity has not been broken and the nitrogen concentration remained at the same level – 0,3 %.

1. D. Usachov et al., Nano Letters **11**, 5401 (2011).

SYNTHESIS AND PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF LIPOSOMES  
CONTAINING  $\text{CaF}_2: \text{Yb}^{3+}, \text{Re}^{3+}$  ( $\text{Re} = \text{Er}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$ ) CRYSTALLINE  
NANOSIZED PARTICLES FOR PHOTODYNAMIC THERAPY

M.N. Zharkov, A.A. Lyapin, V.P. Ageev, S.A. Khrushchalina, O.A. Kulikov,  
P.A. Ryabochkina

*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

*E-mail: [mikhail.zharkov.92@mail.ru](mailto:mikhail.zharkov.92@mail.ru)*

The photodynamic therapy (PDT) is the most sparing form of cancer treatment, because it has greater selectivity of action on tumor tissue compared to traditional chemotherapy and it has not the severe local and systemic complications that may occur during surgery time. This method of treatment includes the direct activation of photosensitizer molecules (PS) under exposure of the visible range laser radiation. The described process is accompanied by the forming of active singlet oxygen molecules and free radicals, which can cause necrosis and apoptosis of cancer cells. Currently, in clinical practice for PDT, a large number of photosensitizers having a maximum absorption in the red region of the spectrum (650-800 nm) are used. However, this range does not correspond to the maximum optical transparency ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ) of biological tissues that complicates PDT for the deep localisation tumors.

In our work, we presented a PS liposomal form for carrying out PDT of deep-lying tumors (up to  $\approx 7 \text{ cm}$ ) with using laser radiation, which has a near infrared (IR) spectral range. The developed system is a chemically stabilized nucleus on base nanoparticles  $\text{CaF}_2: \text{Yb}^{3+}, \text{Re}^{3+}$  ( $\text{Re} = \text{Er}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$ ), which have a lipid bilayer cover with included PS molecules. The  $\text{Yb}^{3+}$  ions contained into the nanoparticle composition give the effective absorption of laser radiation with wavelengths 980 nm. As a result of nonradiative transfer, the absorbed energy can be transferred to the energy levels of other rare-earth ions ( $\text{Er}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$ ), that will lead to the appearance of their luminescence in the visible spectral range through by up-conversion mechanism. Thus, the IR radiation will be transformed to shortwave light, which corresponds to the visible spectral range and it will be absorbed by the PS. An important feature of the proposed liposomal system is the possibility of imparting additional "vector" properties through various receptors and specific antibodies, which can increase the efficiency of PDT.

In our work proposed a method for the synthesis of these nanostructures and described of their some physico-chemical properties.

## SPECIFIC SURFACE OF MULTISTABLE CARBON NANOTUBES

E.S. Klimov<sup>1</sup>, M.V. Buzaeva<sup>1</sup>, I.A. Makarova<sup>1</sup>, O.A. Davydova<sup>1</sup>,  
E.S. Vaganova<sup>1</sup>, N.A. Bunakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia*

<sup>2</sup>*Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia*

*E-mail: [eugen1947@mail.ru](mailto:eugen1947@mail.ru)*

Multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) were obtained on a laboratory installation using the MOCVD method using precursors of ferrocene and toluene [1]. The diameter of nanotubes is 20-120 nm, most of which are 40-60 nm, and several tens of microns in length. The porosity of carbon nanotubes was determined by capillary nitrogen condensation. The specific surface area was determined by the BET method (Brunauer-Emmett-Teller), the pore size distribution and the specific pore volume were determined by the BJH method (Barrett-Joyner-Halendy) [2]. The isotherms of the adsorption isotherm correspond to type II isotherms and are characteristic of nonporous adsorbents (fig. 1).

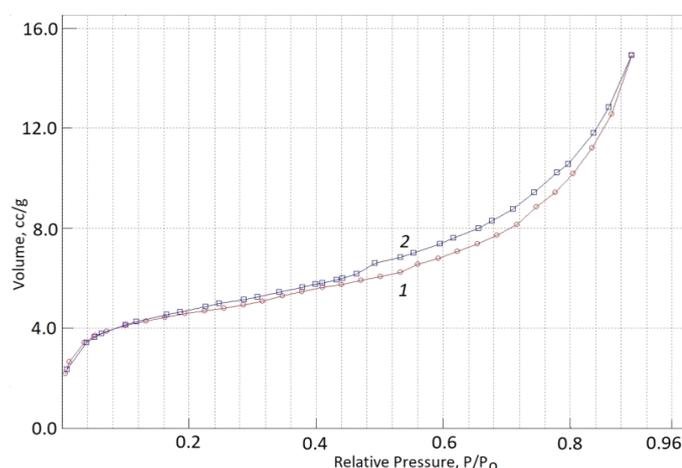


Fig. 1. Nitrogen Adsorption-Desorption Isotherms for MWNTs: 1 - adsorption; 2 - desorption.  
Quantachrome NOVA 1000 e Analyzer

