

Министерство образования и науки 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  
Фонд инфраструктурных и образовательных программ ОАО РОСНАНО

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

**Программа и сборник трудов  
15-й Международной научной конференции-школы  
Саранск, 11 октября – 14 октября 2016 г.**



МИНИСТЕРСТВО  
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Национальный исследовательский  
Мордовский государственный университет  
имени Н. П. Огарёва



НЦВО  
РАН



Технопарк-Мордовия



РОСНАНО

ФОНД ИНФРАСТРУКТУРНЫХ  
И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ



Нижегородский  
государственный  
университет  
им. Н. И. Лобачевского



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ



РФФИ



ГРУППА КОМПАНИЙ  
«ОПТИКЭНЕРГО»

САРАНСК  
ИЗДАТЕЛЬСТВО МОРДОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
2016

УДК 537.533.3:621.3.049.77

ББК В3

М341

Редакционная коллегия:

*Нищев К. Н. (отв. ред.), Рябочкина П. А. (отв. секр.),*

*Попова М. Н., Тарасенко С. А, Семашко В. В.*

М341

**Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники  
и волоконной оптики: физические свойства и применение :**  
прогр. и материалы 15-й Междунар. науч. конф.-шк., Саранск,  
11 окт. – 14 окт. 2016 г. / редкол.: К. Н. Нищев (отв. ред.)  
[и др.]. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2016. – 232с.  
ISBN 978-5-7103-3126-2

В сборник включены конспекты лекций и тезисы докладов 15-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.

УДК 537.533.3:621.3.049.77

ББК В3

ISBN 978-5-7103-3126-2

© Коллектив авторов, 2016

© Оформление Издательство

Мордовского университета, 2016

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УЧАСТНИКОВ

Конференция проводится Институтом физики и химии Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева в период с 11 октября по 14 октября 2016 года.

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

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 – 40 мин, приглашенные доклады 30 мин, устные сообщения – 10 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 Power Point 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 10 октября с 15.00 до 18.00 в фойе главного корпуса МГУ им. Н. П. Огарева (ул. Большевикская, 68), 11 октября 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: [ryabochkina@freemail.mrsu.ru](mailto:ryabochkina@freemail.mrsu.ru). При наличии данной 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. Огарева, ИФХ

Тел./факс: (8342) 24-24-44

E-mail: [ryabochkina@freemail.mrsu.ru](mailto:ryabochkina@freemail.mrsu.ru)  
[ryabochkina@mail.ru](mailto:ryabochkina@mail.ru)

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

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

Саранск, 11 октября – 14 октября 2016 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. Огарева, председатель

**К.Н. Нищев** – директор ИФХ МГУ им. Н. П. Огарева, 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»

**П.А. Рябочкина** – ученый секретарь

**Программный комитет:**

**Т.В. Антропова** – д.х.н., Институт химии силикатов им.

И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург, Россия;

**С.А. Григорьев** - д.т.н. Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия;

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

**В.Д. Кревчик** – д.ф.-м.н., Пензенский ГУ, Пенза, Россия;

**F. Kusmartsev** – Ph.D., Loughborough University, Loughborough, UK;

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

**В.В. Осико** – академик РАН, ИОФ РАН, Москва, Россия, председатель

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

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

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

**I. Sildos** - Ph.D., Tartu University, Tartu, Estonia;

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

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

**С.Н. Ушаков** – к.ф.-м.н., ИОФ РАН, Москва, Россия;

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

**П.П. Федоров** – д.х.н., ИОФ РАН, Москва, Россия;

**А.В. Шорохов** – д.ф.-м.н., МГУ им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия.

**Рабочая группа:**

Т.В. Волкова

Л.А. Куликов

Н.В. Моисеев

А.В. Голубьев

О.П. Лазарева

Д.В. Мягков

И.Н. Евтеева

А.А. Ляпин

М.А. Пятаев

Н.В. Сидорова

С.А. Хрущалина

А.Н. Чабушкин

Н.В. Янцен

## 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.



**Группа компаний «Оптикэнерго»** включает в себя ряд независимых предприятий. Компании, осуществляющие промышленное производство: «Саранскабель-Оптика», «ЭМ-КАБЕЛЬ», «ЭМ-КАТ», «ЭМ-ПЛАСТ», «САРМАТ», предприятия по оказанию услуг: Испытательный центр «Оптикэнерго», «Автотранс-Саранск», «ЭМ-ПРИНТ», кофе-бар «ПроКофий». Компании медицинского направления: «НОВОМЕД» и «МедЭстетКлиник». ООО «ЭМ-СЕРВИС» - предприятие по оказанию бытовых услуг. Представительства, созданные для продвижения товаров «Оптикэнерго» – Торговый Дом ЭМ-Кабель в России и Opticenergo GmbH за рубежом.

Сайт «Оптикэнерго»: <http://www.opticenergo.ru>.



**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.



# РОСНАНО

ФОНД ИНФРАСТРУКТУРНЫХ  
И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

**Фонд инфраструктурных и образовательных программ** создан в 2010 году в соответствии с Федеральным законом № 211-ФЗ «О реорганизации Российской корпорации нанотехнологий». Одобренная в ноябре 2013 года «Стратегия Фонда инфраструктурных и образовательных программ» определяет его место в Группе РОСНАНО как института, способствующего развитию инфраструктуры в сфере нанотехнологий для всех российских предприятий наноиндустрии, исключая портфельные компании РОСНАНО. Кроме того, Фонд является частью системы российских институтов развития («инновационного лифта»), формируемой в рамках государственной программы «Экономическое развитие и инновационная экономика».

В целях создания оптимальных условий для развития наноиндустрии Фонд инфраструктурных и образовательных программ ведет работу в семи основных направлениях:

- развитие технологической инфраструктуры;
- создание кадрового потенциала отрасли;
- развитие рынков инновационной продукции;
- стандартизация, сертификация и оценка безопасности нанотехнологической продукции;
- метрологическое обеспечение наноиндустрии;
- совершенствование законодательства в области инноваций;
- популяризация нанотехнологий.



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

**ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ**

ОАО "Электровыпрямитель" – крупнейшая российская электротехническая компания с богатым опытом в области разработок и производства силовых полупроводниковых приборов и оборудования для нужд многих отраслей промышленности, энергетики и транспорта.

Основные направления деятельности ОАО "Электровыпрямитель":

- разработка и производство высокоэффективных полупроводниковых приборов силовой электроники;
- разработка и производство энергосберегающего преобразовательного оборудования.

# ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ-ШКОЛЫ

11 октября 2016, вторник

07:00–08:00	<b>ЗАЕЗД УЧАСТНИКОВ</b>
08:00–08:30	<b>РЕГИСТРАЦИЯ</b>
08:30–09:00	<b>ЗАВТРАК</b>
12:00–13:00	<b>ОБЕД</b>
13:00–13:30	<b>ТОРЖЕСТВЕННОЕ ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ-ШКОЛЫ</b> <i>С.М. Вдовин, председатель Организационного комитета</i>
13:30-15:00	<b>ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ, ПОСВЯЩЕННОЕ 100-ЛЕТИЮ ЛАУРЕАТА НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ, АКАДЕМИКА А.М. ПРОХОРОВА</b> <i>Сопредседатели: академик РАН Е.М. Дианов, академик РАН В.В. Осико</i>
13:30–14:15	<i>В.В. Осико, М.Н. Попова</i> <i>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва</i> <b>К ИСТОРИИ СОЗДАНИЯ ЛАЗЕРА</b> <b>(К 100-ЛЕТИЮ ЛАУРЕАТА НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ, АКАДЕМИКА А.М. ПРОХОРОВА)</b>
14:15–15:00	<i>Е.М. Дианов</i> <i>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва</i> <b>А.М. ПРОХОРОВ И ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА</b>
15:00-15:15	<b>ПЕРЕРЫВ</b>
15:15–16:00	<i>В.В. Семашко</i> <i>Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань</i> <b>А.М. ПРОХОРОВ И СТАНОВЛЕНИЕ КАЗАНСКОЙ ШКОЛЫ ПО КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ</b>
16:15–17:00	<i>П.А. Рябочкина</i> <i>Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск</i> <b>ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ НА ОСНОВЕ ПРОЗРАЧНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ</b>
17:00–17:45	<i>Ю.Г. Вайнер</i> <i>Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва</i> <b>ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ СВЕРХВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ</b>
18:00	<b>ПРИВЕТСТВЕННЫЙ УЖИН</b>

12 октября 2016, среда

08:00-09:00	<b>ЗАВТРАК</b>
	<b>ДКИ МГУ им. Н.П. Огарёва</b>
09:00-10:30	<b>ЛЕКЦИИ</b> <i>Председатель: д.ф.-м.н. В.В. Семашко</i>
09:00-09:40	<u><b>Н.С. Аверкиев</b></u> Физико-технический институт им. Иоффе, Санкт-Петербург <b>СЛАБАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ И АНТИЛОКАЛИЗАЦИЯ В МНОГОДОЛИННЫХ НАНОСТРУКТУРАХ</b>
09:40-10:20	<u><b>С.А. Тарасенко</b></u> Физико-технический институт им. Иоффе, Санкт-Петербург <b>ДРОЖАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ</b>
10:20-10:35	<b>ПЕРЕРЫВ</b>
10:35-11:15	<u><b>П.Б. Родин</b></u> Физико-технический институт им. Иоффе, Санкт-Петербург <b>СВЕРХБЫСТРЫЕ ЛАВИННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ИМПУЛЬСНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ПИКОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА</b>
11:15-11:55	<u><b>М.С. Каган</b></u> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва <b>ТУННЕЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ В СВЕРХРЕШЕТКАХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ТГЦ РЕЗОНАТОРОМ</b>
12:00–13:00	<b>ОБЕД</b>
13:05-17:45	<b>ЛЕКЦИИ</b> <i>Председатель: д.ф.-м.н. П.А. Рябочкина</i>
13:05-13:45	<u><b>Н.Л. Шварц</b></u> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск <b>МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР A<sup>III</sup>B<sup>V</sup></b>
13:45-14:25	<u><b>А.В. Крайский</b></u> Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва <b>О ГОЛОГРАФИИ: ЧТО ЭТО ТАКОЕ, КАК ОНА ВОЗНИКЛА И ДЛЯ ЧЕГО НУЖНА</b>
14:25-15:05	<u><b>С.А. Григорьев</b></u> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва <b>НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ</b>
15:05-15:20	<b>ПЕРЕРЫВ</b>
15:20-16:00	<u><b>Г.Е. Малашкевич</b></u> Институт физики им. Б.И. Степанова Республики Беларусь, Минск <b>АКТИВИРОВАННЫЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЕ АЛМАЗЫ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ</b>
16:00-16:40	<u><b>К.Н. Болдырев</b></u> Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва <b>ЦЕНТРЫ ОКРАСКИ В АЛМАЗЕ: ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ</b>
16:40-17:20	<u><b>А.В. Князев</b></u> Национальный исследовательский Нижегородский университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>ХИМИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ</b>
18:00–19:00	<b>УЖИН</b>
19:00–20:30	<b>СТЕНДОВАЯ СЕССИЯ (холл перед ауд. №1 )</b>



13 октября 2016, четверг

08:00-09:00	<b>ЗАВТРАК</b>	
9:00-10:30	<b>ПРИГЛАШЕННЫЕ ДОКЛАДЫ</b> Председатель д.ф.-м.н. М.Н. Попова	
9:00-9:30	<u><b>А.В. Платонов</b></u> ФТИ им. Иоффе, Санкт-Петербург <b>ОПТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР</b>	
9:30-10:00	<u><b>С.А. Климин</b></u> Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва <b>ФОНОНЫ И СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ</b>	
10:00-10:30	<b>ПЕРЕРЫВ</b>	
10:30-13:00	<b>ЗАСЕДАНИЯ СЕКЦИЙ</b>	
	<b>Ауд. 1</b>	<b>Ауд. 2</b>
	<b>ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ</b> Председатель: д.ф.-м.н. П.Г. Зверев	<b>ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА</b> Председатель: к.ф.-м.н. К.Н. Нищев
10:30-10:40	<u><b>С.В. Фирстов<sup>1,2</sup>, М. Zhao<sup>3,4</sup>, L. Su<sup>3</sup>, Q.H. Yang<sup>4</sup>, Е.Г. Фирстова<sup>1</sup>, С.В. Алышев<sup>1</sup>, Е.М. Дианов<sup>1</sup></b></u> 1 - Научный центр волоконной оптики РАН, Москва 2 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск 3 - Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, China 4 - School of Materials Science and Engineering Shanghai University, China <b>ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА Na<sub>2</sub>O-GeO<sub>2</sub> СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ</b>	<u><b>А.С. Лобанов<sup>1</sup>, А.Н. Гурьянов<sup>1</sup>, С.В. Фирстов<sup>2</sup></b></u> 1 - Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН, Нижний Новгород 2 - Научный центр волоконной оптики РАН, Москва <b>ПОЛУЧЕНИЕ СВЕТОВОДОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЧИСТОГО КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА, ЛЕГИРОВАННОГО ОЛОВОМ МЕТОДОМ МСVD И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ</b>
10:40-10:50	<u><b>О.Г. Гориев</b></u> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань <b>АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ АКОНВЕРСИОННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ КРАСНОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ИОНОВ Ho<sup>3+</sup> В КРИСТАЛЛЕ LiYbF<sub>4</sub>:Ho<sup>3+</sup></b>	<u><b>А.Н. Абрамов<sup>1</sup>, А.Н. Гурьянов<sup>1</sup>, М.В. Яшков<sup>1</sup>, А.Д. Плехович<sup>2</sup>, Л.Д. Исхакова<sup>2</sup>, В.В. Колташев<sup>2</sup></b></u> 1 - Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН, Нижний Новгород, 2 - Научный центр волоконной оптики РАН, Москва <b>ФОРМИРОВАНИЕ ФАЗЫ МУЛЛИТА В СЕРДЦЕВИНЕ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ХРОМОМ</b>
10:50-11:00	<u><b>А.В. Харахордин<sup>1</sup>, В.О. Соколов<sup>1</sup>, В.Г. Плотниченко<sup>1</sup>, А.Ю. Лаптев<sup>2</sup>, А.Н. Гурьянов<sup>2</sup></b></u> 1 - Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, 2 - Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН, Нижний Новгород <b>ВИДИМАЯ И БЛИЖНЯЯ ИК-ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СВИНЦОВЫХ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ В СТЕКЛАХ SiO<sub>2</sub></b>	<u><b>И.В. Жлуктова<sup>1,2</sup>, С.А. Филатова<sup>2</sup>, В.А. Камынин<sup>2</sup>, В.Б. Цветков<sup>2</sup></b></u> 1 - Московский технологический университет, Москва 2 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва <b>РАЗРАБОТКА ГОЛЬМИЕВОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ</b>
11:00-11:10	<u><b>С.С. Федотов<sup>1</sup>, А.С. Липатьев<sup>1</sup>, С.В. Лотарев<sup>1</sup>, И.С. Глебов<sup>1</sup>, П.Г. Казанский<sup>1,2</sup>, В.Н. Сигаев<sup>1</sup></b></u>	<u><b>В.Н. Захаров, Д.И. Каэтасьев, Г.И. Леонович</b></u> АО «Прогресс», Самара

	<p>1 - Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва 2 - University of Southampton, United Kingdom</p> <p><b>ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРЕШЕТОК В ЩЕЛОЧНОСИЛИКАТНЫХ СТЕКЛАХ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ</b></p>	<p><b>ДАТЧИК ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВНУТРИВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК</b></p>
11:10-11:20	<p><u>Л.А. Мочалов</u>, <u>А.В. Костров</u>, <u>А.В. Сириковский</u>, <u>А.В. Нежданов</u>, <u>А.И. Машин</u>, <u>А.В. Воротынцев</u>, <u>А.М. Воротынцев</u> 1 - Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород 2 – Национальный исследовательский Нижегородский университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород 3 - Нижегородский технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород</p> <p><b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НА СВОЙСТВА СТЕКОЛ СИСТЕМЫ AS-S ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ</b></p>	<p><u>Г.И. Леонович</u>, <u>С.В. Олешкевич</u>, <u>В.Н. Захаров</u>, <u>Н.В. Рясной</u> АО «Прогресс» г. Самара</p> <p><b>ПАССИВНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ</b></p>
11:20-11:30	<p><u>А.А. Ляпин</u><sup>1</sup>, <u>П.А. Рябочкина</u><sup>1</sup>, <u>В.В. Семашко</u><sup>2</sup>, <u>В.Г. Гориева</u><sup>2</sup>, <u>С.Л. Кораблева</u><sup>2</sup> 1 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва", Саранск 2 - Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань</p> <p><b>ГЕНЕРАЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА НА КРИСТАЛЛАХ <math>LiY_{0.3}Lu_{0.7}F_4: Pr</math> И <math>LiYF_4: Pr</math></b></p>	<p><u>Е.Н. Плетенева</u><sup>1,2</sup>, <u>А.Ф. Косолапов</u><sup>3</sup>, <u>А.Н. Колядин</u><sup>3</sup>, <u>А.В. Гладышев</u><sup>3</sup>, <u>А.Г. Охримчук</u><sup>1,3</sup> 1 - Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, 2 - Московский физико-технический институт, Москва, 3 - Научный центр волоконной оптики РАН, Москва</p> <p><b>ПЕРЕДАЧА СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ПО ВОЛОКОННОМУ СВЕТОВОДУ С ПОЛОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ</b></p>
11:30-11:40	<p><u>А.А.Шавельев</u>, <u>А.С.Низамутдинов</u>, <u>В.В.Семашко</u>, <u>М.С.Марисов</u> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань</p> <p><b>СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СО СТРУКТУРОЙ КОЛЬКВИРИИТА <math>LiCa_{1-x}Sr_xAlF_6:Ce^{3+}</math></b></p>	<p><u>В.А. Лазарев</u><sup>1</sup>, <u>С.О. Леонов</u><sup>1</sup>, <u>О.В.Малеев</u><sup>1</sup>, <u>С.Г. Сазонкин</u><sup>1</sup>, <u>А.А. Крылов</u><sup>2</sup>, <u>М.К. Тарабрин</u><sup>1</sup>, <u>В.Е. Карасик</u><sup>1</sup>, <u>А.Н. Киреев</u><sup>3</sup>, <u>М.А. Губин</u><sup>3,4</sup> 1-Научно-образовательный центр Фотоника и ИК-Техника, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва 2-Научный центр волоконной оптики РАН, Москва 3-Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва 4-Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва</p> <p><b>ВОЛОКОННЫЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЭРБИЕВЫЙ ЛАЗЕР ДЛЯ МЕТРОЛОГИИ</b></p>
11:40-11:50	<p><u>А.А. Соболев</u><sup>1</sup>, <u>В.Е. Шукшин</u><sup>1</sup>, <u>А.И. Зайцев</u><sup>2</sup> 1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва 2- Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск</p> <p><b>ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ</b></p>	<p><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>В.А. Камынин</u><sup>1</sup>, <u>А.А. Поносова</u><sup>1</sup>, <u>С.Е. Сверчков</u><sup>1</sup>, <u>С.Л. Семенов</u><sup>2</sup>, <u>В.Б. Цветков</u><sup>1</sup> 1 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва</p>

	<b>МАТЕРИАЛОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКИ SrV<sub>4</sub>O<sub>7</sub> И RbV<sub>4</sub>O<sub>7</sub> В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ, СТЕКЛООБРАЗНОМ И РАСПЛАВЛЕННОМ СОСТОЯНИИХ МЕТОДАМИ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА</b>	2 - Научный центр волоконной оптики РАН, Москва <b>ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ИСТОЧНИК НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> КОМПОЗИТНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА</b>
11:50-12:00	<b>О.Ю. Биткина<sup>1,2</sup>, А.П. Савикин<sup>1</sup>, О.Н. Еремейкин<sup>1,2,3</sup></b> 1- Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им.Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород 2 -ООО «МелСиТек», Дзержинск, 3- Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН, Нижний Новгород <b>ЛАЗЕР НА ПОЛИКРИСТАЛЛЕ Cr<sup>2+</sup>:ZnSe С СЕЛЕКТИВНЫМ РЕЗОНАТОРОМ</b>	<b>Я.А. Зазулин, Б.Н. Денисов</b> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск <b>ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ФОТОДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ ФОТОДИОДА В ОПТИКОВОЛОКОННЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ</b>
12:00-12:10	<b>С.Д. Великанов, К.В. Воронцов, В.А. Гарюткин, Н.Г. Захаров, В.Б. Коломеец, А.В. Ларионов, Г.Н. Номанов, Ю.Н. Фролов</b> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров <b>ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА ДВУХМИКРОННОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ Tm:YLF И Ho:YAG С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ</b>	<b>А.А. Пыntenков<sup>1</sup>, К.Н. Нищев<sup>1</sup>, В.М. Кяшкин<sup>1</sup>, С.В. Фирстов<sup>2</sup></b> 1- Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск, 2- Научный центр волоконной оптики РАН, Москва <b>ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И КОНЦЕНТРАЦИИ Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> НА СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА БАРИЙ-ГАЛЛО-ГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ</b>
12:10-12:20	<b>С.Д. Великанов, К.В. Воронцов, В.А. Гарюткин, Н.Г. Захаров, Г.М. Мищенко, А.В. Мухин, А.С. Надёжин, Н.И. Николаев</b> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров <b>ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНАЯ СИСТЕМА ГЕНЕРАТОР-УСИЛИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ Ho:YAG</b>	<b>М.В. Дяденко, И.А. Левицкий, Л.Ф. Папко</b> Белорусский государственный технологический университет, Минск <b>БОРОСИЛИКАТНЫЕ СТЕКЛА ДЛЯ ЖЕСТКОГО МНОГОЖИЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА</b>
12:20-12:30		<b>Д.С. Липатов, А.Н. Гурьянов</b> Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН, Нижний Новгород <b>ИЗГОТОВЛЕНИЕ АКТИВНЫХ СВЕТОВОДОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМОФОСФОРСИЛИКАТНОЙ МАТРИЦЫ</b>
10:30-13:00	<b>Ауд. 3</b> <b>НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ</b> <b>Председатель: д. ф.-м.н. Ю.Г. Вайнер</b>	
10:30-10:40	<b>Р.Г. Вахренев<sup>1</sup>, М.Н. Маякова<sup>2</sup>, С.В. Кузнецов<sup>2</sup>, А.В. Рябова<sup>2</sup>, Д.В. Поминова<sup>2</sup>, В.В. Воронов<sup>2</sup>, П.П. Федоров<sup>2</sup></b> 1 - Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 2 - Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН <b>ЭФФЕКТИВНЫЕ АП-КОНВЕРСИОННЫЕ ЛЮМИНОФОРЫ НА ОСНОВЕ ФТОРИДА КАЛЬЦИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ИТТЕРБИЕМ И ЭРБИЕМ</b>	

10:40-10:50	<b>Н. В. Латухина, Д.А. Лизункова, Г.А. Рогожина</b> Самарский государственный аэрокосмический университет, Самара <b>МНОГОСЛОЙНЫЕ СТРУКТУРЫ НА БАЗЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ</b>
10:50-11:00	<b>С.А. Хрущалина<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, В.М. Кяшкин<sup>1</sup>, А.С. Ванецев<sup>2</sup>, О.М. Гайтко<sup>3</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>4</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>5</sup></b> 1 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск 2 - Institute of Physics, Tartu, Estonia 3 - Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва 4 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва 5 - НИТУ МИСИС, Москва <b>ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА СПЕКТРА С УЬ-СОДЕРЖАЩИМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ</b>
11:00-11:10	<b>Д.А. Грачев<sup>1</sup>, С.А. Гарахин<sup>1</sup>, А.В. Белолипецкий<sup>2</sup>, А.Н. Яблонский<sup>1,3</sup>, Б.А. Андреев<sup>1,3</sup>, А.В. Ершов<sup>1</sup></b> 1 - Национальный исследовательский Нижегородский университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород 2 - Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, РАН, Санкт-Петербурга 3 - Институт физики микроструктур, РАН, Нижний Новгород <b>РЕЗОНАТОРНЫЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ СТРУКТУРЫ, СОДЕРЖАЩИЕ НАНОКРИСТАЛЛЫ КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ</b>
11:10-11:20	<b>М.Н. Жарков, С.А. Хрущалина<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, Н.А. Пятаев<sup>1</sup>, Г.Б. Сухоруков<sup>1,2</sup></b> 1 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск 2 - Queen Mary University of London, United Kingdom <b>КОМПОЗИТНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КАПСУЛ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ ОРТОФОСФАТОВ И ОРТОВАНАДАТОВ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ</b>
11:20-11:30	<b>М.Н. Маякова, П.П. Федоров, А.А. Лугинина, С.В. Кузнецов, В.В. Воронов</b> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва <b>ФАЗООБРАЗОВАНИЕ ПРИ СИНТЕЗЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ НАНОФТОРИДОВ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ</b>
11:30-11:40	<b>Ю.А. Рожнова, С.В. Кузнецов, М.Н. Маякова, В.В. Воронов, Р.П. Ермаков, А.В. Рябова, Д.В. Поминова, П.П. Федоров</b> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва <b>СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ АП-КОНВЕРСИОННЫХ ЛЮМИНОФОРОВ НА ОСНОВЕ НАНОПОРОШКОВ SrF<sub>2</sub>:Yb:R (R = Er, Tm)</b>
11:40-11:50	<b>А.В. Долганов, В.С. Храмов, В.В. Мишкин, А.П. Лопарева, К.Н. Нищев</b> Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск <b>ПОЛУЧЕНИЕ МЕТОДОМ ALD НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> НА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЯ</b>
11:50-12:00	<b>М.А. Пятаев<sup>1</sup>, М.В. Герасимов<sup>1</sup>, М.Н. Жарков<sup>1</sup>, И.А. Юрлов<sup>1</sup>, П.С. Замышляев<sup>1</sup>, Р.Р. Ганеев<sup>1</sup>, Н.А. Пятаев<sup>1</sup>, Г.Б. Сухоруков<sup>1,2</sup></b> <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫХ МАГNETИТ-СОДЕРЖАЩИХ МИКРОКАПСУЛ В БИООБЪЕКТАХ</b> 1 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, Саранск 2 - Queen Mary University of London, London, UK
13:00-13:30	<b>ОБЕД</b>
13:30-19:30	<b>Посещение центра мокшанской культуры (с. Старая Теризморга)</b>
19:30-20:00	<b>УЖИН</b>

14 октября 2016, пятница

08:00-09:00	<b>ЗАВТРАК</b>	
9:00-10:30	<b>ПРИГЛАШЕННЫЕ ДОКЛАДЫ</b> Председатель: д.ф.-м.н. Г.Е. Малашкевич	
9:00-9:30	<u><b>М.В. Дурнев</b></u> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН <b>МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КУЛОНОВСКИХ КОМПЛЕКСОВ В ТРИГОНАЛЬНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ GaAs/AlGaAs</b>	
9:30 -10:00	<u><b>С.В. Кузнецов<sup>1</sup>, П.П. Федоров<sup>1</sup>, Е.А. Гарибин<sup>1,2</sup>, В.В. Осико<sup>1</sup></b></u> 1 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва 2 - ЗАО ИНКРОМ, Санкт-Петербург <b>ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ФТОРИДОВ II И III ГРУПП ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ФОТОНИКИ</b>	
10:00-10:30	<u><b>И.А. Кокурин</b></u> 1 - Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН 2 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева <b>ТОНКАЯ СТРУКТУРА ЭКСИТОНОВ, ЛОКАЛИЗОВАННЫХ НА ОДИНОЧНЫХ АКЦЕПТОРАХ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ GaAs/AlGaAs</b>	
10:30-10:50	<b>ПЕРЕРЫВ</b>	
10:50-13:30	<b>Ауд. 1</b>	<b>Ауд. 2</b>
<b>ЗАСЕДАНИЯ СЕКЦИЙ</b>	<b>НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ</b> Председатель: д.ф.-м.н. М.Н. Попова	<b>ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ</b> Председатель: д.ф.-м.н. Н.С. Аверкиев
10:50-11:00	<u><b>К.Н. Нищеев<sup>1</sup>, М.И.Новопольцев<sup>1</sup>, В.В.Елисеев<sup>2</sup></b></u> 1 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск 2 - ОАО «Электровыпрямитель» <b>КОМПЛЕКСНЫЙ ПРОЕКТ «СОЗДАНИЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА СВЕРХМОЩНЫХ ПРИБОРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ И ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ В НАУКОЕМКИХ ОБЛАСТЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ТРАНСПОРТА И ЭНЕРГЕТИКИ»: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НИОКТР</b>	<u><b>В.В. Карпунин</b></u> Мордовский государственный педагогический институт, Саранск <b>РЕЗОНАНСЫ В ПОГЛОЩЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КВАНТОВОЙ ПРОВОЛОКЕ</b>
11:00-11:10	<u><b>Е.С. Ваганова<sup>1</sup>, О.А. Давыдова<sup>1</sup>, М.В. Бузаева<sup>1</sup>, Е.С. Климов<sup>1</sup>, В.А. Сергеев<sup>2</sup>, И.В. Фролов<sup>1</sup></b></u> 1 - Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск 2 - Ульяновский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск <b>АКРИЛОВЫЙ ПОЛИМЕР С ВКЛЮЧЕНИЕМ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК</b>	<u><b>А.А. Перов, А.С. Рульков</b></u> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ КЕРРА И ИНДУЦИРОВАННАЯ СПИНОВАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ СОСТОЯНИЙ НОСИТЕЛЕЙ В ПОВЕРХНОСТНОЙ СВЕРХРЕШЁТКЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ</b>
11:10-11:20	<u><b>А.С. Липатьев<sup>1</sup>, Г.Ю. Шахгильдян<sup>1</sup>, Т.О. Липатьева<sup>1</sup>, С.В. Лотарев<sup>1</sup>, С.С. Федотов<sup>1</sup>, М. П. Ветчинников<sup>1</sup>, В.Н. Сизаев<sup>1</sup>, П.Г. Казанский<sup>1,2</sup></b></u>	<u><b>Е.С. Азарова, Г.М. Максимова</b></u> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>ДОЛИННО-ЗАВИСИМЫЙ СДВИГ</b>

	<p>1 - Российский химико-технологический Университет им. Д.И. Менделеева, Москва, 2 - University of Southampton, United Kingdom</p> <p><b>МОДИФИЦИРОВАНИЕ СТЕКОЛ СИСТЕМЫ <math>Ag_2O-ZnO-P_2O_5</math> ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРА С ИМПУЛЬСАМИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ</b></p>	<p><b>ГУСА-ХЕНХЕН В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ СИЛИЦЕНА И ГРАФЕНА</b></p>
11:20-11:30	<p><u>Н. Ф. Рахимов</u>, А. С. Низамутдинов, В. В. Семашко Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань</p> <p><b>ФОТОИНДУЦИРУЕМЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ В КРИСТАЛЛАХ <math>CaF_2-LuF_3</math>, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ <math>Ce^{3+}</math> И <math>Yb^{3+}</math></b></p>	<p>М. В. Кочиев, <u>Е.В. Уцына</u>, В. А. Цветков, Н.Н. Сибельдин Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва</p> <p><b>ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА НА СПЕКТР ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЭКСИТОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЕ GaAs/AlGaAs С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ</b></p>
11:30-11:40	<p><u>М.О. Анурова</u>, Е.В. Ермолаева, А.В. Хомяков, О.Б. Петрова Российский химико-технологический Университет им. Д.И. Менделеева, Москва</p> <p><b>ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ОКСИХИНОЛИНОВЫХ МЕТАЛЛ-КОМПЛЕКСОВ И ФТОРОБОРАТНОЙ СТЕКЛЯННОЙ МАТРИЦЫ</b></p>	<p><u>Д.С. Королев</u>, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, И.Н. Антонов, Е.В. Окулич, Д.В. Гусейнов, О.Н. Горшков, Д.И. Тетельбаум Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород</p> <p><b>СИНАПТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ МЕМРИСТИВНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДА КРЕМНИЯ</b></p>
11:40-11:50	<p><u>К.Н. Болдырев</u><sup>1</sup>, <u>А.Д. Молчанова</u><sup>1</sup>, <u>Р.В. Писарев</u><sup>2</sup>, <u>D. Kamenskiy</u><sup>3</sup> 1 - Институт спектроскопии РАН, Москва 2 - Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург 3 - High Field Magnetic Laboratory, Radboud University, Nijmegen, Netherlands</p> <p><b>ФРУСТРИРОВАННЫЙ МАГНЕТИК <math>Ni_3(VO_3)_2</math>: ИССЛЕДОВАНИЕ СПИНОВЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ</b></p>	<p><u>А.Р. Зайнагутдинов</u>, А.В. Тележников Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород</p> <p><b>ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В СВЕРХРЕШЕТКАХ СО СПИНОРБИТАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ</b></p>
11:50-12:00	<p><u>М.А. Борик</u><sup>1</sup>, <u>В.Т. Бублик</u><sup>3</sup>, <u>С.И. Бредихин</u><sup>2</sup>, <u>А.В. Кулебякин</u><sup>1</sup>, <u>И.Е. Курицына</u><sup>2</sup>, <u>Е.Е. Ломонова</u><sup>1</sup>, <u>Ф.О. Милович</u><sup>3</sup>, <u>В.А. Мызина</u><sup>1</sup>, <u>В.В. Осико</u><sup>1</sup>, <u>Н.Ю. Табачкова</u><sup>3</sup> 1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва 2 -Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Москва 3- Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка</p> <p><b>СРАВНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ОКСИДАМИ ИТТРИЯ И СКАНДИЯ</b></p>	<p><u>К.Р. Власов</u>, М.А. Пятаев Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск</p> <p><b>ПРОЯВЛЕНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВАНЬЕ-ШТАРКА В СВЕРХРЕШЕТКЕ С ОГРАНИЧЕННЫМ ЧИСЛОМ СЛОЕВ</b></p>
12:00-12:10	<p><u>Л.С. Мазеев</u><sup>1,2</sup> С.А. Климин<sup>1</sup> 1-Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва 2- Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская область</p>	

	<b>ТРИ СЦЕНАРИЯ МАГНИТНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ <math>Cu_3R(SeO_3)_2O_2Cl</math> (<math>R=Er, Sm, Yb</math>): ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ</b>	
12:10-12:20	<b><u>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>, А.Н. Чабушкин<sup>1</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>3</sup></u></b> 1 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск 2 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва 3 -Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Москва, <b>ОПТИЧЕСКИЕ ЦЕНТРЫ ИОНОВ <math>Eu^{3+}</math> В КРИСТАЛЛАХ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ОКСИДОМ ИТТРИЯ, С ТЕТРАГОНАЛЬНОЙ И КУБИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ</b>	
12:20-12:30	<b><u>Е.Э. Дунаева<sup>1</sup>, Т.В. Чухловина<sup>1</sup>, Л.И. Иелева<sup>1</sup>, В.В. Колтышев<sup>2</sup></u></b> 1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва 2 -Научный центр волоконной оптики РАН, Москва <b>ВЫРАЩИВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛЛОВ <math>VGO</math></b>	
12:30-12:40	<b><u>Е.М. Колобкова, И.В. Степанова, О.Б. Петрова</u></b> Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва <b>СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ d- и f- ЭЛЕМЕНТАМИ</b>	
12:40-12:50	<b><u>Е.С. Игнатьева<sup>1</sup>, Н.В. Голубев<sup>1</sup>, М.З. Зиятдинова<sup>1</sup>, В.Н. Сигаев<sup>1</sup>, Р. Лоренци<sup>2</sup>, А. Палеари<sup>2</sup></u></b> 1 - Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва 2 - University of Milano-Bicocca, Milan, Italy <b>СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА СТЕКЛОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ <math>\gamma</math>-<math>Ga_2O_3</math></b>	
12:50-13:00	<b><u>В.Р. Боричевский, В.Т. Бублик, А.В. Кулебякин, Е.Е. Ломонова, В.А. Мызина, С.В. Серяков, Н.Ю. Табачкова</u></b> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва <b>ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ, СТРУКТУРОЙ, КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ТЕТРАГОНАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ</b>	

13:00-13:10	<b>Н.Н. Кузьмин, К.Н. Болдырев, Е.А. Добрецова</b> 1 - Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва 2 - Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва 3 - Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва <b>СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ГАЛЛИЕВЫХ БОРАТОВ СО СТРУКТУРОЙ ХАНТИТА</b>	
	<b>Ауд. 3</b>	
10:50-13:00	<b>ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ</b> <b>Председатель : д.ф.-м.н. П.А. Рябочкина</b>	
10:50-11:10	<b>Л.Д. Исхакова<sup>1</sup>, Ф.О. Милович<sup>1</sup>, В.М. Машинский<sup>1</sup>, А.С. Зленко<sup>1</sup>, М.В. Пресняков<sup>2</sup>, А.Л. Васильев<sup>2</sup>, Б.И. Галаган<sup>3</sup>, С.Е. Сверчков<sup>3</sup>, Е.М. Дианов<sup>1</sup></b> 1 - Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, 2 - «НИЦ» Курчатовский институт, Москва 3 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва <b>ИДЕНТИФИКАЦИЯ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ, ИНДИВИДУАЛЬНЫХ АТОМОВ <math>V_i</math> И <math>V_i</math>-КЛАСТЕРОВ В АКТИВИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ</b>	
11:00-11:10	<b>С.Н. Ушаков<sup>1,2</sup>, М.А. Усламина<sup>1</sup>, П.П. Федоров<sup>1,2</sup>, В.В. Осико<sup>2</sup>, К.Н. Нищев<sup>1</sup>, В.М. Кяшкин<sup>1</sup>, А.А. Пыntenков<sup>1</sup>, С.В. Кузнецов<sup>2</sup>, Е.В. Тютяев<sup>1</sup></b> 1 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск, 2 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва <b>ВЫРАЩИВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ <math>CaF_2-SrF_2</math>: ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА</b>	
11:10-11:20	<b>А.Н. Чабушкин, В.В. Балашов, Е.Е. Ломонова, Ю.Л. Копылов, П.А. Рябочкина</b> 1 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им.Н.П. Огарева, Саранск 2 - Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская область <b>СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И ГЕНЕРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ <math>Y_2O_3</math> И КРИСТАЛЛОВ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ИТТРИЕМ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ РЗ-ИОНАМИ (<math>Er^{3+}</math>, <math>Tm^{3+}</math>, <math>Ho^{3+}</math>)</b>	
11:30-11:40	<b>Г.В. Шилова, П.Г. Зеерев, А.А.Сироткин</b> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ СПЕКТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ИОНОВ НЕОДИМА В АНИЗОТРОПНЫХ КРИСТАЛЛАХ</b>	
11:40-11:50	<b>И.О. Золотовский, В.А. Лапин, Д.И. Семенов</b> Ульяновский государственный университет, Научно-технологический институт им. С.П. Капицы, Ульяновск <b>МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В СРЕДЕ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ</b>	
13:30-14:00	<b>ОБЕД</b>	
15:00	<b>ПОДВЕДЕНИЕ ИТОГОВ КОНФЕРЕНЦИИ</b>	



<b>СТЕНДОВАЯ СЕССИЯ (холл перед ауд. №1 )</b> Сопредседатели: д.ф.-м.н. М.Н. Попова, д.ф.-м.н. П.А. Рябочкина	
№	
1	<u><b>Е.В. Гольева<sup>1,2</sup>, И.Е. Колесникова<sup>3</sup>, М.Д. Михайлов<sup>1</sup>, А.В. Сандуленко<sup>1</sup>, И.А. Соколов<sup>2</sup></b></u> 1 - Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург 2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург 3 - Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург <b>СИНТЕЗ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ <math>MgAl_2O_4</math>: <math>Eu^{3+}/Eu^{2+}</math></b>
2	<u><b>Е.В. Гольева<sup>1,2</sup>, М.Д. Михайлов<sup>1</sup>, И.А. Соколов<sup>2</sup></b></u> 1 - Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург 2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург <b>МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ АЛЮМОМАГНИЕВОЙ ШПИНЕЛИ</b>
3	<u><b>А.И. Крюкова, А.В. Щербак</b></u> Самарский национальный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, Самара <b>БЕЗЫНЕРЦИОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ СВЧ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ РАДИОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ</b>
4	<u><b>А.М. Легков, А.В. Ершов, Д.А. Грачев, И.И. Чунин</b></u> 1 - Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>МОДИФИКАЦИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСИСТЕМ «НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КРЕМНИЙ/ДИЭЛЕКТРИК» ВВЕДЕНИЕМ ВОДОРОДА</b>
5	<u><b>Е.А. Добрецова<sup>1</sup>, К.Н. Болдырев<sup>1</sup>, Е.Ю. Боровикова<sup>2</sup>, В.А. Чернышев<sup>3</sup></b></u> 1 - Институт спектроскопии РАН, Москва, Троицк 2 - Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва 3 - Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург <b>СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛОВ <math>GdCr_3(VO_3)_4</math></b>
6	<u><b>П.П. Федоров<sup>1,2</sup>, М.Н. Маякова<sup>2</sup>, С.В. Кузнецов<sup>2</sup>, В.А. Маслов<sup>2</sup>, А.А. Пыненков<sup>1</sup>, С.Н. Ушаков<sup>1,2</sup>, М.А. Усламина<sup>1</sup>, К.Н. Нищев<sup>1</sup>, Н.И. Сорокин<sup>3</sup></b></u> 1 - Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск, 2 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва 3 - Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, г. Москва <b>ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА СИСТЕМЫ <math>NaF-CaF_2</math></b>
7	<u><b>В.В. Грибко<sup>1</sup>, В.Н. Трушин<sup>2</sup>, А.С. Маркелов<sup>2</sup></b></u> 1 - Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород 2 - Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ, Нижний Новгород <b>УПРАВЛЕНИЕ КРИВИЗНОЙ ПРОФИЛЯ РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ</b>
8	<u><b>Е.А. Исупова, В.А. Иванов, П.В. Андреев, М.А. Фаддеев</b></u> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ КРИСТАЛЛОВ <math>KTR:Nf</math> И <math>KTR:Zr</math>, ВЫРАЩИВАЕМЫХ МЕТОДОМ ИЗ РАСТВОРА В РАСПЛАВЕ</b>
9	<u><b>В.А. Крутько<sup>1</sup>, М.Г. Комова<sup>1</sup>, Д.И. Поминова<sup>2</sup></b></u> 1 - Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва 2 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва <b>ПИРОГИДРОЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ГЕРМАНАТОФОСФАТОВ <math>Gd_{11}O_{10}(GeO_4)(PO_4)_3</math>, ДОПИРОВАННЫХ ИОНАМИ <math>Yb^{3+} - Er^{3+}</math> В ПАРАХ, И ИХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА</b>

10	<p><b><u>С.В. Кузнецов<sup>1</sup>, П.П. Федоров<sup>1</sup>, Е.В. Чувилина<sup>2</sup>, А.А. Гасанов<sup>3</sup>, В.Г. Плотниченко<sup>4</sup>, В.В. Воронов<sup>1</sup>, П.А. Попов<sup>5</sup>, В.В. Осико<sup>1</sup></u></b>  1 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  2 - ООО ЛАНХИТ, Москва  3 - АО ГИРЕДМЕТ, Москва  4 - Научный центр волоконной оптики РАН, Москва  5 - Брянский государственный университет им. И.Г. Петровского, Брянск  <b>МОНОКРИСТАЛЛ INI: НОВЫЙ МАТЕРИАЛ ИК ДИАПАЗОНА</b></p>
11	<p><b><u>С.В. Кузнецов<sup>1</sup>, В.С. Седов<sup>1,2</sup>, В.Г. Ральченко<sup>1,2</sup>, М.Н. Маякова<sup>1</sup>, С.С. Савин<sup>3</sup>, К.П. Журавлев<sup>4</sup>, А.К. Мартыанов<sup>1</sup>, И.Д. Романишкин<sup>1</sup>, А.А. Хомич<sup>4</sup>, П.П. Федоров<sup>1</sup>, В.И. Конов<sup>1,2</sup>, В.В. Осико<sup>1</sup></u></b>  1 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  2 - Национальный исследовательский ядерный университет, Москва  3 - Московский технологический университет, Москва  4 - Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская область  <b>ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК С НАНОЧАСТИЦАМИ ФТОРИДОВ</b></p>
12	<p><b><u>А.В. Рябинин, М.А. Фаддеев, П.В. Андреев</u></b>  Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород  <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ РАВНОВЕСИЙ В СИСТЕМЕ <math>K_2SO_4-H_2SO_4-H_2O</math></b></p>
13	<p><b><u>Т.С. Севостьянова, Е.В. Жукова, В.А. Сиротина, А.В. Хомяков, О.Б. Петрова</u></b>  Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Москва  <b>АКТИВИРОВАННЫЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ОКСИФТОРИДНЫЕ БОРАТНЫЕ И БОРОСИЛИКАТНЫЕ СТЕКЛА</b></p>
14	<p><b><u>А.В. Зайцев, С.А. Денисов, В.Н. Трушин, А.В. Нежданов, С.А. Матвеев, В.Ю. Чалков, В.Г. Шенгуров</u></b>  Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород  <b>ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НА СТРУКТУРУ И МОРФОЛОГИЮ СЛОЕВ Ge, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ «ГОРЯЧЕЙ ПРОВОЛОКИ» НА Si (100)</b></p>
15	<p><b><u>М.З. Зиятдинова<sup>1</sup>, А.С. Шкуратко<sup>1</sup>, Н.В. Голубев<sup>1</sup>, С.С. Гижя<sup>2</sup>, А.В. Масалов<sup>2</sup>, А.Г. Турьянский<sup>2</sup>, И.В. Пиршин<sup>2</sup>, В.Н. Сигаев<sup>1</sup></u></b>  1 - Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва  2 - Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва  <b>ИТТРИЙ-АЛЮМОБОРАТНЫЕ СТЕКЛА ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ</b></p>
16	<p><b><u>П.В. Безбородкин<sup>1</sup>, К.В. Дукельский<sup>2</sup>, В.В. Демидов<sup>1</sup></u></b>  1 - Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург  2 - Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. профессора М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург  <b>ДИСКРИМИНАЦИЯ ВЫСШЕЙ МОДЫ В ТРИГОНАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ МИКРОСТРУКТУРАХ С СЕРДЦЕВИНОЙ ДИАМЕТРОМ 100 мкм И ДВОЙНОЙ ОБОЛОЧКОЙ</b></p>
17	<p><b><u>А.В. Михеев<sup>1,2</sup>, Б.Н. Казаков<sup>2</sup></u></b>  1 - Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань  2 - Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань  <b>АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ АП-КОНВЕРСИОННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ С ПОМОЩЬЮ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СПЕКТРОВ</b></p>
18	<p><b><u>А.Н. Носкова, А.П. Прохоров</u></b>  Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  <b>ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ КРИСТАЛЛОВ DKDP</b></p>
19	<p><b><u>А.А. Степко</u></b>  Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва  <b>ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ <math>Nd^{3+}</math> НА СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО ФОСФАТНОГО СТЕКЛА</b></p>

20	<b><u>М.П. Смаев<sup>1</sup>, В.В. Дорофеев<sup>2</sup>, А.Г. Охримчук<sup>1</sup></u></b> 1 - Международный центр лазерных технологий, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва 2 - Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Деятовых РАН, Нижний Новгород <b>НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЧИСТЫХ ТЕЛЛУРИТНЫХ СТЕКОЛ</b>
21	<b><u>А.М. Гурьянов</u></b> Самарский государственный архитектурно-строительный университет, Самара <b>ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КРЕМНИЕВЫХ МДП-СТРУКТУРАХ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЛОЯМИ ОКСИДОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ</b>
22	<b><u>А.С. Козулин, А.И. Малышев, А.А. Конаков</u></b> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>СПИНОВЫЕ ХЕЛИКСЫ В ДВУМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ</b>
23	<b><u>А.П. Савикин, А.С. Егоров, А.В. Будруев, И.Ю. Перунин, И.А. Гришин</u></b> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород <b>ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДВУХМИКРОННОГО ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ В ВИДИМЫЙ ДИАПАЗОН КЕРАМИКОЙ НА ОСНОВЕ <math>\text{PbF}_2</math> ЛЕГИРОВАННОЙ ИОНАМИ <math>\text{Ho}^{3+}</math></b>
24	<b><u>В.И. Луканин, А.Я. Карасик</u></b> Институт общей физики им. А.М. Прохорова, Москва <b>НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ДВУХФОТОННОМ МЕЖЗОННОМ ПИКОСЕКУНДНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ КРИСТАЛЛА <math>\text{PbWO}_4</math></b>
25	<b><u>Д.С. Горбунов, В.П. Мишкин, Е.Н. Лютова, А.В. Долганов, К. Н. Нищев</u></b> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск <b>ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ РЭМ И АСМ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ АЛЮМИНИЕВЫХ ФОЛЬГ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО АНОДИРОВАНИЯ</b>
26	<b><u>Е.А. Вагапова, О.К. Алимов, М.Е. Дорошенко, К.А. Мартынова, В.А. Конюшкин, А.Н. Накладов</u></b> Институт общей физики им. А.М. Прохорова, Москва <b>СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ ИОНОВ ТУЛИЯ В КРИСТАЛЛАХ ИТТРОФЛЮОРИТА</b>
27	<b><u>Ю.В. Керв, П.Г. Зверев, А.А. Сироткин</u></b> Институт общей физики им. А.М. Прохорова, Москва <b>ТРЕХМИКРОННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ИОНОВ ГОЛЬМИЯ В КРИСТАЛЛЕ <math>\text{YSGG}</math> ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ КОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ</b>
28	<b><u>Н.П. Нетесова</u></b> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва <b>ОСЦИЛЛЯЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ КРИСТАЛЛОВ КАЛИЯ ДИГИДРОФОСФАТА</b>
29	<b><u>Ф.В. Афанасьев</u></b> Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Деятовых РАН, Нижний Новгород <b>ПОЛУЧЕНИЕ СТЕКОЛ СИСТЕМЫ <math>\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5</math>, ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ, МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ (MCVD)</b>
30	<b><u>С.И. Мунтанилов, А.В. Голубьев</u></b> ФБУ «Мордовский центр стандартизации и метрологии», Саранск <b>МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАУЧНЫХ РАЗРАБОТОК И ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ В ОБЛАСТИ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ</b>
31	<b><u>И.Волков<sup>1</sup>, В.А.Камынин<sup>2</sup>, К.Н.Нищев<sup>1</sup>, В.Б.Цветков<sup>2</sup></u></b> 1 - Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск 2 - Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Москва <b>СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИКОСЕКУНДНОГО ЭРБИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С РАЗЛИЧНЫМИ ДЛИНАМИ РЕЗОНАТОРА</b>



# **НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ**

## ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ СВЕРХВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Ю.Г. Вайнер

*Институт Спектроскопии РАН, Троицк, Москва*

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

Опыты Антони ван Левенгука открыли миру замечательный инструмент: оптический микроскоп и продемонстрировали его удивительные возможности. С помощью простейшего устройства, основой которой были всего лишь одна миниатюрная сферическая линза и свет свечи, удалось заглянуть в неизвестный к тому времени мир микроскопических размеров и форм: впервые увидеть бактерии, разглядеть сложное микроскопическое строение клеток, наблюдать многие другие необычные для того времени микроскопические объекты и структуры. Очень быстро оптический микроскоп стал основным инструментом, используемым для изучения микрообъектов и микроструктур в биологии, медицине, материаловедении и многих других областях.

Оптическая схема и конструкция оптического микроскопа, сложившиеся в первые десятилетия после начала широкого использования этого прибора долгое время принципиально не менялись. Стандартный микроскоп, изготовленный в середине XIX века и в середине XX века мало отличались даже внешне. Основным достижением в развитии оптической микроскопии в XIX веке можно считать создание Джоржем Эйри и Эрнстом Аббе теории работы оптического микроскопа, основанной на волновой теории света, дающей количественный критерий пространственного разрешения микроскопа. В XX веке оптическая микроскопия стала развиваться более быстрыми темпами. В самом начале века Рихард Зигмонди и Генри Зидентопф выполнили уникальные эксперименты по наблюдению сверхмалых наночастиц золота в коллоидном растворе на созданном ими новом оптическом микроскопе, получившем название щелевой ультрамикроскоп. Это микроскоп, работающий в режиме темного поля с освещением образца сбоку с помощью интенсивного излучения, создаваемого плазмой электрической дуги. Важно отметить, что размеры наблюдаемых частиц в этих экспериментах составляли единицы нанометров, что намного меньше половины длины волны освещающего света. Эти эксперименты и создание нового метода оптической микроскопии были отмечены вручением в 1925 году Рихарду Зигмонди Нобелевской премии по химии. Следующим важным шагом в развитии оптической микроскопии явилось создание Фрицем Цернике метода фазового контраста, который позволил преодолеть трудности наблюдения прозрачных микрообъектов, помещенных в жидкую среду. Это достижение было отмечено в 1953 году Нобелевской премией по физике.

В 1956 году Марвин Минский создает новый тип оптического микроскопа – конфокальный микроскоп, преимущества и потенциальные возможности которого оказались столь значимыми, что в настоящее время

оптическая схема конфокального микроскопа является основной при создании большинства современных микроскопов.

Бурное развитие в конце XX и в начале XXI века науки и технологий, в частности появление высокочувствительных фотоэлектронных приемников для регистрации оптических изображений, широкое распространение компьютерных средств, а также появление широкого ассортимента малогабаритных лазерных источников послужили мощным толчком для развития оптической микроскопии в последние два десятилетия. Темпы этого развития поражают: если совсем недавно в большинстве применений оптический микроскоп представлял собой относительно небольшой и простой настольный прибор, то теперь современный микроскоп, реализующий последние достижения в этой области, представляет собой сложное крупногабаритное устройство, требующее для своего функционирования специально оборудованного помещения. Появилось много новых методов оптической микроскопии, основанных на последних достижениях оптики, спектроскопии, фотоники и других наук и технологий. Важность развития оптической микроскопии для науки и практики наглядно подтверждает вручение в 2014 году трем ученым: Стефану Хеллу, Эрику Бетцигу и Вильяму Мернеру Нобелевской премии по химии за развитие флуоресцентной микроскопии сверхвысокого разрешения.

В лекции будут кратко изложены теоретические основы оптической микроскопии и даны объяснения основных принципов, лежащих в основе различных методов оптической микроскопии. Планируется ознакомить слушателей с новыми методами оптической микроскопии и их возможностями, привести примеры их использования в разных областях, продемонстрировать ряд интересных результатов, полученных с их применением в самое последнее время.

## МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР $A^{III}B^V$

Н.Л. Шварц

*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск*

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

Интерес к наноструктурам  $A^{III}B^V$  обусловлен перспективой их использования в приборах нано- и оптоэлектроники. В работе представлены результаты моделирования роста нитевидных нанокристаллов (ННК), нанокластеров и наноколец по механизму пар-жидкость-кристалл. Анализ роста наноструктур осуществлялся с помощью Монте-Карло моделирования на базе программного комплекса SilSim3D [1].

Исследованы зависимости скорости каталитического и самокаталитического роста GaAs и InAs ННК от температуры и интенсивности потока мышьяка. Показано, что самокаталитический рост более чувствителен к соотношению потоков галлия и мышьяка, чем каталитический. Проанализировано влияние эффекта реадсорбции на морфологию и скорость роста ННК. Показано, что реадсорбция мышьяка дает основной вклад в увеличение скорости роста ННК и преждевременное поглощение капли металла. Реадсорбция Ga/In приводит к незначительному уменьшению аксиальной скорости роста, но продлевает рост ННК, предотвращая исчезновение капли для длин, превышающих диффузионную длину Ga/In по боковым стенкам ННК. Продемонстрирован эффект выравниванию диаметров ННК, характерный для самокаталитического роста [2].

Продемонстрирована зависимость морфологии GaAs наноструктур, полученных методом капельной эпитаксии, от параметров роста. Определены диапазоны температур и потоков мышьяка для формирования нанокластеров и наноколец GaAs. Проанализированы условия образования одинарных и двойных концентрических колец. Показано, что наблюдение двойных колец возможно в некотором диапазоне температур и потоков мышьяка при расстояниях между каплями, превышающими удвоенную длину диффузии галлия по поверхности.

Работа проведена при поддержке РФФИ (№ 14-02-00776-а) и программ РАН.

1. А.Н. Карпов, В.А. Зверев, А.Г. Настовьяк и др. Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии. **15**, 388-399 (2014).
2. V.G. Dubrovskii, T. Xu, A.D. Álvarez et al. Nano Lett. **15**, 5580-5584 (2015).



## АКТИВИРОВАННЫЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЕ АЛМАЗЫ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Г.Е. Малашкевич<sup>1</sup>, В.А. Лапина<sup>1</sup>, J. Opitz<sup>2</sup>, I. Sildos<sup>3</sup>, В.В. Ковгар<sup>1</sup>,  
Т.Г. Хотченкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск*

<sup>2</sup> *Fraunhofer Institute of nondestructive testing, Dresden, Germany*

<sup>3</sup> *Institute of Physics, University of Tartu, Tartu, Estonia*

*E-mail: g.malashkevich@ifanbel.bas-net.by*

Индивидуальные частицы ультрадисперсного алмаза (УДА), полученные детонационным синтезом, представляют собой алмазные ядра с «диаметром»  $\sim 4$  нм, покрытые кластерной оболочкой неалмазного углерода толщиной 1–5 нм, на которой располагаются вкрапления графитовой фазы, содержащей также различные типы углеводородов и примеси [1]. Такие наночастицы могут проявлять люминесценцию в видимой и ближней УФ-областях спектра. При этом ширина запрещенной зоны для монокристаллического алмаза составляет  $\approx 5,5$  эВ, а для неалмазного углерода может понижаться до 2 эВ с повышением доли «графитовых»  $sp^2$ -связей над «алмазными»  $sp^3$ -связями [2]. Данные особенности делают УДА интересным объектом для легирования различными примесными активаторами и исследования его влияния на спектрально-люминесцентные свойства последних. Однако следует отметить, что из-за высокой поверхностной энергии индивидуальных частиц УДА стабилизируются в виде кластеров размером 20–40 нм, а их разделение представляет достаточно сложную проблему.

Настоящая работа представляет собой обзор полученных нами результатов по исследованию люминесценции активированных УДА и легированных ими кварцевых гель-стекол.

В работе использовались УДА, синтезированные в ЗАО «Синта» (Минск, Беларусь). Активация порошков УДА осуществлялась путём их смешивания в условиях ультразвукового диспергирования с растворами легирующих соединений. Полученные активированные порошки высушивались и термообрабатывались в регулируемых окислительно-восстановительных условиях. Легирование этими порошками кварцевых гель-стекол осуществлялось на стадии золь.

Исследование полученных образцов проводилось с использованием рентгенографических, электронно-микроскопических и спектрально-люминесцентных методов.

Установлено, что активированные описанным образом УДА характеризуются значительным увеличением термостойкости: потеря веса исходного УДА после 30 мин отжига на воздухе при  $T_{отж} \approx 700$  °С составляет 100 %, а легированного – менее 10 %. При этом на дифрактограмме сохраняется брэгговский рефлекс при  $2\Theta \approx 43,8^\circ$ , соответствующий отражению от плоскости (111) алмаза [3]. Наблюдаемое увеличение термостойкости мы объясняем формированием на поверхности частиц УДА достаточно

плотной пленки легирующих соединений, связанных химическими связями типа  $L_n - O - C$  с неалмазным углеродом, которая ведет к ингибированию окисления алмазного ядра.

Формирование в процессе термообработки указанных связей подтверждено спектроскопически на примере УДА, легированного азотнокислой солью европия, для которого при термообработке в диапазоне 450 – 700 °С имеет место длинноволновое смещение на 0,5 нм барицентра нерасщепляющейся полосы  $^5D_0 \rightarrow ^7F_0$  ионов  $Eu^{3+}$  и значительное ослабление «электродипольных»  $f-f$ -полос. Одновременно наблюдается двадцатикратное увеличение эффективности возбуждения люминесценции ионов  $Eu^{3+}$  в области полосы переноса заряда [4].

Значительное увеличение интенсивности люминесценции наблюдается для УДА, легированного солями хрома и алюминия. Полученные нанопорошки проявляют эффективную люминесценцию при низких  $T_{отж}$  в широкой вибронной полосе  $^4T_2 \rightarrow ^4A_2$ , а при высоких – в узкой спинзапрещенной полосе  $^2E \rightarrow ^4A_2$  [5]. Использование Cr–Al-содержащих УДА с  $T_{отж} \approx 1300$  °С для легирования кварцевых гель-стекол показало, что введенные в них наночастицы подвержены изотропному сжатию матрицей, а также незначительному, благодаря отсутствию стадии расплава, растворению, при котором формируются оптические центры  $Cr^{n+}$ , где  $n = 3 - 6$  [6].

При легировании УДА азотнокислыми солями алюминия, церия и тербия во всех случаях интенсивность люминесценции редкоземельных ионов была ниже чем аналогичным образом термообработанных соединений легирующих элементов. Причиной такой ситуации, по-видимому, является большая доля графитизированного углерода, вызывающего гашение и тушение люминесценции как  $Se^{3+}$ , так и  $Tb^{3+}$ . Однако радиационная стойкость оптических центров лантаноидов, сформированных на поверхности УДА, заметно повышается.

Рассмотрены перспективы использования активированных УДА в качестве люминофоров, активных сред порошковых лазеров, а также наноструктурирующих и дефектообразующих добавок.

1. А.Е. Алексенский, М.В. Байдакова, А.Я. Вуль и др. ФТТ **41**, 740 (1999).
2. М.Е. Компан, Е.И. Теруков, С.К. Гордеев и др. ФТТ **39**, 2156 (1997).
3. Powder Diffraction File. JCPDS – ASTM, USA, N 6-0675 (1977).
4. Г.Е. Малашкевич, В.А. Лапина, Г.И. Семкова и др., Письма в ЖЭТФ **77**, 341 (2003).
5. Г.Е. Малашкевич, В.А. Лапина, П.П. Першукевич, Известия РАН, Серия физическая **70**, 1659 (2006).
6. Г.Е. Малашкевич, Г.И. Семкова, А.В. Семченко и др., Письма в ЖЭТФ **88**, 740 (2008).

## ЦЕНТРЫ ОКРАСКИ В АЛМАЗЕ: ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

К.Н. Болдырев

*Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва*

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

Вот уже на протяжении нескольких десятилетий внимание мирового научного сообщества привлекают оптические свойства центров окраски в алмазах. Такие центры связаны с примесями, либо вводимыми специально путем легирования, либо неконтролируемыми. Центры окраски способны как поглощать излучение селективно по длинам волн, что может менять цвет алмаза, так и излучать свет в различных спектральных диапазонах. Оказалось, что некоторые центры могут давать очень узкую линию излучения (центры типа азот-вакансия, NV, и кремний-вакансия, SiV), причем удалось получить излучение от одиночных центров, что позволяет исследовать их интересную квантовую природу. Технологии позволяют получить наноалмаз, содержащий один оптический центр, что перспективно для нужд квантовых информационных и вычислительных систем. Это источники одиночных фотонов и элементы квантовых компьютеров (оптические кубиты). Паспортизируя спектральные характеристики отдельных частиц, можно создавать уникальные оптические метки, защищающие от подделок. Кроме того, открываются перспективы применения в биологии и медицине. Функционализируя такие наночастицы, можно исследовать процессы, происходящие внутри как одной клетки, так и целого организма, причем возможно проводить исследования *in vivo*, то есть работать с живыми организмами. «Прикрепляя» такой наноалмаз, например, к вирусу, можно проследить, как последний атакует клетку, что позволит создавать новые эффективные средства защиты. Стоит заметить, что алмаз – это углерод, он входит в состав всех живых организмов, поэтому можно ожидать, что токсичность наноалмазов низка. Все приведенное говорит о большом научном и практическом потенциале алмазов с центрами окраски.

В лекции будут также затронуты работы автора, касающиеся нового оптического центра в алмазе, связанного с примесью германия (GeV). Наши исследования показали, что GeV центры имеют уникальные характеристики, во многом превосходящие таковые для известных ранее центров SiV и NV. В частности, наблюдается очень яркое свечение в красно-оранжевой области спектра с большой квантовой эффективностью. Будут обсуждаться интересные изотопические эффекты, как связанные с углеродом, так и с германием [1].

Работа поддержана Программой ПРАН «Фундаментальные и прикладные проблемы фотоники и физика новых оптических материалов»

1. Е.А. Екимов, С.Г. Ляпин, К.Н. Болдырев и др., Письма в ЖЭТФ. **102**, 811 (2015).

# ОПТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР

А.В. Платонов

*Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург*  
*Email: [Alexei.platonov@mail.ioffe.ru](mailto:Alexei.platonov@mail.ioffe.ru)*

В последнее время интерес исследователей сместился от изучения свойств объемных кристаллов к изучению свойств гетероструктур с квантовыми ямами, квантовыми нитями и квантовыми точками. Такие структуры представляют собой слои, нити или кластеры узко-зонного полупроводника окруженные широко-зонным полупроводником. Естественно, что влияние границ раздела (интерфейсов) на свойства образца в таких условиях сильно возрастает, и оптические свойства таких структур будут во многом определяться свойствами интерфейсов.

Большинство гетероструктур выращиваются на основе кубических полупроводников, имеющих высокую точечную симметрию. Однако граница между двумя кубическими полупроводниками всегда имеет существенно более низкую симметрию. Это приводит к тому, что даже в симметричных гетероструктурах, таких как симметричные квантовые ямы (КЯ) или сферические квантовые точки, пониженная симметрия интерфейсов может вызвать анизотропию оптических свойств структуры как целого.

В данном докладе будет дан обзор оригинальных результатов исследования оптической анизотропии гетероструктур, вызванной естественной анизотропией интерфейсов. Будут рассмотрены проявления оптической анизотропии в гетероструктурах типа-II, эффект анизотропии времени спиновой релаксации и анизотропия обменного расщепления экситона в квантовых точках.

Наиболее сильно влияние пониженной симметрии интерфейсом на оптические переходы может проявляться в гетероструктурах типа-II, в которых электронные и дырочные состояния локализованы в соседних полупроводниковых слоях. В этом случае оптические переходы происходят прямо на интерфейсе и, следовательно, в полной мере испытывают на себе его микроскопическую структуру. Данный эффект будет рассмотрен на примере КЯ ZnSe/BeTe, выращенных вдоль направления [001]. Эта система относится к классу структур без общего атома, то есть при переходе через интерфейс меняется как катион, так и анион. Это позволяет создавать два типа интерфейсов для структур данного класса. В рассматриваемом случае это интерфейс (Be-Se) и (Zn-Te). Причем структура прямого и обратного интерфейса в КЯ может контролироваться независимо. Тем самым мы можем создавать как симметричные КЯ (оба интерфейса одинаковые), так и несимметричные.

Точечная симметрия интерфейса (001) в системе, состоящей из полупроводников с кубической решеткой, есть  $C_{2v}$ . Это низкая симметрия, допускающая оптическую анизотропию в плоскости интерфейса. Однако в КЯ есть второй интерфейс с такой же симметрией. В ямах с эквивалентными интерфейсами возникает дополнительная операция симметрии, а именно отражение в центральной плоскости КЯ и поворот на 90 градусов. Эта операция переводит прямой интерфейс в обратный. В результате общая симметрия КЯ повышается до  $D_{2d}$ . Для этой точечной симметрии оп-

тическая анизотропия запрещена. В КЯ с неэквивалентными интерфейсами симметрия всей структуры сохраняет симметрию одиночного интерфейса, и оптическая анизотропия может наблюдаться непосредственно.

Гетеросистема ZnSe/BeTe характеризуется очень большой величиной разрывов зон (1эВ и более) как в зоне проводимости, так и валентной зоне. Как следствие туннелирование носителей из ямы в барьер крайне мало, не более одного монослоя. Учитывая тот факт, что дырка и электрон в типе-II локализованы в соседних слоях, становится понятным, что оптический переход в данном случае происходит в узком слое, который захватывает только интерфейсные химические связи. Для каждого интерфейса химические связи лежат в определенной плоскости (110) или (110). Эксперимент показывает, что именно ориентация связей задает ориентацию линейной поляризации излучения непрямого экситона на интерфейсе. Причем степень поляризации излучения на одиночном интерфейсе достигает 80 %. В структурах с несимметричными КЯ ориентация химических связей на прямом и обратном интерфейсах совпадают. Следовательно, общий сигнал ФЛ от структуры в целом обладает степенью линейно поляризации, определяемой одним интерфейсом, т. е. 80 % [1].

В симметричных КЯ вклады в поляризацию от прямого и обратного интерфейсов компенсируют друг друга, и сигнал ФЛ от КЯ в целом оказывается неполяризованным. Тем не менее, и в этом случае анизотропию можно наблюдать, если нарушить эквивалентность интерфейсов внешним возмущением. Это можно сделать, например, приложив внешнее электрическое поле вдоль оси роста. С помощью этого подхода нам удалось обнаружить так называемый квантовый эффект Поккельса в гетероструктурах типа-II [2].

В КЯ анизотропия интерфейсов может проявиться не только в виде поляризации излучения или поглощения, но и привести к анизотропии других параметров, описывающих состояния носителей. В качестве примера мы рассмотрим анизотропию времени спиновой релаксации электрона в КЯ GaAs/AlGaAs. Известно, что в GaAs основным механизмом спиновой является механизм Дьяконова - Переля. Качественно этот механизм можно понять, если рассмотреть прецессию электронного спина в случайном эффективном магнитном поле величина и направление которого зависят от волнового вектора электрона. Наличие такого поля связано со спиновым расщеплением электронного состояния за счет спин-орбитального взаимодействия. В КЯ возможны два вклада в это расщепление: линейные и по волновому вектору. Для обоих вкладов необходимо, конечно, отсутствие центра инверсии в структуре. Первый вклад (Дрессельхауза) существует и в объемном материале и связан с отсутствием центра инверсии в исходном полупроводнике. Кроме того, при наличии структурной асимметрии вдоль оси роста, возникает вклад Рашбы. Существенно, что зависимости направления эффективного поля от направления волнового вектора для этих вкладов различны. Это приводит к тому, что для некоторого направления вклады могут скомпенсировать друг друга. При точном совпадении констант расщепления Дрессельхауза и Рашбы возможно полное подавление релаксации для одной из компонент спина электрона. В общем случае частичной компенсации время релаксации спина оказывается зависящим от его направления.

Для обнаружения эффекта необходимо одновременное существование обоих вкладов с соизмеримой величиной. Обычно КЯ GaAs/AlGaAs симметричны и вклад Рашбы в них отсутствует, однако неэквивалентность интерфейсов может быть создана искусственно. Например, можно приложить электрическое поле вдоль оси роста или вырастить барьеры слева и справа от ямы с разным составом. В докладе будут представлены экспериментальные результаты по наблюдению анизотропии времени спиновой релаксации полученные, используя оба подхода [3].

Последняя часть доклада будет посвящена оптическим проявлениям низкой симметрии в квантовых точках (КТ). В отличие от КЯ, в данном случае анизотропия может быть вызвана не только низкой симметрией интерфейсов, но и формой точки. Как правило, в эксперименте не удается разделить два этих вклада. В данной работе на примере КТ CdSe/ZnSe будет проанализирована роль низкой симметрии на обменное взаимодействие в экситоне в КТ. Будет показано, что анизотропное обменное взаимодействие снимает вырождение состояния оптически активного экситона. В эксперименте этот эффект проявляется как конверсия поляризации фотолюминесценции в условиях поляризованного, резонансного возбуждения. На базе данного эффекта возможно создание электрооптического модулятора на КТ. В докладе будет представлена возможная конструкция такого прибора [4].

В исследованной системе КТ возможно наблюдение любопытного эффекта при приложении магнитного поля в плоскости (геометрия Фогта). Оказывается, что при определенном значении магнитного поля, симметрия состояния экситона в КТ повышается, и он ведет себя подобно экситону в объемном материале в поперечном поле. Анализ полевой зависимости поляризации ФЛ, полученной в данных экспериментах, позволил с удовлетворительной точностью определить многие экситонные параметры, в частности константы обменного расщепления и  $g$ -фактор экситона в плоскости интерфейсов [5]. Последний, с учетом низкой симметрии КТ, также обладает анизотропией. Микроскопические механизмы, ответственные за анизотропию  $g$ -фактора, будут рассмотрены в заключительной части доклада.

1. D.R. Yakovlev, A.V. Platonov, E.L. Ivchenko, et al. Phys. Rev. Lett. **88**, 257401 (2002).
2. A.V. Platonov, V.P. Kochereshko, E.L. Ivchenko, et al. Phys. Rev. Lett. **83**, 3546-3549 (1999).
3. N.S. Averkiev, L.E. Golub, A.S. Gurevich, et al., Phys. Rev. B **74**, 033305 (2006).
4. G.V. Astakhov, T. Kiessling, A.V. Platonov, et al. Phys. Rev. Lett. **96**, 027402 (2006).
5. T. Kiessling, A.V. Platonov, G.V. Astakhov, et al. Phys. Rev. B **74**, 041301(R) (2006).

# ЭФФЕКТИВНЫЕ АП-КОНВЕРСИОННЫЕ ЛЮМИНОФОРЫ НА ОСНОВЕ ФТОРИДА КАЛЬЦИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ИТТЕРБИЕМ И ЭРБИЕМ

Р.Г. Вахренев<sup>1</sup>, М.Н. Маякова<sup>2</sup>, С.В. Кузнецов<sup>2</sup>, А.В. Рябова<sup>2</sup>,  
Д.В. Поминова<sup>2</sup>, В.В. Воронов<sup>2</sup>, П.П. Федоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва

<sup>2</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
E-mail: [rvakhrenev@yandex.ru](mailto:rvakhrenev@yandex.ru)

Анализ публикационной активности в области люминофоров на основе фторидов показал, что наблюдается устойчивый рост количества публикаций по синтезу и исследованию ап-конверсионных люминофоров, способных преобразовывать ИК-излучение накачки в видимый диапазон света. Увеличение интереса связано преимущественно с перспективой их применения в биомедицинских приложениях, а также для увеличения КПД солнечных источников тока. Для применения в медицине необходимо использовать наименее токсичные вещества. В литературе наиболее исследуемой матрицей является  $\text{NaYF}_4$  и тому подобные фазы. В то же время весьма малоисследованным является биосовместимый материал - фторид кальция. Одним из сдерживающих факторов его применения является низкий квантовый выход. В результате, целью нашей работы был синтез и исследование люминесцентных характеристик  $\text{CaF}_2:\text{Yb}:\text{Er}$ , а также поиск оптимального соотношения легирующих добавок. В работе был использован метод соосаждения из водных растворов с использованием в качестве фторирующих агентов фторида аммония и фтороводородной кислоты, изменяли также порядок добавления реагентов. Согласно данным рентгенофазового анализа в результате каждого эксперимента были синтезированы образцы флюоритового твердого раствора.

На рис. 1. представлены типичные спектры ап-конверсионной люминесценции образцов при накачке на длине волны 974 нм, которые характеризуются наличием одной полосы люминесценции в красной области спектра и двух полос в зеленой области спектра. В результате анализа экспериментальных данных было определено, что наибольший энергетический выход (3,11 %) был достигнут при использовании методики совместного прикапывания фтороводородной кислоты и раствора нитратов в реактор заполненный бидистиллированной водой.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-32-21152-мол-а-вед).

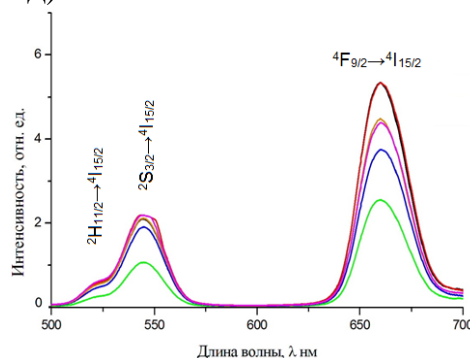


Рис. 1. Спектр люминесценции нанопорошков  $\text{Ca}_{0.94}\text{Yb}_{0.05}\text{Er}_{0.01}\text{F}_{2.06}$

# МНОГОСЛОЙНЫЕ СТРУКТУРЫ НА БАЗЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Н.В. Латухина, Д.А. Лизункова, Г.А. Рогожина

Самарский государственный аэрокосмический университет, Самара

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

Актуальность данной работы определяется необходимостью повысить КПД кремниевых солнечных элементов.

Для создания фоточувствительных структур использовались монокристаллические пластины кремния с р-п переходом и разной обработкой рабочей поверхности: текстурированной, шлифованной или полированной. Текстурированная поверхность имела микрорельеф в виде правильных четырехугольных пирамид (рис. 1). Формирование пористого слоя проводилось анодным травлением в водно-спиртовых растворах HF. Во время анодного травления текстурированной поверхности порообразование начинается в местах углубления микрорельефа, далее пора растет вглубь кремниевого электрода. В зависимости от режимов травления можно получить отдельно стоящие колонны с вершинами в виде пирамид, отделенных друг от друга высокоомными областями пористого кремния (темные области на рис. 1). На поверхности пирамид сохраняется n-тип проводимости, так что фоточувствительная структура представляет собой матрицу отдельных вертикальных диодов. Затем на рабочую поверхность наносились контакты и диэлектрическое покрытие

Исследования показали хорошую фоточувствительность образцов (рис. 2). Лучшие спектральные характеристики имели образцы с пористым слоем и покрытием из DyF<sub>3</sub>. При некотором уменьшении фоточувствительности в коротковолновой части спектра, образцы с пленкой DyF<sub>3</sub> имеют заметное увеличение в длинноволновой. Эти результаты показывают перспективность использования таких структур в солнечных элементах [1].

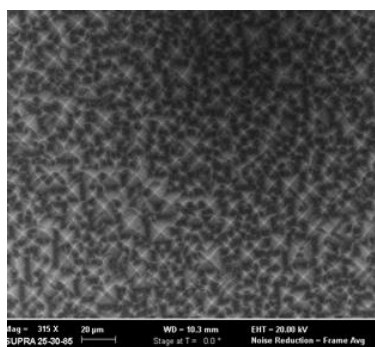


Рис. 1. РЭМ-изображение текстурированной поверхности с пористым слоем.

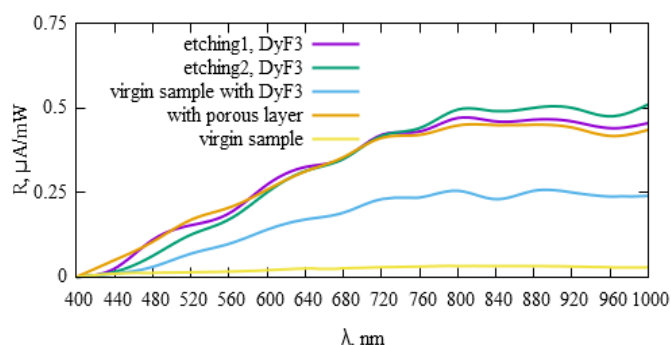


Рис. 2. Спектральные зависимости образцов с пористым слоем DyF<sub>3</sub> и без них

1. N.V. Latukhina, A.S. Rogozin, G.V. Puzyrnaya et al., *Procedia Engineering* **104**, 157-161 (2015).



# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА СПЕКТРА С УЬ-СОДЕРЖАЩИМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ

С.А. Хрущалина<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, В.М. Кяшкин<sup>1</sup>, А.С. Ванецев<sup>2</sup>,  
О.М. Гайтко<sup>3</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>4</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup> *Institute of Physics, Tartu, Estonia*

<sup>3</sup> *Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва*

<sup>4</sup> *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>5</sup> *НИТУ МИСИС, Москва*

*E-mail: [anabel-2005@yandex.ru](mailto:anabel-2005@yandex.ru)*

В настоящее время интерес для исследователей представляют диэлектрические наноразмерные соединения, активированные редкоземельными (РЗ) ионами. Возбуждение данных частиц лазерным излучением определенных длин волн приводит к возникновению в них люминесценции РЗ-ионов, что обуславливает их использование в биомедицине в качестве визуализаторов и биологических меток.

Наряду с публикациями, посвященными исследованиям люминесценции РЗ-ионов в диэлектрических наночастицах, существуют работы, свидетельствующие о проявлении подобными частицами свойств, отличных от свойств объемных кристаллов аналогичных составов. В частности, ряд авторов [1-4] сообщает о появлении широкополосного излучения в иттербий-содержащих соединениях при возбуждении лазерным излучением в полосу поглощения ионов  $\text{Yb}^{3+}$ . Подобное явление наблюдалось в нанопорошках  $\text{LiYbP}_4\text{O}_{12}$  [1],  $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Yb},\text{Er}$  [2],  $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  [3], а также керамике  $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Yb}^{3+}$  [4], однако среди авторов нет однозначного мнения о причинах возникновения широкополосного излучения в данных соединениях.

В настоящей работе сообщается о наблюдении широкополосного излучения и его характеристиках в наноразмерных частицах концентрационных рядов ортофосфатов и гидратов ортофосфатов иттрия, легированных ионами  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ , а также частицах  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  и  $\text{ZrO}_2\text{-Yb}_2\text{O}_3$ . Приводятся экспериментальные факты, свидетельствующие о тепловой природе широкополосного излучения и предлагаются возможные механизмы его возникновения.

1. W. Streck, L. Marciniak, A. Bednarkiewicz, et al., *Opt. Express* **19**, 14084 (2011).
2. S.M. Redmond, S.C. Rand, S.L. Oliveira. *Appl. Phys. Lett.* **85**, 5517 (2004).
3. J. Wang, J.H. Hao, P.A. Tanner, *Optic Lett.* **35**, 3922 (2010).
4. J.-F. Bisson, D. Kouznetsov, K.-I. Ueda, et al., *Appl. Phys. Lett.* **90**, 201901 (2007).

## РЕЗОНАТОРНЫЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ СТРУКТУРЫ, СОДЕРЖАЩИЕ НАНОКРИСТАЛЛЫ КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ

Д.А. Грачев<sup>1</sup>, С.А. Гарахин<sup>1</sup>, А.В. Белолипецкий<sup>2</sup>, А.Н. Яблонский<sup>1,3</sup>,  
Б.А. Андреев<sup>1,3</sup>, А.В. Ершов<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

<sup>3</sup> *Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород*

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

Проведены структурные и оптические исследования нанокристаллов Si и Ge в резонаторных структурах. Многослойные нанопериодические структуры были получены методом физического осаждения SiO (или GeO) и SiO<sub>2</sub> из двух отдельных источников. Формирование нанокристаллов стимулировалось отжигом в атмосфере азота: при 1000–1100 °С для структуры SiO/SiO<sub>2</sub> [1], и при 400–600 °С для GeO/SiO<sub>2</sub> [2]. Размеры нанокристаллов варьировались от 3 до 8 нм как путем изменения температуры отжига [1], так и толщины слоев [3], которые составляли несколько нанометров. Резонаторные структуры были изготовлены на кремниевых подложках и состояли из двух распределенных брэгговских отражателей с активной средой, заполненной нанокристаллами [4].

Стационарная фотолюминесценция изучалась в условиях накачки Nd:YAG лазера ( $\lambda = 532$  нм). Спектры с временным разрешением были получены при накачке N<sub>2</sub> лазера ( $\lambda = 337$  нм, 7 нс, 45 Гц). Измерения проводились при комнатной температуре.

Было установлено, что использование резонаторных структур приводит к значительному сужению пиков люминесценции до 20 нм и в то же время повышению их интенсивности до 50 раз. Особое положение максимума полосы люминесценции определяется конструкцией резонатора: рабочий диапазон для структур SiO/SiO<sub>2</sub> составлял 650–850 нм и 1000–750 нм для GeO/SiO<sub>2</sub>. Для резонаторных структур по сравнению со структурами без зеркал наблюдается сокращение времени излучения.

В целом исследование резонаторных структур не только хорошая возможность увеличить функциональность кремниевой фотоники, но и также более широко исследовать фундаментальные вопросы люминесценции кремниевых и германиевых нанокристаллов.

1. L. Vaccaro, L. Spallino, A.F. Zatsopin et al., *Physica Status Solidi (B)* **252**, 600 (2015).
2. M. Ardyanian, H. Rinnert, M. Vergnat, *Journal of Luminescence* **129**, 729 (2009).
3. A.V. Ershov, I.A. Chugrov, D.I. Tetelbaum et al., *Semiconductors* **47**, 481 (2013).
4. A. Belarouci, F. Gourbilleau, R. Rizk, *Journal of Luminescence* **121**, 282 (2006).

# КОМПОЗИТНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КАПСУЛ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ ОРТОФОСФАТОВ И ОРТОВАНАДАТОВ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

М.Н. Жарков<sup>1</sup>, С.А. Хрущалина<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, Н.А. Пятаев<sup>1</sup>,  
Г.Б. Сухоруков<sup>1,2</sup>

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск,*

<sup>2</sup> *Queen Mary University of London, United Kingdom*

Низкая избирательность действия и высокая системная токсичность противоопухолевых препаратов является одной из наиболее актуальных проблем в современной медицине и фармакологии. Одним из подходов к решению данной проблемы является инкапсулирование химиопрепаратов в различные носители. В последнее время достигнут большой прогресс в создании полимерных нано- и микрокапсул.

Для создания систем адресной доставки лекарственных препаратов необходимо осуществлять как управляемое перемещение капсул, так и дистанционное управление проницаемостью их оболочек. Существуют различные способы воздействия на оболочку капсул, которые могут привести к высвобождению материала, помещенного внутрь: физическое (лазерное излучение, СВЧ), химическое (изменение pH) и биологическое (воздействие фермента).

Для обеспечения чувствительности к лазерному излучению в состав оболочки могут быть включены наночастицы металлов или других их соединений (оксидов, солей), молекулы органических красителей, которые имеют пики поглощения в видимой и ближней ИК-области спектра.

В настоящей работе обсуждается способ применения кристаллических наночастиц ортофосфатов и ортованадатов РЗЭ для вскрытия микрокапсул при воздействии на них лазерного излучения.

Нагревание кристаллических наночастиц ортофосфатов и ортованадатов РЗЭ при воздействии на них лазерного излучения может быть обусловлено двумя наиболее возможными механизмами. Энергия лазерного излучения, поглощенная РЗ-ионом, может быть передана на колебательные уровни ОН-групп, и затем в результате безызлучательной релаксации трансформирована в тепловое излучение. Также возможен разогрев частиц в результате безызлучательной релаксации с энергетических уровней самого РЗ-иона.

В работе представлены экспериментальные результаты, свидетельствующие о нагревании образцов тонкодисперсных порошков и коллоидов составов:  $Y_{0.99}Er_{0.01}PO_4$ ,  $Y_{0.95}Er_{0.05}PO_4$  и  $Y_{0.5}Er_{0.5}PO_4$  при воздействии на них лазерным излучением с длиной волны 532 нм.

## ФАЗООБРАЗОВАНИЕ ПРИ СИНТЕЗЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ НАНОФТОРИДОВ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

М.Н. Маякова, П.П. Федоров, А.А. Лугинина, С.В. Кузнецов,  
В.В. Воронов

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*  
*E-mail: [mn.mayakova@gmail.com](mailto:mn.mayakova@gmail.com)*

Нанофториды – бурно развивающаяся область неорганического материаловедения. Свойства, проявляемые наноматериалами, а также уникальный набор физико-химических свойств фторидов обуславливают возможности использования нанопорошков фторидов в различных областях науки и техники (люминофоры; прекурсоры для лазерной и сцинтилляционной керамики; компоненты электрохимических устройств, просветляющие покрытия, катализаторы, биомедицинские приложения и т. д.). Целью данной работы было установление общих закономерностей синтеза нанофторидов сложного состава методом соосаждения из водных растворов и разработка методик получения порошков с функциональными свойствами (люминофоры, сцинтилляторы).

Было установлено, что синтез нанофторидов сложного состава, как правило, осуществляется посредством неклассического механизма роста кристаллов путем агломерации наночастиц и приводит к образованию неравновесных фаз переменного состава. При переходе на наноуровень происходит повышение симметрии фазы, а также исчезновение огранки кристаллов. Фазовые диаграммы бинарных систем щелочноземельных и редкоземельных фторидов, полученные на основе данных соосаждения из водных растворов при комнатной температуре, как правило, не соответствуют фазовым диаграммам, полученным при обработке данных твердофазного синтеза. Был обнаружен эффект изменения фазового состава в зависимости от последовательности введения компонентов. В ряде исследованных систем были выявлены новые фазы. Найденные закономерности могут быть применены при разработке технологии синтеза функциональных порошков нанофторидов и материалов на их основе.

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ АП-КОНВЕРСИОННЫХ  
ЛЮМИНОФОРОВ НА ОСНОВЕ НАНОПОРОШКОВ  
 $\text{SrF}_2:\text{Yb}:\text{R}$  (R = Er, Tm)

Ю.А. Рожнова, С.В. Кузнецов, М.Н. Маякова, В.В. Воронов, Р.П. Ермаков,  
А.В. Рябова, Д.В. Поминова, П.П. Федоров  
*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*  
*E-mail: [mn.mayakova@gmail.com](mailto:mn.mayakova@gmail.com)*

В последние годы одним из бурно развивающихся направлений является исследование ап-конверсионных люминофоров, позволяющих преобразовывать ближнее инфракрасное излучение (БИК) в видимый диапазон света. Для получения высокоэффективных люминофоров с энергетической точки зрения необходимо использовать вещества с малой энергией фононов кристаллической решетки, в связи с чем наиболее широко исследуются фториды (в виде стеклокерамики и кристаллических порошков) для применения в медицине, источников белого света и увеличении КПД солнечных батарей.

Целью данной работы являлась разработка методики синтеза однофазных порошков на основе фторида стронция, легированного парами  $\text{Yb}^{3+}:\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}:\text{Tm}^{3+}$ , а также их физико-химическая и люминесцентная характеристика для установления взаимосвязи «состав – люминесцентные характеристики» синтезированных порошков.

Методом соосаждения из водных растворов при использовании нитрата стронция, нитратов редкоземельных элементов, фторида аммония и фтороводородной кислоты синтезированы однофазные порошки твердых растворов  $\text{Sr}_{1-x-y}\text{Yb}_x\text{Er}_y\text{F}_{2+x+y}$  и  $\text{Sr}_{1-x-y}\text{Yb}_x\text{Tm}_y\text{F}_{2+x+y}$  со структурой флюорита, причем содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) варьировалось в широком диапазоне концентраций (для пар Yb/Er:  $x = 2 \div 12$ ;  $y = 0.1 \div 3$  мол. %; для пар Yb/Tm:  $x = 1 \div 30$ ;  $y = 0.1 \div 6$  мол. %).

В результате работы отработана методика синтеза и условия термообработки синтезируемых порошков.

Проанализирована зависимость энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции для порошков на основе фторида стронция, легированного парами Yb:Er и Yb:Tm в зависимости от содержания РЗЭ. Определены перспективные составы ап-конверсионных люминофоров  $\text{Sr}_{1-x-y}\text{Yb}_x\text{Er}_y\text{F}_{2+x+y}$  ( $x = 5 \div 7,5$ ;  $y = 0,5 \div 2$  мол. %) и  $\text{Sr}_{1-x-y}\text{Yb}_x\text{Tm}_y\text{F}_{2+x+y}$  ( $x = 10$ ;  $y = 0,1 \div 0,2$  мол. %), которые могут обеспечить ап-конверсионную люминесценцию с энергетическим выходом более 5 % при накачке полупроводниковым лазером на длине волны 974 нм и плотности мощности накачки 1 Вт/см<sup>2</sup>.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-32-00654 мол\_а.

## ПОЛУЧЕНИЕ МЕТОДОМ ALD НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК $Al_2O_3$ НА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЯ

*А.В. Долганов, В.С Храмов, В.П. Мишкин, А.П. Лопарева, К.Н Нищев  
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск  
E-mail: [dolganov\\_sasha@mail.ru](mailto:dolganov_sasha@mail.ru)*

Пористые пленки оксида алюминия являются ярким примером пространственно-упорядоченных структур, имеющих важное практическое значение. Данный материал является основой для создания большого круга наноматериалов и высокотехнологичных устройств: электролитических конденсаторов повышенной емкости, фотонных кристаллов, матриц для формирования наноструктур различного состава и геометрии, подложек для газовых сенсоров.

В докладе представлен новый подход к получению ориентированных высокопористых наноструктурированных пленок  $Al_2O_3$  на поверхности алюминиевых фольг. Способ основан на нанесении методом атомно-слоевого осаждения (ALD) наноразмерных слоев  $Al_2O_3$  на предварительно сформированную на поверхности алюминия высокоупорядоченную систему нанопор, которая получается путем электрохимического окисления алюминия в разбавленных растворах кислот с последующим кипячением в  $CrO_3+H_3PO_4$ . В результате, по данным растровой электронной микроскопии (РЭМ) и сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), на поверхности алюминия формируется упорядоченная структура цилиндрических каналов, расположенных перпендикулярно подложке и образующих гексагональную сетку (рис. 1).

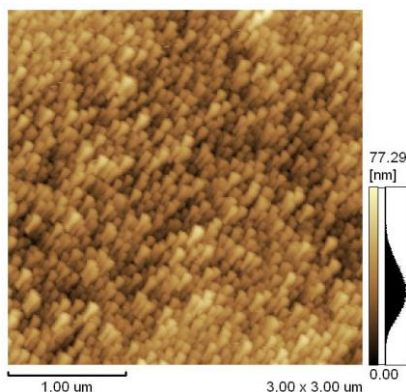


Рис.1.

Выявлены корреляции между условиями электрохимического окисления алюминия и размерами доменов, долей пор в гексагональном окружении и параметрами локального порядка. Разработана методика синтеза и подобраны оптимальные условия формирования пористых наноструктур на поверхности алюминия с максимальной степенью упорядоченности. Показано, что методом ALD на данной структуре могут быть получены наноструктурированные слои оксида алюминия заданной толщины и морфологии.

СИНТЕЗ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ  $MgAl_2O_4: Eu^{3+}/Eu^{2+}$

Е.В. Гольева<sup>1,2</sup>, И.Е. Колесников<sup>3</sup>, М.Д. Михайлов<sup>1</sup>, А.В. Сандуленко<sup>1</sup>,  
И.А. Соколов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург  
E-mail: [lenysik\\_net@mail.ru](mailto:lenysik_net@mail.ru)

Оксидные нанокристаллические материалы, легированные редкоземельными ионами (РЗИ), благодаря набору особых физико-химических свойств являются объектом интенсивных исследований научного и прикладного характера и широко применяются в качестве люминесцентных покрытий, меток, маркеров в оптике, оптоэлектронике, медицине, биологии. Большой интерес представляют нанопорошки алюмомагниево-шпинели (АМШ), легированной ионами трех- и двухвалентного европия. Возбуждение люминесценции в них возможно при воздействии излучения ближнего УФ диапазона. Легирование ионами двухвалентного европия обеспечивает высокую интенсивность и квантовый выход люминофоров на основе АМШ.

Цель данного исследования – синтез и исследование физико-химических свойств нанопорошков АМШ, активированной ионами трех-, двухвалентного европия. Для получения наноразмерных кристаллических порошков  $MgAl_2O_4: Eu^{3+}/Eu^{2+}$  в работе применяли модифицированный метод Печини, включающий дополнительную термическую обработку в расплаве хлорида калия для снижения степени агломерации частиц [1]. Проведено исследование влияния температуры и времени первичного и вторичного прокаливания порошков в процессе синтеза на их структуру, фазовый состав, морфологию и спектрально-люминесцентные свойства. В работе также изучены спектры люминесценции (при разных способах возбуждения), получены и исследованы концентрационные серии образцов  $MgAl_2O_4: Eu^{3+}/Eu^{2+}$ , определены оптимальные концентрации ионов европия в матрице АМШ. Исследования свойств полученных образцов проведены с использованием оборудования ресурсных центров СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования», «Оптические и лазерные методы исследования вещества».

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Соглашения № 14.604.21.0078 (RFMEFI60414X0078).

1. E.V. Golyeva, D.V. Tolstikova, I.E. Kolesnikov et al., J. Rare Earths. **33(2)**, 129-134 (2015).

# МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ АЛЮМОМАГНИЕВОЙ ШПИНЕЛИ

Е.В. Гольева<sup>1,2</sup>, М.Д. Михайлов<sup>1</sup>, И.А. Соколов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

*E-mail: [lenysik\\_net@mail.ru](mailto:lenysik_net@mail.ru)*

Для развития современной науки и техники, в частности для создания оптико-электронных систем повышенного качества, актуальной задачей является поиск новых или усовершенствование имеющихся оптических материалов. В числе перспективных неорганических материалов особое место занимает оптическая керамика алюмомагниево-шпинели (АМШ). Сочетание высоких оптических, механических и других физико-химических свойств обуславливают широкое применение АМШ в качестве прозрачной брони, обтекателей ракет, подложек для электронных устройств. АМШ, легированная ионами переходных металлов (Fe, Co, Ni, Ti и др.), представляет интерес для создания искусственных драгоценных камней. Использование нанопорошков в технологии оптических керамик способствует улучшению их спекаемости и уплотнению и значительно повышает механические и оптические свойства конечного продукта.

Цель данной работы – синтез и исследование свойств нанопорошков АМШ и оптической керамики на их основе для получения мультиспектрального материала, прозрачного от УФ до ближнего ИК диапазона длин волн. Для изготовления керамики в работе использовались наноразмерные порошки АМШ, синтезированные следующими методами «мягкой химии»: модифицированным методом Печини [1] и методом гидролиза двойного изопропилата Mg-Al [2]. Керамические образцы получены методом горячего одноосного прессования нанопорошков. Исследовано влияние условий синтеза нанопорошков на их структуру, свойства и физико-химические характеристики оптической керамики на их основе. Изучены оптические свойства керамических образцов. Продемонстрирована возможность получения цветной оптической керамики, перспективной для ювелирной промышленности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках программы «УМНИК».

1. E.V. Golyeva, D.V. Tolstikova, I.E. Kolesnikov at al., J. Rare Earths. **33**(2), 129-134 (2015).
2. В.В. Дроботенко, Е.М. Гаврищук. Способ получения двойного изопропилата магния-алюминия. Патент России № 2471763. 2011.



# ОСЦИЛЛЯЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ КРИСТАЛЛОВ КАЛИЯ ДИГИДРОФОСФАТА

Н.П. Нетесова

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Физический факультет, НТСФ К, Москва  
E-mail: [nprn@mig.phys.msu.ru](mailto:nprn@mig.phys.msu.ru)*

Оптические параметры кристаллов KDP - дигидрофосфата калия,  $K_2H_2PO_4$ , исследовались в рамках полиосцилляционной электронной модели [1].

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= 1 + \sum_k \omega_{pk}^2 (\omega_{ck}^2 - \omega^2) / \Omega_k^4, & \varepsilon_i &= \sum_k 2\gamma_k \omega_{pk}^2 \omega / \Omega_k^4, & \Omega_k^4 &= (\omega_{ck}^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma_k^2 \omega^2, \\ 2n_r^2 &= [(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_i^2)^{0,5} + \varepsilon_r], & 2n_i^2 &= [(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_i^2)^{0,5} - \varepsilon_r], \\ \alpha &= n_i \cdot \hbar\omega / (\hbar/2) = 10^5 n_i \cdot \hbar\omega, & R &= [(n_r - 1)^2 + n_i^2] / [(n_r + 1)^2 + n_i^2], \\ \omega_{pv}^2 &= (4\pi e^2 / m) \cdot \rho \cdot s / (M \cdot q), \end{aligned}$$

где  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_i$ ,  $n_r$ ,  $n_i$  есть действительные и мнимые компоненты диэлектрической и преломления функций,  $\hbar\omega_p$ ,  $\hbar\omega_c$ ,  $\hbar\gamma$  – плазменная, эффективная собственная, радиационного трения энергии в eV,  $e$ ,  $m$ ,  $s$  – заряд, масса и валентное число электронов, соответственно,  $\omega$  – частота,  $h=2\pi\hbar$  – постоянная Планка,  $\hbar\omega_{pv}$  – плазменная энергия, соответствующая максимуму электронных потерь  $\omega L$ ,  $q$  – параметр взаимодействия,  $M$  – молекулярная масса,  $\rho$  – массовая плотность в  $g/cm^3$ ,  $\alpha$  – коэффициент поглощения в  $cm^{-1}$ ,  $R$  – коэффициент отражения,  $c$  – скорость света.

Для моноосцилляционной модели KDP величина квадрата плазменной энергии валентных электронов равна  $\omega_{pv}^2 = 456,6769 = 21,37^2$ , величина квадрата собственной энергии –  $\omega_c^2 = 14,2884 = 3,78^2$ , граничные условия при  $\omega = 0$  определяются  $\varepsilon_{r0} = 1 + \omega_p^2 / \omega_c^2$ ,  $\varepsilon_{r0} = 456,6769 / 14,2884 = 31,96137$ . Величина коэффициента поглощения  $\alpha = 10^5 \cdot 3,7 \cdot 9 \cdot 210^{-7} = 0,34 cm^{-1}$  при  $\hbar\omega = 3,7$ ,  $2\hbar\gamma = 4 \cdot 10^{-8}$ ,  $n_i = 9,2 \cdot 10^{-7}$  согласуется с экспериментальными данными [2]. При уменьшении потерь  $2\gamma < 4 \cdot 10^{-8}$  коэффициент поглощения  $\alpha$  будет уменьшаться. Однородность наноструктур KDP можно контролировать по величине  $2\gamma_k$ .

Были рассчитаны для  $k = 6$  осцилляционной модели оптические функции  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_i$ ,  $n_r$ ,  $n_i$ ,  $\alpha$ ,  $\omega$ ,  $\varepsilon_b$ ,  $L$ ,  $\omega L$ ,  $R$ . Величина квадрата плазменной энергии  $\hbar\omega_{pv}^2$  разбивается на 6 переменных по числу оксидов  $2KH_2PO_4 = 2KPO_3 + 2H_2O = K_2O + P_2O_5 + 2H_2O = (K_2 + 0,5O_2) + (P_2 + 2,5O_2) + (2H_2 + O_2)$ .

Обсуждаются для KDP критерии образования, роста, устойчивости и однородности нанокристаллов. Рассматривается фазовый переход (температура 123 К) в KDP при разрыве валентных связей, ассоциации атомов за счёт выделения энергии подрешеток спаренных электронов – молекул, фазовом расслоении.

1. N.P. Netesova, Proc. SPIE, Nanophotonics VI, **9884**, 98843R1-98843R14 (April 21, 2016).
2. В.И. Беспалов и др., Квантовая электроника, **9** (11), 2343-2345 (1982).

# МОДИФИКАЦИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСИСТЕМ «НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КРЕМНИЙ/ДИЭЛЕКТРИК» ВВЕДЕНИЕМ ВОДОРОДА

А.М. Легков, А.В. Ершов, Д.А. Грачев, И.И. Чунин

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

*E-mail: [legkov\\_a\\_m@mail.ru](mailto:legkov_a_m@mail.ru)*

Цель работы - изучение влияния отжига и постгидрогенизации на фотолюминесценцию (ФЛ) многослойных нанопериодических структур (МНС)  $a\text{-SiO}_x/\text{SiO}_2$ ,  $a\text{-SiO}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $a\text{-SiO}_x/\text{ZrO}_2$ .

МНС  $\text{SiO}_x/\text{диэлектрик}$  с периодами 8–20 нм и числом слоев до 60 были получены электронно-лучевым испарением. Отжиг образцов в азотной среде с целью формирования нанокристаллов кремния (nc-Si) проводился при температурах 1000 и 1100 °С в течение 2 часов. Гидрогенизация МНС проводилась отжигом в молекулярном водороде (1 атм.) при 400–550 °С в течение 2 часов. Последующая дегидрогенизация осуществлялась в атмосфере азота при температурах 600–700 °С в течение часа. Спектры стационарной ФЛ измерялись при комнатной температуре на монохроматоре SP-150 (350–900 нм) при накачке  $\text{N}_2$ -лазером (337 нм) и Ar-лазером (488 нм), а также в диапазоне 580–1100 нм при возбуждении Nd:YAG (532 нм) лазером.

По данным ФЛ наблюдается пик в диапазоне длин волн 700–800 нм (1.5–1.8 эВ), связанный с излучением от НК Si в диэлектрической матрице. Термообработка отожженных при 1000 и 1100 °С МНС  $a\text{-SiO}_x/\text{диэлектрик}$  в водороде при 400–550 °С усиливает интенсивность фотолюминесценции от НК в 2–6 раз для исследуемых типов структур и их периодов. Наиболее подходящим для гидрогенизации найден диапазон температур 400–450 °С, выше которого пассивация становится менее эффективной вследствие нарастания эффузии водорода. Рост интенсивности ФЛ сопровождается слабым красным смещением пика световой эмиссии за счет более эффективной пассивации оборванных связей более крупных НК Si и соответствующего уменьшения концентрации центров безызлучательной рекомбинации.

Последующая дегидрогенизация в безводородной среде при температурах 600–700 °С приводит к значительному уменьшению интенсивности люминесценции от нанокристаллов кремния из-за интенсивной эффузии водорода.

С целью нахождения водорода в образцах, подвергнутых гидрогенизации, проводилось снятие спектров ИК пропускания. Влияние пассивации водородом оборванных связей на границе nc-Si/диэлектрик исследовалось методом ЭПР.

**NANOMATERIALS  
AND NANOTECHNOLOGIES**

# MECHANISM OF A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> NANOSTRUCTURES FORMATION

N.L. Shwartz

*A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

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

Research interest to A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> nanostructures is due to their promising applications in opto- and nanoelectronics. Simulation results of nanowires (NW), nanoclusters and nanorings growth according to vapor-liquid-solid mechanism are presented in this work. Analysis of nanostructure growth was fulfilled using a Monte Carlo simulation based on software package SilSim3D [1].

Growth rate dependences of catalyzed and self-catalyzed growth of GaAs and InAs NWs on temperature and arsenic flux were obtained and analyzed. It was shown that self-catalyzed growth is more sensitive to the ratio between the gallium and arsenic fluxes than catalytic growth. A readsorption effect on NW morphology and growth rate was examined. Arsenic readsorption was demonstrated to make a dominant contribution to the increase of NW growth rate and untimely drop consumption. Gallium/indium readsorption results in insignificant axial growth rate decrease, but prolongates NW growth, preventing drop disappearance for the length exceeding the Ga/In diffusion length along NW side walls. Self-equilibration effect of NW diameters, typical for self-catalyzed growth [2], was demonstrated.

Morphology dependence of GaAs nanostructure, formed by droplet epitaxy, on growth parameters was demonstrated. Temperature and arsenic flux ranges for GaAs nanoclusters and nanoring formation were determined. The conditions for single and double nanorings were analyzed. It was shown that double rings formation is possible for certain temperatures and arsenic fluxes when distances between the droplets exceed twice gallium surface diffusion length.

This work was supported by RFBR (project № 14-02-00776-a) and by the Russian Academy of Sciences Programs.

1. A.N. Karpov, V.A. Zverev, A.G. Nastovjak at al., Numerical Methods and programming **15**, 388-399 (2014).
2. V.G. Dubrovskii, T. Xu, A.D. Álvarez at al., Nano Lett. **15**, 5580-5584 (2015).

## ACTIVATED ULTRADISPERSED DIAMOND: CURRENT STATUS AND PROSPECTS

G.E. Malashkevich<sup>1</sup>, V.A. Lapina<sup>1</sup>, J. Opitz<sup>2</sup>, I. Sildos<sup>3</sup>,  
V.V. Kouhar<sup>1</sup>, T.G. Khottchenkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *B.I. Stepanov Institute of Physics, NAS of Belarus, Minsk*

<sup>2</sup> *Fraunhofer Institute of nondestructive testing, Dresden, Germany*

<sup>3</sup> *Institute of Physics, University of Tartu, Tartu, Estonia*

*E-mail: [g.malashkevich@ifanbel.bas-net.by](mailto:g.malashkevich@ifanbel.bas-net.by)*

Individual particles of ultradispersed diamond (UDD) obtained by detonation synthesis represent diamond nuclei with a “diameter” of about 4 nm covered by a cluster shell of non-diamond carbon with 1–5 nm thick, on which inclusions of graphite phase also containing various types of hydrocarbons and impurities are arranged [1]. Such nanoparticles can exhibit luminescence in the visible and near-UV regions of the spectrum. Energy gap width for single crystal diamond is  $\approx 5.5$  eV, while for non-diamond carbon it may be reduced to 2 eV with increasing proportion of “graphite-like”  $sp^2$ -bonds over the “diamond-like”  $sp^3$ -bonds [2]. These features make the UDD an interesting object for different impurity activators doping and studying its effect on the spectral-luminescent properties of the latter. However, it should be noted that due to the high surface energy of individual particles the UDD are stabilized in the form of clusters sized 20–40 nm, and their separation is an intractable problem.

This work provides an overview of our results on the study of the luminescence properties of activated UDD and silica gel-glasses doped with them.

We used the UDD synthesized by CC “Sinta” (Minsk, Belarus). Activation of UDD powders was carried out by mixing them with doping compounds solutions under ultrasonic dispersion. The obtained activated powders were dried and heat treated under controlled redox conditions. Doping of the silica glasses with these powders was carried out on a sol stage.

A study of the samples was carried out using X-ray diffraction, electron microscopy and spectral-luminescent methods.

It was found that UDD activated by the manner described are characterized by a significant increase in a heat resistance: weight loss for the initial UDD after 30 minutes of annealing in air at  $T_{\text{ann}} \approx 700$  °C was 100 %, and it was less than 10 % for doped UDD. At that the Bragg reflex at  $2\Theta \approx 43,8^\circ$  corresponding to the reflection from the (111) plane of the diamond persists on a diffraction patterns [3]. The observed increase in the heat resistance we explain by the formation of the sufficiently dense film of the doping compounds associated with Ln–O–C chemical bonds with non-diamond carbon on the surface of UDD particles, which leads to inhibition of the oxidation of the diamond core.

Formation of the such bonds during the heat treatment confirmed spectroscopically on the example of the UDD doped with europium nitrate salt, for which long-wavelength shift in 0,5 nm of  $\text{Eu}^{3+}$  ions nonsplit  $^5D_0 \rightarrow ^7F_0$  band barycenter and the significant weakening of the electric dipole  $f$ – $f$ -bands take

place during the heat treatment in the 450–700 °C range. At the same time, there is a twenty-fold increase in the efficiency of luminescence excitation of  $\text{Eu}^{3+}$  ions in the region of charge-transfer band [4].

A significant increase in the intensity of luminescence is observed for the UDD doped with chromium and aluminum salts. These nanopowders exhibit efficient luminescence at low  $T_{\text{ann}}$  in the broad vibronic band  ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$ , and at high  $T_{\text{ann}}$  in the narrow spin-forbidden band  ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$  [5]. Using of Cr–Al-containing UDD with  $T_{\text{ann}} \approx 1300^\circ\text{C}$  for doping of silica gel-glasses showed that the introduced nanoparticles are subject to the isotropic compression by the matrix, as well as to a slight (due to the absence of the melt stage) dissolution when the optical  $\text{Cr}^{n+}$  centers (where  $n = 3\text{--}6$ ) are formed [6].

Rare earth ions luminescence intensity was lower for UDD doped with nitrate salts of aluminum, cerium and terbium than for the compounds of alloying elements heat-treated in a similar manner in all cases. The reason for this situation, apparently, is a large proportion of graphite-like carbon that causes quenching of both  $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{Tb}^{3+}$  ions luminescence. However, radiation resistance of the lanthanides optical centers formed on the surface of the UDD markedly increases.

The prospects of using of activated UDD as luminophors, laser active media, nanostructuring and defect-forming additives were contemplated.

1. A.E. Aleksenskii, M.V. Baidakova, A.Ya. Vul' et al., *Phys. Solid State* **41**, 668 (1999).
2. M.E. Kompan, E.I. Terukov, S.K. Gordeev, et al., *Phys. Solid State* **39**, 1928 (1997).
3. Powder Diffraction File. JCPDS – ASTM, USA, N 6-0675 (1977).
4. G.E. Malashkevich, V.A. Lapina, G.I. Semkova, et al., *JETP Letters* **77**, 291 (2003).
5. G.E. Malashkevich, V.A. Lapina, P.P. Pershukevich, *Bull. Russian Academy Sci. Phys.* **70**, 1899 (2006).
6. G.E. Malashkevich, G.I. Semkova, A.V. Semchenko, et al., *JETP Letters* **88**, 855 (2008).

# COLOUR CENTERS IN DIAMOND: OPTICAL PROPERTIES AND APPLICATION PROSPECTS

K.N. Boldyrev

*Institute of spectroscopy RAS, Troitsk, Moscow, Russia*

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

Over the last decades, optical properties of color centers in diamond attract attention of the world scientific community. These centers are associated with impurities, specially introduced by doping or uncontrollable ones. Color centers are capable to both selectively absorb radiation at wavelengths that can change the color of the diamond and emit light in different spectral ranges. It turned out that some centers can provide a very narrow emission line (e.g., nitrogen-vacancy, NV, and silicon-vacancy, SiV, centers), and it is possible to get emission from a single center, which allows to explore its interesting quantum nature. In going over to nanoscale size crystals, nanodiamond containing only one optical center can be obtained. This gives possibility of using such diamonds for the needs of quantum information and computing systems, in particular, as single-photon emitters and elements of quantum computers (optical qubits). Knowledge of spectral characteristics of individual particles allows creating unique optical labels that protect against counterfeiting. In addition, perspectives of application in biology and medicine appear. Using such nanoparticles, one can investigate the processes taking place inside a single cell, as well as in the whole organism, it is possible to carry out studies *in vivo*, that is, to work with living organisms. "Attaching" nanodiamond with a color center to, e.g., a virus, one can see how the latter one attacks the cell, which has a perspective of creating new and effective means of protection against viruses. It is worth noting that diamond is carbon but living organisms contain carbon, so one can await a low toxicity of nanodiamonds. All said above points to a great scientific and practical potential of diamond with color centers.

The lecture will also deal with the author's research on a new optical center in diamond, associated with the germanium impurity (GeV). Our study has shown that GeV centers have unique characteristics, in many respects superior to those of previously known SiV and NV centers. In particular, they show a very bright glow in the orange-red region of the spectrum, with high quantum efficiency. Interesting isotopic effects associated with both carbon and germanium will be discussed [1].

Financial support of the RAS under the Program "Fundamental and practical problems of photonics and physics of new optical materials" is acknowledged.

1. E.A. Ekimov, S.G. Lyapin, K.N. Boldyrev at al., JETP Letters **102**, 811 (2015).

## THE INTERACTION OF NEAR-INFRARED LASER RADIATION WITH Yb-DOPED DIELECTRIC PARTICLES

S.A. Khrushchalina<sup>1</sup>, P.A. Ryabochkina<sup>1</sup>, V.M. Kyashkin<sup>1</sup>, A.S. Vanetsev<sup>2</sup>,  
O.M. Gaitko<sup>3</sup>, E.E. Lomonova<sup>4</sup>, N.Yu. Tabachkova<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup> *The Institute of Physics, University of Tartu, Tartu, Estonia*

<sup>3</sup> *Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, RAS, Moscow, Russia*

<sup>4</sup> *Prokhorov General Physics Institute, RAS, Moscow, Russia*

<sup>5</sup> *National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia*

*E-mail: [anabel-2005@yandex.ru](mailto:anabel-2005@yandex.ru)*

At the present time the dielectric nanosized compounds doped by rare earth (RE) ions are interesting for researchers. Excitation of these nanoparticles by laser radiation with a certain wavelengths leads to occurrence of luminescence of RE ions, allowing their application in biomedicine as the visualizers and bio-labels.

In addition to investigations devoted to the study of the luminescence of RE ions in dielectric nanoparticles, there are articles testifying that such particles can exhibit the properties that different from those of the bulk crystals of similar composition. In particular, some authors [1-4] report about the occurrence of broadband radiation in ytterbium-containing compounds when excited by laser radiation in an absorption band of Yb<sup>3+</sup> ions. A similar phenomenon has been observed in such nanopowders as LiYbP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> [1], Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Yb,Er [2], Yb<sub>3</sub>A<sub>15</sub>O<sub>12</sub> [3], as well as ceramics Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Yb<sup>3+</sup> [4], but there is no single opinion about the causes of appearance of the broadband radiation in these compounds.

In this paper we report the observation of the broadband radiation and its characteristics in nanosized particles of concentration series of yttrium orthophosphates and hydrate orthophosphates doped with Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>, as well as particles Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub>-Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Experimental evidence of the thermal nature of the broadband radiation are presented, and possible mechanisms of its occurrence are suggested .

1. W. Strek, L. Marciniak, A. Bednarkiewicz at al., *Opt. Express* **19**, 14084 (2011).
2. S.M. Redmond, S.C. Rand, S.L. Oliveira, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 5517 (2004).
3. J. Wang, J.H. Hao, P.A. Tanner, *Optic Lett.* **35**, 3922 (2010).
4. J.-F. Bisson, D. Kouznetsov, K.-I. Ueda at al., *Appl. Phys. Lett.* **90**, 201901 (2007).



## RESONATOR MULTILAYER STRUCTURES CONTAINED SI AND GE NANOCRYSTALS

D.A. Grachev<sup>1</sup>, S.A. Garakhin<sup>1</sup>, A.V. Belolipecky<sup>2</sup>, A.N. Yablonsky<sup>1,3</sup>,  
B.A. Andreev<sup>1,3</sup> and A.V. Ershov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>2</sup> *Ioffe Physical-Technical Institute, RAS, St Petersburg, Russia*

<sup>3</sup> *Institute for Physics of Microstructures, RAS, Nizhny Novgorod, Russia*

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

We present a structural and optical study of Si and Ge nanocrystals in the resonator structures. The multilayer nanopericodic structures were fabricated by physical vapor deposition of SiO (or GeO) and SiO<sub>2</sub> from two separate sources. Formation of nanocrystals has been achieved by annealing in a nitrogen atmosphere: the SiO/SiO<sub>2</sub> structure [1] at 1000–1100 °C, and the GeO/SiO<sub>2</sub> structure at 400–600 °C [2]. Nanocrystal sizes have ranged from about 3 to 8 nm by varying the annealing temperature [1] and the thickness of the layers [3], which were a few nanometers. The resonator structures were prepared on silicon substrates and consisted of two distributed Bragg reflectors with an active medium filled with the nanocrystals in between [4].

The stationary photoluminescence has been excited with a Nd:YAG laser emitting at  $\lambda = 532$  nm. The time-resolved photoluminescence spectra have been obtained at the excitation with a pulse nitrogen laser emitting at  $\lambda = 337$  nm, with a pulse duration of 7 ns and repetition frequency 45 Hz. Measurements have been carried out at room temperature.

The study has been found that the use of such resonator structures has led to significant narrowing of luminescence bands to 20 nm and enhancing their intensity up to 50 times at the same time. The particular position of the luminescence band maximum is determined by the resonator design: operating range for the SiO/SiO<sub>2</sub> structures was 650–850 nm and 1000–750 nm for GeO/SiO<sub>2</sub>. So far as the dynamics is concerned, we observed decrease in luminescence time for the resonators compared with the structures without mirrors.

This resonator structure study in general seems to be a good way to add further functionality to silicon photonics and investigate broader the problem of the luminescence of silicon and germanium nanocrystals as well.

1. L. Vaccaro, L. Spallino, A.F. Zetsepina et al., *Physica Status Solidi (B)* **252**, 600 (2015).
2. M. Ardyanian, H. Rinnert, M. Vergnat, *Journal of Luminescence* **129**, 729 (2009).
3. A.V. Ershov, I.A. Chugrov, D.I. Tetelbaum et al., *Semiconductors* **47**, 481 (2013).
4. A. Belarouci, F. Gourbilleau, R. Rizk, *Journal of Luminescence* **121**, 282 (2006).

# THE OBTAINING OF NANOSIZED $\text{Al}_2\text{O}_3$ FILMS ON NOSTRUCTURED ALUMINUM SURFACE BY ALD METHOD

A.V. Dolganov, V.S. Khramov, V.P. Mishkin, A.P. Lopareva, K.N. Nishev  
*Mordovian State University, Saransk, Russia*  
*E-mail: [dolganov\\_sasha@mail.ru](mailto:dolganov_sasha@mail.ru)*

Porous alumina films are a bright example of spatially ordered structures with great practical importance. This material is the base for a large range of nanomaterials and high-tech devices, such as electrolytic high-value capacitors, photonic crystals, matrices for the formation of nanostructures with different compositions and geometries, substrates for gas sensors.

The new method for the production of highly porous oriented  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanostructured films on the surface of aluminum foil is presented. This approach is based on the nanosized  $\text{Al}_2\text{O}_3$  atomic layers deposition (ALD) on alumina surface with a preformed highly ordered nanopore system, obtained by electrochemical oxidation of aluminum in a dilute acid solution, followed by boiling in  $\text{CrO}_3+\text{H}_3\text{PO}_4$ . According to scanning electron microscopy (SEM) and scanning probe microscopy (SPM), the ordered structure of cylindrical channels disposed perpendicular to the substrate and forming a hexagonal grid is obtained on the surface of aluminum (Fig.1).

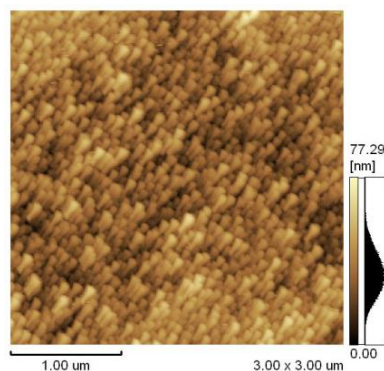


Fig.1.

Correlations between the aluminum electrochemical oxidation conditions and the domain size, as well as between the proportion of pores in the hexagonal environment and local order parameters are detected. The method of synthesis is developed and the optimal conditions for the formation of porous nanostructures on the surface of aluminum with a maximum degree of order are selected. It is shown that the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanostructured layers with the predetermined thickness and morphology can be obtained on this structure by the ALD method.

# OSCILLATION PARAMETERS OF POTASSIUM DIHYDROGEN PHOSPHATE CRYSTALS

N.P. Netesova

*M.V. Lomonosov Moscow State University, Physics Faculty, LTSP D, Russia*

*E-mail: [npn@mig.phys.msu.ru](mailto:npn@mig.phys.msu.ru)*

Optical parameters of KDP crystals - potassium dihydrogen phosphate,  $K_2H_2PO_4$ , within poly oscillation electron model were investigated [1].