The specific surface area of the MWNT is 16,33 m<sup>2</sup>/g, the pore diameter with a narrow distribution of 19,23 nm, a specific pore volume of 0,019 ml/g. which is comparable with the literature data [3].

1. E.S. Klimov, M.V. Buzaeva, O.A. Davydova et al., *ZhPH* **87**, 1128 (2014).
2. A.S. Vyacheslavov, E.A. Pomerantseva, *Measurement of area and porosity by capillary nitrogen condensation*, M.: MSU, 2006.
3. M. Maryam, *Advanced Materials Research* **626**, 289 (2013).

## THE SORPTION PROPERTIES OF ZEOLITE DOPED WITH CARBON NANOTUBES

T.Yu. Dyachkova, M.V. Buzaeva, I.A. Makarova, O.A. Davydova, E.S. Klimov  
*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia*  
*E-mail: [m.buzaeva@mail.ru](mailto:m.buzaeva@mail.ru)*

Introduction to natural minerals of nanocarbon structures can significantly improve the sorption properties of natural minerals, and on this basis, a new generation of composite materials for the sorption treatment of industrial wastewater from oil products and heavy metals can be created. As the sorbents used natural minerals deposits of the Ulyanovsk region. Modification of sorbents by multiwalled carbon nanotubes was carried out (MWNT) at a ratio of solid and liquid phases T: Ж = 1:10. 100 ml of an aqueous suspension formed of carbon nanotubes and water was sonicated for 6-8 min, 1 g of aluminum sulfate, 10 g of the impurity-free sorbent (diatomite, flask, zeolite) was sequentially introduced and subjected to an ultrasonic action for a further 2-3 min. After cessation of the ultrasonic effect, a uniform light gray fine powder is precipitated for 20-60 minutes. Sorption properties of minerals were determined by the static method at a ratio of T: H = 1:50. The residual concentration of pollutants was determined in the filtrate. At various concentrations of metal ions, adsorption isotherms were constructed in the solution and the main parameters of the adsorption of ions on the zeolite for the modified (0,2 wt. % MWNT) and unmodified zeolite under ultrasound exposure for 120 s were determined.

Graphical analysis of adsorption isotherms of metal ions indicates the best sorption properties of the modified zeolite with respect to zinc ions. The same value of maximum adsorption is observed for copper using a modified zeolite. Compared with unmodified zeolite, the recovery rate is increased by 25 %.

Intensification of sorption processes with the use of modified zeolite and ultrasonic action (in comparison with sorption on zeolite under ordinary static conditions) allowed to reduce the processing time of solutions contaminated with zinc and copper ions from 4 h to 120 s. The degree of extraction of heavy metal ions reaches 98 %. Sorption purification is economically feasible with a total content of heavy metal ions in waste water of less than 20 mg/l.

SYNTHESIS AND ELECTRON-MICROSCOPIC ANALYSIS OF HYBRID  
MATERIALS BASED ON MULTI-WALL CARBON NANOTUBES  
AND NANO-COATINGS Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub>

I.V. Vilkov<sup>1</sup>, K.V. Kremlev<sup>2</sup>, P.V. Andreev<sup>1</sup>, G.S. Zabrodina<sup>2</sup>, A.M. Obyedkov<sup>2</sup>,  
B.S. Kaverin<sup>2</sup>, N.M. Semenov<sup>2</sup>, C.U. Ketkov<sup>2</sup>, M.A. Faddeev<sup>1</sup>, S.A. Gusev<sup>3</sup>,  
D.A. Tatarsky<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>2</sup>*Rasuvaev Institute of Metalorganics Chemistry RAS, Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>3</sup>*Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhny Novgorod, Russia*

*E-mail: [mr.vilkof@yandex.ru](mailto:mr.vilkof@yandex.ru)*

Hybrid materials based on multi-walled carbon nanotubes (MWNTs), the surface of which is decorated with nanoparticles of metal oxide, represent a new class of functional nanomaterials, which have wide set of applications in various fields of science and industry. The materials arouse large interest due to perspectives of their application as components in high-temperature ceramic matrix composites for improvement of mechanical and electronic properties, and ones have exceptional photocatalytic, electrocatalytic and sensory properties.

For synthesize hybrid materials based on MWCNs and nanocoatings of metal oxides, particularly Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub>, we used the method of metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) on a specially designed experimental installation. It presents a vertical tubular quartz reactor with a heating furnace system. The precursor of the nanocoating (aluminum acetylacetonate or zirconium acetylacetonate) is placed into the evaporator area of heater. MWNTs are placed into the pyrolysis area of heater, upon decomposition of the precursor the coating is deposited on them. Synthesis goes on with a continuous pumping of the reactor and with a slow heating of the furnaces to the required evaporation and decomposition temperatures of the precursors.

The final hybrid materials were researched by means of scanning electron microscope Carl Zeiss SUPRA 50 VP and transmission electron microscope Carl Zeiss LIBRA 200MC. The analysis of synthesized hybrid materials was held by these methods allowed to identify morphology, structure and composition of materials on different areas of samples.

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant № 18-33-00776).

## STUDY OF ELASTIC DEFORMATIONS IN X-RAY OPTICS ELEMENTS

V.V. Gribko, V.N. Trushin, A.S. Markelov

*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*

*E-mail: [gribkovaldimir@icloud.com](mailto:gribkovaldimir@icloud.com)*

At present, the adaptive x-ray optics elements are increasingly used to control the parameters of the x-ray beam along with stationary x-ray elements [1-4]. The interactive control of X-ray beam convergence parameters is important for solving problems of focusing and collimation of X-ray beams and can be applied in such areas as medicine, astronomy, biological objects research, and also in micro- and nanoelectronics.

In paper [5], a method of focusing x-ray radiation based on the use of crystals with a variable period is proposed. It is pointed out that in such crystals the width of the boundaries of the diffraction reflection region depends on the type of deformation profile, which makes it possible to create focus systems. These studies indicate the need to take into account deformation fields when focusing X-ray beams using deform crystals.

This paper presents the results of a study of the diffraction element deformation (Si single-crystalline plate) that occurred during the formation of the bending module, the possibility of using it as an adaptive x-ray optical element is shown in [3, 4]. The deformation analysis was carried out by relative displacement Bragg position of the peak (400) defined by the scanning of the different parts of the sample. The measurements were carried out on the diffractometer Bruker D8 Discover.

According to the experimental data and calculated data, the relative deformations arising when the Si plate is bent do not exceed  $5,5 \cdot 10^{-6}$ . From the data obtained, it can be concluded that the deformations in the diffractive element have little effect when the bending module is formed to control the convergence of the X-ray beam.

1. C. Atkins et al., Proc. of SPIE **6721**, 67210T-2 (2008).
2. V.N. Trushin, E.V. Chuprunov et al., Surface. Roentgen., sync. and the neutron. **5**, 28 (2017).
3. V.V. Gribko, V.N. Trushin et al., Nanophysics and nanoelectronics. Proceedings of the XX international Symposium **1**, 387 (2017).
4. A.V. Andreev, JETP Letters **74**, 8 (2001).

# OPTICAL GENERATION IN AMPLIFYING PHOTONIC CRYSTAL WITH MONOLAYER OF METALL NANOPARTICLES

I.A. Glukhov<sup>1</sup>, S.G. Moiseev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia*

<sup>2</sup>*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Ulyanovsk, Russia*

*E-mail: [glukhov91@yandex.ru](mailto:glukhov91@yandex.ru)*

We investigate spectral characteristics of the photonic crystal structure with a monolayer of silver elliptic-shaped nanoparticles.

We use matrix method for interfaces to calculate the reflectivity and transmission of the structure. Optical characteristics of the interface between two material media are determined by the Fresnel reflection and transmission coefficients. Since an array of nanoparticles interacts with an electromagnetic wave like a plane interface between two media, it is also considered as an interface with some proper reflection and transmission coefficients. The reflection and refraction coefficients of a monolayer are calculated with a package of specialized physical modeling programs.

The possibility of selective generation of polarized light in a photonic crystal structure with a monolayer of metallic nanoparticles is shown. The reflection and transmission coefficients of a monolayer are determined by the plasmon resonance in nanoparticles and depend on the surface concentration and shape of the nanoparticles. Dependence on the orientation of the anisotropy axis of the monolayer and the direction of light polarization leads to the separation of the modes of the photonic crystal structure.