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= 1 + \sum_k \omega_{pk}^2 (\omega_{ck}^2 - \omega^2) / \Omega_k^4, & \varepsilon_i &= \sum_k 2\gamma_k \omega_{pk}^2 \omega / \Omega_k^4, & \Omega_k^4 &= (\omega_{ck}^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma_k^2 \omega^2, \\ 2n_r^2 &= [(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_i^2)^{0.5} + \varepsilon_r], & 2n_i^2 &= [(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_i^2)^{0.5} - \varepsilon_r], \\ \alpha &= n_i \cdot \hbar\omega / (\hbar/2) = 10^5 n_i \cdot \hbar\omega, & R &= [(n_r - 1)^2 + n_i^2] / [(n_r + 1)^2 + n_i^2], \\ \omega_{pv}^2 &= (4\pi e^2 / m) \cdot \rho \cdot s / (M \cdot q), \end{aligned}$$

where  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_i$ ,  $n_r$ ,  $n_i$  are the real and imaginary components of the dielectric and refractive functions,  $\hbar\omega_p$ ,  $\hbar\omega_c$ ,  $\hbar\gamma$  are the plasma, effective natural, radiant friction energies in eV,  $e$ ,  $m$ ,  $s$  are charge, mass and valency number electrons; suitably,  $\omega$  is frequency,  $h=2\pi\hbar$  is Planck constant,  $\hbar\omega_{pv}$  is the plasma energy corresponding to the maximum electron losses  $\omega L$ ,  $q$  is interaction parameter;  $M$  is molecular mass,  $\rho$  is mass density in  $g/cm^3$ ,  $\alpha$  is the absorption coefficient in  $cm^{-1}$ ;  $R$  is the reflectance factor,  $c$  is the light speed.

For one oscillation KDP model value of the square plasma valence electron energy is  $\omega_{pv}^2=456,6769=21,37^2$ , the value of the square effective natural energy is  $\omega_c^2=14,2884=3,78^2$ , the boundary conditions at  $\omega=0$  are determined  $\varepsilon_{r0}=1+\omega_p^2/\omega_c^2$ ,  $\varepsilon_{r0}=456,6769/14,2884=31,96137$ . The absorption coefficient value  $\alpha=10^5 \cdot 3,7 \cdot 9,210^{-7}=0,34 cm^{-1}$  at  $\hbar\omega=3,7$ ,  $2\hbar\gamma=4 \cdot 10^{-8}$ ,  $n_i=9,2 \cdot 10^{-7}$  is consistent with experimental data [2]. With radiation loss decrease  $2\hbar\gamma < 4 \cdot 10^{-8}$  absorption coefficient  $\alpha$  will be decreased. Homogeneity of KDP nanostructures can be controlled by the value  $2\gamma_k$ .

There were calculated for  $k=6$  the oscillation model optical functions  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_i$ ,  $n_r$ ,  $n_i$ ,  $\alpha$ ,  $\omega$ ,  $\varepsilon_b$ ,  $L$ ,  $\omega L$ ,  $R$ . The square plasma energy value  $\hbar\omega_{pv}^2$  is divided into 6 variables on the number of oxides  $2KH_2PO_4 = 2KPO_3 + 2H_2O = K_2O + P_2O_5 + 2H_2O = (K_2 + 0,5O_2) + (P_2 + 2,5O_2) + (2H_2 + O_2)$ .

Criteria for KDP formation, growth, stability and homogeneity nanocrystals are discussed. The phase transition (temperature 123 K) in KDP at break covalent bonds, the association of atoms due to the release of energy sublattices paired electrons - molecules, phase separation is considered.

1. N.P. Netesova, Proc. SPIE, Nanophotonics VI, **9884**, 98843R1-98843R14 (April 21, 2016).

MODIFICATION OF LUMINESCENT PROPERTIES  
OF «NANOCRYSTALLINE SILICON/DIELECTRIC» MULTILAYER  
NANOSYSTEMS BY HYDROGENATION

A.M. Legkov, A.V. Ershov, D.A. Grachev, I.I. Chunin  
*Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, Russia*  
*E-mail: [legkov\\_a\\_m@mail.ru](mailto:legkov_a_m@mail.ru)*

We have studied photoluminescence (PL) of the  $a$ -SiO<sub>x</sub>/SiO<sub>2</sub>,  $a$ -SiO<sub>x</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $a$ -SiO<sub>x</sub>/ZrO<sub>2</sub> multilayer nanoperiodic structures (MNS) annealed and post-hydrogenized.

A SiO<sub>x</sub>/dielectric MNS consists of a few layers, up to 60; layer thickness is varied between 8–20 nm. MNS were obtained by electron beam evaporation. Annealing of the samples was carried out in nitric environment at 1000 and 1100 °C for 2 hours. The MNS were annealed in molecular hydrogen (1 atm.) at 400–550 °C for 2 hours. PL spectra were measured with monochromator SP-150 (350–900 nm), the samples were pumped by N<sub>2</sub>-laser (337 nm), Ar<sub>2</sub>-laser (488 nm) and in the range 580–1100 nm by Nd:YAG-laser (532 nm).

As to PL data of the annealed SiO<sub>x</sub>/dielectric systems there is a PL band in the range of 700–800 nm (1,5–1,8 eV) and assumed with silicon nanocrystals (Si NCs). PL intensity of annealed at 1000–1100 °C MNS increases by 2–6 times after heat treatment in hydrogen at 400–550 °C for all structures and all layer thicknesses. Its maximum reaches after hydrogenation at 400–450 °C, and for higher annealing temperature it is less effective since hydrogen effusion rises. The growth of the PL intensity is accompanied by a weak red shift. The phenomena is caused by more effective passivation of the dangling bonds in the large Si NCs and corresponding reduction in the concentration of recombination centers.

The subsequent dehydrogenation in nitric environment at a temperature of 600–700 °C decreases the luminescence intensity of Si NCs since intensive hydrogen effusion.

In order to find the hydrogen in the hydrogenated samples was obtained IR transmission spectra. The effect of the hydrogen passivation of the dangling bonds at the nc-Si–oxide count was investigated by ESR.

# **ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА**

# ПОЛУЧЕНИЕ СВЕТОВОДОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЧИСТОГО КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА, ЛЕГИРОВАННОГО ОЛОВОМ МЕТОДОМ MCVD И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

А.С. Лобанов<sup>1</sup>, А.Н. Гурьянов<sup>1</sup>, С.В. Фирстов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН,  
Нижний Новгород*

<sup>2</sup>*Научный центр волоконной оптики РАН, Москва  
E-mail: [lobanov@ihps.nnov.ru](mailto:lobanov@ihps.nnov.ru)*

Введение диоксида олова даже в незначительных концентрациях в силикатные стекла повышает их фоточувствительность в ультрафиолетовой части спектра, что позволяет выполнять более эффективную запись брэгговских решеток в волоконных световодах. Кроме того потребность в широкополосных оптических усилителях и лазерах стимулировали интерес к поиску новых материалов, пригодных для создания таких устройств в ближней ИК области. Обнаружение ИК люминесценции в стеклах, легированных висмутом, и последующая демонстрация в висмутовых световодах лазерной генерации и усиления в области 1150 – 1770 нм повысило интерес к поиску новых легирующих добавок.

Авторы работы [1] наблюдали широкую полосу люминесценции на 1200 – 1600 нм в стекле на основе SiO<sub>2</sub> с добавкой олова, положение которой зависело от длины волны накачки. Авторы работы связывают наличие этих полос с активными центрами обусловленными присутствием ионов Sn<sup>2+</sup> в полученном стекле. Важно отметить, что в литературе отсутствуют сведения с детальным описанием MCVD процесса получения волоконных заготовок на основе высокочистого кварцевого стекла, легированного оловом и световодов из них.

В данном сообщении приводятся результаты исследований по получению заготовок MCVD методом и волоконных световодов на основе высокочистого кварцевого стекла, легированного оловом. Для введения олова использовался метод осаждения из газовой фазы, а также метод пропитки пористого слоя стекла. Проведены исследования влияния состава стекла матрицы, окислительно-восстановительных условий и температуры осаждения на эффективность вхождения олова в стекло. Показано существенное влияние температуры процесса на концентрацию олова в полученных стеклах. Получены образцы заготовок и световодов с содержанием диоксида олова до 7,5 мол.%. Проведены исследования оптических характеристик полученных заготовок и световодов.

1. B.I. Denker , B.I. Galagan, L.D. Iskhakova et al., J. Appl. Phys. B. **120**, 13 (2015).

ФОРМИРОВАНИЕ ФАЗЫ МУЛЛИТА В СЕРДЦЕВИНЕ  
АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ,  
ЛЕГИРОВАННЫХ ХРОМОМ

А.Н. Абрамов<sup>1</sup>, А.Н. Гурьянов<sup>1</sup>, М.В. Яшков<sup>1</sup>, А.Д. Плехович<sup>2</sup>,  
Л.Д. Исхакова<sup>2</sup>, В.В. Колташев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН,  
Нижний Новгород.*

<sup>2</sup>*Научный центр волоконной оптики РАН, Москва.  
E-mail: [abramovan84@mail.ru](mailto:abramovan84@mail.ru)*

В настоящей работе проведено исследование оптических свойств волоконных световодов со стеклокристаллической сердцевиной, легированной хромом с перспективой создания перестраиваемых источников излучения, работающих в неохваченном волоконными лазерами диапазоне < 900 нм. Необходимость формирования кристаллической фазы, в нашем случае муллит, в сердцевине ВС путем тепловой обработки образцов обусловлена низким квантовым выходом люминесценции ионов хрома в силикатных стеклах [1, 2].

Исследование проводилось на образцах ВС на основе плавленного кварца, легированных хромом и оксидом алюминия, концентрация которого варьируется в пределах от 6,5 мол.% до 29 мол.%. Концентрация хрома оценивается как  $10^{-3}$  -  $10^{-2}$  масс.%. В ходе спектроскопических исследований ВС выявлено, что при увеличении концентрации оксида алюминия меняется соотношение интенсивностей полос поглощения ионов  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{Cr}^{4+}$ . Установлено, что при концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 20$  мол.% ионы хрома находятся преимущественно в валентности 3+.

Проведен дифференциально-термический анализ стекол сердцевины заготовок для установления параметров термообработки образцов ВС. Установлено, что тепловая обработка образцов ВС, с высоким содержанием оксида алюминия в сердцевине, увеличивает интенсивность люминесценции в ближней ИК-области спектра с увеличением ее квантового выхода до ~2 % и временем жизни вплоть до ~2,5 мс при комнатной температуре. Изучены спектры поглощения в отожженных образцах. Показана зависимость интенсивности пропускания света от времени и температуры отжига образцов.

Методами спектроскопии КР и РФА подтверждено, что отжиг приводит к появлению в сердцевине кристаллической фазы муллита.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-32-00438.

1. T. Murata, M. Torisaka, H. Takebe, K.J. Morinaga, J. Non. Cryst. Solids **220**, 139–146 (1997).
2. G.H. Beall, J.F. MacDowell, M.P. Taylor. Transparent Glass Ceramics Containing Mullite, U.S. Patent 4396720 (1983).

## РАЗРАБОТКА ГОЛЬМИЕВОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

И.В. Жлуктова<sup>1,2</sup>, С.А. Филатова<sup>2</sup>, В.А. Камынин<sup>2</sup>, В.Б. Цветков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский технологический университет, Москва

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

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

Интерес к 2 мкм диапазону вызван потенциальными применениями в таких областях, как медицина, спектроскопия и перспективных телекоммуникационных разработках. Для реализации оптических схем, работающих в этом диапазоне, необходимы усилители, основанные на ионах тулия или гольмия. Тулиевые волоконные усилители продемонстрировали высокий коэффициент усиления и низкий уровень шум-фактора при работе в спектральном диапазоне от 1720 нм до 2050 нм [1]. Однако для получения генерации на длинах волн более 2100 нм, как правило, используются волокна, легированные ионами гольмия, так как их область люминесценции лежит в диапазоне 1900-2200 нм [2-4].

Оптическая схема гольмиевого усилителя представлена на рисунке 1(А). В качестве задающего генератора (З. Г.) был использован гольмиевый лазер, излучающий на длине волны 2120 нм, мощность которого была снижена до 250 мкВт. Мультиплексор (WDM) 1125/2100 нм, который объединял импульсный сигнал от задающего лазера и излучение накачки на длине волны 1125 нм.

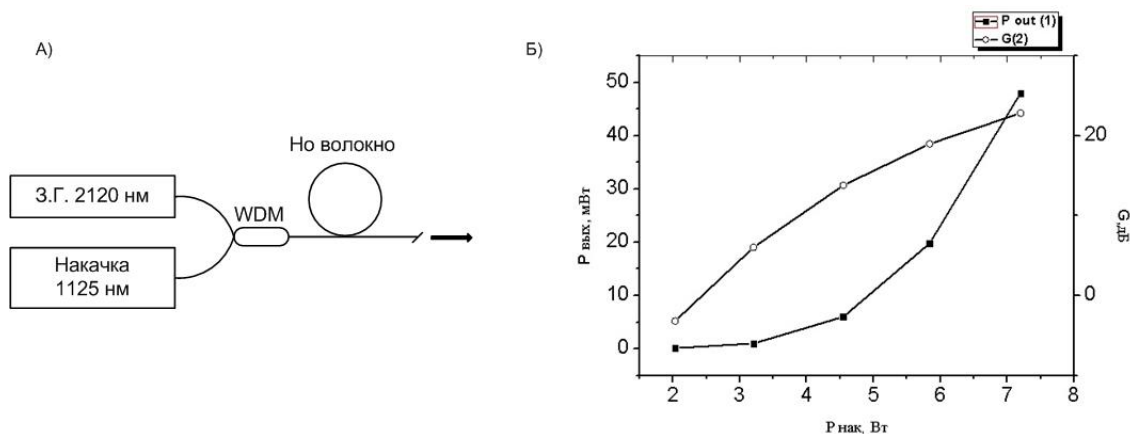


Рис. 1. А) Схема гольмиевого усилителя и Б) выходные данные.

В процессе измерения выходного сигнала был использован фильтр с подавлением 30 дБ на длинах волн менее 1,5 мкм для подавления непоглощенного излучения накачки.

В результате, максимальный коэффициент усиления составил ~ 22 дБ, а выходная мощность на длине волны 2120 нм - 48 мВт.

1. A.M. Heidt et al., IEEE J. Quantum Electron. **20**, 3100612 (2014).
2. S.D. Jackson, IEEE J. Quantum Electron. **42**, 187-191 (2006).
3. J.Kim, et al., CLEO/Europe and EQEC (2009).
4. A.S. Kurkov, et al., Opt. Lett. **35**, 490-492 (2010).



## ДАТЧИК ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВНУТРИВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК

В.Н. Захаров, Д.И. Кавтасьев, Г.И. Леонович,  
*АО «Прогресс» г. Самара*  
*E-mail: [ZaharoffV@inbox.ru](mailto:ZaharoffV@inbox.ru)*

При контроле электрического напряжения в высоковольтных линиях передачи электроэнергии необходимо либо принимать специальные высокотратные меры для защиты измерительных приборов, либо использовать технические средства, не требующие этих мер. К таким средствам относятся волоконно-оптические датчики на внутриволоконных Брэгговских решетках (ВБР) [1].

В докладе представлен способ косвенного измерения высоковольтного напряжения посредством преобразования трансформатором напряжения отбираемой из линии электрической мощности в микроперемещение сердечника трансформатора, жестко закрепленного на участке оптического волокна с ВБР (рис. 1). Микроперемещение сердечника вызывает аксиальную деформацию участка ОВ, что в свою очередь позволяет получить оптический сигнал, длина волны которого пропорциональна измеряемому напряжению. Начальная предустановка и коррекция управления аксиальным растяжением участка ОВ с ВБР осуществляется с применением постоянного магнита.

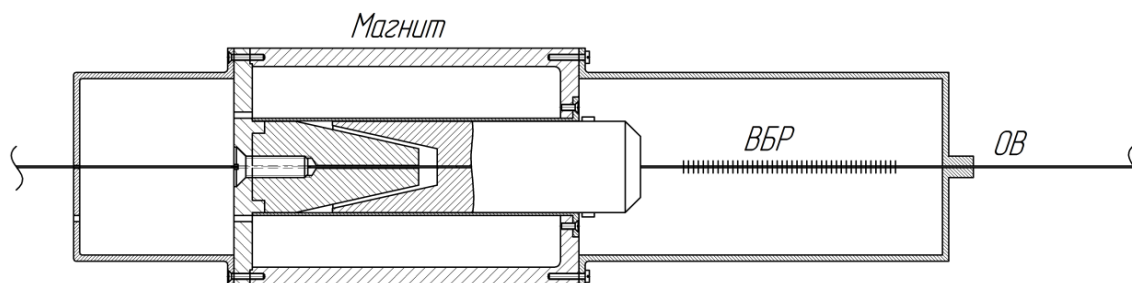


Рис. 1

Выбор и оптимизация зазора между якорем и сердечником, образованного усеченно-коническими полюсами, позволяет снизить поток рассеяния катушки и увеличить проводимость рабочего зазора, что существенно улучшает эффективность использования энергии магнитного поля.

1. В. Ribeiro, FBG-PZT sensor system for high voltage measurements Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2011 IEEE.

## ПАССИВНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Г.И. Леонович, С.В. Олешкевич, В.Н. Захаров, Н.В. Рясной  
*АО «Прогресс» г. Самара*  
*E-mail: leogil@mail.ru*

Одним из существенных преимуществ пассивных волоконно-оптических датчиков напряженности электрического поля (ВДЭП) перед гальваническими является абсолютная искровзрывобезопасность, что делает их особо привлекательными для опасных производств и объектов [1]. Наибольшую известность среди ВДЭП получили датчики напряженности электрического поля, основанные на электрооптическом эффекте По克尔са. При массе достоинств таких датчиков они не являются сетевыми и требуют отдельно для каждого сенсора подводящее и отводящее транспортные волокна. Кроме того, в них применён аттенуаторный тип преобразования напряженности ЭП в мощность модулируемого ей аналогового оптического сигнала, существенно снижающий помехоустойчивость протяженных каналов передачи данных.

В настоящее время набирают популярность ВДЭП волнового типа на основе внутриволоконных Брэгговских решеток (ВБР). Группу из нескольких десятков таких датчиков, работающих в индивидуальных спектральных диапазонах, можно объединить в сетевую структуру на одножильном транспортном оптоволокне, которое подключается к удаленному анализатору спектра - интеррогатору. К сложностям реализации известных структурных и технических решений при создании таких датчиков является необходимость поиска высокочувствительного сенсорного элемента, представляющего собой либо непосредственно участок специализированного оптоволокна с ВБР, либо такой же элемент на стандартном оптоволокне, но с дополнительной сенсорно-актуаторной структурой (САС), преобразующей воздействие электрического поля в механическую или тепловую деформацию участка с ВБР. В ряде публикаций в качестве САС предлагаются различные материалы, обладающие сильными электрострикционным или пьезоэлектрическим эффектами, например сегнетоэлектрические релаксоры на основе магнониобата свинца [2].

С учетом дополнительного упругого сопротивления, создаваемого материалом оптического волокна, относительная осевая деформация участка ВБР с САС определяется формулой

$$\xi_{ВБР} = \frac{\varepsilon_0 (k\varepsilon_{САС} + n\varepsilon_{ОВ}) E^2}{kY_{САС} + nY_{ОВ}}, \quad k + n = 1, \quad (1)$$

где  $E$  - напряженность электрического поля; где  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_{САС}$  и  $\varepsilon_{ОВ}$  - электрическая постоянная вакуума и относительные электрические константы материала САС и ОВ соответственно;  $Y_{ОВ}$  и  $Y_{САС}$  - модули Юнга оптического волокна с ВБР и САС соответственно;  $k$ ,  $n$  - коэффициенты опреде-

ляющие вклад САС и ОВ (по массе и способу взаимодействия) в формирование итоговой деформации.

На рис. 1 представлены характеристики зависимости деформации различных типов САС от напряженности электрического поля, в которых практически у всех характеристик наблюдается малая крутизна на начальных участках кривых.

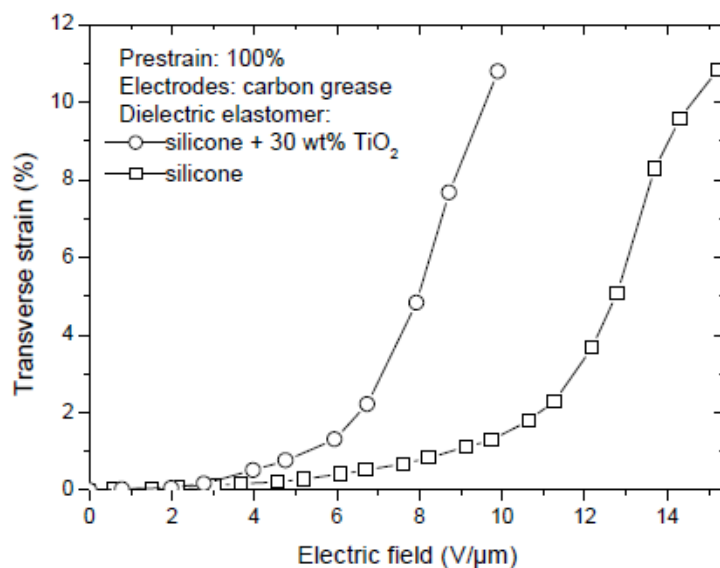


Рис. 1

Авторами предложен способ и техническое решение, позволяющее без введения гальванических элементов за счет применения нового комбинированного САС из релаксоров и электретов сместить начальную точку отсчета зависимости на участок с большей крутизной характеристики, что существенно улучшает чувствительность датчика при малых значениях напряженности электрического поля.

1. Т. Окоси, *Волоконно-оптические датчики*, Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
2. Z.Y. Cheng, V. Bharti, X. Zhao, S. Wang. *Ultrasonics Symposium*, 1998.

## ПЕРЕДАЧА СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ПО ВОЛОКОННОМУ СВЕТОВОДУ С ПОЛОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ

Е.Н. Плетенева<sup>1,2</sup>, А.Ф. Косолапов<sup>3</sup>, А.Н. Колядин<sup>3</sup>,  
А.В. Гладышев<sup>3</sup>, А.Г. Охримчук<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Российский химико-технологический университет  
им. Д.И. Менделеева, Москва*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт, Москва*

<sup>3</sup>*Научный Центр Волоконной Оптики РАН, Москва*

*E-mail: [ekaterina.pleteneva@phystech.edu](mailto:ekaterina.pleteneva@phystech.edu)*

Волоконные световоды с поллой сердцевинной выгодно отличаются от световодов с кварцевой сердцевинной тем, что они способны пропускать сверхкороткие импульсы высокой пиковой мощности, обладают уникальными дисперсионными свойствами и низкой нелинейностью (примерно на 3 порядка ниже, чем в световодах с твердотельной сердцевинной).

Было исследовано распространение фемтосекундных импульсов в волоконном световоде револьверного типа с поллой воздушной сердцевинной и с оболочкой в виде не связанных между собой восемью цилиндрических капилляров. Показана возможность передачи импульсов пиковой мощности вплоть до 6,6 МВт (энергия импульса до 1,7 мкДж) через исследуемый световод без искажения формы импульсов (увеличение длительности импульса не более чем на 20 %).

Максимальное пропускание световода, включая потери на заведение, составило 74 % при энергиях меньших 1 мкДж. При увеличении энергии импульса на входе в световод пропускание уменьшается, а затем при энергиях больших 50 мкДж выходит на постоянное значение, примерно равное 30 %.

Проведены экспериментальные исследования дисперсионных свойств. Результаты показали, что световод обладает аномальной дисперсией, коэффициент дисперсии групповых скоростей  $\beta_2 = -2,3\text{пс}^2/\text{км}$  отрицательный. Из-за ДГС происходит уширение импульса, но не такое значительное, как в световоде с кварцевой сердцевинной такой же длины, так как дисперсионная длина исследованного световода существенно больше, чем у световода с кварцевой сердцевинной.

При энергии лазерной накачки 8 нДж начинают появляться нелинейные эффекты в спектре (изрезанность спектра). При этом спектр еще не начинает уширяться. При увеличении энергии спектр начинает уширяться, появляются новые высокочастотные (при энергии накачки от 624 нДж) и низкочастотные компоненты (при энергии накачки от 3 мкДж), причем эффективность преобразования энергии накачки в энергию низкочастотной волны выше, чем в энергию высокочастотной. Волокно начинает активно светиться при энергии излучения, превышающей пороговое значение 85 мкДж, появляются спектральные компоненты видимого излучения, вплоть до 450 нм. Так же установлено, что при энергиях, превышающих значение 110 мкДж наблюдается генерация квазиконтинуума в диапазоне от 430 до 1450 нм. Нелинейные эффекты связаны с вкладом  $\chi^3$  в поляризуемость воздуха.

Результаты исследований свидетельствуют о перспективности применений волоконных световодов с поллой сердцевинной для транспортировки сверхкоротких лазерных импульсов высокой пиковой мощности.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант № 14.Z50.31.0009) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ 15-02-99688 А и РФФИ 15-02-08840 А).

## ВОЛОКОННЫЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЭРБИЕВЫЙ ЛАЗЕР ДЛЯ МЕТРОЛОГИИ

В.А. Лазарев<sup>1</sup>, С.О. Леонов<sup>1</sup>, О.В. Малеев<sup>1</sup>, С.Г. Сазонкин<sup>1</sup>, А.А. Крылов<sup>2</sup>,  
М.К. Тарабрин<sup>1</sup>, В.Е. Карасик<sup>1</sup>, А.Н. Киреев<sup>3</sup>, М.А. Губин<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>*Научно-образовательный центр «Фотоника и ИК-Техника»,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*

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

<sup>3</sup>*Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,  
Москва*

<sup>4</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва  
E-mail: [vladimir.al.lazarev@gmail.ru](mailto:vladimir.al.lazarev@gmail.ru)*

Волоконный лазер ультракоротких импульсов (УКИ) – неотъемлемая часть вопросов метрологии частот [1]. Ранее было показано, что генерация симиларитонов может быть получена с помощью гибридной синхронизации мод, которая подразумевает совместное действие двух механизмов синхронизации: медленный - насыщающийся поглотитель в виде одностенных углеродных нанотрубок [2] и быстрый, основанный на нелинейной эволюции поляризации, вызванной нелинейным эффектом Керра в волокнах.

Мы получили генерацию УКИ в полностью волоконном эрбиевом кольцевом волоконном лазере, который работает в режиме гибридной синхронизации мод [3, 4]. Медленно насыщающийся поглотитель представляет собой одностенные углеродные нанотрубки, помещенные в полимерную пленку карбоксиметилцеллюлозы [5]. Длительность импульсов лазера составляет 130 фс, спектр имеет параболическую форму и выходная мощность 7,14 мВт. Полученный режим генерации симиларитонов был очень стабильным в течение нескольких месяцев.

Было проведено изучение режима работы симиларитонного лазера, в частности измерена ширина одной линии гребенки, которая составила 32 кГц (FWHM). Также была измерена девиация Аллана и относительный шум интенсивности (RIN). По сравнению с волоконным лазером, представленным в [6], наш лазер имеет соизмеримое значение отклонения частоты повторения, относительно низкое значение шума интенсивности менее –125 дБн/Гц и высокую стабильность работы.

1. U. Keller, *Nature* **424**, 831–838 (2003).
2. M. E. Fermann, I. Hartl, *Nat Photon.* **7**, 868-874 (2013).
3. A.A. Krylov et al., *Laser Physics Letters* **12**, 6 (2015).
4. V. A. Lazarev et al., *Frontiers in Optics 2015. FW3C. 2* (2015).
5. A.A. Krylov et al., *J. Opt. Soc. Am. B.* **33**, 134–142 (2016).
6. M. Gubin et. al., *Laser Physics* **17**, 1286–1291 (2007).

# ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ИСТОЧНИК НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ КОМПОЗИТНОГО ОПТИЧЕ- СКОГО ВОЛОКНА

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</sup>, С.Е. Сверчков<sup>1</sup>, С.Л. Семенов<sup>2</sup>, В.Б. Цветков<sup>1</sup>

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

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

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

Широкополосные волоконные источники излучения на основе кварцевых оптических волокон, легированных ионами  $\text{Er}^{3+}$ , нашли широкое применение в волоконно-оптических гироскопах, системах низкокогерентной рефлектометрии и пр.

Цель настоящей работы заключалась в создании и исследовании полностью волоконного компактного широкополосного источника излучения, в качестве активной среды которого использовано высоколегированное  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  композитное оптическое волокно. Поглощение излучения накачки в волокне на длине волны 971 нм при вводе в оболочку составило 0,3 дБ/см. Поглощение в сердцевине на длине волны 1535 нм было 1,5 дБ/см.

В работе были исследованы спектры излучения и мощность широкополосного источника излучения при различных длинах активной среды и различных мощностях накачки на 971 нм.

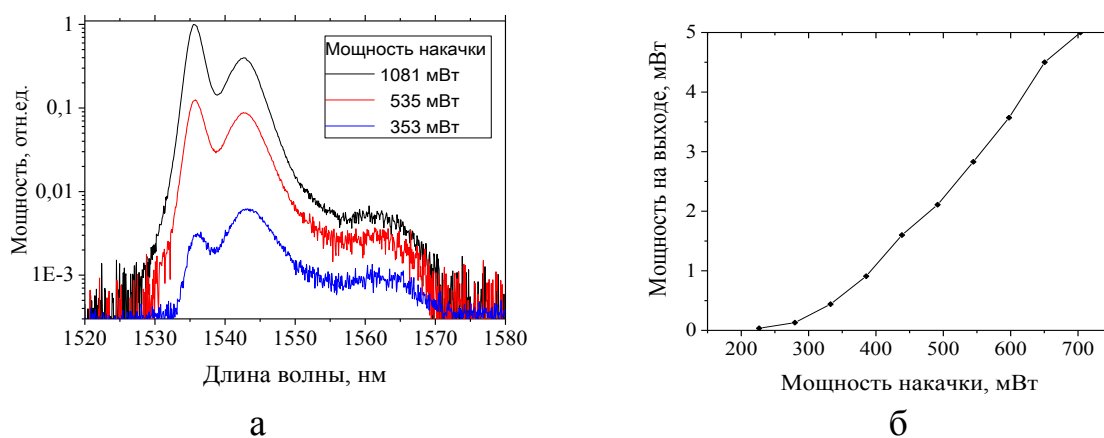


Рис. 1. Спектры излучения (а) и мощность (б) источника излучения при различных мощностях накачки (длина световода 68 см)

На рис. 1 представлены спектры излучения (а) и мощность (б) при длине активной среды 68 см. На спектрах излучения наблюдаются два ярко выраженных пика вблизи 1535 и 1543 нм, ширина которых на полувысоте составляет 2 нм и 5 нм, соответственно. Соотношение интенсивностей пиков меняется в зависимости от мощности накачки.

В результате работы продемонстрирована возможность использования разработанных волокон в широкополосных источниках излучения.

Работа была поддержана РФФИ в рамках проекта 14-29-08168 офи\_м.

# ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ФОТОДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ ФОТОДИОДА В ОПТИКОВОЛОКОННЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

Я.А. Зазулин, Б.Н. Денисов

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск

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

В оптоволоконных линиях связи существует большое количество различных приемников оптических сигналов. В большинстве устройств сигнал принимают, преобразуют из оптического в электрический и затем производят различные операции, что требует пошагового преобразования, а следовательно, энергии и времени. Как было ранее показано [1] существует возможность суммирования двух сигналов с помощью фоторезисторного оптрона. В рамках данной работы рассмотрена возможность произведения математических операций (перемножение, суммирование) непосредственно при детектировании оптических сигналов, и реализовано в устройстве суммирования двух оптических сигналов, модулированных по интенсивности, что упрощает конструкцию узлов ОВЛС и повышает быстродействие. На рис. 1 представлена принципиальная схема экспериментальной установки.

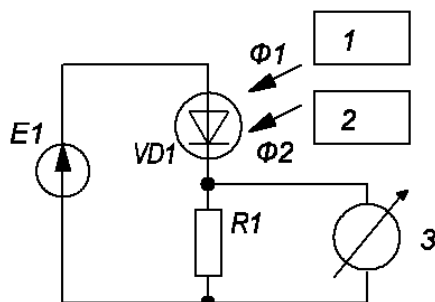


Рис. 1. Принципиальная схема детектора

Данная конструкция позволяет производить суммирование оптических сигналов и обеспечивать полную гальваническую развязку входных сигналов как между собой, так и с выходным сигналом. На рис. 2 представлены соответственно теоретический и экспериментальный спектры выходного сигнала.

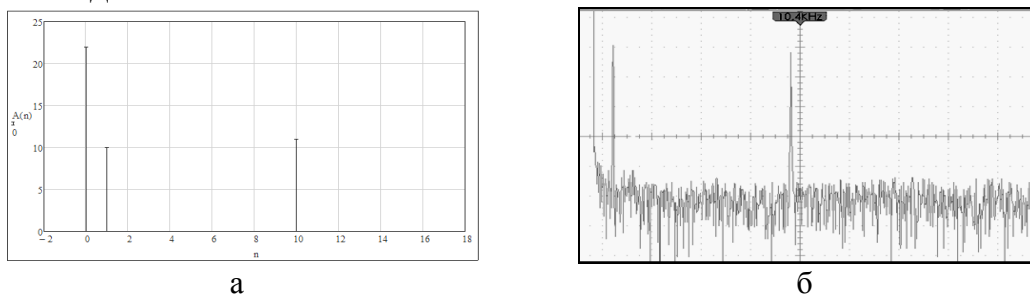


Рис. 2. Спектр выходного сигнала (а-теоретический, б-экспериментальный)

1. Б.Н. Денисов, Я.А. Зазулин. Материалы Всероссийской конференции «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации», 156 (2014).

# ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И КОНЦЕНТРАЦИИ $\text{Bi}_2\text{O}_3$ НА СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА БАРИЙ- ГАЛЛО-ГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ

А.А. Пыненков<sup>1</sup>, К.Н. Нищев<sup>1</sup>, В.М. Кяшкин<sup>1</sup>, С.В. Фирстов<sup>2</sup>

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

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

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

Волоконные световоды, активированные ионами висмута, являются перспективными для применения в широкополосных волоконно-оптических усилителях, работающих в ближнем ИК-диапазоне длин волн. Практическое применение таких световодов сдерживается тем, что до настоящего времени окончательно не установлена физическая природа активных висмутовых центров (АВЦ), определяющих спектрально-люминесцентные свойства активной среды.

Целью работы являлось сравнительное исследование спектрально-люминесцентных свойств АВЦ в аморфных барий-галло-германатных стеклах и в этих же стеклах, подвергнутых контролируемой кристаллизации.

Исследуемые стекла получали путем плавления твердофазной шихты состава  $14\text{BaO} - 2\text{Ga}_2\text{O}_3 - (84-x)\text{GeO}_2 - x\text{Bi}_2\text{O}_3$  ( $x = 0 - 5$ ) на воздухе. Кристаллическая фаза данной системы со структурой  $\text{BaGe}_4\text{O}_9$  получалась путем высокотемпературного отжига исходных аморфных образцов при температурах близких к температуре кристаллизации стекла.

На спектрах поглощения исследуемых образцов в аморфном состоянии наблюдается характерная для висмутсодержащих стекол полоса поглощения с максимумом в области 500 нм. Интенсивность данной полосы возрастает с увеличением концентрации висмута. При исследовании спектров поглощения закристаллизованных образцов с содержанием висмута от 1 до 5 мол.% наблюдается разделение вышеуказанной полосы на две с максимумами в области 475 и 550 нм. В спектрах люминесценции, полученных с длиной волны возбуждения 450 нм, для стекол с концентрацией  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  0,5 и 1 мол.% в аморфном состоянии наблюдались две полосы с максимумами вблизи 820 нм и 1270 нм, примерное соотношение интенсивностей которых составляло 1:3. В процессе кристаллизации стекол наблюдалась инверсия соотношения интенсивностей данных полос люминесценции. С увеличением содержания кристаллической фазы существенно возрастала интенсивность полосы люминесценции с максимумом вблизи 820 нм, при этом пропорционально уменьшалась (вплоть до полного исчезновения) интенсивность полосы с максимумом в области 1270 нм. Данный эффект может быть связан с переходом при кристаллизации стекла активных ионов висмута из аморфного в кристаллическое окружение.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-32-00852



## БОРОСИЛИКАТНЫЕ СТЕКЛА ДЛЯ ЖЕСТКОГО МНОГОЖИЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

М.В. Дяденко, И.А. Левицкий, Л.Ф. Папко

*Белорусский государственный технологический университет, Минск*

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

Данная работа направлена на решение одной из актуальных задач оптического материаловедения, связанной с повышением качества волоконно-оптических изделий, которые находят широкое применение в медицине, электронике, автомобилестроении, приборостроении и оборонной промышленности.

Основой волоконно-оптических изделий является жесткое многомодовое оптическое волокно, для получения которого используются согласованные по ряду характеристик стекла для световедущей жилы, светоотражающей и защитной оболочек.

В результате синтеза и исследования стекол системы  $\text{BaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{La}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2$  разработаны материалы для световедущей жилы с показателем преломления свыше 1,8050 и показатель ослабления  $0,0041 \text{ см}^{-1}$ . Установлено, что при молярном соотношении компонентов  $\text{BaO}:\text{La}_2\text{O}_3:\text{TiO}_2$ , равном 2:1:1, подавляются процессы кристаллизации, характерные для данной системы. Введение добавок  $\text{WO}_3$  и  $\text{Y}_2\text{O}_3$  позволяет повысить показатель преломления стекол и исключить их кристаллизацию при длительной термической обработке.

Разработка стекла для светоотражающей оболочки с показателем преломления 1,4887 в системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  позволило обеспечить числовую апертуру оптического волокна более 1,0. Совместное введение  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  в соотношении от 1:1 до 4:1 обеспечивает подавление процессов кристаллизации при длительной термической обработке в процессе вытягивания одно- и многожильного оптического волокна.

При разработке стекол для защитной оболочки на основе системы  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  с введением комбинации красителей  $\text{CoO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  получены материалы с высоким коэффициентом ослабления в видимой и ближней инфракрасной части спектра.

Регулирование вязкостных характеристик стекол для светоотражающей и защитной оболочек оптического волокна обеспечивается варьированием соотношений  $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{B}_2\text{O}_3$  и  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  в их составе, которые составляют 1,5 и 1,0–1,2 соответственно.

Установлено, что соотношение показателей вязкости стекол для световедущей жилы и оболочек в температурных интервалах его вытягивания, перетяжки в многожильное волокно влияет на геометрические параметры оптического волокна, а также чистоту поля зрения и контрастность волоконно-оптических изделий. Оптимизация составов стекол для защитной оболочки по вязкостным характеристикам в интервале значений  $10^9-10^4 \text{ Па}\cdot\text{с}$  позволяет стабилизировать процесс изготовления волоконно-оптических изделий различного назначения и, как следствие, повысить их качество.

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ АКТИВНЫХ СВЕТОВОДОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМОФОСФОРОСИЛИКАТНОЙ МАТРИЦЫ

А.Н. Гурьянов, Д.С. Липатов  
*ИХВВ РАН, Нижний Новгород*  
*E-mail: [lidenis@yandex.ru](mailto:lidenis@yandex.ru)*

Близкий к кварцевому стеклу показатель преломления алюмофосфоросиликатного (АФС) стекла и высокая растворимость в нем оксидов РЗЭ, делают данный материал уникальным для изготовления одномодовых активных световодов с высоким порогом нелинейных эффектов и создания на их основе мощных источников излучения.

Работа посвящена исследованию процесса одновременного легирования кварцевого стекла  $P_2O_5$ ,  $Al_2O_3$ ,  $RE_2O_3$  (RE - Er, Yb, Tm) из газовой фазы в MCVD методе. В качестве прекурсоров использовались легколетучие  $SiCl_4$ ,  $POCl_3$  и малолетучие  $AlCl_3$  и  $RE(thd)_3$ , которые термостатировались при 130 и 160 °С и дозировались в опорную трубу по отдельным обогреваемым магистралям для исключения конденсации и взаимодействия компонентов парогазовой смеси в системе напуска.

Изготовление АФС стекла осуществлялось двумя способами. В стандартной методике в опорную трубу одновременно поступали  $SiCl_4$ ,  $POCl_3$ ,  $AlCl_3$  и  $RE(thd)_3$ , образующиеся в зоне нагрева оксиды сплавлялись в прозрачный слой стекла. Данный метод не позволяет вводить в АФС матрицу более 1 мас.% РЗЭ. В результате взаимодействия паров  $AlCl_3$ ,  $POCl_3$  и  $Er(thd)_3$  выход системы подачи зарастал твердыми частицами, которые срывались потоком, что впоследствии приводило к образованию в стекле пузырей и резкому росту оптических потерь.

Вторая методика исключает взаимодействие прекурсоров. В начале осаждался пористый  $P_2O_5-Al_2O_3-SiO_2$  слой стекла. Далее в трубу поступал  $RE(thd)_3$  и образующийся в зоне нагрева  $RE_2O_3$  осаждался на поверхности пористого слоя. Затем пропитанный пористый слой сплавлялся в прозрачное стекло. Изготовление сердцевины путем многократного нанесения тонких пористых слоев, каждый из которых многократно пропитывался  $RE_2O_3$  позволяет изготавливать высоколегированные РЗЭ (4 - 6 мас.%) АФС световоды.

Установлено влияние состава АФС стекла на степень вхождения оксидов РЗЭ. Проведены исследования по влиянию температуры и эффективности осаждения на концентрацию  $P_2O_5$ ,  $Al_2O_3$ ,  $RE_2O_3$  в стекле и равномерность распределения легирующих оксидов по длине преформы. Изготовлены АФС преформы с  $\Delta n = 0.0005-0.002$ , содержащие от 1 до 4 мас.% РЗЭ, характеризующиеся однородным составом как по длине, так и по сечению. Световоды вытянутые из полученных преформ имеют высокие оптические характеристики (низкие оптические потери, высокую эффективность усиления и т.д.).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-03-00325 а.

# ПОЛУЧЕНИЕ СТЕКОЛ СИСТЕМЫ $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ , ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ, МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ (MCVD)

Афанасьев Ф. В.

*ИХВВ им. Г. Г. Десятых РАН, Нижний Новгород*

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

Среди большого разнообразия составов кислородных стёкол, легированных висмутом, стекла состава  $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$  обладают рядом преимуществ, а именно: более низкими оптическими потерями в диапазоне 1 – 1,3 мкм, наличием более широкополосной люминесценции с центром на 1,3 мкм [1], по сравнению с другими стёклами.

Цель данной работы заключается в получении фосфорогерманосиликатных (ФГС) стёкол, легированных висмутом методом MCVD, используя в качестве исходного соединения  $\text{ViBr}_3$ , и определении оптимальной концентрации оксида висмута в сердцевине материала, обладающего высокой интенсивностью люминесценции и низкими оптическими потерями.

Образцы высокочистых стекол системы  $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ , легированных висмутом, были получены по стандартной MCVD технологии. В качестве изменяемого параметра при получении заготовок была выбрана относительная концентрация трибромид висмута (ОСЧ) в исходной парогазовой смеси. Подача висмута в сердцевину контролировалась потоком инертного газа (аргона, СВЧ) через термостатируемую ампулу, содержащую трибромид висмута. Из полученных заготовок были вытянуты световоды.

Состав полученных стекол определялся методом масс спектроскопии. Измерение распределения легирующей добавки по длине заготовок осуществлялось на специальном приборе с накачкой от лазерного диода на 800 нм. Спектры поглощения и усиления световодов (L~150-200 метров), вытянутых из заготовок, были измерены в диапазоне длин волн 800-1700 нм.

Разработана методика получения высокочистых ФГС стёкол и световодов на их основе, легированных висмутом, изготовленных по MCVD технологии, используя в качестве прекурсора  $\text{ViBr}_3$ .

Результаты указывают на то, что увеличение концентрации висмута в сердцевинах световодов приводит быстрому росту оптических потерь в диапазоне 400-1600 нм. Показано, что для получения стёкол системы  $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-Vi}$  с низкими оптическими потерями и активными ИК-центрами необходимо введение висмута порядка (0,01-0,02 мол.%).

1. В.Ф. Хопин, И.А. Буфетов и др., Квантовая электроника **38**(7), (2008).

Выражение благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю В.Ф. Хопину, а также сотрудникам ЛТВС А.Н. Гурьянову, А.Н. Абрамову и Н.Н. Вечканову за ценные консультации и помощь в проведении эксперимента.

# СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИКОСЕКУНДНОГО ЭРБИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С РАЗЛИЧНЫМИ ДЛИНАМИ РЕЗОНАТОРА

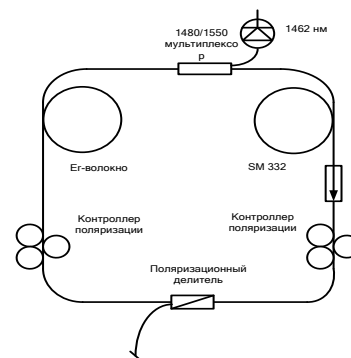
И.А.Волков<sup>1</sup>, В.А.Камынин<sup>2</sup>, К.Н.Нищев<sup>1</sup>, В.Б.Цветков<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, Саранск

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

Лазерные источники, излучающие в широком спектральном диапазоне с заданными временными характеристиками и формой спектра, находят применение во многих областях. Это может быть как применение в научных целях - спектроскопия, генерация суперконтинуума, так и прикладных – метрология, оптическая томография, гиперспектральное изучение объекта и др. В качестве приложений коротких импульсов отметим исследование сверхбыстрых процессов, генерацию и детектирование терагерцового излучения. Разнообразие возможных применений привело к появлению большого количества исследований, направленных на создание источников, генерирующих ультракороткие оптические импульсы с различными характеристиками.

В работе исследована схема кольцевого эрбиевого волоконного лазера ультракоротких импульсов с длинами резонатора 64 м и 204 м. Данная схема позволяет реализовать механизм синхронизации мод на эффекте НВП, который основан на эффекте Керра. Резонатор лазера образован одномодовым волокном SM 332 и волокном, легированным эрбием. Длина активного световода АЕ№5 (изготовленного в ОАО "ПНППК" г. Пермь) составила 4м.



Накачка осуществлялась через волоконный мультиплексор 1480/1550 лазерным одномодовым диодом на длине волны 1462 нм с выходной мощностью до 100 мВт. Поглощение на длине волны накачки составило 6,4 дБ/м. Направление генерации в схеме определялось волоконным изолятором. Два контроллера поляризации установлены в кольцевом резонаторе с двух сторон от волоконного поляризационного делителя и используются для подстройки поляризации.

Известно, что в области аномальной ДГС внутри резонатора могут существовать два основных типа генерации: генерация солитонов и генерация растянутых импульсов. Характерным признаком генерации классического солитонного режима является возникновение в спектре излучения узких боковых максимумов Келли n-ного порядка, отстающих от центральной длины волны  $\lambda_c$  на некоторую величину  $\Delta\lambda$ , по которой можно судить о суммарной ДГС внутри резонатора.

При длине резонатора лазера 64 м были получены импульсы длительностью 1,08 пс с частотой повторения  $f=3,3$  МГц, а в схеме с длиной резонатора 204 м – 1,3 пс с частотой повторения  $f=1$  МГц. Полученные режимы генерации обладают характеристиками, пригодными для успешного использования в качестве задающего устройства при генерации суперконтинуума.

1. K. Rajesh, R.W.Brian, APPLIED OPTICS **51** (27), (2012).

# **FIBER OPTICS**

# FABRICATION OF OPTICAL FIBERS BASED ON HIGH-PURITY QUARTZ GLASS DOPED WITH TIN BY MCVD METHOD AND INVESTIGATION OF THEIR OPTICAL PROPERTIES

A.S. Lobanov<sup>1</sup>, A.N. Gur'yanov<sup>1</sup>, S.V. Firstov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*G.G. Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of RAS,  
Nizhny Novgorod*

<sup>2</sup>*Fiber Optics Research Center of RAS, Moscow  
E-mail: [lobanov@ihps.nnov.ru](mailto:lobanov@ihps.nnov.ru)*

Introduction of tin dioxide even in small amounts into silicate glasses increases their photosensitivity in the ultra-violet spectrum range which provides a more efficient record of Bragg gratings in optical fibers. Besides, the demand for broadband optical amplifiers and lasers stimulated the interest to search new materials suitable for fabrication of such devices in the near IR-range. Detection of IR luminescence in glasses doped with bismuth and subsequent demonstration of laser generation and amplification in the range of 1150 – 1770 nm in bismuth optical fibers heightened the interest in searching for new dopants.

The authors of paper [1] have observed the broadband of luminescence at 1200 - 1600 nm in glass on the basis of SiO<sub>2</sub> with addition of tin which position depends on pumping wavelength. The authors of paper connect the presence of these bands with active centers due to ions of Sn<sup>2+</sup> in prepared glass. It is important to note that the detailed description of MCVD process for fabrication of fiber preforms on the basis of high-purity glass doped with tin and of optical fibers on their base are not available in literature.

This report gives the results of investigations on fabrication of preforms by MCVD method and of optical fibers on the basis of high-purity quartz glass doped with tin. For introduction of tin the method of deposition from the gas phase was used as well as the method of impregnation of the porous layer of glass. The effect of matrix glass composition, the reductive-oxidative conditions and the deposition temperature on the efficiency of introduction of tin into glass was investigated. A substantial effect of the process temperature on the concentration of tin in the prepared glasses is shown. The samples of preforms and optical fibers were fabricated with the content of tin dioxide up to 7.5 mole %. The optical properties of the fabricated preforms and optical fibers were investigated.

1. B.I. Denker, B.I. Galagan, L.D. Iskhakova, S.E. Sverchkov, E.M. Dianov, *J. Appl. Phys. B.* **120**, 13 (2015).

FORMATION OF MULLITE PHASE IN THE CORE  
OF ALUMINOSILICATE OPTICAL FIBERS DOPED WITH CHROMIUM

A.N. Abramov<sup>1</sup>, A.N. Guryanov<sup>1</sup>, M.V. Yashkov<sup>1</sup>, A.D. Plekhovich<sup>2</sup>,  
L.D. Iskhakova<sup>2</sup>, V.V. Koltashev<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>*G.G. Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS,  
Nizhny Novgorod*

<sup>2</sup>*Fiber Optics Research Center RAS, Moscow  
E-mail: [abramovan84@mail.ru](mailto:abramovan84@mail.ru)*

Optical properties of optical fibers with a glass-ceramic core doped with chromium for new fiber lasers to shorter wavelengths (<900 nm) have been studied. Chromium ions have a low luminescence quantum yield in silicate glasses [1, 2], but the crystalline phase, in our case mullite, will enable a high luminescence quantum yield.

A number of fiber preforms with a chromium doped aluminosilicate core have been investigated. The alumina concentration in the preforms was varied from 6 to 29 mol. %, and the chromium concentration was estimated at  $10^{-3}$ - $10^{-2}$  wt.%. As shown by spectroscopic characterization, increasing the alumina concentration in the aluminosilicate core glass increases the percentage of Cr<sup>3+</sup> ions and reduces that of Cr<sup>4+</sup> ions.

To establish the parameters of the heat treatment of samples carried out differential thermal analysis of the core glass. Prolonged heat treatment has been shown to increase the near-IR luminescence intensity and quantum yield of luminescence to 2 % in the fibers at room temperature. Optical losses of optical fibers after annealing have been studied. It is shown the dependence of the intensity of light transmission from the time and temperature of annealing the samples.

Raman spectroscopy and X-ray diffraction data indicate the presence of a crystalline mullite phase in the fibers and preforms after high-temperature heat treatment.

This work was supported by the RFBR grant № 16-32-00438.

1. T. Murata, M. Torisaka, H. Takebe, K.J. Morinaga, J. Non. Cryst. Solids **220**, 139–146 (1997).
2. G.H. Beall, J.F. MacDowell, M.P. Taylor. Transparent Glass Ceramics Containing Mullite, U.S. Patent 4396720 (1983).

## DEVELOPMENT HOLMIUM FIBER OPTICAL AMPLIFIER

I.V. Zhluktova<sup>1,2</sup>, S.A. Filatova<sup>2</sup>, V.A. Kamynin<sup>2</sup>, V.B. Tsvetkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Moscow Technological University, Moscow, Russia*

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

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

Interest in the 2 micron range caused by potential applications in such areas as medicine, spectroscopy and advanced telecommunications development. In order to implement optical scheme operating in this range, the required amplifiers based on thulium or holmium ions. Thulium fiber amplifiers have demonstrated a high gain and low noise figure at work in the spectral range from 1720 nm to 2050 nm [1]. However to obtain emission at wavelengths longer than 2100 nm, the as usual fiber doped with holmium ions are used since their luminescence region is in the range 1900-2200 nm. [2-4].

Optical scheme of holmium amplifier is shown in Fig. 1 (A). As a master oscillator (MO) was used holmium laser, that emitting at a wavelength of 2120 nm, the output power was reduced to 250  $\mu$ W. Multiplexer (WDM) 1125/2100 nm, which combine the pulse signal from the master oscillator and pump irradiation at the wavelength of 1125 nm.

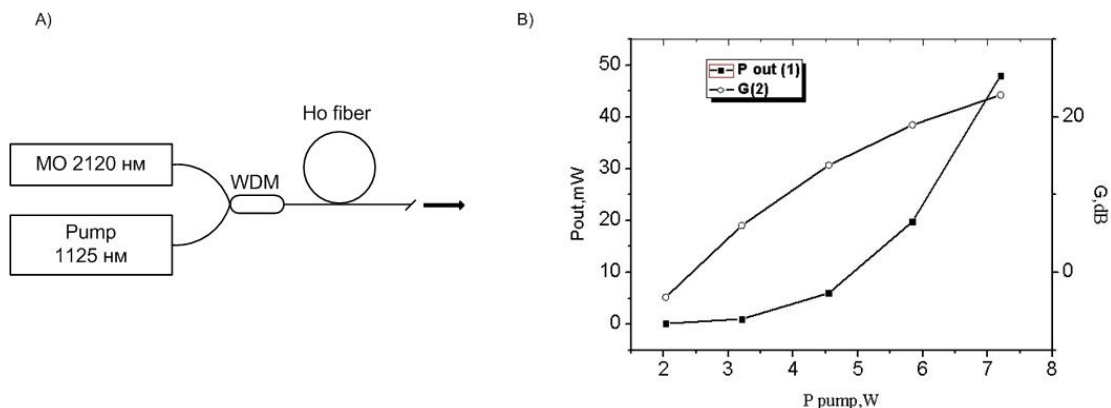


Fig.1. Schematic of holmium amplifier (A) and output data (B)

During the measurement output signal was used filter with the suppression of 30 dB at wavelengths less than 1,5 microns, for unabsorbed pump radiation suppression.

As a result, the maximum gain reached  $\sim$  22 dB, while the output power on wavelength at 2120 nm - 48 mW.

1. A.M. Heidt, et al., IEEE J. Quantum Electron. **20**, 3100612 (2014).
2. S.D. Jackson, IEEE J. Quantum Electron. **42**, 187-191 (2006).
3. J.Kim, et al., in CLEO/Europe and EQEC (2009).
4. A.S. Kurkov, et al., Opt. Lett. **35**, 490- 492 (2010).



## THE HIGH VOLTAGE SENSOR VOLTAGE ON THE BASIS OF INSIDE FIBER BRAGG GRATINGS

V.N. Zakharov, D.I. Kaftasev, G.I. Leonovich  
*JSC "Progress", Samara*  
*E-mail: [ZaharoffV@inbox.ru](mailto:ZaharoffV@inbox.ru)*

In the control of electrical stresses in high-voltage lines of electricity transmission you must either take special and costly measures to protect the measuring devices or to use technical means that do not require these measures. These features include fiber-optic sensors on vnutripolostnyh Bragg grating (FBG) [1].

The report presents a method for indirect measurement of high voltage by converting a voltage transformer tapped from the electric power line in microprecision of a transformer core fixedly mounted on the region of the optical fiber with FBG (Fig. 1). Microprecision core causes axial deformation of S section, which, in turn, allows to obtain an optical signal, the wavelength of which is proportional to the measured voltage. The starting preset and the correction control axial tension plot of CQ VBR is carried out using a permanent magnet.

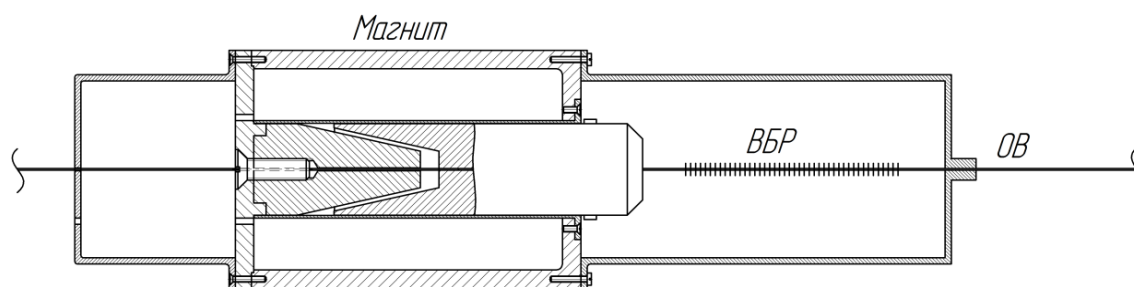


Fig. 1

Selection and optimization of the gap between the armature and the core, formed by a truncated conical poles, allows to reduce the flux of the coil and to increase the conductivity of the working gap, which significantly improves the energy efficiency of the magnetic field.

1. Ribeiro B. FBG-PZT sensor system for high voltage measurements / Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2011 IEEE.

# OPTICAL FIBER PASSIVE SENSOR OF ELECTRIC FIELD INTENSITY

G.I. Leonovich, S.V. Oleshkevich, V.N. Zakharov, N.V. Ryasnoy

JSC "Progress", Samara

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

One of the significant advantages of passive fiber optic sensors of electric field intensity (VDAP) over electroplating is the absolute isbrowsercompatible, which makes them particularly attractive for hazardous production facilities and objects [1]. The most famous among VDAP got the sensors of the electric field based on the electrooptical Pockels effect. With the many advantages of such sensors, they are not networked and require a separate sensor for each inlet and outlet of the transport fiber. In addition, they applied attenuation conversion type tension EP in her power modulated analog optical signal significantly reduces the noise immunity of extended data channels.

Currently gaining popularity VDAP wave type based vnutripolostnyh Bragg gratings (FBG). A group of several dozen such sensors, working in individual spectral bands can be combined into a network structure on the single transport fiber, which connects to a remote spectrum analyzer - interrogatory. The complexity of implementing the known structural and technological solutions for the creation of such sensors is the need of finding highly sensitive sensor element, which is either directly to the site of a specialized fiber with FBGS or the same element in a standard optical fiber, but with additional sensory-actuator structure (SAS), which converts the influence of an electric field into mechanical or thermal deformation plot with UBD. In a number of publications as the CAC offers a variety of materials with strong electrostriction or piezoelectric effects, for example, ferroelectric relaxsory based magnoniobate lead [2].

With the additional elastic resistance generated by the material of the optical fiber, the relative axial deformation plot UBD with SAS is determined by the formula

$$\xi_{BEP} = \frac{\varepsilon_0 (k\varepsilon_{CAC} + n\varepsilon_{OB}) E^2}{kY_{CAC} + nY_{OB}}, \quad k + n = 1, \quad (1)$$

where E - electric field strength;  $\varepsilon_0$ , the  $\varepsilon_{CAC}$  and  $\varepsilon_{OB}$  - electric constant of vacuum and relative electric constant of the material of SAS and S, respectively; and WAV - USAS - young's modules of fiber optic with FBG and CAC, respectively; k, n – coefficients specifying the contribution of the SAS and S (by mass and the way of interaction) to the final deformation.

In fig. 1 presents characteristics depending on the strain of different types of SAS on the electric field, in which virtually all characteristics can be observed small slope at the initial sections of the curves.

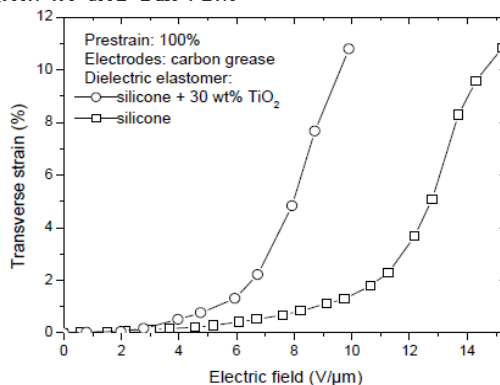


Fig. 1

The authors propose a method and technical solution without the introduction of galvanic cells, due to the application of the new combined SAS from relaxors and electrets, offset the start point based on the plot with a higher slope, which significantly improves the sensitivity of the sensor for small values of the electric field.

1. T. Okoshi, *Fiber-optic sensors*, L.: Energoatomizdat, 1990. 256 p.
2. Z.Y. Cheng, V. Bharti, X. Zhao, S. Wang. Ultrasonics Symposium, 1998.

## FIBER ERBIUM RING LASER FOR METROLOGY

V.A. Lazarev<sup>1</sup>, S.O. Leonov<sup>1</sup>, O.V. Maleev<sup>1</sup> S.G. Sazonkin<sup>1</sup>, A.A. Krylov<sup>2</sup>,  
M.K. Tarabrin<sup>1</sup>, V.E. Karasik<sup>1</sup>, A.N. Kireev<sup>3</sup>, and M.A. Gubin<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>*Science and Research Center Photonics and IR-Technics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow*

<sup>2</sup>*Fiber Optics Research Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

<sup>3</sup>*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

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

*E-mail: [vladimir.al.lazarev@gmail.ru](mailto:vladimir.al.lazarev@gmail.ru)*

Ultra-short pulse (USP) fiber laser is a chief ingredient in the emerging field of optical frequency metrology [1]. It was shown earlier that a similariton generation may be realized with a hybrid mode-locking (ML) technique that implies co-action of two ML mechanisms – a slow saturable absorber (SA) such as single-walled (SW) carbon nanotubes (CNTs) [2], and a fast one such as non-linear polarization evolution based on the nonlinear Kerr-effect in fibers.

We obtained USP generation from erbium-doped hybrid mode-locked all-fiber erbium ring laser [3, 4]. Slow SA was based on boron nitride-doped SW CNTs hosted in polymeric carboxymethylcellulose film [5]. The laser has a typical 130-fs USP parabolic-shape spectrum at 7.14-mW output power. The obtained similariton generation regime was very reliable over several months.

Frequency measurements of the similariton laser was performed, in particular a single comb line is estimated to be approximately 32 kHz (FWHM). Also, the Allan deviation of the repetition rate and a relative intensity noise were measured. Compared with a fiber laser given in [6], our laser has a commensurably low repetition rate deviation, a low relative intensity noise value of less than - 125 dBc/Hz and high reliability.

1. U. Keller, *Nature*. **424**, 831–838 (2003).
2. M.E. Fermann, I. Hartl, *Nat Photon*. **7**, 868-874 (2013).
3. A.A. Krylov et al., *Laser Physics Letters*. **12**, 6 (2015).
4. V.A. Lazarev et al., *Frontiers in Optics 2015. FW3C. 2* (2015).
5. A.A. Krylov et al., *J. Opt. Soc. Am. B*. **33**, 134–142 (2016).
6. M. Gubin et. al., *Laser Physics*. **17**, 1286–1291 (2007).

# BROADBAND HIGH-CONCENTRATION ER/YB-CODOPED COMPOSITE FIBER SOURCE

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

<sup>1</sup>*General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow*

<sup>2</sup>*Fiber Optics Research Center, Russian Academy of Sciences, Moscow*

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

Broadband Er-doped silica fiber sources are widely used in fiber-optic gyroscopes, low-coherence reflectometry systems, and etc.

The purpose of present research was development and investigation of compact all-fiber broadband light source using a high-concentration Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> composite fiber as gain medium. The small-signal absorption of light launched to inner cladding was about 0.3 dB/cm at the pump wavelength 971 nm. The core absorption at the 1535 nm wavelength was 1,5 dB/cm.

The emission spectra and output power were measured for broadband cladding-pump light source with different gain medium length and varying pump power at 971 nm using single-pass forward-signal configuration.

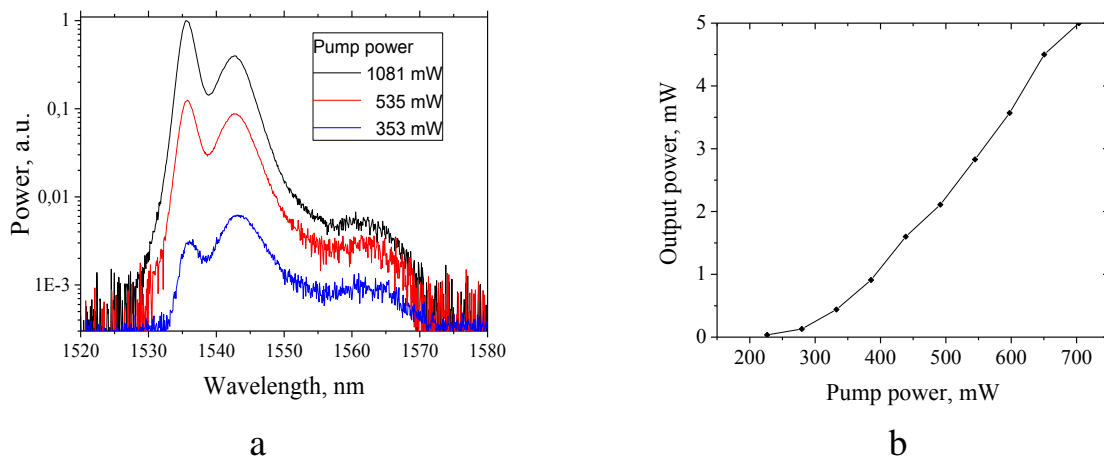


Figure 1. Emission spectra (a) and output power (b) of broadband light source with the composite fiber 68 cm long

Fig. 1 shows emission spectra (a) and output power (b) of broadband light source with the composite fiber 68 cm long. The emission spectra have two peaks near 1535 nm and 1543 nm which full widths at half maximum amount about 2 nm and 5 nm, respectively. Peak intensity relation varies with pump power.

In summary, we demonstrate the applicability of investigated fibers for design of compact all-fiber broadband light sources.

This study was supported by RFBR, the project 14-29-08168 ofi\_m.

# INFLUENCE OF CRYSTALLIZATION AND THE CONCENTRATION OF $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ON SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES OF BARIUM GALLIUM GERMANATE GLASSES

A.A. Pynenkov<sup>1</sup>, K.N.Nishchev<sup>1</sup>, V.M. Kyashkin<sup>1</sup>, S.V. Firstov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*N.P.Ogarev Mordovia State University, Saransk*

<sup>2</sup>*Fiber Optics Research Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

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

Optical fibers doped with bismuth are promising for use in wideband optical fiber amplifier operating in the near infrared wavelength range. The practical application of such fibers is constrained by the fact that so far not been finally established the physical nature of the bismuth active centers (BAC) determining the spectral-luminescent properties of the active medium.

The aim of the work was a comparative studying of spectral-luminescent properties of BAC in amorphous barium gallium germanate glasses and in the same glasses subjected controlled crystallization.

The investigated glasses were obtained by melting in air of batch with composition:  $14\text{BaO} - 2 \text{Ga}_2\text{O}_3 - (84-x) \text{GeO}_2 - x\text{Bi}_2\text{O}_3$  ( $x = 0-5$ ). The crystalline phase of the system with the structure  $\text{BaGe}_4\text{O}_9$  was obtained by high-temperature annealing of initial amorphous samples at temperatures close to the crystallization temperature of the glass.

In the absorption spectra of the samples in the amorphous state is observed characteristic of bismuth glass absorption band with a maximum at 500 nm. The intensity of this band increases with the concentration of bismuth. In the study of the absorption spectra of samples crystallized bismuth containing from 1 to 5 mol.% of the aforementioned bands observed split into two maxima at 475 and 550 nm region. Moreover, by increasing the bismuth concentration of 1 to 5 mol.%, a change ratio of intensities of these bands. So for a sample containing 1 mol.%  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  band with a maximum at 550 nm is of the form "shoulder" on the background of the main strip, and when the content 5mol.%  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  the opposite is true. In the luminescence spectra obtained with an excitation wavelength of 450 nm for glass in the amorphous state observed two bands with maxima near 820 nm and 1270 nm, the approximate ratio of the intensities of which was 1:3. In the process of crystallization of the glass was observed inversion of the ratio of intensities of these luminescence bands. With the increase in the content of the crystalline phase substantially increased the intensity of the luminescence band having a maximum near 820 nm with a proportional reduction (up to complete disappearance) with a maximum intensity of the band at 1270 nm region. This effect may be associated with transition of active bismuth ions at crystallization glass from an amorphous to a crystalline environment.

This work was supported by the grant of the RFBR № 16-32-00852

## BOROSILICATE GLASSES FOR RIGID MULTICORE OPTICAL FIBER

M.V. Dyadenko, I.A. Levitskii, L.F. Papko  
*Belarusian State Technological University, Minsk*  
*E-mail: [dyadenko-mihail@mail.ru](mailto:dyadenko-mihail@mail.ru)*

The given work is aimed at solving one of actual problem of the optical materials technology, connected with improvement of quality of fiber-optical products. These products are widely used in medicine, electronics, motor industry and other branches of industry.

Rigid multimode optical fiber is a basis of fiber-optical products. The glasses for the light-guiding core, reflective and protective coats coordinated on a number of characteristics are used to obtain rigid multimode optical fiber.

Materials for light-guiding core with the refractive index over 1,8050 and an indicator of weakening of  $0,0041 \text{ cm}^{-1}$  are developed as a result of synthesis and research of glasses of the  $\text{BaO-B}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$  system. It is established that at the molar ratio of the  $\text{BaO:La}_2\text{O}_3\text{:TiO}_2$  equal 2:1:1, the typical crystallization processes characteristic for this system are suppressed. Introduction of the  $\text{WO}_3$  and  $\text{Y}_2\text{O}_3$  oxides allows to increase refractive index of glass and to exclude their crystallization at long period of heat treatment.

Development of the glass for a reflecting coat with the refraction index of 1,4887 in the  $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  system has allowed to provide a numerical aperture of optical fiber more than 1,0. The joint introduction of the  $\text{K}_2\text{O}$  and  $\text{Na}_2\text{O}$  in the ratio from 1:1 to 4:1 provides suppression of the crystallization processes at long heat treatment during optical fiber drawing.

Materials with the high coefficient of easing in the visible and near infrared part of a spectrum as the result of developing glasses for a protective coat on the basis of the  $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  system with introduction of the combination  $\text{CoO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  are received.

Regulation of the glass viscosity characteristics for the reflective and protective coats of the optical fiber is provided with a variation of ratio  $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{B}_2\text{O}_3$  and  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  in their compositions which are 1,5 and 1,0–1,2 respectively.

It is established that the ratio of indicators of the glass viscosity for the light-guiding core, reflective and protective coats in temperature intervals of the fiber drawing, banners in multicore fiber influences on the geometrical parameters of optical fiber, and also cleanliness of a vision's field and contrast of the fiber-optical products. Optimization of the glass compositions for the protective coat according to viscosity characteristics in the range of values  $10^9\text{-}10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  allows to stabilize process of the fiber-optical articles production of different purposes and, as a result, to increase their quality.

**НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ**

# НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

С.А. Григорьев

Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва

E-mail: [sergey.grigoriev@outlook.com](mailto:sergey.grigoriev@outlook.com)

Низкотемпературные электрохимические системы (топливные элементы, электролизеры воды и др.) на основе твердого полимерного электролита (ТПЭ) [1] позволяют с высокой эффективностью осуществлять преобразование видов энергии без ущерба окружающей среде и находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности, на транспорте, в энергетике и в специальных целях. В данном докладе будут рассмотрены применяемые в электрохимических системах с ТПЭ наноструктурные каталитические, электродные и мембранные материалы (рис. 1) и технологии их получения.

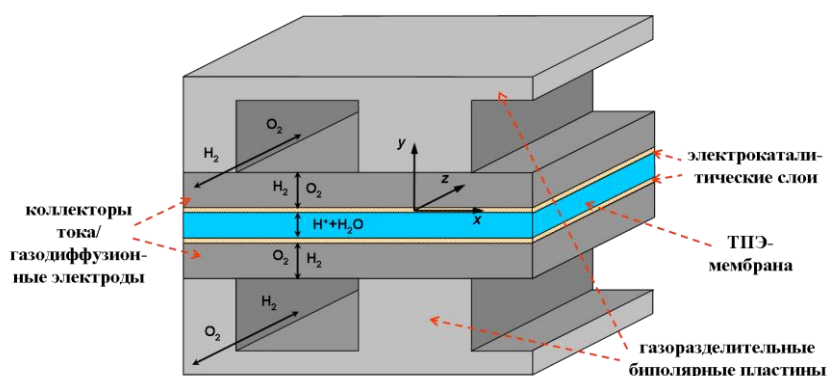


Рис. 1. Принципиальная схема электрохимического элемента на основе ТПЭ.

Одним из основных компонентов электрохимической системы с ТПЭ, определяющих ее эффективность и ресурс работы, является электродокаталитический слой, основу которого составляют наночастицы платиновых металлов. Для синтеза катализаторов используются как высокоэффективные химические (одновременная сорбция/восстановление), так и физические методы (магнетронно-ионное распыление), позволяющие получать наночастицы платиновых металлов с мономодальным распределением размеров в диапазоне 2,5-3,5 нм. Электрохимическая реакция протекает в так называемых точках тройного контакта (рис. 2), в которых каталитически-активные частицы находятся в контакте с электронными и протонными проводниками, а также системой газовых и жидкостных пор. Благодаря применению наноструктурных электродокатализаторов расход металлов платиновой группы был снижен на порядок, активно ведется разработка не содержащих платиновых металлов каталитически активных молекулярных комплексов [2]. В силу ряда уникальных свойств, таких как высокая электропроводность, большая удельная поверхность, механическая прочность, стабильность и стойкость в агрессивных средах большую перспективу



имеет применение графеноподобных материалов в качестве носителя электрокатализатора (рис. 3) [3].

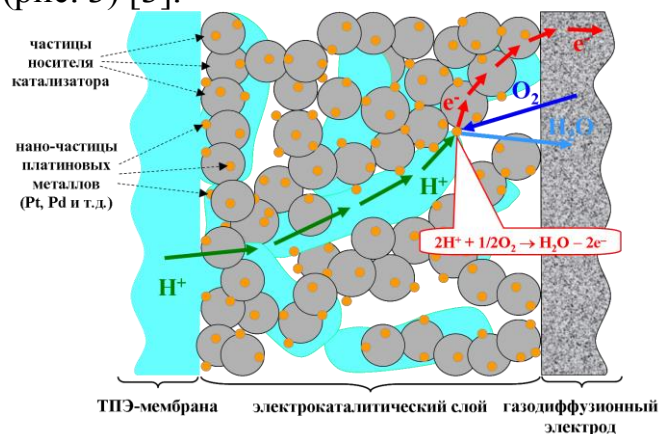


Рис. 2. Схема процессов переноса массы и заряда в катодном электрокаталитическом слое топливного элемента с ТПЭ

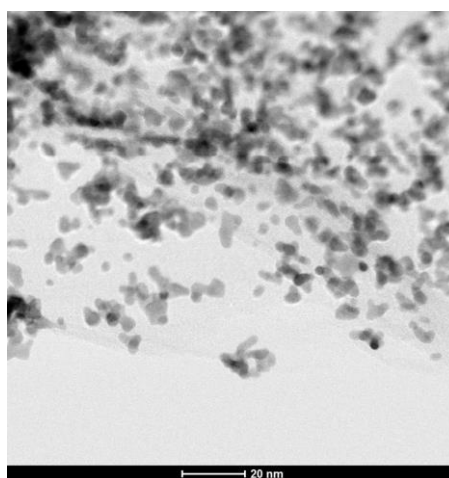


Рис. 3. Наночастицы платины на поверхности восстановленного оксида графена

В коллекторах тока/газодиффузионных электродах осуществляется транспорт реагентов и продуктов электрохимической реакции, они обеспечивают также контакт с электрокаталитическим слоем. Благодаря разработанным электродам с градиентом пористости значительно улучшен массоперенос, а также снижены омические потери на границе с электрокаталитическим слоем [4].

Применение модифицированных и композитных мембран с наноструктурой со сниженной газопроницаемостью позволяет повысить эффективность электрохимической системы и повысить срок ее службы.

Важную роль в оптимизации электрохимических систем играет математическое моделирование. С учетом полученных результатов были предложены, в частности, оптимизированные конструкции электродов и структуры электрокаталитических слоев, оптимальные параметры работы электрохимической системы.

Таким образом, использование наноматериалов и нанотехнологий в низкотемпературных электрохимических системах позволяет значительно улучшить их характеристики. Так, суммарный КПД энергоустановки на основе топливного элемента с ТПЭ может достигать 50-60 %; КПД элек-

тролизных систем составляет 85-90 %. Достигнутый на сегодняшний день уровень удельной мощности батарей топливных элементов на основе ТПЭ составляет более 1,0 кВт/кг (при плотности тока более 1 А/см<sup>2</sup> мембранно-электродного блока). Дальнейшая разработка инновационных нанотехнологий водородных электрохимических систем, относящихся к шестому технологическому укладу, позволит сместить вектор развития промышленности в сторону наукоемких технологий и создать новые рабочие места для высококвалифицированных специалистов, а широкомасштабное внедрение водородной энергетики будет способствовать решению ряд экологических, энергетических и социальных проблем.

1. P. Millet, R. Ngameni, S.A. Grigoriev, V.N. Fateev, *Int. J. Hydrogen Energy* **36**, 4156 (2011).
2. A.V. Dolganov, O.V. Tarasova, D.N. Moiseeva, E.E. Muryumin, *Int. J. Hydrogen Energy* **41**, 9312 (2016).
3. A.K. Geim, *Science* **324**, 1530 (2009).
4. S.A. Grigoriev, P. Millet, S.A. Volobuev, V.N. Fateev, *Int. J. Hydrogen Energy* **34**, 4968 (2009).

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ

А.В. Князев<sup>1</sup>, Н.Н. Смирнова<sup>1</sup>, Е.Н. Буланов<sup>1</sup>, С.С. Князева<sup>1</sup>,  
О.В. Крашенинникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*  
*E-mail: [knyazevav@gmail.com](mailto:knyazevav@gmail.com)*

Наиболее важной частью наших исследований в области химической термодинамики – калориметрические исследования. Полученные калориметрическими методами термодинамические функции соединений использовали для описания процессов с их участием и выявления критериев их устойчивости. С использованием реакционного адиабатического калориметра впервые экспериментально определены энтальпии образования порядка 200 неорганических соединений. При всей кажущейся простоте получения подобных результатов для проведения эксперимента требуется во-первых: найти растворитель для соединения, что зачастую является серьезной проблемой в случае некоторых труднорастворимых соединений во-вторых для определения одной энтальпии образования необходимо определить энтальпии 3-6 реакций, а каждую реакцию проводят 3-5 раз, чтобы с помощью распределения Стьюдента рассчитать погрешность энтальпии растворения.

В адиабатическом вакуумном калориметре изучены температурные зависимости изобарных теплоемкостей более чем для 50 соединений в интервале температур от 7 до 350 К. Данные исследования позволили нам описать возможные фазовые переходы в соединениях при низких температурах, а также определить абсолютные энтропии веществ. Отметим, что изобарные теплоемкости большинства неорганических соединений монотонно возрастают с увеличением температуры, не проявляя видимых аномалий. Напротив, в уранилванадиевой кислоте, уранилкарбонатах, уранилсульфатах в некоторых вольфраматах обнаружены физические переходы. Описание переходов проводили с помощью классификации физических переходов Мак-Каллафа – Веструма. Согласно этой феноменологической классификации все фазовые переходы в твердых телах можно разделить на семь типов (I, 2I, 3I, 2N, 3N, G, H). Три перехода являются изотермическими, два перехода - неизотермические, G и H переходы, чье названия происходят от английских слов “hump” и “glass-like” .

Наиболее распространенный вид переходов в слоистых соединениях – изотермические (I) переходы, связанные с полиморфными переходами в кристалле. Полиморфизм обусловлен возможными смещениями или поворотами слоев друг относительно друга в кристаллической структуре. Изотермические переходы наблюдаются в виде “пиков” на кривой теплоемкости; площадь “пиков” численно равна энтальпии фазового перехода. Более редко встречаемые физические переходы – H-переходы, которые наблюдаются в виде “горбов” на кривой теплоемкости. С физической точки зре-

ния данная аномалия может быть связана с “размораживанием” вращений вокруг связи  $M^k \cdots OH_2$  в структурах соответствующих кристаллогидратов.

Для соединений  $Na_4UO_2(CO_3)_3$  и  $K_2Fe_2Ti_6O_{16}$  обнаружен третий вид физических переходов – типа G (glass-like). Природа этой аномалии, вероятно, связана с наличием в структуре данного соединения катион-катионных взаимодействий, что подтверждено нами расчетами полиэдров Вороного-Дирихле с помощью программного комплекса TOPOS.

Таким образом, колориметрические методы позволили определить все необходимые термодинамические функции для 50 неорганических соединений. Термохимические данные были получены для 200 соединений.

Данные о теплоемкости, особенно при низких температурах, позволяют сделать выводы о характере топологии структуры твердых тел. Для этого, мы рассчитали фрактальные размерности и характеристические температуры. Из экспериментальных значений теплоемкости в диапазоне 20-50 К оценивали значение фрактальной размерности  $D$  соединений. Согласно фрактальной теории теплоемкости,  $D$  является наиболее важным параметром, который определяет характер гетеродинамичности структуры вещества. Для твердых веществ с цепочечной структурой зависимость теплоемкость от температуры при низких температурах пропорциональна  $T^1$ , для слоистых соединений -  $T^2$  и для каркасных -  $T^3$ . В фрактальной теории теплоемкости, показателем  $T$  является функцией теплоемкость обозначается через  $D$  и называется фрактальной размерностью. Полученные значения фрактальной размерности согласуются с нашими структурными данными, так она равна 3 для каркасных пироксенов и 2,4 и 2,5 для браннеритов с квазислоистой структурой.

Для изучения фазовых переходов, термической стабильности и температур плавления веществ нами также активно используется дифференциальная сканирующая калориметрия. Однако, для того, чтобы ответить на вопросы о структурных перестройках необходимо использовать высокотемпературную рентгенографию. В области фазовых переходов наблюдается аномальное изменение температурной зависимости параметра элементарной ячейки. При фазовом переходе происходит экстремальное изменение диаграммы теплового расширения. Эти диаграммы построение при различных температурах демонстрируют приоритетные направления теплового расширения и его анизотропии. Значение коэффициента теплового расширения в заданном направлении соответствует длине радиус-вектора, который откладывается от начала координат до края фигуры расширения.