1. Y. Dadoenkova, I. Glukhov, S. Moiseev et al., *Optics Communications* **389**, 1 (2017).
2. S.G. Moiseev, V.A. Ostatochnikov, *Quantum Electron.* **46**, 743 (2016).

## SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES AND CYTOXICITY OF NANOSIZED PARTICLES (YEr)PO<sub>4</sub>

A.V. Schuchkina, S.A. Khrushchalina, P.A. Ryabochkina, O.V. Minaeva,  
M.N. Zharkov

*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*  
*E-mail: [nastenka1220@gmail.com](mailto:nastenka1220@gmail.com)*

In the scientific literature there is a significant amount of work devoted to the study of morphology, phase composition, spectral-luminescent properties of nanosized particles of orthophosphates doped with RE ions [1-3]. Interest in them is due to the fact that in many works their use for biomedical applications is positioned.

In this paper the studies of the upconversion luminescence of the concentration series Y<sub>1-x</sub>Er<sub>x</sub>PO<sub>4</sub> (x = 0,25; 0,5; 0,75; 1) particles under excitation of <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> level (λ = 1,5 μm) of Er<sup>3+</sup> ions were performed. In this excitation method, upconversion luminescence was observed from <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub>, <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub>, <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub> and <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> levels of Er<sup>3+</sup> ions.

When the power density of the excitation radiation was higher than 1929 W/cm<sup>2</sup> the broadband radiation in the visible spectral range was observed for Y<sub>1-x</sub>Er<sub>x</sub>PO<sub>4</sub> (x = 0,25; 0,5; 0,75; 1) particles. Analysis of the characteristics of this radiation indicates its thermal nature.

An important condition determining the use of nanoparticles in biomedicine is the degree of their toxicity. In the work, the toxicity of (YEr)PO<sub>4</sub> nanosized dielectric particles was estimated, as result these particles can be characterized as a moderately toxic substance.

When the investigated powders with the concentration of Er<sup>3+</sup> ions from 0,15 mg/ml and higher were added to cells, 55% of their number remained viable. The half-maximal inhibitory concentration IC<sub>50</sub> of the (YEr)PO<sub>4</sub> nanoparticles was estimated as 0,894 and 1,383 mg/ml for 48 and 24 h incubation, respectively.

1. R. Balakrishnaiah, D. Kim, S. Yi et al., *Thin Solid Films* **518**, 6145 (2010).
2. S. Khrushchalina, P. Ryabochkina, V. Kashkin et al., *JETP Lett.* **103**, 342 (2016).
3. Yu.V. Orlovskii, *Optics Express* **5**, 1230 (2015).

# LUMINESCENCE NANOTHERMOMETRY OF $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$ SINGLE CORE AND $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3/\text{LaF}_3$ CORE/SHELL NANOPARTICLES

M.S. Pudovkin, O.A. Morozov, D.A. Koryakovtseva, R.Sh. Khusnutdinova,  
A.G. Kiiamov, A.S. Nizamutdinov, V.V. Semashko  
*Kazan Federal University, Kazan, Russia*  
*E-mail: jaz7778@list.ru*

The  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$  ( $C_{\text{Pr}} = 1\%$ ) plate like NPs (PNPs),  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$  ( $C_{\text{Pr}} = 1\%$ ) @ $\text{LaF}_3$  core shell PNPs,  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$  ( $C_{\text{Pr}} = 1\%$ ) SNPs and  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$  ( $C_{\text{Pr}} = 1\%$ ) @ $\text{LaF}_3$  core shell SNPs were synthesized via co-precipitation method.

Then decreasing of the intensity of the emission from  $^3\text{P}_0$  (e. g., at about 487 nm or 537 nm) and simultaneous increasing of the intensity of the emission from  $^3\text{P}_1$  (at 523 nm) can be attributed to the fact that  $^3\text{P}_1$  and  $^3\text{P}_0$  states share their electronic populations according to the Boltzmann process. For all the samples absolute sensitivity  $S_a = 0,01\text{ K}^{-1}$  at 300 K. As it is proved the  $S_a$  does not depend on the structure of the NPs. Fluorescence decay curves of  $^3\text{P}_0$  level for core PLNPs recorded at different temperatures upon 444 nm pulse laser excitation is shown on fig. 1.