Данные дифференциальной сканирующей калориметрии, реакционной калориметрии совместно с термодинамическим моделированием позволяют построить фазовые диаграммы. В качестве примера приведено исследование фазовой диаграммы системы  $Pb_5(PO_4)_3Cl - Pb_5(VO_4)_3Cl$ . Для данной системы моделирование включало следующие этапы:

1. Расчет температур распада твердых растворов ( $T_M$ ), т.е. кривой Беккера;
2. Определение функциональной зависимости температуры полиморфного перехода от состава;

3. Расчет температур солидуса и ликвидуса, основанный на равновесии кристалл – жидкость.

Для расчета температур солидуса и ликвидуса использовали уравнение Клаузиуса-Клапейрона, которое в случае регулярных растворов можно переписать в виде следующей системы. При этом решалась обратная задача, т.е. моделирование проводилось на основе экспериментально полученных данных о границах фаз. Решив систему уравнений, мы определили термодинамические параметры для кристалла и энтальпии плавления компонентов. Значения, полученные таким образом, были использованы для построения зависимости функции Гиббса жидкости и кристалла от состава и фазовой диаграммы.

При формировании данных минералоподобных соединений в природе или технологических схемах, можно ожидать образование, как индивидуальных фаз, так и твердых растворов. Нами проведено физико-химического исследования твердых растворов составов представленных на слайде. Методом рентгенографии определены границы смесимости всех изученных систем и реакционной калориметрией определены стандартные энтальпии смешения.

Затем с помощью теоретических моделей описывали изменение термодинамических функций в виде аналитических уравнений, что упрощало представление количественной информации о системах и позволяло находить парциальные мольные величины и коэффициенты активностей компонентов.

В уранилванадатах смешение описывается моделью регулярных растворов, теоретически разработанной И.Пригожиным. В рамках данной модели максимум поверхности энтальпии смешения от состава должен находиться вблизи одной из бинарных систем, что наблюдается в нашем случае.

Изучение уранилсульфатов потребовало создание теоретической модели субрегулярных растворов для тройных систем, которая отсутствует в литературе. В рамках этой модели максимальное значение энтальпии смешения наблюдается при произвольных концентрациях трех компонентов, поэтому энтальпию смешения как функцию от состава необходимо представлять в виде четырех слагаемых. Три слагаемых будут отвечать за поведение функции вблизи бинарных систем, а четвертое в центральной части диаграммы.

Одним из этапов изучения соединений является исследование их поведения в водных растворах.

Предложена количественная физико-химическая модель описания гетерогенной системы «осадок – водный раствор», которая представлена следующей блок-схемой. В основу модели были положены уравнения материального баланса для урана и соответствующих элементов, с учетом возможных форм существования их в растворе. Концентрации ионно-молекулярных форм выражали через активности иона или молекулы, наличие которых в растворе наиболее вероятно при заданной кислотности

среды. Для этого использовали уравнения гомогенных реакций и величины их констант равновесия. Подставляя экспериментально полученные значения концентраций соответствующих элементов и величину рН решали полученную систему уравнений. Далее вычисляли константу равновесия процесса растворения соединений, а затем функции Гиббса образования соединений.

# ФОНОНЫ И СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

С.А. Климин

*Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва*

*E-mail: [klimin@isan.troitskl.ru](mailto:klimin@isan.troitskl.ru)*

Будут рассмотрены физические модели и спектроскопические методы исследования энергетических состояний кристаллов, связанных с оптическими колебаниями решетки. Особенное внимание будет уделено взаимодействию фононов с энергетическими возбуждениями других подсистем: электронной и магнитной. Будут приведены примеры экспериментального наблюдения электрон-фононных и фонон-магнонных связанных мод из оригинальных исследований с участием автора доклада.

Детально будет обсуждаться спектроскопическое исследование тербиевого и гадолиниевого ферроборатов,  $GdFe_3(BO_3)_4$  и  $TbFe_3(BO_3)_4$ , в котором нами были впервые экспериментально исследованы фононы в низкотемпературной структурной фазе  $R3_121$  [1, 2]. Сравнительный анализ ИК-спектров отражения двух соединений, одного - с редкоземельным ионом, не имеющим электронных уровней в области энергий фононов (гадолиний), другого – с ионом, обладающим богатым спектром состояний в той же области (тербий), показал, что в  $TbFe_3(BO_3)_4$  образуется связанная электрон-фононная мода в области Е-фонона вблизи  $197\text{ см}^{-1}$  [1] (рис. 1).

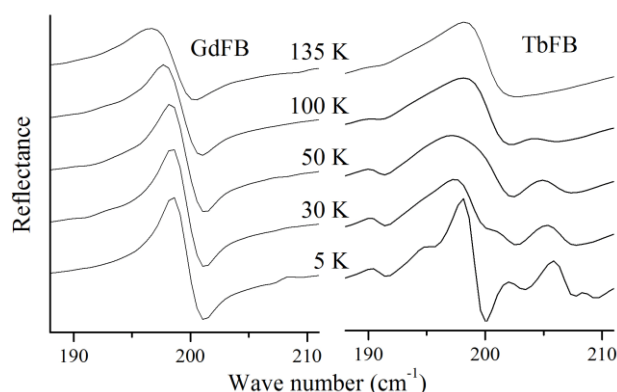


Рис. 1. Спектры отражения  $TbFe_3(BO_3)_4$  и  $GdFe_3(BO_3)_4$  в области Е-фонона вблизи  $197\text{ см}^{-1}$ . Взаимодействие фонона с электронными возбуждениями иона  $Tb^{3+}$  приводит к образованию связанных электрон-фононных мод [1].

Будут рассмотрены также другие кристаллы [3, 4] с ярко выраженными эффектами взаимодействия фононов с различными подсистемами.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №14-12-01033).

1. S.A. Klimin, A.B. Kuzmenko, M.A. Kashchenko, M.N. Popova, Phys. Rev. B. **93**, 054304 (2016).
2. D. Fausti, A. Nugroho, P. van Loosdrecht, S.A. Klimin, M.N. Popova, L.N. Bezmaternykh, Phys. Rev. B. **74**, 024403 (2006).
3. S.A. Klimin, D. S. Pytalev, M. N. Popova, B. Z. Malkin, M.V. Vanyunin, S.L. Korableva, Phys. Rev. B. **81**, 045113 (2010).
4. S.A. Klimin, A.B. Kuzmenko, M.N. Popova, B.Z. Malkin, I.V. Telegina, Phys. Rev. B. **82**, 174425 (2010).

## ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ФТОРИДОВ II И III ГРУПП ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ФОТОНИКИ

С.В. Кузнецов<sup>1</sup>, П.П. Федоров<sup>1</sup>, Е.А. Гарибин<sup>1,2</sup>, В.В. Осико<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>ЗАО ИНКРОМ, Санкт-Петербург

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

Поликристаллические материалы на основе щелочноземельных фторидов, легированных редкоземельными элементами на протяжении десятилетий представляют значительный интерес для фотоники. Использование монокристаллических материалов осложнено их совершенной спайностью, что приводит к разрушению оптических материалов при работе с ними. Кроме того, затруднено получение монокристаллических образцов высокого качества и большой апертуры. Улучшение механических характеристик и связанной с ними лазерной прочности возможно при переходе к получению керамических (поликристаллических) фторидных оптических материалов, что требует разработки технологий их синтеза. В докладе будут изложены результаты по получению керамик методом глубокой пластической деформации монокристаллов и методом горячего прессования порошков. Получены следующие результаты:

- разработан новый подход к синтезу фторидных порошков прекурсоров посредством синтеза промежуточного вещества, выделяющего при термообработке фторирующий агент;

- определены требования к порошкам-прекурсорам для использования их в технологии компактирования;

- определены требования к монокристаллам для использования в технологии глубокой пластической деформации;

- получены образцы фторидной лазерной керамики идентичной монокристаллам (рис.1) по теплопроводности и схожей по спектрально-генерационным характеристикам;

- определены подходы для увеличения механических характеристик (микротвердость и вязкость разрушения) керамик по сравнению с монокристаллами

- развито новое научное направление – химия, физика и технология нанофторидов.



Рис. 1. Фотография керамики  $\text{CaF}_2:\text{Yb}$  (3 мол.%), полученной методом глубокой пластической деформации монокристалла.



КОМПЛЕКСНЫЙ ПРОЕКТ «СОЗДАНИЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА СВЕРХМОЩНЫХ ПРИБОРОВ СИЛОВОЙ  
ЭЛЕКТРОНИКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ  
И ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ В НАУКОЕМКИХ ОБЛАСТЯХ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ТРАНСПОРТА И ЭНЕРГЕТИКИ» :  
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НИОКТР

К.Н. Нищев<sup>1</sup>, М.И.Новопольцев<sup>1</sup>, В.В.Елисеев<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*ОАО «Электровыпрямитель», Саранск*

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

В докладе представлены результаты первого отчетного периода проекта «Создание высокотехнологичного производства сверхмощных приборов силовой электроники, обеспечивающих конкурентоспособность и импортозамещение в наукоемких областях промышленности, транспорта и энергетики», выполняемого Институтом физики и химии МГУ им.Н.П. Огарева и ОАО «Электровыпрямитель» в рамках Постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Целью проекта является разработка базовой технологии и организация производства новых высоковольтных силовых полупроводниковых приборов на основе нейтроннолегированного кремния и электропроводящих композиционных термокомпенсаторов диаметром до 5 дюймов. В рамках проекта проводятся НИОКТР, направленные на создание тиристоров на токи до 5000 А и напряжение до 8500 В, обладающих повышенными техническими характеристиками. Создание данных приборов решает задачу импортозамещения сложных силовых электронных компонентов для современного энергосберегающего оборудования.

Основной задачей первого отчетного периода являлась разработка предварительного проекта технологических процессов изготовления электропроводящих композитных термокомпенсаторов (ТП ТК) и полупроводниковых элементов (ТП ПЭ). Исполнителями проекта проведены патентные исследования, разработана предварительная технологическая документация, проведены исследовательские испытания макетов ТК и ТП ТК.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарева» при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) в рамках договора № 02.G25.31.0213 между ОАО «Электровыпрямитель» и Минобрнауки РФ об условиях предоставления и использования субсидии на реализацию комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения.

## АКРИЛОВЫЙ ПОЛИМЕР С ВКЛЮЧЕНИЕМ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Е.С. Ваганова<sup>1</sup>, О.А. Давыдова<sup>1</sup>, М.В. Бузаева<sup>1</sup>, Е.С. Климов<sup>1</sup>,  
В.А. Сергеев<sup>2</sup>, И.В. Фролов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск

<sup>2</sup>Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск

E-mail: [ilya-frolov88@mail.ru](mailto:ilya-frolov88@mail.ru)

Основная задача при создании полимерных нанокомпозитов с включением углеродных наночастиц – достижение максимальной степени диспергирования УНТ в матрице полимера.

В работе использовали синтезированные методом МОСVD многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) с диаметром 40-80 нм. Для улучшения совместимости МУНТ с матрицей полимера трубки функционализировали (ф-МУНТ) прививкой на поверхности полярных карбоксильных групп (COOH) при обработке сильными кислотами [1].

Для получения композита брали раствор полиметилметакрилата (ПММА) в толуоле, с помощью ультразвука в него диспергировали МУНТ, суспензию наносили на кремниевую пластинку, центрифугировали для испарения толуола, полученные пленки исследовали различными методами. Микропрофили поверхности пленок измерялись на зондовом микроскопе NanoEducator в режиме АСМ (рис. 1). Более микродисперсная, устойчивая нанокомпозитная среда получается с ф-МУНТ, о чем свидетельствует более сглаженный профиль поверхности пленки (рис. 1 б).

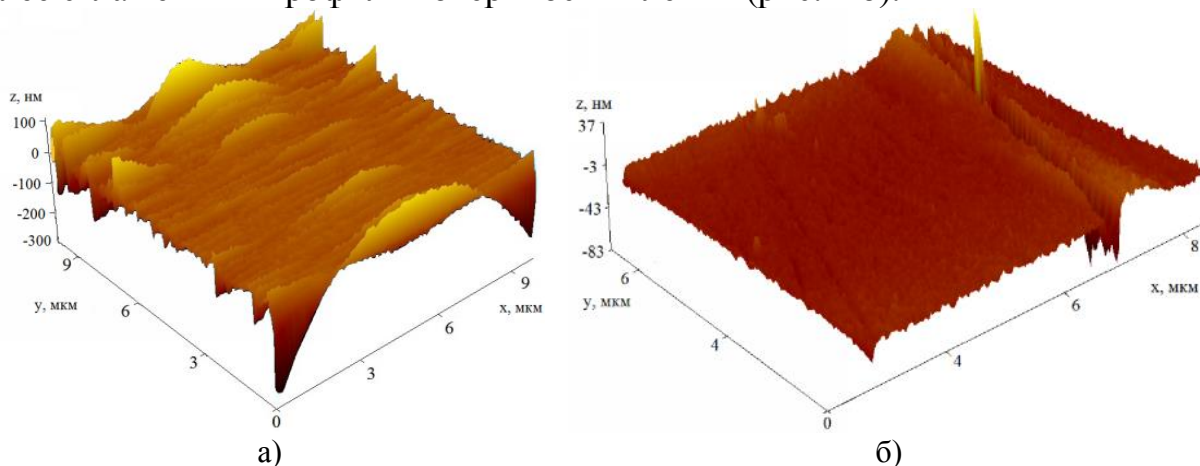


Рис. 1. АСМ-микрофотографии пленок полимерного композита на основе ПММА: а) с ориентированными МУНТ; б) с ф-МУНТ

1. Е.С. Климов, М.В. Бузаева, О.А. Давыдова и др., Журнал прикладной химии **88**, 1128 (2015).

# МОДИФИЦИРОВАНИЕ СТЕКОЛ СИСТЕМЫ $\text{Ag}_2\text{O-ZnO-P}_2\text{O}_5$ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРА С ИМПУЛЬСАМИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

А.С. Липатьев<sup>1</sup>, Г.Ю. Шахгильдян<sup>1</sup>, Т.О. Липатьева<sup>1</sup>, С.В. Лотарев<sup>1</sup>,  
С.С. Федотов<sup>1</sup>, М.П. Ветчинников<sup>1</sup>, В.Н. Сигаев<sup>1</sup>, П.Г. Казанский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва*

<sup>2</sup>*University of Southampton, United Kingdom*

*E-mail: lipatievas@yandex.ru*

Особо значимым практическим применением фемтосекундного лазерного модифицирования оптических сред, в частности стекол, представляется разработка объемной оптической памяти, обеспечивающего многослойную запись данных в носителе. Реализация такого подхода позволила бы многократно повысить плотность записи информации, а использование оксидного стекла в качестве носителя обеспечило бы сохранность информации на тысячи лет. Для кодирования информации могут быть использованы различные параметры, возникающие при фемтосекундном лазерном модифицировании стекол: изменение показателя преломления, параметры двулучепреломления анизотропных областей и возникновение или изменение спектра люминесценции, которые в ряде случаев дают возможность многоуровневой записи [1, 2]. Анализ развития подходов к многомерной записи информации в стекле показывает перспективность совместного использования двулучепреломления и люминесценции для повышения плотности многоуровневого кодирования информации.

В данной работе предпринята попытка одновременного формирования люминесцентных наночастиц серебра и двулучепреломляющих областей в объеме стекла состава  $40\text{P}_2\text{O}_5\text{-}55\text{ZnO}\text{-}4\text{Ag}_2\text{O}\text{-}1\text{Ga}_2\text{O}_3$  фемтосекундным лазерным пучком. При воздействии на стекло сфокусированным пучком в диапазоне энергий импульса от 38 до 73 нДж получены кольцевидные микрообласти диаметром до 5 мкм с наночастицами серебра, интенсивно люминесцирующими в видимой области. В центре этих областей зафиксировано двулучепреломление с фазовым сдвигом до 30 нм. Ориентация медленной оси двулучепреломления перпендикулярна плоскости поляризации лазерного пучка, что свидетельствует о формировании периодических наноструктур типа нанорешетки. В дальнейшем предполагается исследовать возможность независимого управления параметрами люминесценции и двулучепреломления, что открыло бы возможность для кодирования данных в каждом из них.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ (грант МК-9290.2016.3), РФФИ (грант 16-03-00541) и Министерства образования и науки РФ (грант № 14.Z50.31.0009).

1. L. Canioni et. al., Opt. Lett. **33**, 360-362 (2008).
2. J. Zhang et. al., Phys. Rev. Lett. **112**, 033901 (2014).

ФОТОИНДУЦИРУЕМЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ  
И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ В КРИСТАЛЛАХ CaF<sub>2</sub>-LuF<sub>3</sub>,  
АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ Ce<sup>3+</sup> и Yb<sup>3+</sup>

Н.Ф. Рахимов, А.С. Низамутдинов, В.В. Семашко  
*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*  
*E-mail: [niyaz@mail.ru](mailto:niyaz@mail.ru)*

В настоящее время ведется активное исследование материалов, в объеме которых можно было бы создавать пространственные периодические неоднородности оптических характеристик (показатель преломления, коэффициент поглощения) для целей реализации на их основе фотонных кристаллов [1, 2, 3]. Также ведутся поиски методик создания периодических структур на основе центров окраски. В работе [4] в кристалле LiF были созданы периодические структуры с периодом 1 мкм за счет обесцвечивания центров окраски, предварительно наведенных в кристаллическом материале. Существенным является то, что сейчас периодические структуры изготавливают посредством травления либо наведения дефектов в материалах жестким УФ излучением или электронными пучками, т. е. они являются стационарными. При этом следует отметить, что существуют короткоживущие центры окраски, время жизни которых может принимать значения порядка  $10^{-10}$  с [5].

Перспективным представляется создание материалов, оптическими свойствами которых можно было бы управлять с помощью внешнего лазерного излучения за счет управления равновесием динамических процессов в них при накачке УФ излучением.

В настоящей работе обсуждаются результаты экспериментов по созданию периодических неоднородностей коэффициента поглощения центров окраски и коэффициента усиления в смешанных кристаллах со структурой флюорита CaF<sub>2</sub>-LuF<sub>3</sub>, активированных ионами Ce<sup>3+</sup> и Yb<sup>3+</sup>. Периодические неоднородности были созданы с помощью интерферометрических методов с использованием излучения 4-й гармоники лазера Nd:YAG с длиной когерентности 20 см. Представлены результаты исследований характеристик полученных периодических структур, а именно глубина модуляции, время жизни периодической структуры, спектральные характеристики.

1. L.Lu, A. Mock, M. Bagheri, J.-R. Cao, S.-J. Choi, J.O'Brien, P. Daniel Dapkus, IEEE Photonics Technology Letters **17**, (2009).
2. P. Barclay, K.-M. Fu, C. Santori, R. Beausoleil, OPTICS EXPRESS. **12**, 9588-9601 (2009).
3. Y. Tanaka, J. Upham, T. Nagashima, T. Sugiya, T. Asano, S. Noda, Nature materials **6**, 862-866 (2007).
4. F. Bonfigli, et. al., Applied Optics **31**, 38-43 (2009).
5. V.V. Semashko, A.K. Naumov, A.S. Nizamutdinov, R.Yu. Abdulsabirov, S.L. Korableva, SPIE Proc. **5402**, 421-429 (2004).

# ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ОКСИХИНОЛИНОВЫХ МЕТАЛЛ-КОМПЛЕКСОВ И ФТОРОБОРАТНОЙ СТЕКЛЯННОЙ МАТРИЦЫ

М.О. Анурова, Е.В. Ермолаева, А.В. Хомяков, О.Б. Петрова

Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева,  
Москва

E-mail: [maria\\_anurova93@mail.ru](mailto:maria_anurova93@mail.ru)

Гибридные материалы (ГМ) – это материалы особого типа, архитектура которых состоит из органической и неорганической составляющих взаимодействие которых приводит как к частично наследующим так и абсолютно новым свойствам по отношению к веществам из которых они синтезированы [1]. ГМ на основе оксихинолиновых [2] и фенантролиновых [3] люминесцирующих органических металл-комплексов могут быть перспективными для создания новых светоизлучающих устройств.

ГМ синтезировали по методике, описанной в [3]. В качестве органических люминофоров использовались 8-оксихиноляты ( $\text{Meq}_x$ ) металлов ( $\text{Liq}$ ,  $\text{Kq}$ ,  $\text{Naq}$ ,  $\text{Rbq}$ ,  $\text{Mgq}_2$ ,  $\text{Srq}_2$ ,  $\text{Baq}_2$ ,  $\text{Znq}_2$ ,  $\text{Scq}_3$ ,  $\text{Alq}_3$ ,  $\text{Gaq}_3$  and  $\text{Inq}_3$ ). Образцы представляли собой прозрачные стекловидные пластины, спектр пропускания которых практически полностью соответствовал спектру пропускания матричного стекла  $80\text{PbF}_2\text{-}20\text{B}_2\text{O}_3$  (рис. 1а). ГМ состава  $\text{Srq}_2\text{+}80\text{PbF}_2\text{-}20\text{B}_2\text{O}_3$  показал наиболее яркую фотолюминесценцию (ФЛ) с максимумом полосы на 528 нм и шириной 123 нм (рис.1\_б).

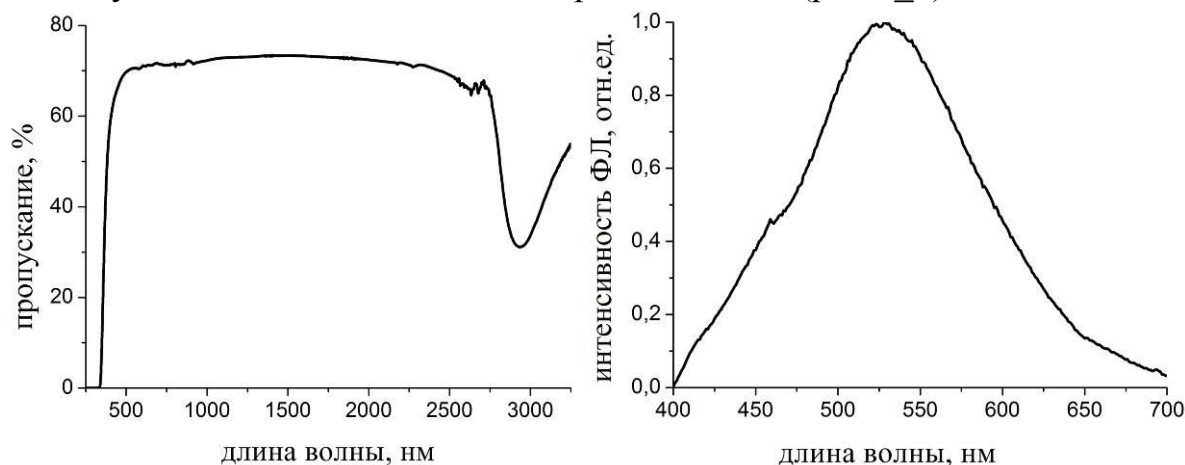


Рис. 1. Гибридный материал  $\text{Srq}_2\text{+}80\text{PbF}_2\text{-}20\text{B}_2\text{O}_3$ :  
а) спектр пропускания, б) нормированный спектр ФЛ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 14-13-01074).

1. B. Lebeaue, P. Innocenz, Chem. Soc. Rev. **40**, 886 (2011).
2. R. Avetisov, O. Petrova, A. Khomyakov et al., J. Cryst. Growth **401**, 449 (2014).
3. O. Petrova, I. Taydakov, M. Anurova et al., J. Non-Cryst. Sol. **429**, 213 (2015).

# ФРУСТРИРОВАННЫЙ МАГНЕТИК $\text{Ni}_3(\text{VO}_3)_2$ : ИССЛЕДОВАНИЕ СПИНОВЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

К.Н. Болдырев<sup>1</sup>, А.Д. Молчанова<sup>1</sup>, Р.В. Писарев<sup>2</sup>, D. Kamenskiy<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>3</sup>High Field Magnetic Laboratory, Radboud University, Nijmegen, Netherlands

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

Ортоборат никеля  $\text{Ni}_3(\text{VO}_3)_2$  кристаллизуется в ромбической сингонии (пр. гр.  $R\bar{3}m$  (#58)) и обладает структурой минерала котоита. Ионы  $\text{Ni}^{2+}$  занимают две различные октаэдрические позиции  $2a$  и  $4f$ , формируя две магнитные подсистемы. Обе подсистемы никеля упорядочиваются антиферромагнитно при температуре  $T_N = 46$  К [1]. В недавней работе [2] было показано, что в данном соединении при  $T_N$  наблюдается также структурный фазовый переход, связанный с удвоением кристаллической ячейки и «складывании» при этом зоны Бриллюэна.

В настоящей работе представлено исследование спектров пропускания терагерцового излучения через монокристалл  $\text{Ni}_3(\text{VO}_3)_2$  в постоянных магнитных полях напряженностью до 32 Тл. В нулевом магнитном поле ниже температуры  $T_N$  наблюдался ряд особенностей, интерпретированных как одномагнитные возбуждения. Зависимость частот магнитных возбуждений от величины поля имеет ярко выраженный нелинейный характер (рис. 1). Это может указывать на взаимодействие магнитных мод друг с другом (спин-спиновое взаимодействие). Кроме того, в сильных магнитных полях ( $>10$  Тл) наблюдается поведение магнитных мод, указывающее на фазовый переход типа «спин-флоп».

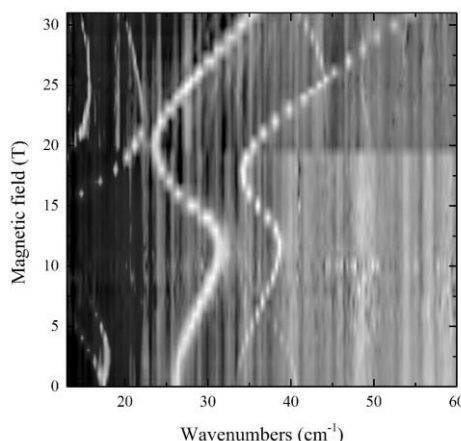


Рис. 1. Зависимость терагерцового спектра пропускания монокристалла  $\text{Ni}_3(\text{VO}_3)_2$  от внешнего магнитного поля при  $T = 1,5$  К.

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ 16-12-10456 (Р.В.П.), РФФИ № 15-32-20613 (К.Н.Б., А.Д.М.) и гранта Президента РФ для поддержки молодых ученых (МК-3521-2015.2).

1. L.N. Bezmaternykh et al., Phys. Stat. Sol. B. **249**, 1628 (2012).
2. R.V. Pisarev et al., Phys. Rev. B. **93**, 134306 (2016).

# СРАВНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ОКСИДАМИ ИТТРИЯ И СКАНДИЯ

М.А. Борик<sup>1</sup>, В.Т. Бублик<sup>3</sup>, С.И. Бредихин<sup>2</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>,  
В.В. Осико<sup>1</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>3</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>*Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка  
E-mail: [kulebyakin@lst.gpi.ru](mailto:kulebyakin@lst.gpi.ru)*

Кристаллические материалы на основе диоксида циркония известны не только своими превосходными прочностными характеристиками, но и высокой ионной проводимостью. Высокие прочностные свойства обусловлены специфической доменной структурой материала, которая формируется в процессе охлаждения кристалла, а также вероятностью тетрагонально-моноклинного перехода при приложении механической нагрузки. Высокая ионная проводимость возможна благодаря наличию в структуре материала кислородных вакансий, которые образуются в результате стабилизации высокотемпературной модификации  $ZrO_2$  ионами редкоземельных элементов с валентностью отличной от Zr.

В зависимости от вида и концентрации стабилизирующего оксида структура и свойства полученных материалов могут существенно отличаться. В настоящей работе представлены результаты исследования кристаллов  $ZrO_2$  стабилизированных  $Y_2O_3$ ,  $Sc_2O_3$  и проведен сравнительный анализ полученных данных.

Показано, что в тетрагональных кристаллах диоксида циркония стабилизированного оксидом иттрия, присутствуют две фазы: трансформируемая и нетрансформируемая, которые отличаются содержанием  $Y_2O_3$  и параметрами решетки. В кристаллах с оксидом скандия аналогичной концентрации присутствует лишь одна фаза - нетрансформируемая. Соответственно, трещиностойкость тетрагональных кристаллов  $ZrO_2 - Y_2O_3$  намного выше, чем кристаллов  $ZrO_2 - Sc_2O_3$ .

Исследования кубических кристаллов показало, что при стабилизации оксидом иттрия кубическая фаза в кристаллах сохраняется при концентрациях 8 мол.%  $Y_2O_3$  и выше, а при стабилизации оксидом скандия кубическая фаза в кристаллах появляется лишь при 10 мол.%  $Sc_2O_3$ . В основном, в диапазоне концентраций оксида скандия 9-11 мол.%, кубическая фаза распадается на тетрагональную и ромбоэдрическую. Это связано с меньшим ионным радиусом катиона скандия по сравнению с катионом иттрия.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 16-38-00521 мол\_а и № 15-38-70053 мол\_а\_мос.

## ТРИ СЦЕНАРИЯ МАГНИТНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ $\text{Cu}_3R(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Cl}$ ( $R = \text{Er}, \text{Sm}, \text{Yb}$ ): ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Л.С. Мазаев<sup>1,2</sup> С.А. Климин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва*

<sup>2</sup>*МФТИ, Долгопрудный, Московская область*

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

Редкоземельные (РЗ) франциситы  $\text{Cu}_3R(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Cl}$  ( $R$  – редкая земля) – это синтетические изоструктурные аналоги природного минерала  $\text{Cu}_3\text{Bi}(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Cl}$  [1, 2]. С одной стороны, эти соединения представляют интерес в качестве модельных систем для исследования фрустрированного и низкоразмерного магнетизма [3, 4]. С другой стороны, с практической точки зрения привлекательна возможность управления намагниченностью в низких магнитных полях. К настоящему моменту хорошо исследованы магнитные свойства висмутового и иттриевого франциситов, в которых только медь обладает магнитным моментом. Можно ожидать, что при введении второй магнитной подсистемы (редкоземельной) будут наблюдаться новые интересные явления. В данной работе методами оптической спектроскопии исследуются три францисита с различными редкими землями – Er, Sm, Yb. Все три РЗ элемента находятся в трехвалентном состоянии, это – крамерсовские ионы. По расщеплению спектральных линий переходов между крамерсовскими дублетами можно детектировать магнитное упорядочение кристалла, по его резкому изменению – спин-переориентацию.

Проведены исследования температурно-зависимых спектров поглощения в области f-f переходов упомянутых РЗ ионов. Во всех трех соединениях обнаружено магнитное упорядочение медной подсистемы при температуре  $T_N$  вблизи 36 К так же, как в  $\text{Cu}_3\text{Y}(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Cl}$  [4]. Борьба магнитных анизотропий РЗ и медной подсистем приводит к спин-переориентационному фазовому переходу в самариевом и иттербиевом франциситах, причем разного типа. Если в иттербиевом францисите переориентация происходит как фазовый переход первого рода, то в самариевом – как второго. Обсуждаются возможные причины трех различных сценариев магнитного поведения исследованных соединений.

1. A. Pring, B.M. Gatehouse, W.D. Birch, Amer. Mineral. **75**, 1421 (1990).
2. P.S. Berdonosov, V.A. Dolgikh, Russ. J. Inorg. Chem. **53**, 1353 (2008).
3. M. Pregelj, O. Zaharko, A. Günther, A. Loidl, V. Tsurkan, S. Guerrero, Phys. Rev. B. **86**, 144409 (2012).
4. K.V. Zakharov, E.A. Zvereva, P.S. Berdonosov et al., Phys. Rev. B. **90**, 214417 (2014).



# ОПТИЧЕСКИЕ ЦЕНТРЫ ИОНОВ $\text{Eu}^{3+}$ В КРИСТАЛЛАХ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ОКСИДОМ ИТТРИЯ, С ТЕТРАГОНАЛЬНОЙ И КУБИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

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>, А.Н. Чабушкин<sup>1</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>3</sup>

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

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

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

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

Уникальные физико-химические свойства материалов на основе диоксида циркония  $\text{ZrO}_2$ , стабилизированных и частично стабилизированных  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , обеспечивают их различные практические приложения. Свойства этих материалов во многом зависят от их структурных особенностей, обусловленных наличием кислородных вакансий, образующихся в процессе стабилизации  $\text{ZrO}_2$  оксидом иттрия.

Формирование локальной структуры катионов при наличии кислородных вакансий в кристаллах стабилизированного и частично стабилизированного диоксида циркония можно выявить методами оптической спектроскопии с использованием в качестве спектроскопического зонда иона  $\text{Eu}^{3+}$ .

Несмотря на значительное количество публикаций, посвященных исследованию структуры оптических центров ионов  $\text{Eu}^{3+}$  в твердых растворах на основе диоксида циркония [1-4], в настоящее время отсутствуют работы, в которых подобные исследования были бы выполнены для монокристаллов  $\text{ZrO}_2$  при стабилизации оксидом иттрия в широком диапазоне изменения концентрации  $\text{Y}_2\text{O}_3$ .

В настоящей работе с использованием методов оптической спектроскопии выявлены особенности локального окружения ионов  $\text{Eu}^{3+}$  для тетрагональных и кубических твердых растворов  $\text{ZrO}_2$ –(2,7 – 3,8 мол.%)  $\text{Y}_2\text{O}_3$ –0,1 мол.%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ , полученных методом направленной кристаллизации расплава с использованием прямого высокочастотного нагрева в холодном контейнере.

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

1. J. Dexpert-Ghys, M. Faucher, P. Caro, *Journal of Solid State Chemistry* **54**, 179 (1984).
2. H. Yugami, A. Koike, M. Ishigame, *Phys. Rev* **44**, 9214 (1991).
3. Ю.К. Воронько, М.А. Зуфаров, А.А. Соболев и др., *Оптика и спектроскопия* **81**, 814 (1996).
4. Ю.К. Воронько, М.А. Зуфаров, А.А. Соболев и др., *Неорганические материалы* **33**, 452 (1997).

ВЫРАЩИВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
КРИСТАЛЛОВ ВГО

Е.Э. Дунаева<sup>1</sup>, Т.В. Чухловина<sup>1</sup>, Л.И. Ивлева<sup>1</sup>, В.В. Колтышев<sup>2</sup>

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

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

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

Монокристаллы германата висмута  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (ВГО) со структурой эвлитина являются сцинтилляционным материалом, о чём известно еще с середины XX века. Однако при определенных воздействиях данные кристаллы могут проявлять особенные спектрально-люминесцентные характеристики [1]. Настоящая работа посвящена разработке технологии оптически совершенных кристаллов германата висмута  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  со структурой эвлитина и исследованию влияния внешних воздействий на спектроскопические характеристики полученных образцов.

В рамках данной работы были проведены ростовые эксперименты и подобраны оптимальные параметры, позволяющие получить бесцветные, прозрачные в области 0,3–6,5 мкм кристаллы ВГО оптического качества двух ориентаций [111] и [100] методом Чохральского.

Представлены результаты экспериментов по отжигу образцов в различных условиях: в порошках ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{GeO}_2$ , в шихте  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ), на воздухе и в форвакууме. Также было исследовано влияние  $\gamma$ -облучения и насыщения водородом на оптические свойства кристаллов ВГО. Изучено влияние внешних воздействий на морфологию поверхности исследованных образцов, получены спектры поглощения и проанализировано влияние условий проведения термической обработки на их спектрально-люминесцентные характеристики.

Окрашенный образец («red» ВГО) был получен отжигом в форвакууме в графитовом тигле при 900 °С. Спектр поглощения данного образца выявляет пики на 365, 455 и 518 нм. При накачке ксеноновой лампой на длине волны 450 нм в спектральной области 240-1650 нм была зарегистрирована люминесценция с двумя пиками: широкий пик с максимумом на 1000-1100 нм и более узкий пик на 1500 нм. Для полосы 1030 нм спектр возбуждения люминесценции – узкая полоса с максимумом на 370 нм, для полосы 1500 нм – более широкая полоса с максимумом на 450 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы президиума РАН № I.1П.

1. Y. Pingsheng, S. Liangbi, Z. Hengyu, *Opt. Mater.* **33**, 831–834, (2011).

## СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ d- ИЛИ f-ЭЛЕМЕНТАМИ

Е.М. Колобкова, И.В. Степанова, О.Б. Петрова

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

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

Висмутгерманатные стекла прозрачны в видимом и ближнем ИК-диапазоне спектра, что позволяет использовать их как матрицу для легирования редкоземельными и переходными ионами [1]. Кроме того, в висмутгерманатных стеклах возможно получение нескольких кристаллических фаз: сцинтилляционной  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  и сегнетоэлектрической  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$  [2]. Изменение соотношения исходных оксидов способствует образованию в стекле либо одной, либо комбинации этих фаз. Данная работа посвящена изучению влияния добавок оксидов хрома или неодима на свойства висмутгерманатных стекол разных составов.

Исследованы стекла  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2$  с соотношениями основных компонентов 40:60, 45:55 и 50:50 мол.% и с добавлением оксида неодима или оксида хрома в концентрациях 0,1, 1 или 0,01, 0,1 мол.%, соответственно. Стекла получали плавлением смеси исходных оксидов при температуре 1100°C и последующим отливом на подложку. Диэлектрические характеристики измеряли с помощью мостовой схемы E7-12 с частотой 1 МГц в диапазоне температур 25-620°C. Микротвердость определяли методом Виккерса в диапазоне нагрузок 50-150 г.

Выявлено, что рост концентрации хрома в стекле способствует кристаллизации, тогда как оксид неодима улучшает стеклование висмутгерманатных составов. Добавление оксидов неодима и хрома увеличивает микротвердость, аналогичное влияние оказывает рост концентрации  $\text{GeO}_2$ . По данным диэлектрических измерений определены характеристические температуры стекол. Уменьшение содержания оксида висмута в стекле приводит к увеличению температуры стеклования и температуры максимальной кристаллизации, а также к росту удельного сопротивления. Не отмечено существенного влияния оксидов хрома и неодима указанных концентраций на диэлектрические характеристики. Таким образом, изменения в диэлектрических свойствах преимущественно связаны с соотношением основных компонентов матрицы стекол – оксидов висмута и германия.

1. I.V. Stepanova, N.G. Goraschenko, *Optics and Spectroscopy* **114**, 873–875 (2013).
2. K. Pengpat, D. Holland, J. *Europ. Ceram. Soc.* **23**, 1599–1607 (2003).

## СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА СТЕКЛОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Е.С. Игнатьева<sup>1</sup>, Н.В. Голубев<sup>1</sup>, М.З. Зиятдинова<sup>1</sup>, В.Н. Сигаев<sup>1</sup>,  
Р. Лоренци<sup>2</sup>, А. Палеари<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,  
Москва*

<sup>2</sup> *Университет Милана-Биккока, Милан, Италия  
E-mail: [elena\\_ign85@mail.ru](mailto:elena_ign85@mail.ru)*

С момента выхода, около 35 лет назад, первой работы по оптическим свойствам квантовых точек в стекле [1], процессы формирования полупроводниковых нанокристаллов в прозрачной диэлектрической матрице привлекают пристальное внимание. Наблюдение квантовых размерных эффектов было обусловлено возможностью получать в ней нанокристаллы заданного размера, варьируя условия термообработки [2]. Изменение количества собственных дефектов полупроводника, например при введении легирующих примесей, является не менее важным способом управления его оптическими свойствами [3, 4]. Последнее, однако, осложнено взаимодействием со стеклообразной матрицей в случае полупроводниковой фазы, выделяющейся в стекле. Повышенная химическая и термическая стабильность стеклообразной матрицы расширяет тем не менее спектр возможных применений выделенных в ней нанокристаллов по сравнению с теми же нанокристаллами, полученными из раствора.

В данной работе синтезированы малощелочные галлиевосиликогерманатные стекла, при термообработке которых выделяются нанокристаллы  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Показано, что как и для фазы  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> спектр люминесценции нанокристаллов  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, выделившихся в матрице стекла, представляет собой суперпозицию УФ-, голубой и зеленой полос. Выявлены взаимосвязи между составом стекол, условиями их варки и термообработки, с одной стороны, и люминесценцией в УФ, видимой и ИК области спектра, с другой.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ (гранты МК-8807.2016.3 и 14.Z50.31.0009).

1. А.И. Екимов, А.А. Онущенко, Письма в ЖЭТФ **34**, 363 (1981).
2. N.F. Borrelli et al., J. Appl. Phys. **61**, 5399 (1987).
3. M. Kuno, J. Phys. Chem. Lett. **5**, 3817 (2014).
4. J.Z. Zhang, J.K. Cooper, S. Gul, J. Phys. Chem. Lett. **5**, 3694 (2014).

# ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ, СТРУКТУРОЙ, КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ТЕТРАГОНАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

В.Р. Боричевский, В.Т. Бублик, А.В. Кулебякин, Е.Е. Ломонова,  
В.А. Мызина, С.В. Серяков, Н.Ю. Табачкова  
*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*  
*E-mail: [vasbm@yandex.ru](mailto:vasbm@yandex.ru)*

Кристаллические материалы на основе диоксида циркония обладают свойствами, перспективными во многих приложениях и представляют значительный интерес как с научной, так и с практической точки зрения. Актуальность создания таких материалов определяется перспективами их использования в качестве конструкционных неметаллических высокопрочных и износостойких материалов, термобарьерных и защитных покрытий, твердых электролитов для топливных элементов, датчиков кислорода в разных средах и других подобных устройствах, а также в качестве биоинертных материалов для медицины.

Целью настоящей работы является установление корреляции между химическим составом, структурой, кристаллографической ориентацией тетрагональных кристаллов на основе диоксида циркония и их механическими свойствами. Для изучения механических характеристик материала, таких как, твердость и трещиностойкость, использовали метод индентирования. Исследование деформационных механизмов важны потому, что для многих применений напряжения в объеме вызваны контактной нагрузкой действующей с поверхности.

Методами рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии исследована эволюция фазового состава и двойниковой структуры кристаллов ЧСЦ в зависимости от концентрации стабилизирующей примеси и условий термообработки. Исследовано влияние ориентации индентора на величину микротвердости и трещиностойкости на разных кристаллографических гранях кристалла.

Сопоставление данных о структуре, фазовом составе и механических свойствах позволило предположить, что основным фактором, влияющим на снижение трещиностойкости с увеличением концентрации стабилизирующей примеси, является изменение фазового состава кристаллов ЧСЦ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-02-000742.

## СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ГАЛЛИЕВЫХ БОРАТОВ СО СТРУКТУРОЙ ХАНТИТА

Н.Н. Кузьмин<sup>1,2</sup>, К.Н. Болдырев<sup>2</sup>, Е.А. Добрецова<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

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

<sup>3</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

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

Существует растущая потребность в синих и ультрафиолетовых лазерах в некоторых развивающихся областях практического применения. Уменьшение длины волны лазерного излучения имеет важное значение при оптической записи и обработке информации (для лучшего разрешения и более высокой плотности данных), в медицинских целях (для селективного поглощения света), в охране окружающей среды (для разработки дистанционных датчиков). Один из эффективных способов получения такого излучения – использование нелинейных кристаллов в качестве генерационной среды с последующим самоудвоением и самосмещением частот. Такая технология также применима при разработке микролазеров с диодной накачкой, где небольшой нелинейный кристалл крепится к выходному концу лазерного диода, и выполняет роль удвоителя частоты. Одним из ярких представителей таких нелинейных материалов являются редкоземельные алюминиды боратов со структурным типом хантита. Соединения широко изучены, и результаты их исследования представлены во многих статьях (напр., [1, 2]).

В настоящей работе проведены первые спектроскопические исследования ряда соединений галлиевых боратов, близких к алюминидным боратам, однако в отличие от последних практически не изученных. В широком диапазоне температур и частот получены и интерпретированы спектры пропускания и люминесценции боратов  $REGa_3(BO_3)_4$  с различными редкоземельными ионами RE. На основе люминесцентных данных и результатов исследования методом оптической спектроскопии в ИК и видимой области определена схема штарковских энергетических уровней ряда редкоземельных ионов ( $Eu^{3+}$ ,  $Sm^{3+}$ ,  $Ho^{3+}$  и др.) в матрице галлиевого бората. Получены времена затухания люминесценции для наиболее интенсивных переходов. Полученная информация может быть использована для создания оптических усилителей, лазеров и частотных удвоителей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант № 14-12-01033) и стипендии Президента РФ (Е.А.Д., СП-754.2015.1).

1. I. Foldvari, Journal of Luminescence **102–103**, 395 (2003).
2. E. Cavalli, Journal of Luminescence **102–103**, 216 (2003).

## СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛОВ $GdCr_3(VO_3)_4$

Е.А. Добрецова<sup>1</sup>, К.Н. Болдырев<sup>1</sup>, Е.Ю. Боровикова<sup>2</sup>, В.А. Чернышев<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

<sup>3</sup>Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

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

Редкоземельные (РЗ) бораты со структурным типом минерала хантита представляют интерес благодаря своим оптическим, магнитным и магнитоэлектрическим свойствам. Ряд этих свойств характерен лишь для нецентросимметричных структур. РЗ хромовые бораты имеют политипную природу и кристаллизуются в двух различных модификациях: ромбоэдрической с пространственной группой  $R32$  (без центра инверсии) или моноклинной с центросимметричной пространственной группой  $C2/c$ . Тип структуры зависит от условий синтеза. Более того, для данных соединений характерно сосуществование в одном монокристалле различно упорядоченных структурных фрагментов. В настоящей работе представлены результаты исследования количественного соотношения структурных фаз в кристалле  $GdCr_3(VO_3)_4$  методом ИК спектроскопии в длинноволновой области.

Инконгруэнтно плавящийся борат  $GdCr_3(VO_3)_4$  получен методом спонтанной кристаллизации с использованием в качестве растворителя  $K_2MoO_4 - 3MoO_3$ . Отношение бората к растворителю в эксперименте составляло 1:1. На рис. 1 представлен ИК спектр  $GdCr_3(VO_3)_4$  в длинноволновой области. Проведенные *ab initio* расчеты в рамках теории функционала плотности позволили разделить колебания, относящиеся к структурам  $R32$  и  $C2/c$ . По интенсивностям полос с учетом сил осцилляторов удалось оценить соотношение фаз: содержание ромбоэдрической (нецентросимметричной) фазы составляет около 80 %.

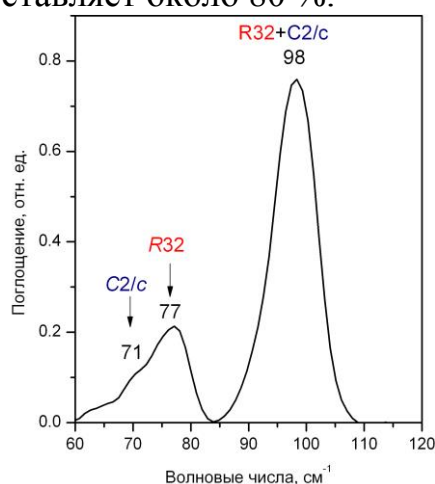


Рис. 1. Спектр поглощения  $GdCr_3(VO_3)_4$  в длинноволновой области при комнатной температуре.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-12-01033) и стипендии Президента РФ (СП-754.2015.1).

## ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА СИСТЕМЫ NaF–CaF<sub>2</sub>

П.П. Федоров<sup>1,2</sup>, М.Н. Маякова<sup>2</sup>, С.В. Кузнецов<sup>2</sup>, В.А. Маслов<sup>2</sup>,  
А.А. Пыненков<sup>1</sup>, С.Н. Ушаков<sup>1,2</sup>, М.А. Усламина<sup>1</sup>, К.Н. Нищев<sup>1</sup>,  
Н.И. Сорокин<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup>Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Москва

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

Система NaF–CaF<sub>2</sub> - одна из простейших фторидных систем эвтектического типа, фазовая диаграмма ее изучалась неоднократно [1-3]. На основе этой системы разрабатывались многокомпонентные ионные расплавы, перспективные для использования в металлургии и атомной энергетике. Имеются указания на образование области твердых растворов на основе CaF<sub>2</sub> [1-3], представляющей интерес для разработки фтор-ионных электролитов, однако эта область фазовой диаграммы ранее не изучалась.

Исследование фазообразования проводили методами ДСК, РФА, РЭМ и РСМА. Синтез при 950-1050 °С проводили в растворе-расплаве по реакции  $\text{CaCl}_2 + 2\text{NaF} = \text{CaF}_2 + 2\text{NaCl}$ . Низкотемпературный синтез нанопорошков осуществляли путем осаждения  $\text{Ca}_{1-x}\text{Na}_x\text{F}_{2-x}$  из водного раствора  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  избытком NaF. Получены порошки со средним размером частиц 50 нм с содержанием NaF ( $x = 0,035$ ). Эти образцы находятся в метастабильном состоянии. Температурная зависимость равновесной растворимости NaF в CaF<sub>2</sub> носит ретроградный характер. Растворимость достигает максимальной величины  $3,5 \pm 0,5$  мол. % NaF ( $x = 0.035$ ) при  $1200 \pm 50$  °С (температуре, соответствующей размытому фазовому переходу у флюорита). При  $920 \pm 25$  °С она достигает минимума ( $< 0,4$  мол. %), и снова возрастает до  $2,2 \pm 0,2$  мол. % при температуре эвтектики (818 °С).

Измерение ионной проводимости проведено на прессованных таблетках методом импедансной спектроскопии с использованием серебряных электродов. Значения электропроводности образцов нанокерамики, полученной холодным прессованием нанопорошков  $\text{Ca}_{0,965}\text{Na}_{0,035}\text{F}_{1,965}$ , составляют  $1 \cdot 10^{-4}$  -  $3 \cdot 10^{-4}$  См/см при 400 °С.

Значение электропроводности нанокерамики n-CaF<sub>2</sub> при 530 °С превышает электропроводность монокристаллов CaF<sub>2</sub> в  $10^3$  раз.

Работа поддержана грантом РФФИ 15-08-02481-а.

1. F.Delbove, *Silicates Industriels* **32**, 2659. (1967).
2. W. Bollmann, R.Reimann, *Phys. Stat. Sol. A* **16**, 187 (1973).
3. M. Natsuhara, et al., *Solid State Ionics* **40/41**, 874. (1990).



## УПРАВЛЕНИЕ КРИВИЗНОЙ ПРОФИЛЯ РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.В. Грибко<sup>1</sup>, В.Н. Трушин<sup>2</sup>, А.С. Маркелов<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> *Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ, Нижний Новгород*

*E-mail: [gribkovladimir@icloud.com](mailto:gribkovladimir@icloud.com)*

Одной из задач рентгеновской оптики является создание рентгено-дифракционных элементов для двумерной фокусировки [1] и коллимации рентгеновского излучения. На результат управления рентгеновским излучением изогнутыми элементами, помимо геометрических искажений, влияет отклонение локальной кривизны изгиба от заданной. В этом случае актуальным является развитие методов адаптивной рентгеновской оптики, позволяющих корректировать сходимость рентгеновских пучков путем управления профилем изгиба кристалла.

В данной работе экспериментально исследуется температурное изменение кривизны профиля поверхности дифракционных элементов на примере монокристаллической пластины Si(400) в составе трехслойной структуры – подложка-клей-монокристаллическая пластина. Экспериментальное исследование профиля поверхности монокристаллической пластины проводилось на дифрактометре D8 Discover.

Из полученных нами данных было установлено, что исходная кривизна поверхности монокристаллической пластины, образующаяся при приклеивании её на подложку, зависит от усадки клея, упругих параметров составляющих изгибного модуля и их размеров. Исходная кривизна монокристаллической пластины также зависит от температуры ее приклеивания, изменением которой можно задавать исходную кривизну монокристаллической пластины, которую она приобретает при комнатной температуре (температуре проведения эксперимента). Это дает возможность формирования двухосно-изогнутого профиля отражающего элемента [2], в качестве которого могут быть также использованы рентгеновские и оптические зеркала.

1. Т. Чен, Журнал технической физики **72**, 92–94 (2002).
2. А.В.Андреев, А.А. Коновко, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **1**, 28–32 (2003).

## ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ КРИСТАЛЛОВ КТР:HF И КТР:ZR, ВЫРАЩИВАЕМЫХ МЕТОДОМ ИЗ РАСТВОРА В РАСПЛАВЕ

Е.А. Исупова, В.А. Иванов, П.В. Андреев, М.А. Фаддеев  
*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 и циркония 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  $HfO_2$  или  $ZrO_2$  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  $KTi_{1-x}Hf_xOPO_4$  и  $KTi_{1-x}Zr_xOPO_4$  со значениями мольных долей ( $HfO_2$  или  $ZrO_2$ )/ $TiO_2$  в начальном составе в интервале от 0,01 до 0,13, с шагом в 0,02, а также опорный образец кристалла КТР (всего 15 образцов). Полученные образцы кристаллов перетирались в агатовой ступке.

Для идентификации выращенных фаз проводился рентгеновский фазовый анализ на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 на излучении Cu-K $\alpha$ . Съемка производилась по схеме Брэгга-Брентано, в диапазоне углов  $2\theta$   $10^\circ$ – $80^\circ$  с шагом  $0,02^\circ$ , экспозицией 2 с. при комнатной температуре. Задавалось вращение образца в собственной плоскости со скоростью 1 об./с. Фазовый анализ показал, что все образцы однофазные, близкие по структуре к чистому КТР (PDF № 00–035–0802). Обработка дифрактограмм проводилась в программе Bruker TOPAS с целью уточнения параметров элементарной ячейки кристаллов. В качестве нулевого приближения использовалась чистая структура КТР (ICSD 66570). Объем элементарной ячейки возрастает с увеличением доли замещения атомов титана атомами примеси вплоть до величины 0,07. При дальнейшем увеличении доли атомов титана, атомами примеси объем меняется незначительно. Результаты рентгеновской дифрактометрии позволяют сделать вывод, что примеси встраиваются в структуру кристаллов, что в сочетании с данными элементного анализа позволит уточнить данные о коэффициенте захвата Hf и Zr кристаллом КТР.

1. K. Iliev et al., J. of Crystal Growth **100** (1–2), 225–232 (1990).
2. D.P. Shumov et al., Cryst. Res. Tech. **25**(11), 1245–1250 (1990).

ПИРОГИДРОЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ГЕРМАНАТОФОСФАТОВ  
 $Gd_{11}O_{10}(GeO_4)(PO_4)_3$ , ДОПИРОВАННЫХ ИОНАМИ  $Yb^{3+}$  -  $Er^{3+}$  В ПАРАХ,  
И ИХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА

В.А. Крутько<sup>1</sup>, М.Г. Комова<sup>1</sup>, Д.И. Поминова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С.Курнакова РАН,  
Москва

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Москва  
E-mail: [kroutko@igic.ras.ru](mailto:kroutko@igic.ras.ru)

Германатофосфаты  $Ln_{11}(GeO_4)(PO_4)_3O_{10}$  (брутто-формула  $Ln_{11}GeP_3O_{26}$ ) – термостойкие соединения ( $T_{пл} > 1500$  °С), которые кристаллизуются в триклинной сингонии (пр.гр. P1). Они имеют высокую изоморфную емкость по редкоземельному иону, поскольку образуют ряд структурных соединений от Pr до Ho [1]. В составе этих соединений германий изоморфно замещает кремний в силикатофосфатах  $Ln_{11}SiP_3O_{26}$ , которые представляют интерес в качестве матриц для ап-конверсионных люминофоров [2]. Как правило, синтез сложных фосфатов  $Ln_{11}GeP_3O_{26}$  проводят методом совместного соосаждения аммиаком компонентов реакции с последующим ступенчатым отжигом золя до конечной температуры 1400 °С [1]. В работе показана возможность получения люминофоров  $Gd_{11}GeP_3O_{26}:Yb^{3+}-Er^{3+}$  по золь-гель технологии (СВС методом) с последующим отжигом золь при температуре 1200 °С.

Зарегистрированы спектры ап-конверсионной люминесценции при излучательных переходах  $^2H_{11/2}, ^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  и  $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  ионов  $Er^{3+}$  в соединениях  $Gd_{9.9}Yb_{0.99}Er_{0.11}GeP_3O_{26}$  и  $Gd_{10.12}Yb_{0.77}Er_{0.11}GeP_3O_{26}$  (рис.1), значения энергетического выхода люминофоров составили 0,45 и 0,41 %, соответственно.

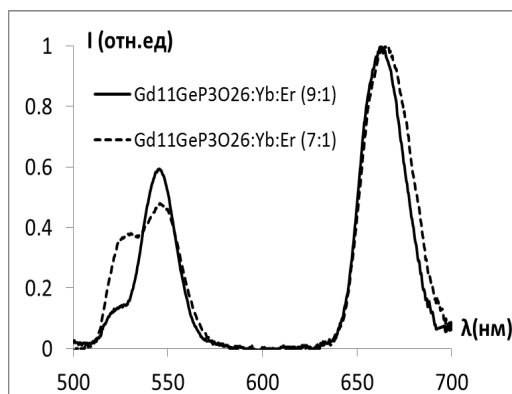


Рис. 1. Спектры ап-конверсионной люминесценции  $Gd_{9.9}Yb_{0.99}Er_{0.11}GeP_3O_{26}$  и  $Gd_{10.12}Yb_{0.77}Er_{0.11}GeP_3O_{26}$  ( $\lambda_{exc} = 974$  nm, P = 2,5 W)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-08467).

1. Б.Ф.Джуринский, Г.В.Лысанова, Журн. неорганической химии **43**, 2065 (1998).
2. A.Ryabova, D.Pominova, V.Krut'ko et al., Photonics & Lasers in Med. **2**, 117 (2013).

## МОНОКРИСТАЛЛ InI: НОВЫЙ МАТЕРИАЛ ИК ДИАПАЗОНА

С.В. Кузнецов<sup>1</sup>, П.П. Федоров<sup>1</sup>, Е.В. Чувилина<sup>2</sup>, А.А. Гасанов<sup>3</sup>,  
В.Г. Плотниченко<sup>4</sup>, В.В. Воронов<sup>1</sup>, П.А. Попов<sup>5</sup>, В.В. Осико<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> ООО «ЛАНХИТ», Москва

<sup>3</sup> АО «ГИРЕДМЕТ», Москва

<sup>4</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

<sup>5</sup>Брянский государственный университет им. И.Г. Петровского, Брянск

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

Монокристаллы галогенидов таллия: TlCl-TlBr (КРС-6) и TlBr-TlI (КРС-5), также как и CsI являются материалами дальнего ИК диапазона. Данные материалы имеют ряд недостатков: кристаллы с таллием токсичны, а иодид цезия гигроскопичен. В связи с этим поиск новых материалов, исключаяющих вышеперечисленные недостатки, является целесообразным. Одним из перспективных материалов, который может быть использован в качестве альтернативы является InI. InI кристаллизуется в ромбической сингонии (пр. гр. *Стт*) при температуре 365 °С.

InI был синтезирован из соответствующих элементов в кварцевом реакторе и затем очищен реактификацией в аргоне и перекристаллизацией. Монокристаллы InI были выращены методом Бриджмена-Стокбаргера в кварцевых ампулах, скорость кристаллизации составила 2 мм/ч. Параметры решетки выращенного монокристалла составили:  $a = 4.76465$  (35),  $b = 12.77656$  (82),  $c = 4.90717$  (35) Å; также было отмечено, что монокристаллы обладают хорошей спайностью по  $\langle 0k0 \rangle$  (рис.1.). Край полосы поглощения в ИК области составил 52 мкм (рис.2). Была определена температурная зависимость теплопроводности и теплоемкости InI, которые составили 1,03 Вт/(м·К) при 100 К и 0,58 Вт/(м·К) при 300 К, 44,7 Дж/(моль·К) при 100 К и 52,7 Дж/(моль·К) при 300 К, соответственно (рис. 3.).

Работа выполнена за счет средств Соглашения № 14.604.21.0130 (уникальный идентификатор RFMEFI60414X0130).

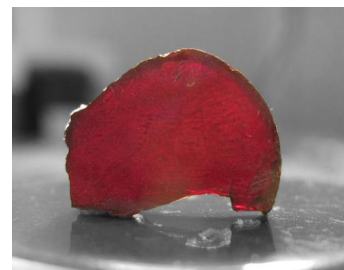


Рис. 1. Фото скола монокристалла InI.

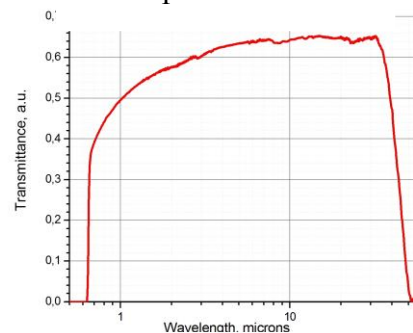


Рис. 2. Спектр пропускания InI (толщина 1.80 мм).

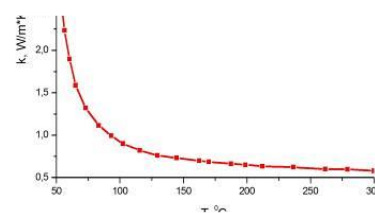


Рис. 3. Зависимость теплопроводности от температуры для InI.

# ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК С НАНОЧАСТИЦАМИ ФТОРИДОВ

С.В. Кузнецов<sup>1</sup>, В.С. Седов<sup>1,2</sup>, В.Г. Ральченко<sup>1,2</sup>, М.Н. Маякова<sup>1</sup>,  
С.С. Савин<sup>3</sup>, К.П. Журавлев<sup>4</sup>, А.К. Мартьянов<sup>1</sup>, И.Д. Романишкин<sup>1</sup>,  
А.А. Хомич<sup>4</sup>, П.П. Федоров<sup>1</sup>, В.И. Конов<sup>1,2</sup>, В.В. Осико<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет, Москва

<sup>3</sup>Московский технологический университет, Москва

<sup>4</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Фрязино

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

Алмаз является традиционно востребованным материалом для пассивных элементов оптики – высокопрозрачных и износостойких окон и линз, способных пропускать высокомошное излучение в диапазоне от ближнего УФ до микроволн. Высокая теплопроводность и прозрачность алмаза для рентгеновского излучения делает его перспективным материалом для создания масок рентгеновской литографии. В последние 15 лет все больший интерес вызывает перспектива использования алмаза в биомедицине и квантовой оптике в качестве активного элемента за счет формирования в алмазе примесных центров окраски. Однако, относительно малое количество возможных центров окраски в алмазе, а также трудности в их формировании оставляют открытым вопрос о поиске новых методов формирования оптически активного алмаза.

Одним из новых подходов является создание композитного материала на основе наночастиц фторидов, вращенных в алмазную матрицу методом плазмохимического осаждения алмаза из газовой фазы. Неоспоримым преимуществом данного подхода является возможность широко модулировать свойства получаемого материала за счет модификации химического состава встраиваемых наночастиц.

В результате были получены пленки алмазов с вращенными наночастицами фторидов. Были зарегистрированы спектры ап-конверсионной люминесценции для LaF<sub>3</sub>:Yb:Er (при накачке на длине волны 974 нм) и фотолюминесценции (при накачке на длине волны 473 нм) для EuF<sub>3</sub>. Для образцов с вращенными частицами EuF<sub>3</sub> было обнаружено изменение спектра люминесценции по сравнению со спектром люминесценции исходного порошка - в спектре люминесценции интенсивной полосой люминесценции становится так называемая красная полоса люминесценции, свидетельствующая о низкой симметрии локального окружения иона европия (рис. 1).

Работа частично поддержана Стипендией Президента РФ 2575.2015.2 и РФФИ 16-29-11784 офи-м.

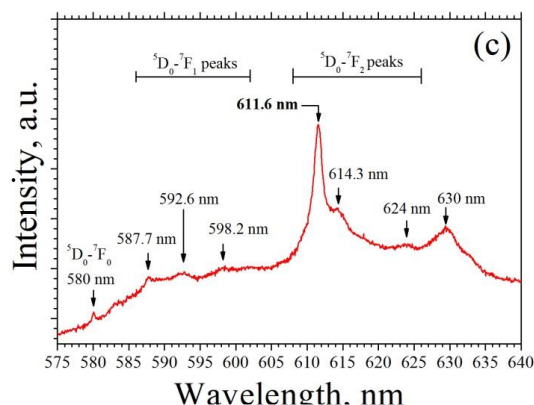


Рис. 1. Спектр люминесценции образца алмазной пленки с вращенными наночастицами EuF<sub>3</sub>.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ РАВНОВЕСИЙ В СИСТЕМЕ $K_2SO_4-H_2SO_4-H_2O$

А.В. Рябинин, М.А. Фаддеев, П.В. Андреев

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

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

Важнейшей функциональной частью водородных топливных элементов является протонообменная мембрана. В качестве перспективных материалов мембран рассматриваются суперпротонные кристаллы – водородосодержащие соли с общей формулой  $Me_mH_n(AO_4)_{(m+n)/2} \cdot xH_2O$  ( $Me = NH_4, K, Rb, Cs$ ;  $A = S, Se, P, As$ ).

Объектом исследования данной работы являются кристаллы гидросульфата калия  $K_mH_n(SO_4)_{(m+n)/2} \cdot xH_2O$ , и основной задачей является поиск условий кристаллизации данных соединений. Таким образом, работа посвящена определению граничных условий кристаллизации из водных растворов кристаллов  $K_mH_n(SO_4)_{(m+n)/2} \cdot xH_2O$  в системе  $K_2SO_4-H_2SO_4-H_2O$ .

Исследование фазовых равновесий в исследуемой системе проводили в изотермических равновесных условиях при температуре 29.0 °С методом загрузок. Постоянство температуры обеспечивали с помощью термостата разработанной нами конструкции. Время установления динамического равновесия определялось для соединения  $K_2SO_4$ . С шагом в 10 мас.% проведен анализ десяти загрузок с различным содержанием исходных компонентов.

Фазовый состав кристаллизующихся соединений определялся методом рентгеновского фазового анализа на порошковом дифрактометре Shimadzu XRD-7000.

Элементный состав кристаллизующихся соединений и насыщенных растворов определялся методом атомно-эмиссионной спектроскопии на спектрометре Varian 720-ES.

В ходе исследования получены области кристаллизации фаз  $K_2SO_4$ ,  $K_3H(SO_4)_2$ ,  $KHSO_4$  трехкомпонентной системы  $K_2SO_4-H_2SO_4-H_2O$ . Исходное соединение  $K_2SO_4$  кристаллизуется при концентрации  $H_2SO_4$  в диапазоне от 0 до 10 мас.%. При загрузке 20 мас.%  $H_2SO_4$  совместно кристаллизуются  $K_2SO_4$  и  $K_3H(SO_4)_2$ .  $K_3H(SO_4)_2$  кристаллизуется в диапазоне соотношений  $K_2SO_4:H_2SO_4$  от 70:30 до 60:40 мас.%. Соединение  $KHSO_4$  кристаллизуется при превышении концентрации  $H_2SO_4$  в 50 мас.%.

# АКТИВИРОВАННЫЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ОКСИФТОРИДНЫЕ БОРАТНЫЕ И БОРОСИЛИКАТНЫЕ СТЕКЛА

Т.С. Севостьянова, Е.В. Жукова, В.А. Сиротина,  
А.В. Хомяков, О.Б. Петрова

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

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

Оксифторидные стекла и стеклокристаллические материалы (СКМ) на их основе являются перспективной матрицей для введения редкоземельных активаторов, так как совмещают люминесцентные свойства фторидных кристаллов, обладающих низкоэнергетическим фонным спектром, с технологичностью и высокой механической и химической стойкостью оксидных стекол. Оксифторидные свинцовые, бариевые и смешанные стекла, как прекурсоры для получения СКМ, синтезировали в различных системах: силикатных [1], боратных [2], германатных [3], телуритных [4].

В данной работе были получены боросиликатные стекла из шихты состава  $80 \text{PbF}_2 - x \text{B}_2\text{O}_3 - (20-x) \text{SiO}_2$  (где  $x = 0, 5, 10, 15$  и  $20$ ) и  $70 \text{PbF}_2 - x \text{B}_2\text{O}_3 - (30-x) \text{SiO}_2$  (где  $x = 0, 10, 20$  и  $30$ ) и активированные составы, в которых Pb частично замещен на Eu, Er или Yb в концентрациях от 1 до 6 мол.%. Исследования состава стекол методом рентгено-спектрального микроанализа (INCA Energy 3-D MAX, Oxford Instruments) показали, что при синтезе улетучивается до 20 % фтора, а алюминий входит в стекло в количестве 4-5 масс.%.

Для полученных стекол определены характеристические температуры и коэффициент линейного термического расширения (дилатометрическим методом), плотность, микротвердость (методом Виккерса, ПМТ-3), показатели преломления (методом Лодочникова для длин волн 488, 540 и 619 нм), диэлектрическая проницаемость и проводимость (измеритель E7-12, 1 МГц, серебряные контакты), спектры поглощения (Varian 5000 Cary), спектры люминесценции (QE65000 (Ocean Optics) и Fluorolog FL3-22 (Horiba Jobin Yvon)). Проведены кристаллизации стекол в различных температурно-временных режимах, получены СКМ, в которых выделяется одна кубическая кристаллическая фаза  $\beta\text{-PbF}_2$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ грант № 14-13-01074.

1. О.Б. Петрова, А.В. Хомяков, *Опт. и спектр.* **114**, 962 (2013).
2. О.Б. Петрова, Т.С. Севостьянова, М.О. Анурова, А.В. Хомяков, *Опт. и спектр.* **120**, 272 (2016)
3. V. Klimesz, G. Dominiak-Dzik, M. Zelechower, W. Ryba-Romanowski, *Opt. Mat.* **30**, 1587 (2008)
4. V. Burtan, Z. Mazurak, J. Cisowski, M. Czaja, R. Lisiecki, W. Ryba-Romanowski, M. Reben, J. Wasylak, *Opt. Mat.* **34**, 2050 (2012)

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НА СТРУКТУРУ И МОРФОЛОГИЮ СЛОЕВ Ge, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ «ГОРЯЧЕЙ ПРОВОЛОКИ» НА Si(100)

А.В. Зайцев, С.А. Денисов, В.Н. Трушин, А.В. Нежданов, С.А. Матвеев, В.Ю. Чалков, В.Г. Шенгуров

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

*E-mail: [andrew1994a@mail.ru](mailto:andrew1994a@mail.ru)*

Для изготовления микро- и оптоэлектронных приборов на основе эпитаксиальных слоев Ge перспективными являются методы газофазного осаждения. Недавно нами сообщалось о получении качественных слоев путем разложения гидрида ( $\text{GeH}_4$ ) на «горячей проволоке» [1].

Цель настоящей работы – исследование структурного совершенства и морфологии слоев Ge, выращенных в различных температурных условиях на подложках Si(100).

Слои Ge толщиной 0,5–4 мкм осаждали на Si (100) в высоковакуумной установке при напуске моногермана до давления  $4 \cdot 10^{-4}$  торр. Разложение  $\text{GeH}_4$  происходило на нагретой до 1300-1500 °С танталовой полоске, расположенной напротив подложки. Исследовали два температурных режима роста: при постоянной температуре подложки ( $T_S = 350^\circ\text{C}$ ) и при двух температурах (350 °С и 500 °С). А также исследовалось влияние послеростового отжига (при 800 °С/30 мин.), выращенных при постоянной температуре 350°С слоев Ge.

Результаты проведенных исследований показали, что структурное совершенство слоев, выращенных при двухтемпературном режиме выше, чем при однотемпературном. По данным рентгеновской дифракции ширина кривой качания на половине ее максимума интенсивности ( $\Delta\omega_{1/2}$ ; англ.: FWHM) от слоя Ge(004) составляла 3,1 угл. мин. в первом случае и 5,7 угл. мин. во втором. Однако при двухтемпературном режиме роста наблюдалось некоторое огрубление поверхности слоев Ge.

Отжиг слоев улучшает структурное совершенство слоев: после отжига  $\Delta\omega_{1/2} = 2,6$  угл. мин. Поверхность слоя при этом сохраняется гладкой, как после выращивания: значения среднеквадратичной шероховатости поверхности (RMS) не превышают 1 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президента Российской Федерации (МК-7021.2015.2) и РФФИ (№ 15-02-99664).

1. В.Г.Шенгуров, С.А.Денисов, В.Ю.Чалков и др., Письма в ЖТФ **41**(1), 71 (2015).



## ИТТРИЙ-АЛЮМОБОРАТНЫЕ СТЕКЛА ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М.З. Зиятдинова<sup>1</sup>, А.С. Шкуратко<sup>1</sup>, Н.В. Голубев<sup>1</sup>, С.С. Гижжа<sup>2</sup>,  
А.В. Масалов<sup>2</sup>, А.Г. Турьянский<sup>2</sup>, И.В. Пиршин<sup>2</sup>, В.Н. Сигаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,  
Москва*

<sup>2</sup>*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва  
E-mail: [m.z.ziyatdinova@gmail.com](mailto:m.z.ziyatdinova@gmail.com)*

Одним из основных методов регистрации ионизирующего излучения является сцинтилляционный [1]. Преимуществами стекол в качестве сцинтилляторов являются относительная дешевизна изготовления, возможность получения изделий разных форм и размеров. Существенный недостаток стекол – относительно низкая эффективность преобразования рентгеновского излучения. Он, однако, может быть уменьшен за счет увеличения поглощения рентгеновского излучения благодаря введению в состав стекла тяжелых элементов и увеличению оптического пути этого излучения, т. е. использования волокон [1]. Использование волоконных сцинтилляторов позволяет увеличить энергетическое разрешение и снизить потери при спектрометрических измерениях [2].

Недавно нами показано, что иттрий-алюмоборатные стекла системы  $\text{Ln}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3\text{--Sb}_2\text{O}_3$  ( $\text{Ln} = \text{Y, Tb, Ce, Gd}$ ) люминесцируют под воздействием рентгеновского излучения, причем интенсивность свечения возрастала, как и ожидалось, при введении оксидов тяжелых металлов [3]. В настоящей работе изучена рентгенолюминесценция иттрий-алюмоборатных стекол в зависимости от содержания  $\text{Tb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  и замены части легких элементов на  $\text{PbO}$ . Введение в состав стекол  $\text{BaO}$  позволило значительно снизить склонность стекла к кристаллизации: различие между значением  $T_g$  и температурой максимума экзотермического пика увеличилось согласно ДСК с  $\sim 160$  до  $245^\circ\text{C}$ .

Максимальный энергетический выход, оцененный по отношению к монокристаллу  $\text{CdWO}_4$ , составил 25 %. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности изученных стекол для визуализации и детектирования рентгеновского излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (грант 14.Z50.31.0009).

1. M. J. Weber, J. of Lum. **100**, 35 (2002).
2. Н.В. Классен, В.Н. Курлов, С.Н. Россоленко и др., Известия РАН. Серия физическая **73**, 1451 (2009).
3. М.З. Зиятдинова, Н.В. Голубев, Г.Е. Малашкевич и др., Успехи в химии и химической технологии. **29** (7), 23 (2015).

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ РЭМ И АСМ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ АЛЮМИНИЕВЫХ ФОЛЫГ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО АНОДИРОВАНИЯ

Д.С. Горбунов, В.П. Мишкин, Е.Н. Лютова, А.В. Долганов, К.Н. Нищев  
*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

Эффективным и технологически простым методом синтеза самоорганизованных наноструктурированных материалов с периодическим расположением нанопор на макроскопических поверхностях является процесс анодирования. Технология анодирования в последнее время стала активно совершенствоваться в связи с возможностью применения процесса анодирования для получения пористых пленок с заданной морфологией и, как следствие, с определенными свойствами. За счет изменения условий анодирования возможно получение анодных оксидов алюминия с широким спектром структурно морфологических и электрофизических характеристик [1, 2, 3].

В данной работе для исследования микро- и наноструктуры Al-фольг применялись методы РЭМ и АСМ.

Для формирования определенной поверхностной структуры, Al-фольги были подвергнуты электролитическому анодированию, при различных значениях напряжения и временных характеристик.

Анализ РЭМ и АСМ изображений показал, что на поверхности исследуемых фольг, подвергнутых анодированию, возникает развитая периодическая наноструктура. Были получены структуры двух типов с условным названием «трубчатые» - структурная единица представляет собой трубку с размерами порядка  $130 \times 36$  нм (рис. 1а) и «полусферические» - структурная единица имеет вид полусферы с диаметром порядка 70 нм (рис. 1б).

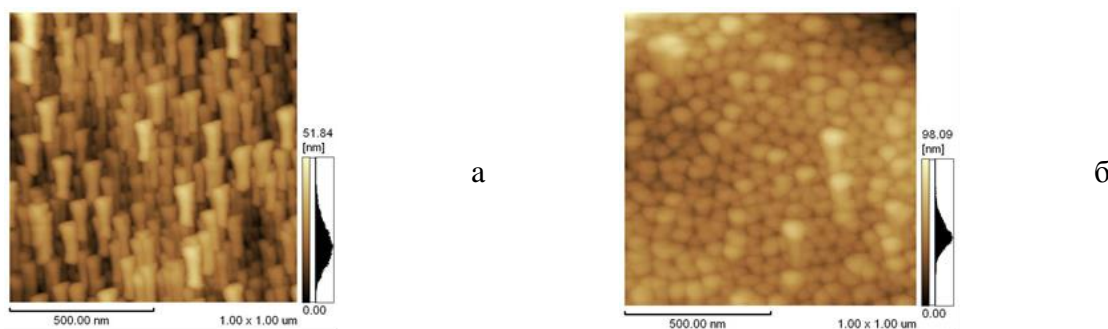


Рис. 1. АСМ – изображение поверхности Al – фольг после электролитического анодирования; (а) – «трубчатая» структура, (б) – «полусферическая структура»

1. A. Mozalev et al., *Electrochimica Acta*. **48**, 3155 (2003).
2. G. D. Sulka, *Nanostructured Materials in Electrochemistry*, Weinhei, WILEY VCH. (2008).
3. М.М. Филяк, О.Н. Каныгина, *Вестник ОГУ* **1**, 150 (2013).

# **NEW FUNCTIONAL MATERIALS**

# NANOSTRUCTURED MATERIALS IN LOW-TEMPERATURE ELECTROCHEMICAL SYSTEMS

S.A. Grigoriev

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow  
E-mail: [sergey.grigoriev@outlook.com](mailto:sergey.grigoriev@outlook.com)

Low-temperature electrochemical systems (fuel cell, water electrolyser, etc) based on proton-exchange membrane (PEM) [1] allow to convert energy environmentally-friendly with high efficiency, and are finding expanding applications in various industries, transport, energy systems and special purposes. Nanostructured catalytic, electrode and membrane materials (fig. 1) applied in PEM electrochemical systems, and technologies of their production are considered in this report.

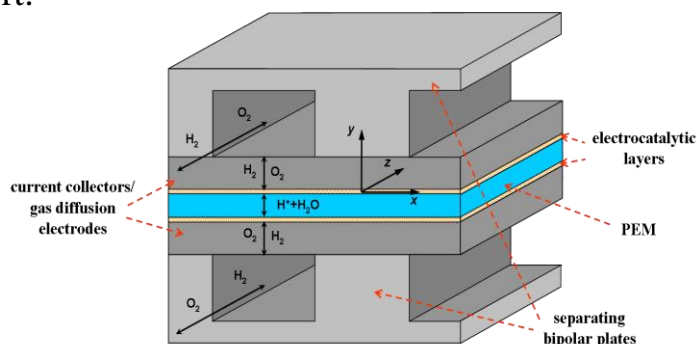


Fig. 1. Schematic diagram of the electrochemical cell based on PEM.

One of the main components of the PEM electrochemical system, responsible for its efficiency and service life, is the electrocatalytic layer based on nano-particles of platinum metals. High-effective chemical (simultaneous sorption/reduction) and physical (magnetron sputtering) methods are applied for the synthesis of catalysts. These methods allow to obtain nano-particles of platinum metals with mono-modal size distribution in a range of 2,5-3,5 nm. The electrochemical reaction occurs in the so-called triple contact points (fig. 2) there catalytically-active particles are in a contact with electron and proton conductors, and a system of gas and liquid pores. Through the use of nanostructured electrocatalysts, the loading of platinum group metals has been reduced by the order; catalytically-active molecular complexes not containing platinum metals are actively developed [2]. Due to a number of unique properties such as high conductivity, large specific surface area, mechanical strength, stability and durability in corrosive environments, graphene-like materials are rather promising as a carrier of electrocatalysts (fig. 3) [3].

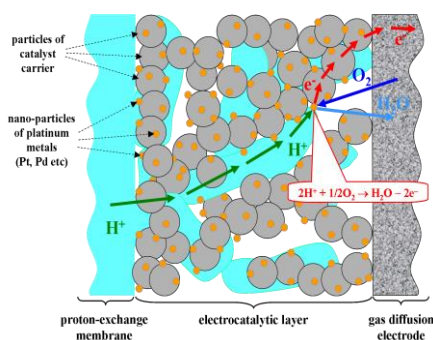


Fig. 2. Scheme of the mass and charge transfer processes in the cathodic electrocatalytic layer of PEM fuel cell

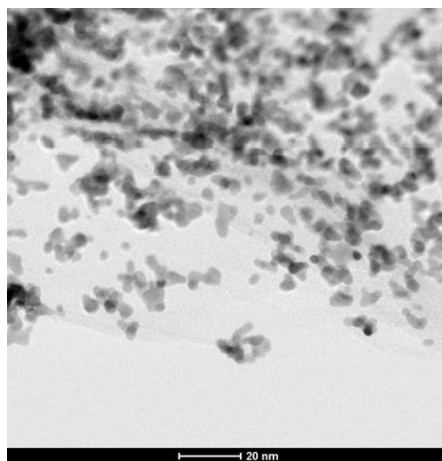


Fig. 3. Platinum nano-particles on the surface of reduced graphene oxide

Current collectors/gas diffusion electrodes are responsible for the transport of the reactants and products of the electrochemical reactions, they also provide the contact with the electrocatalytic layer. Due to developed electrode with gradient of porosity, mass transfer parameters are considerably improved, and Ohmic losses at the boundary with the electrocatalytic layer are reduced [4].