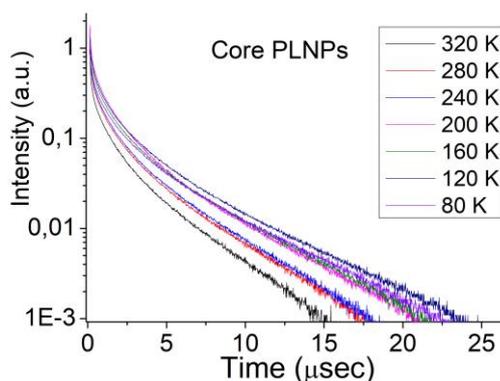


Fig.1. Fluorescence decay curves of  $^3\text{P}_0$  level

The  $^1\text{D}_2$  emission was not found or seems to be negligible for  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$ . Hence the lifetime of  $^3\text{P}_0$  state is not influenced by multophonon relaxation from  $^3\text{P}_0$  to  $^1\text{D}_2$  although this process is temperature dependent [1]. For  $^3\text{P}_0$ , however, thermally populating higher levels, which begin at  $544\text{ cm}^{-1}$  above  $^3\text{P}_0$ , is important. As was discussed above the rapid thermalization of the  $^3\text{P}_1$  in the absence of any nonradiative transitions to other lower states contributes into the temperature sensitivity of the samples. Additionally for system  $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$  concentration quenching takes place. This process is due to energy migration between  $\text{Pr}^{3+}$  ions and final quenching by a defect. The energy exchange between  $\text{Pr}^{3+}$  ions occurs via cross-relaxation.

1. M.J. Weber, The Journal of Chemical Physics **48**, 10 (1968).

## СПИСОК АВТОРОВ

Аверкиев Н.С.	60
Агеев В.П.	188
Азанова И.С.	26
Азарова Е.С.	71
Алимбеков М.С.	30, 35
Алтухов И.В.	66, 105
Алышев С.В.	21, 36, 143
Андреев П.В.	100, 101, 103, 191
Артемов С.А.	149
Афанасьев Ф.В.	29
Байдусь Н.В.	183
Барышников К.А.	68
Белов А.И.	182
Беляев А.Н.	148
Берсенева А.А.	152
Бжеумихов К.А.	31
Бжеумихов А.А.	31
Болдин М.С.	100
Большаков А.П.	105
Борик М.А.	93, 94, 97, 98, 99
Боричевский В.Р.	97, 99
Боряков А.В.	101
Будкин Г.В.	67
Бузаева М.В.	189, 190
Букин В.В.	145
Бунаков Н.А.	189
Бучинская И.И.	102
Бушукина О.С.	148
Ваганова Е.С.	189
Вайнер Ю.Г.	137
Васильевский И.С.	66
Вельмискин В.В.	22
Вилков И.В.	103, 191
Виниченко А.Н.	66
Волкова Т.В.	93, 94
Волкова Я.Ю.	184
Воробьев И.Л.	28
Воронин В.Г.	23
Воронов В.В.	185
Гайтко О.М.	152
Галаган Б.И.	25, 34
Гладилин А.А.	142
Глухов И.А.	193
Грачев П.В.	185

Грибко В.В.	192
Гулько Д.Ю.	20
Гурьев Д.А.	144
Гусев С.А.	191
Гущин С.В.	146, 147, 153
Давыдова О.А.	189, 190
Данилова Д.А.	38
Дворянчикова М.А.	148
Денисов А.Н.	22
Денкер Б.И.	25, 34
Дианов Е.М.	21, 22
Долматов Т.В.	145
Дьячкова Т.Ю.	190
Егорова О.Н.	25, 34
Егорова А.Е.	154
Егорышева А.В.	152
Ельцов К.Н.	90, 187
Ермаков А.С.	146, 147, 153
Жаворонкин А.В.	27
Жарков М.Н.	188, 194
Железов П.Е.	30, 35
Жлуктова И.В.	23, 34, 145
Жукова Л.В.	37, 38
Жукова Л.В.	20
Забродина Г.С.	103, 191
Зайнагутдинов А.Р.	72
Зверев П.Г.	141
Золотовский И.О.	33
Зыкова М.П.	104
Иванов В.А.	101, 154
Исупова Е.А.	101
Каверин Б.С.	103, 191
Каган М.С.	66, 105
Калачев А.А.	125
Калинушкин В.П.	142
Камынин В.А.	23, 25, 34, 145
Канищева О.И.	187
Каримов Д.Н.	102
Кашина Р.Р.	24
Кашуба И.А.	20
Кель О.Л.	26
Кетков С.Ю.	103, 191
Киямов А.Г.	195
Климов Е.С.	189, 190
Коваленко С.Л.	187
Конюшкин В.А.	147
Кораблева С.Л.	106
Королев Д.С.	182

Корсаков В.С.	20
Корсаков А.С.	20, 37, 38
Корсакова Е.А.	37
Коряковцева Д.А.	195
Кремлев К.В.	103, 191
Кривобок В.С.	142
Кривобородова С.Ю.	95
Кривовичев А.В.	28
Кузнецов С.В.	146, 174, 153, 185
Кузнецова О.А.	148
Кулаков Д.А.	73
Кулебякин А.В.	96, 97, 98, 99
Куликов О.А.	188
Курицина И.Е.	93, 69, 98
Ланцев Е.А.	100
Лапин В.А.	33
Ларина Н.А.	94
Лашова А.А.	38
Ломонова Е.Е.	93, 97, 98, 99, 94, 149
Лукинова Е.В.	106
Львов А.Е.	20
Ляпин А.А.	146, 147, 149, 153, 188
Мадиров Э.И.	150, 151
Макарова И.А.	189, 190
Максимова Г.М.	71
Манцевич В.Н.	62
Маргушев З.Ч.	31
Марисов М.А.	106
Маркелов А.С.	192
Марычев М.О.	154
Мастин А.А.	27
Мелькумов М.А.	22, 29, 143
Милович Ф.О.	96, 97, 98, 99
Минаев В.П.	127
Минаева О.В.	194
Минкин А.М.	32
Михайлов А.Н.	182
Моисеев С.Г.	193
Морозов О.А.	195
Морозова Е.А.	74
Муфтахитдинова Н.А.	37
Мызина В.А.	93, 97, 98, 99, 94
Накладов А.Н.	147
Наний О.Е.	23
Низамутдинов А.С.	106, 150, 151, 195
Николов В.С.	154
Никольская А.А.	182
Новиков А.В.	183

Образцов П.А.	145
Образцова Е.Д.	178
Объедков А.М.	103, 191
Охримчук А.Г.	145
Павлов Д.А.	182, 183
Павлова Т.В.	187
Пакалин А.Б.	28
Палашов О.В.	138
Папроцкий С.К.	66, 105
Первадчук В.П.	24
Перов А.А.	74
Петрова О.Б.	95, 104
Петросян Т.К.	184
Поминова Д.В.	185
Понарина М.В.	145
Поносова А.А.	24, 25, 26, 34
Попов С.	30
Попова М.Н.	92
Пройдакова В.Ю.	146, 153, 185
Пудовкин М.С.	195
Ральченко В.Г.	105
Рахматуллина А.Р.	26
Риссанен Й.	30
Родионов Н.Б.	105
Рожанский И.В.	64
Романишкин И.Д.	185
Рульков А.С.	74
Рыбин М.Г.	145
Рыков А.В.	183
Рюмкин К.Е.	22
Рябова А.В.	185
Рябочкина П.А.	93, 97, 99, 94, 146, 147, 148, 149, 152, 153, 186, 194, 188
Салимгареев Д.Д.	20
Сверчков С.Е.	25, 34
Семашко В.В.	106, 150, 151, 195
Семенов С.Л.	22, 25, 34
Семенов Н.М.	103, 191
Семенцов Д.И.	33
Сидорова Н.В.	97, 99
Симановский Д.В.	154
Сироткин А.А.	141
Сметанина К.Е.	100
Смирнов А.С.	24
Смирнов И.В.	141
Смирнов С.А.	28
Созонов Н.С.	32
Соколовский Г.С.	124

Сологуб А.С.	104
Степанова И.В.	95
Сушков А.А.	182, 183
Табачкова Н.Ю.	93, 97, 98, 99, 94
Таракановский А.А.	145
Тарасенко С.А.	61
Таратынова А.Д.	152
Татарский Д.А.	191
Тебеньков А.В.	184
Тележников А.В.	72
Тетельбаум Д.И.	182
Тихомирова Г.В.	184
Трушин В.Н.	192
Уваров О.В.	142
Устимчик В.	30
Фаддеев М.А.	101, 103, 191
Фадеев К.М.	32
Фарухшин И.И.	151
Федоров П.П.	146, 147, 153
Филиппов В.Н.	30
Фирстов С.В.	21, 22, 29, 36, 143
Фирстова Е.Г.	21, 36
Харахордин А.В.	21, 36
Хвальковский Н.А.	105
Хегай А.М.	29, 143
Хмельницкий Р.А.	105
Хомицкий Д.В.	73
Хомяков А.В.	104
Хопин В.Ф.	22
Хрущалина С.А.	94, 148, 186, 188, 194, 152
Хуснутдинова Р.Ш.	195
Цветков В.Б.	23, 25, 34
Цибинкина М.К.	26
Чабушкин А.Н.	149
Чаморовский Ю.К.	28, 30
Ченцов С.И.	142
Чернов М.В.	153
Числов А.С.	96, 98
Шавельев А.А.	106, 150, 151
Шакиров А.А.	106, 150, 151
Шевцов Д.И.	32
Шилова Г.В.	141
Шульга Н.Ю.	96
Щучкина А.В.	194
Юрасов Д.В.	183
Юрлов И.А.	148, 186

## AUTHOR INDEX

Afanasiev F.V.	49
Ageev V.P.	205
Alimbekov M.S.	50, 55
Altukhov I.V.	81, 121
Alyshev S.V.	41, 56, 164
Andreev P.V.	116, 117, 119, 208
Artemov S.A.	170
Arushanov E.	76
Azanova I.S.	46, 85
Baidus N.V.	200
Baryshnikov K.A.	83
Belov A.I.	199
Belyaev A.N.	169
Berseneva A.A.	173
Bodnar I.V.	76
Bol'shakov A.P.	121
Boldin M.S.	116
Borichevskii V.R.	113, 115
Borik M.A.	109, 113, 114, 115, 110
Boryakov A.V.	117
Buchinskaya I.I.	118
Budkin G.V.	82
Bukin V.V.	166
Bunakov N.A.	206
Bushukina O.S.	169
Buzaeva M.V.	206, 207
Bzheumikhov K.A.	51
Bzheumikhov A.A.	51
Cefalas A.C.	198
Chabushkin A.N.	170
Chamorovskii Y.K.	48, 50
Chentsov S.I.	163
Chernov M.V.	174
Chislov A.S.	112, 114
Danilova D.A.	58
Davydova O.A.	206, 207
Denisov A.N.	42
Denker B.I.	45, 54
Dianov E.M.	41, 42
Dolmatov T.V.	166
Dvoryanchkova M.A.	169
Dyachkova T.Yu.	207
Egorova O.N.	45, 54
Egorova A.E.	175
Egorysheva A.V.	173
Eltsov K.N.	204

Ermakov A.S.	167, 168, 174
Faddeev M.A.	117, 119, 208
Fadeev K.M.	52
Farukhshin I.I.	172
Fedorov P.P.	167, 168, 174
Ferraro A.	198
Filippov V.N.	50
Firstov S.V.	41, 42, 49, 56, 164
Firstova E.G.	41, 56
Gaitko O.M.	173
Galagan B.I.	45, 54
Gavriil V.E.	198
Gladilin A.A.	163
Glukhov I.A.	210
Grachev P.V.	202
Gribko V.V.	209
Guc M.	76
Gul'ko D.Y.	40
Guryev D.A.	165
Gusev S.A.	208
Gushchin S.V.	167, 168, 174
Hajdeu-Chicarosh E.	76
Isupova E.A.	117
Ivanov V.A.	117, 175
Kagan M.S.	81, 121
Kalachev A.A.	156
Kalinushkin V.P.	163
Kamynin V.A.	43, 45, 54, 166
Kanischeva O.I.	204
Karimov D.N.	118
Kashina R.R.	44
Kashuba I.A.	40
Kaverin B.S.	119, 208
Kel O.L.	46
Ketkov S.Yu.	119, 208
Kharakhordin A.V.	41, 56
Khegai A.M.	49, 164
Khmel'nitskiy R.A.	121
Khomitsky D.V.	87
Khomyakov A.V.	120
Khopin V.F.	42
Khrushchalina S.A.	110, 169, 173, 203, 205, 211
Khusnutdinova R.Sh.	212
Khval'kovskiy N.A.	121
Kiiamov A.G.	212
Klimov E.S.	206, 207
Kollia Z.	198
Konyushkin V.A.	168

Korableva S.L.	122
Korolev D.S.	199
Korsakov V.S.	40
Korsakov A.S.	40, 57, 58
Korsakova E.A.	57
Koryakovtseva D.A.	212
Kovalenko S.L.	204
Kremlev K.V.	119, 208
Krivobok V.S.	163
Krivoborodova S.Yu.	111
Krivovichev A.V.	48
Kulakov D.A.	87
Kulebyakin A.V.	112, 113, 114, 115
Kulikov O.A.	205
Kuritsyna I.E.	109, 112, 114
Kuznetsov S.V.	167, 168, 174, 202
Kuznetsova O.A.	169
Lähderanta E.	76
Lantsev E.A.	116
Lapin V.A.	53
Larina N.A.	110
Lashova A.A.	58
Levcenko S.	76
Lisunov K.G.	76
Lomonova E.E.	109, 113, 114, 115, 110, 170
Lukinova E.V.	122
Lvov A. E.	40
Lyapin A.A.	167, 168, 170, 174, 205
Madirov E.I.	171, 172
Makarova I.A.	206, 207
Maksimova G.M.	85
Margushev Z.Ch.	51
Marisov M.A.	122
Markelov A.S.	209
Marychev M.O.	175
Mastin A.A.	47
Melkumov M.A.	42, 49, 164
Mikhaylov A.N.	199
Milovich F.O.	112, 113, 114, 115
Minaeva O.V.	211
Minkin A.M.	52
Moiseev S.G.	210
Morozov O.A.	212
Morozova E.A.	88
Muftakhitdinova N.A.	57
Mysina V.A.	113, 109, 114, 115, 110
Nakladov A.N.	168
Nanii O.E.	43

Nikolov V.S.	175
Nikolskaya A.A.	199
Nizamutdinov A.S.	122, 171, 172, 198, 212
Novikov A.V.	200
Obraztsov P.A.	166
Obyedkov A.M.	119, 208
Okhrimchuk A.G.	166
Pakalin A.B.	48
Palashov O.V.	159
Paprotskiy S.K.	81, 121
Pavlov D.A.	199, 200
Pavlova T.V.	204
Perov A.A.	88
Pervadchuk V.P.	44
Petrosyan T.K.	201
Petrova O.B.	111, 120
Pominova D.V.	202
Ponarina M.V.	166
Ponosova A.A.	44, 45, 46, 54
Popov S.	50
Popova M.N.	108
Proydakova V.Yu.	167, 174, 202
Pudovkin M.S.	198, 212
Rakhmatullina A.R.	46
Ral'chenko V.G.	121
Rissanen J.	50
Riumkin K.E.	42
Rodionov N.B.	121
Romanishkin I.D.	202
Rozhansky I.V.	79
Rulkov A.S.	88
Ryabochkina P.A.	109, 113, 115, 110, 167, 168, 169, 170, 173, 174, 203, 205, 211
Ryabova A.V.	202
Rybin M.G.	166
Rykov A.V.	200
Salimgareev D.D.	40
Sarantopoulou E.	198
Schuchkina A.V.	211
Semashko V.V.	122, 171, 172, 198, 212
Semenov S.L.	42, 45, 54
Semenov N.M.	119, 208
Sementsov D.I.	53
Shakhov M.	76
Shakirov A.A.	122, 171, 172
Shavelev A.A.	122, 171, 172
Shevtsov D.I.	52
Shilova G.V.	162
Shulga N.Yu.	112

Sidorova N.V.	113, 115
Simanovsky D.V.	175
Sirotkin A.A.	162
Smetanina K.E.	116
Smirnov A.S.	44
Smirnov I.V.	162
Smirnov S.A.	48
Sokolovskii G.S.	155
Sologub A.S.	120
Sozonov N.S.	52
Stepanova I.V.	111
Sushkov A.A.	199, 200
Sverchkov S.E.	45, 54
Tabachkova N.Yu.	109, 113, 114, 115, 110
Tarakanovsky A.A.	166
Tarasenko S.A.	78
Taratynova A.D.	173
Tatarsky D.A.	208
Tebenkov A.V.	201
Telezhnikov A.V.	86
Tetelbaum D.I.	199
Tikhomirova G.V.	201
Trushin V.N.	209
Tsibinogina M.K.	46
Tsvetkov V.B.	43, 45, 54
Ustimchik V.	50
Uvarov O.V.	163
Vaganova E.S.	206
Vasil'evskii I.S.	81
Vel'miskin V.V.	42
Vilkov I.V.	119, 208
Vinichenko A.N.	81
Volkova T.V.	109, 110
Volkova Ya.Yu.	201
Vorobiev I.L.	48
Voronin V.G.	43
Voronov V.V.	202
Yurasov D.V.	200
Yurlov I.A.	169, 203
Zabrodina G.S.	119, 208
Zakharchyk I.	76

Zaynagutdinov A.R.	86
Zelenikhin P.V.	198
Zharkov M.N.	205, 211
Zhavoronkin A.V.	47
Zhelezov P.E.	50, 55
Zhluktova I.V.	43, 54, 166
Zhukova L.V.	40, 57, 58
Zolotovskii I.O.	53
Zverev P.G.	162
Zykova M.P.	120