The use of modified and composite membranes with nanostructure allows to reduce permeability and improves the efficiency of the electrochemical system and its service life.

Mathematical modeling is an important instrument in the optimization of electrochemical systems. Taking into account the obtained results, the optimized design of the electrodes and the structure of the electrocatalytic layers, optimum operating parameters of the electrochemical system were proposed.

Thus, the use of nano-materials and nanotechnologies in low temperature electrochemical systems can significantly improve their performance. So, the overall efficiency of power generation in PEM fuel cell can reach 50-60 %; the efficiency of the electrolysis system is 85-90 %. Achieved to date the level of specific power of PEM fuel cell stack is more than 1,0 kW/kg (at a current density of 1 A/cm<sup>2</sup> of membrane-electrode assembly). Further development of innovative nano-technologies of hydrogen electrochemical systems pertain to the sixth wave of innovation will allow you to shift the vector of industry development towards high-end technologies and create new workplaces for highly-qualified specialists. Large-scale implementation of hydrogen energy will contribute to solving a number of environmental, energy and social problems.

1. P. Millet, R. Ngameni, S.A. Grigoriev, V.N. Fateev, *Int J Hydrogen Energy* **36**, 4156 (2011).
2. A.V. Dolganov, O.V. Tarasova, D.N. Moiseeva, E.E. Muryumin, *Int J Hydrogen Energy* **41**, 9312 (2016).
3. A.K. Geim, *Science* **324**, 1530 (2009).
4. S.A. Grigoriev, P. Millet, S.A. Volobuev, V.N. Fateev, *Int J Hydrogen Energy* **34**, 4968 (2009).

## CHEMICAL THERMODYNAMICS OF COMPLEX OXIDES

A.V. Knyazev<sup>1</sup>, N.N. Smirnova<sup>1</sup>, E.N. Bulanov<sup>1</sup>, S.S. Knyazeva<sup>1</sup>,  
O.V. Krasheninnikova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lobachevsky University, Nizhny Novgorod, Russia*

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

An important task in our work was studying the thermodynamic functions of the compounds in order to describe the processes with their participation and detecting criteria of their stability. For this purpose, we chose the thermochemical schemes. We used the concentrated nitric, hydrochloric, hydrofluoric and sulphuric acids as solvents. We chose them because of the good solubility of compounds under investigations in their solutions. The enthalpies of formation of about 250 inorganic compounds containing uranium were experimentally determined for the first time using a reaction adiabatic calorimeter. Despite the seeming simplicity of obtaining similar results, in order to conduct the experiment in the first place it is necessary: to find a solvent for the compound, which is often a serious problem in the case of certain soluble compounds. Secondly, to determine the enthalpy of formation of a necessity to determine the enthalpy of from three to six reactions, and each reaction is carried out 3-5 times using Student distribution to calculate the error of the enthalpy of dissolution.

Using an adiabatic vacuum calorimeter, we have identified the temperature dependences of heat capacities at constant pressure for more than 50 compounds in a temperature interval from 7 to 350 K. The obtained data allowed describing possible phase transitions and calculating absolute entropies of formation of the compounds. It is important to note that heat capacities at constant pressure of the majority complex oxides monotonously grow with rising temperature without any visible anomalies. On the contrary, the physical transitions are observed in uranylcarbonates, uranylsulfates, several tungstates and spinels. The description of transitions was made by means of McCallaf–Vestrum classification of physical transitions. According to this classification phenomenological all phase transitions in solids can be categorized into seven types (I, 2I, 3I, 2N, 3N, G, H). Three transitions are isothermal, two transitions are non-isothermal, and G and H transitions, whose name comes from the English word hump and glass-like.

The most common type of transitions in the layered compounds is isothermal (I) transitions connected with polymorphic transitions in the crystal. The polymorphism is caused by possible shifts or rotations of layers relatively to each other in the crystalline structure. Isothermal transitions look like “peaks” on the curve of heat capacity; the area of “peaks” is numerically equal to the enthalpy of phase transition. The less common physical transitions are H-transitions and they are observed as “humps” on the curve of heat capacity. From the physical point of view, the given anomaly may be connected with “defreezing” of rotations around metal – water (M–OH<sub>2</sub>) bond in structures of the appropriate crystallohydrates.

The compounds Tetrasodium Uranyl Tricarbonate ( $\text{Na}_4\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$ ) and (Potassium Titanium Iron Oxide)  $\text{K}_2\text{Fe}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$  show the G-type (glass-like) physical transitions. The nature of this anomaly is probably related to the presence of cation–cation interactions in the structure of this compound, which we confirmed using Voronoi–Dirihle calculations of polyhedra using program complex TOPOS.

Thus, the calorimetric methods allowed estimating all necessary thermodynamic functions of 50 inorganic compounds. Thermochemical data were obtained for 200 compounds.

Data on the heat capacity, especially at low temperatures, allow drawing conclusions about the nature of the topology structure of solids. To do this, we calculated the fractal dimension and the characteristic temperatures. From the experimental heat capacity values in the range 20–50K the value of the fractal dimension  $D$  of the compounds were evaluated. According to the fractal theory of the heat capacity,  $D$  is the most important parameter that specifies the character of heterodynamics of the substance structure. For solids of a chain structure the relation heat capacity versus  $T$  at lower temperatures is proportional to (temperature in the first degree)  $T^1$ , of a layer structure to (temperature in the second degree)  $T^2$  and of steric one to (temperature in the third degree)  $T^3$ . In the fractal theory of the heat capacity, an exponent of  $T$  is the heat capacity function is denoted by  $D$  and is called the fractal dimension.

The obtained values of the fractal dimension are consistent with our structural data, so it is 3 for frame pyrochlore and 2.4 and 2.5 for brannerite quasi layered structure. In addition, in our work we actively use the theory of the Debye heat capacity of solids.

For the study of phase transitions, thermal stability, and melting temperatures of the substances we are also actively using the differential scanning calorimetry. However, in order to answer questions about the structural changes necessary to use high-temperature and low-temperature X-ray diffraction. The anomalous change in the temperature dependence of the unit cell parameter is observed in the field of phase transitions. In the phase transition there occurs extreme change diagram of thermal expansion. These diagrams constructing at different temperatures demonstrate priority directions of thermal expansion and its anisotropy. Value of thermal expansion coefficient in given direction corresponds to length of radius-vector which is traced from origin of coordinates to edge of figure of expansion.

Differential scanning calorimetry data, reaction calorimetry data and thermodynamic modeling allow making phase diagrams. We have investigating the phase diagram of the indicated system  $\text{LiVWO}_6 - \text{NaVWO}_6$ . Modeling for this system includes the following steps: 1. Calculating solidus and liquidus temperatures based on crystal– liquid equilibrium. 2. Calculating the critical temperature on a solid-solution segregation curve ( $T_M$ ) using Becker's equation.

In calculating solidus and liquidus temperatures, we used Clausius–Clapeyron equation, which in the case of regular solutions can be represented by the following system of equations. Thus, we solved an inverse problem, that

consists in the thermodynamic modeling realized on the base of experimental data about phase borders. Having solved the system of equations, we determined thermodynamic parameter for the crystal and enthalpy of melting of the components. The values obtained in this way were used to construct the plots of the Gibbs energies versus composition for a liquid and a crystal and the phase diagram.

It is possible to expect the formation of both individual phases and solid solutions with inclusion of the corresponding metals on forming these mineral-like compounds in nature or during technological processes.

On this slide you can see the physicochemical study of the solid solutions of compositions that we carried out. The miscibility borders of all studied systems were determined using X-ray diffraction, and then the standard enthalpies of mixing were measured using reaction calorimetry. Then using theoretical models, the change of thermodynamic functions was described as analytical equations that simplified the presentation of the quantitative information on the systems and allowed to estimate partial molar values and coefficients of the component activity.

The study of uranylsulfates required the creation of theoretical model of subregular solutions for ternary systems which is absent in literature. In terms of this model, the maximal value of enthalpy of mixing can be obtained at any concentration of three components and, therefore, the enthalpy of mixing as a function of composition should be represented as four summands. Three summands will be responsible for the behavior of function near to binary mixtures, and the fourth - in the central part of the diagram.

One of the steps of studying compounds is the exploring their behavior in water solutions. The experimental data on the solubility of the compounds at 25°C (degrees Celsius) were obtained at the first stage. We identified the tendencies of the changing of hydrolytic stability depending on pH value. Using the obtained data we have identified the thermodynamic characteristics of compounds that are stable, when come in contact with water. Here you can see the quantitative physicochemical model describing heterogeneous system “precipitate – aqueous solution“, represented by the following block diagram. This model is based on material balance equations for corresponding elements subject to possible forms of their existence in solution.

Obtained data were used for constructing phase diagrams of structure-forming elements in the water solution under condition of their simultaneous presence.



# PHONONS AND COUPLED MODES IN OPTICAL SPECTROSCOPY

S.A. Klimin

*Institute of Spectroscopy RAS, 108840 Moscow, Troitsk, Russia*

*E-mail: [klimin@isan.troitskl.ru](mailto:klimin@isan.troitskl.ru)*

Physical models and spectroscopic techniques used to study excitations connected with crystal lattice vibrations will be overviewed. A special attention will be given to the interaction of phonons with excitations of other subsystems (electronic, magnetic). Examples of coupled electron-phonon and electron-magnon modes will be given from author's experimental investigations.

Optical spectroscopic study of the two rare-earth iron borates, namely, of  $\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$  и  $\text{TbFe}_3(\text{BO}_3)_4$ , will be discussed in detail. This study has presented the first experimental results on phonons in the low-temperature  $P3_121$  structural phase of these iron borates [1, 2]. Two compounds mentioned are characterized by the absence of electronic states in the region of phonons for the first one (gadolinium) and by a reach spectrum of such states for the second one (terbium). Comparative study of these two compounds revealed formation of coupled electron-phonon modes in  $\text{TbFe}_3(\text{BO}_3)_4$  in the vicinity of E-phonon near  $197\text{ cm}^{-1}$  [1] (Fig.1).

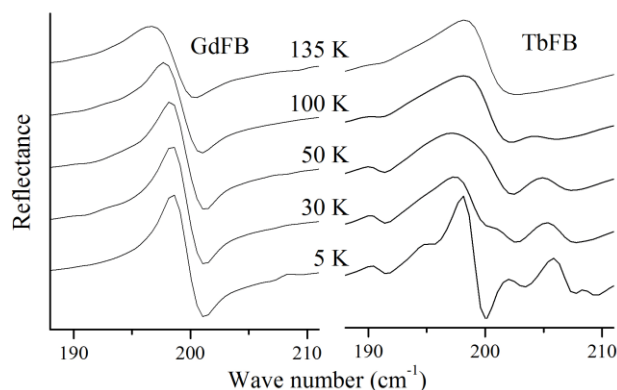


Fig. 1. Reflectivity spectra of  $\text{TbFe}_3(\text{BO}_3)_4$  (TbFb) and  $\text{GdFe}_3(\text{BO}_3)_4$  (GdFB) in the spectral region near the  $197\text{ cm}^{-1}$  E-phonon. Interaction of phonon with crystal-field excitations of the  $\text{Tb}^{3+}$  ion leads to formation of coupled electron-phonon modes [1]

Other crystals [3, 4] demonstrating clear spectral signatures of the interaction of phonons with other subsystems will be discussed.

Support of the Russian Science Foundation under Grant № 14-12-01033 is acknowledged.

1. S.A. Klimin, A.B. Kuzmenko, M.A. Kashchenko, M.N. Popova, Phys. Rev. B. **93**, 054304 (2016).
2. D. Fausti, A. Nugroho, P. van Loosdrecht, S.A. Klimin, M.N. Popova, L.N. Bezmaternykh, Phys. Rev. B. **74**, 024403 (2006).
3. S.A. Klimin, D. S. Pytalev, M. N. Popova, B. Z. Malkin, M.V. Vanyunin, S.L. Korableva, Phys. Rev. B. **81**, 045113 (2010).
4. S.A. Klimin, A.B. Kuzmenko, M.N. Popova, B.Z. Malkin, I.V. Telegina, Phys. Rev. B. **82**, 174425 (2010).

# POLYCRYSTALLINE MATERIALS FOR PHOTONICS ON THE BASIS OF GROUP II AND GROUP III METAL FLUORIDES

S.V. Kuznetsov<sup>1</sup>, P.P. Fedorov<sup>1</sup>, E.A. Garibin<sup>1,2</sup>, V.V. Osiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>INKROM, St. Petesburg, Russia

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

Polycrystalline materials, based on alkaline earth fluorides doped rare earth elements, have been of significant interest for photonics scientists for decades. Use of the single crystals of similar composition is quite complicated, for they are prone to cleavage that leads to mechanical failure of optical materials in the course of their usage. Also, preparation of high quality and large aperture single crystals is quite complicated. One can improve mechanical properties and corresponding laser endurance of said fluoride optical materials by shifting to polycrystalline specimens, but the latter requires a development of their synthetic technology.

Our report covers results of the preparation of fluoride ceramics materials by deep plastic deformation of their single crystals as well as by hot-pressing their powders, namely:

- we have developed a novel synthetic technique for preparing fluoride precursor powders by obtaining an intermediate compound capable to release a fluorinating agent under thermolysis conditions;

- we have determined the requirements for precursor powders that can be used in compacting technology processes;

- we have determined the requirements for the single crystals that can be used in deep plastic deforming processes;

- we have prepared fluoride ceramic specimens with the same thermal conductivity and similar spectrum generation properties as their single crystal analogs (fig. 1);

- we have determined the ways and means for the improvement of mechanical properties of fluoride ceramics materials (micro-hardness and fracture toughness) in comparison with their single crystal analogs;

- we have developed a novel scientific area of study, physics, chemistry and technology of nanofluorides.

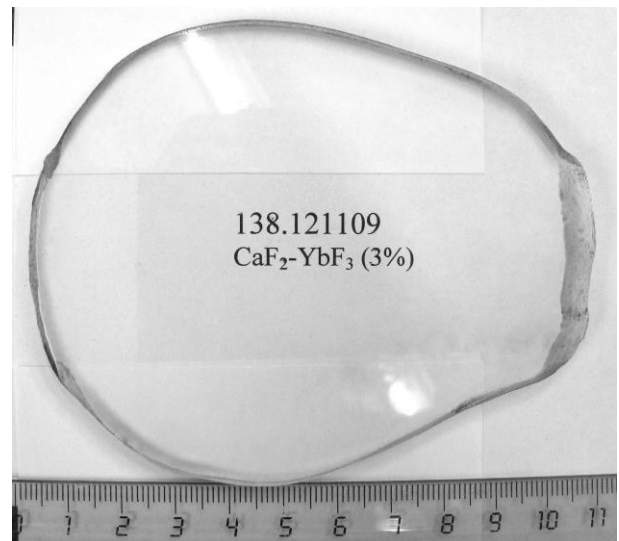


Fig. 1. CaF<sub>2</sub>:Yb (3 mol.% Y) ceramics prepared by deep plastic deformation of its single crystal

# HYBRID MATERIALS BASED ON LUMINESCENT BASED ON 8-HYDROXYQUINOLINE METAL COMPLEX AND FLUOROBORATE GLASS MATRIX

M.O. Anurova, E.V. Ermolaeva, A.V. Khomyakov, O.B. Petrova  
*D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*  
*E-mail: [maria\\_anurova93@mail.ru](mailto:maria_anurova93@mail.ru)*

Hybrid materials (HM) – materials special type of architecture which consists of organic and inorganic components of the interaction which leads to partially inherit and completely new properties compared to the substances from which they are synthesized [1]. HM on the basis of on 8-hydroxyquinoline [2] and phenanthroline [3] luminescent organic metal complexes can be promising for creation of new light-emitting devices.

HM were made as described in Ref [3]. As the organic phosphors used 8-hydroxyquinoline ( $\text{Meq}_x$ ) metal complexes ( $\text{Liq}$ ,  $\text{Kq}$ ,  $\text{Naq}$ ,  $\text{Rbq}$ ,  $\text{Mgq}_2$ ,  $\text{Srq}_2$ ,  $\text{Baq}_2$ ,  $\text{Znq}_2$ ,  $\text{Scq}_3$ ,  $\text{Alq}_3$ ,  $\text{Gaq}_3$  and  $\text{Inq}_3$ ). The samples were transparent glassy plates, the transmission spectrum of which is almost entirely consistent with the spectrum transmission of the matrix glass  $80\text{PbF}_2\text{-}20\text{B}_2\text{O}_3$  (fig. 1a). The HM of the composition  $\text{Srq}_2\text{+}80\text{PbF}_2\text{-}20\text{B}_2\text{O}_3$  demonstrated the highest photoluminescence (PL) intensity with  $\lambda_{\text{max}} = 516 \text{ nm}$  (FWMH 123 nm) (fig.1b).

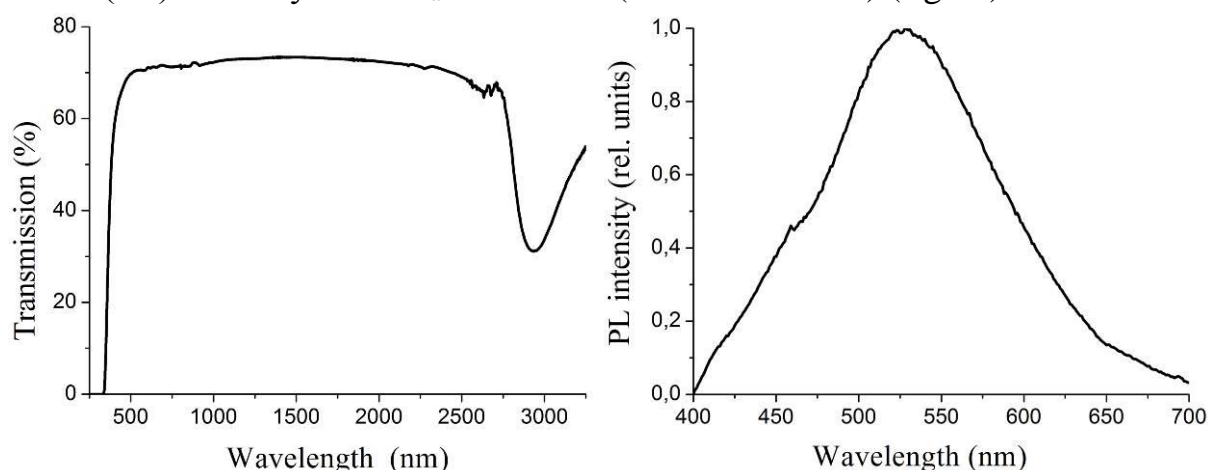


Fig. 1. The hybrid material  $\text{Srq}_2 + 80\text{PbF}_2\text{-}20\text{B}_2\text{O}_3$ :  
a) transmission spectrum, b) normalized PL spectrum

This research was financially supported by the Russian Scientific Foundation (grant number № 14-13-01074).

1. B. Lebeau, P. Innocenzi, *Chem. Soc. Rev.* **40**, 886 (2011).
2. R. Avetisov, O. Petrova, A. Khomyakov et al., *J. Cryst. Growth* **401**, 449 (2014).
3. O. Petrova, I. Taydakov, M. Anurova et al., *J. Non-Cryst. Sol.* **429**, 213 (2015).

# FRUSTRATED MAGNETIC $\text{Ni}_3(\text{BO}_3)_2$ : INVESTIGATION OF SPIN EXCITATIONS IN STRONG MAGNETIC FIELDS

K.N. Boldyrev<sup>1</sup>, A.D. Molchanova<sup>1</sup>, R.V. Pisarev<sup>2</sup>, D. Kamenskiy<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of spectroscopy RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Ioffe Institute, RAS, St Petersburg, Russia*

<sup>3</sup>*High Field Magnetic Laboratory, Radboud University, Nijmegen, Netherlands*

*E-mai: [nastyamolchanova@list.ru](mailto:nastyamolchanova@list.ru)*

Nickel oxyborate  $\text{Ni}_3(\text{BO}_3)_2$  crystallizes in the orthorhombic system (sp. gr. *Pnmm* (# 58)), and possesses the structure of kotoite mineral. The  $\text{Ni}^{2+}$  ions occupy two different octahedral positions,  $2a$  and  $4f$ , forming two magnetic subsystems. Both nickel subsystems order antiferromagnetically at the temperature  $T_N = 46$  K [1]. In the recent study [2], it has been shown that, at  $T_N$ , also a structural phase transition takes place, associated with a doubling of the crystal cell and a corresponding "folding" of the Brillouin zone.

This work presents a study of the terahertz transmission spectra of a  $\text{Ni}_3(\text{BO}_3)_2$  single crystal in constant magnetic fields up to 32 T. Several features interpreted as single-magnon excitations have been observed below  $T_N$  in a zero magnetic field. The field dependence of the frequencies of the magnetic excitations has a distinct nonlinear character (fig. 1). This may indicate to an interaction of the magnetic modes with each other (spin-spin interaction). In addition, the behavior of magnetic modes indicating "spin-flop" phase transition has been observed in strong magnetic fields ( $> 10$  T).

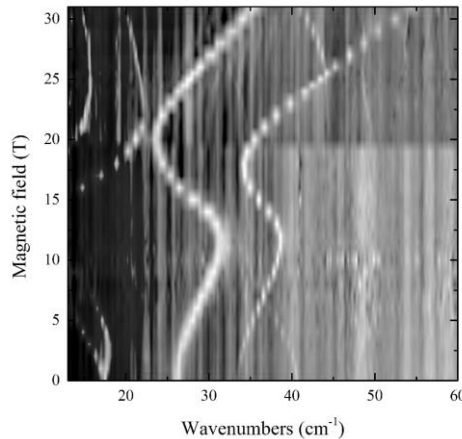


Fig.1. The field dependence of the THz transmission spectrum of the  $\text{Ni}_3(\text{BO}_3)_2$  single crystal at temperature  $T = 1,5$  K

This work has been supported by the RSF Grant №16-12-10456 (R.V.P.), the RFBR Grant № 15-32-20613 (K.N.B., A.D.M.), and the Grant of the President of the Russian Federation (Grant MK-3521-2015.2 for young scientists).

1. L.N. Bezmaternykh et al., Phys. Stat. Sol. B. **249**, 1628 (2012).
2. R.V. Pisarev et al., Phys. Rev. B. **93**, 134306 (2016).

## COMPARISON OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE ZIRCONIA CRYSTALS STABILIZED BY YTTRIUM AND SCANDIUM OXIDES

M.A. Borik<sup>1</sup>, V.T. Bublik<sup>3</sup>, S.I. Bredikhin<sup>2</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>, V.V. Osiko<sup>1</sup>,  
N.Y. Tabachkova<sup>3</sup>

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

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

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

*E-mail: [kulebyakin@lst.gpi.ru](mailto:kulebyakin@lst.gpi.ru)*

Crystalline materials based on zirconia are known not only for its excellent strength characteristics, but also high ion conductivity. High strength properties are due to a specific domain structure of the material, which is formed during cooling of the crystal, as well as the probability of tetragonal-monoclinic transition by applying mechanical stress. High ionic conductivity is possible due to the presence in the structure of the material of the oxygen vacancies which are formed by high temperature modifications stabilize ZrO<sub>2</sub> rare earth ions with a valence other than Zr.

Depending on the type and concentration of the stabilizing oxide structure and properties of the materials may differ substantially. This paper presents the results of a study of ZrO<sub>2</sub> crystals stabilized by the Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and a comparative analysis of the data.

It is shown that the crystals of tetragonal zirconia stabilized with yttria has two phases: transformable and nontransformable which differ Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content and lattice parameters. In crystals of scandium oxide with a similar concentration, there is only one nontransformable phase. Accordingly, the crack resistance of the tetragonal ZrO<sub>2</sub> - Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> crystals higher than ZrO<sub>2</sub> - Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> crystals.

Research cubic crystals showed that the stabilizing yttria cubic phase in the crystal is maintained at a concentration of 8 mol.% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and higher, and the stabilization of scandium oxide crystals in the cubic phase appears only at 10 mol.% Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. In general, in the range of scandium oxide concentrations of 9-11 mol.% the cubic phase falls into the tetragonal and rhombohedral. This is due to the lower scandium cation ionic radius compared with yttrium cation.

This work was supported by RFBR grant № 16-38-00521 mol\_a and № 15-38-70053 mol\_a\_mos.

THREE SCENARIOS OF MAGNETIC ORDERING  $\text{Cu}_3R(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Cl}$   
( $R = \text{Er}, \text{Sm}, \text{Yb}$ ): OPTICAL SPECTROSCOPY

L.S. Mazaev<sup>1,2</sup>, S.A. Klimin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Spectroscopy RAS, Troitsk, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

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

Rare-earth (RE) francisites  $\text{Cu}_3R(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Cl}$  ( $R = \text{RE}$ ) are synthetic isostructural counterparts of the natural mineral  $\text{Cu}_3\text{Bi}(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Cl}$  [1, 2]. On the one part, these compounds are interesting as model systems for studying frustrated and low-dimensional magnetism [3, 4]. On the other part, they are attractive from practical point of view, as they can be switched magnetically in low magnetic fields. At present, magnetic properties of bismuth and yttrium francisites are well studied [3, 4]. These compounds incorporate the only magnetic subsystem which is the two-sublattice copper one. One can anticipate observing new interesting phenomena at an introduction of the second (RE) magnetic subsystem. In this work, optical spectroscopy is used to study magnetic behavior of francisites with the three different RE elements, namely, with Er, Sm, or Yb. All the three enter the compounds as trivalent Kramers ions, which fit well for studying magnetic phase transitions by optical spectroscopy. Splitting of spectral lines corresponding to transitions between Kramers doublets testifies a magnetic ordering but an abrupt change of this splitting manifests a spin-reorientational phase transition.

Temperature-dependent transmission spectra were studied in the region of f-f transitions of the RE ions mentioned above. In all the three compounds, copper magnetic subsystem was found to order magnetically at temperatures  $T_N$  around 36 K, like in  $\text{Cu}_3\text{Y}(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Cl}$ . Competition of magnetic anisotropies of the RE and copper ions leads to spin-reorientational phase transitions in Sm and Yb francisites. Interestingly, these transitions are of different types in Sm and Yb compounds. Whereas a first-order reorientation takes place in  $\text{Cu}_3\text{Yb}(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Cl}$ , a second-order one occurs in  $\text{Cu}_3\text{Sm}(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Cl}$  [4]. Possible reasons for different scenarios of magnetic behavior in the three compounds are discussed.

1. A. Pring, B.M. Gatehouse, W.D. Birch, *Amer. Mineral.* **75**, 1421 (1990).
2. P.S. Berdonosov, V.A. Dolgikh, *Russ. J. Inorg. Chem.* **53**, 1353 (2008).
3. M. Pregelj, O. Zaharko, A. Günther, A. Loidl, V. Tsurkan, S. Guerrero, *Phys. Rev. B.* **86**, 144409 (2012).
4. K.V. Zakharov, E.A. Zvereva, P.S. Berdonosov et al., *Phys. Rev. B.* **90**, 214417 (2014).

THE FEATURES OF FORMATION OF  $\text{Eu}^{3+}$  OPTICAL CENTERS  
IN THE SOLID SOLUTIONS  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Eu}_2\text{O}_3$

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>, A.N. Chabushkin<sup>1</sup>, N.Yu. Tabachkova<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup> *National Research Technological University "Misis", Moscow, Russia*

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

Unique physical and chemical properties of materials based on zirconia dioxide  $\text{ZrO}_2$ , stabilized and partially stabilized with  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , provide them a variety of practical applications. The properties of these materials are largely dependent on their structural characteristics due to the presence of oxygen vacancies formed in the process of stabilizing  $\text{ZrO}_2$  yttria .

Formation of cations local structure in the presence of oxygen vacancies in crystals stabilized and partially stabilized zirconia can be revealed by optical spectroscopy using  $\text{Eu}^{3+}$  ion as a spectroscopic probe.

Despite the large number of publications devoted to the study of the structure of the optical centers of  $\text{Eu}^{3+}$  ions in solid solutions based on zirconia dioxide [1-4], there are no studies that such studies will be conducted for the stabilization of  $\text{ZrO}_2$  single crystals of yttrium oxide in a broad change concentration range  $\text{Y}_2\text{O}_3$ .

In this work we are revealed the features of the local environment of  $\text{Eu}^{3+}$  ions using optical spectroscopy for the tetragonal and cubic solid solutions  $\text{ZrO}_2\text{-(2,7-3,8 mol.%)Y}_2\text{O}_3\text{-0.1 mol.% Eu}_2\text{O}_3$  that were grown by directional melt crystallization with direct high-frequency heating in a cold container are investigated.

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

1. J. Dexpert-Ghys, M. Faucher, P. Caro, *Journal of Solid State Chemistry*. **54**, 179 (1984).
2. H. Yugami, A. Koike, M. Ishigame, *Phys. Rev.* **44**, 9214 (1991).
3. Yu.K. Voronko, M.A. Zufarov, A.A. Sobolev et al., *Optics and Spectroscopy* **81**, 814 (1996).
4. Yu.K. Voronko, M.A. Zufarov, A.A. Sobolev et al., *Inorganic Materials* **33**, 452 (1997).

## GROWTH AND INVESTIGATION OF SPECTRAL-LUMINESCENCE CHARACTERISTICS OF BGO CRYSTALS

E.E. Dunaeva<sup>1</sup>, T.V. Chukhlovina<sup>1</sup>, L.I. Ivleva<sup>1</sup>, V.V. Koltyshev<sup>2</sup>

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

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

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

Single crystals of bismuth germanate  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  also known as BGO (eu-lytite structure) are scintillation materials, what has been known since the mid XX century. However, these crystals can show special spectral-luminescent characteristics [1] as a result of the certain influences. This paper is devoted to the development of the technology optically homogeneous BGO crystals and investigation of the impact of external influences on the spectroscopic properties of the samples.

In this work growth experiments were carried out and the optimum parameters to obtain BGO crystals of optical quality were defined. The crystals grown by the Czochralski method along [111] and [100] directions were colorless and transparent in the spectral range of 0,3 – 6,5 mkm. The results of experiments on thermal treatment of the samples at different conditions (in  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  powders, in air and vacuum) will be demonstrated. The effect of gamma-irradiation and hydrogen saturation on the optical properties of BGO crystals will be also shown. The surface morphology of the testing samples was studied depending on external influences. The effect of thermal treatment conditions on absorption spectra and spectral luminescence characteristics of BGO samples were analyzed. Colored sample ("red" BGO) was obtained in the pre-vacuum annealing in a graphite crucible at 900 °C. The absorption spectrum of this sample has peaks at 365, 455 and 518 nm. The luminescence was registered in the spectral range 240-1650nm under pumping of xenon lamp of 450 nm with two peaks: a broad peak with a maximum at 1000-1100 nm and a narrow peak at 1500 nm. Excitation spectrum of luminescence for the band of 1030 nm is a narrow band with a maximum at 370 nm; for 1500 nm band - a broad band with a maximum at 450 nm.

This work was financially supported by the RAS Presidium program №. I.1P.

1. Y. Pingsheng, S. Liangbi, Z. Hengyu, *Opt. Mater.* **33**, 831–834, (2011).



## SYNTHESIS AND PROPERTIES STUDY OF BISMUTH-GERMANIUM GLASSES DOPED WITH d- OR f-ELEMENTS

E.M. Kolobkova, I.V. Stepanova, O.B. Petrova

*The D.I.Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow*

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

Bismuth-germanium glasses are transparent in visible and near-IR spectral regions and therefore they may be applied as a matrix for rare-earth and transition ions doping [1]. In addition, it's possible to produce several crystal phases in bismuth-germanium glasses: scintillation  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  and ferroelectric  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$  [2]. Initial oxides ratio variation leads to formation of either one phase or phase combination. The aim of present research was to analyze the effect of chromium or neodymium oxides addition on different composed bismuth-germanium glasses properties.

The  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ - $\text{GeO}_2$  glasses with principal components ratio 40:60, 45:55 и 50:50 мол.% and with neodymium or chromium oxides addition at concentrations 0,1, 1 or 0,01, 0,1 mol.%, respectively, were under research. The glasses were produced by melting the mixture of initial oxides at 1100 °C and ensuing castling of the melt onto a substrate. The dielectric properties were measured by Resistance Bridge E7-12 with frequency 1 MHz, inside temperature range 25-620°C. The microhardness was determined by Vickers technique at loads 50-150 g.

It's shown that chromium concentration increasing promotes glass crystallization whereas neodymium oxide refines bismuth-germanium compositions vitrification. Neodymium or chromium oxides addition enhances microhardness, the  $\text{GeO}_2$  concentration growth makes the same effect. The glass characteristic temperatures were determined via dielectric measuring data. The bismuth oxide content decreasing leads to glass transition temperature and maximum crystallization temperature enlarging as well as to resistivity growth. The significant effect of mentioned chromium and neodymium oxides concentrations on dielectric characteristics does not revealed. Thus, dielectric properties variation mainly related with glass matrix principal components ratio – bismuth and germanium oxides.

1. I.V. Stepanova, N.G. Goraschenko. *Optics and Spectroscopy* **114**, 873–875 (2013).
2. K. Pengpat, D. Holland, J. Europ. Ceram. Soc. **23**, 1599–1607(2003).

## SPECTRAL AND LUMINESCENT PROPERTIES OF $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> GLASS-CERAMICS

E.S. Ignat'eva<sup>1</sup>, N.V. Golubev<sup>1</sup>, M.Z. Ziyatdinova<sup>1</sup>, V.N. Sigaev<sup>1</sup>, R. Lorenzi<sup>2</sup>,  
A. Paleari<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow*

<sup>2</sup>*University of Milano-Bicocca, Milan, Italy*

*E-mail: [elena\\_ign85@mail.ru](mailto:elena_ign85@mail.ru)*

Since the first work on the optical properties of quantum dots in glass [1], about 35 years ago, the processes of semiconductor crystals formation in a transparent dielectric matrix have received great attention. Controlling nanocrystals size by varying heat treatment conditions makes possible to observe quantum confinement effects [2]. Changing the number of semiconductor intrinsic defects, for example, by doping, has become even more important tool to control its optical response [3, 4]. The latter, however, is complicated by the interaction of semiconductor phase with the glass matrix. Nevertheless, enhanced chemical and thermal stability of glass matrix extends a range of possible applications of embedded nanocrystals as compared to the same nanocrystals obtained from a solution.

In the present work we have synthesized low-alkali gallium germanosilicate glasses, which are crystalized with  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocrystals. It has been shown that similar to  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> the luminescence spectrum of precipitated  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocrystals is a superposition of UV, blue and green bands. The relationships between the glass composition, melting and heat treatment conditions, on one hand, and the luminescence in the UV, visible and IR spectral region, on the other, are revealed.

This work has been supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grants MK-8807.2016.3 and 11.G34.31.0027).

1. A.I. Ekimov, A.A. Onushchenko, JETP Letters **34**, 363 (1981).
2. N.F. Borrelli et al., J. Appl. Phys. **61**, 5399 (1987).
3. M. Kuno, J. Phys. Chem. Lett. **5**, 3817 (2014).
4. J.Z. Zhang, J.K. Cooper, S. Gul, J. Phys. Chem. Lett. **5**, 3694 (2014).

## SPECTROSCOPIC STUDY OF RARE-EARTH GALLIUM BORATES WITH HUNTITE-TYPE STRUCTURE

N.N. Kuz'min<sup>1,2</sup>, K.N. Boldyrev<sup>2</sup>, E.A. Dobrecova<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, *Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of spectroscopy, RAS, Troitsk, Moscow, Russia*

<sup>3</sup> *Lebedev Physical institute, RAS, Moscow, Russia*

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

At present, there is a growing demand for blue and UV lasers in several developing areas of practical application. Reducing the laser wavelength is important in optical recording and information processing (for a better resolution and higher data density), for medical purposes (for selective absorption of light), in environmental protection (for the development of remote sensors). One of the most effective ways to obtain such radiation is the use of nonlinear crystals as a lasing medium, followed by self-frequency doubling and self-frequency mixing. This technology is also applicable in the development of micro diode pumped lasers, where small nonlinear crystal is mounted to the output end of the laser diode and acts as a frequency doubler. One of the brightest representatives of such nonlinear materials is the rare-earth (RE) aluminum borate with the structure of a natural mineral huntite. The compounds have been extensively studied (see, e.g., [1, 2] and references therein).

Here we report on the first spectroscopic studies of a number of RE gallium borates, which are close to the aluminum borates but unlike the latter ones practically not studied. In a wide range of temperatures and frequencies, transmission and luminescence spectra of RE gallium borates  $\text{REGa}_3(\text{BO}_3)_4$  with various rare earths were obtained and interpreted. On the basis of the luminescent data and of the optical and infrared spectroscopy results, we have determined the scheme of the crystal-field energy levels of a number of rare-earth ions ( $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ , etc.) in the matrix of gallium borate. We have found luminescence decay times for the most intense transitions. The obtained information can be used to create optical amplifiers, lasers, and frequency doublers.

This work was supported by the Russian Science Foundation (Grant № 14-12-01033) and the Russian President's Scholarship (E.F.D., CII-754.2015.1).

1. I. Foldvari, *Journal of Luminescence* **102–103**, 395 (2003).
2. E. Cavalli, *Journal of Luminescence* **102–103**, 216 (2003).

## STRUCTURAL PROPERTIES OF $\text{GdCr}_3(\text{BO}_3)_4$ CRYSTALS

E.A. Dobretsova<sup>1</sup>, K.N. Boldyrev<sup>1</sup>, E.Yu. Borovikova<sup>2</sup>, V.A. Chernyshev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Spectroscopy RAS, Moscow, Troitsk, Russia*

<sup>2</sup>*Moscow State University, Moscow, Russia.*

<sup>3</sup>*Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia*

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

Rare-earth (RE) borates with structure type of the natural mineral huntite are of interest due to their optical, magnetic and magnetoelectric properties. Some of these properties are characteristic only for non-centrosymmetric structures. RE chromium borates have polytype nature and crystallize in two modifications, namely, the rhombohedral one with the space group  $R32$  (non-centrosymmetric) or the monoclinic one with the centrosymmetric space group  $C2/c$ . The crystal type depends on the growth conditions. Moreover, a coexistence of differently ordered structural fragments in one single crystal is a characteristic feature of these compounds. The objective of our study was to investigate the ratio of the two phases in a  $\text{GdCr}_3(\text{BO}_3)_4$  crystal by the method of far-infrared spectroscopy.

Incongruently melting borates  $\text{GdCr}_3(\text{BO}_3)_4$  were obtained from a molten solution based on  $\text{K}_2\text{MoO}_4 - 3\text{MoO}_3$  as a result of spontaneous crystallization. The ratio of borate to the solvent in the mixture was 1:1. fig. 1 shows the long-wave-length part of the absorption spectrum of  $\text{GdCr}_3(\text{BO}_3)_4$  crystal. The *ab initio* calculations in the frame of density functional theory enabled us to separate modes belonging to the  $R32$  and  $C2/c$  phases and to estimate the ratio of these phases in  $\text{GdCr}_3(\text{BO}_3)_4$  crystals. We have found that the content of the rhombohedral (non-centrosymmetric) modification is about 80 %.

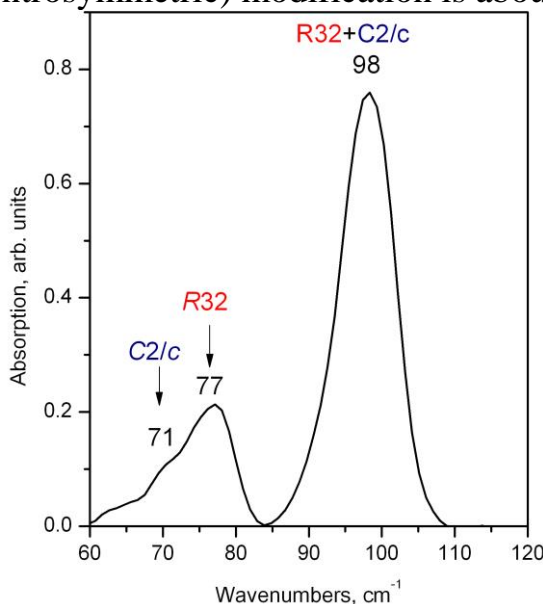


Fig. 1. IR spectrum of  $\text{GdCr}_3(\text{BO}_3)_4$  in long-wave range under room temperature

Support by the Russian Science Foundation (grant № 14-12-01033) and by the President of Russian Federation (D.E.A., project CII-754.2015.1) is acknowledged.

## PHASE DIAGRAM OF THE NaF–CaF<sub>2</sub> SYSTEM

P.P.Fedorov<sup>1,2</sup>, M.N. Majakova<sup>2</sup>, S.V.Kuznetsov<sup>2</sup>, V.A. Maslov<sup>2</sup>,  
A.A. Pynenkov<sup>1</sup>, S.N. Ushakov<sup>1,2</sup>, M.A. Uslamina<sup>1</sup>, K N. Nishchev<sup>1</sup>,  
N.I. Sorokin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*N. P. Ogarev Mordovia State University, Saransk*

<sup>2</sup>*A. M. Prokhorov General Physics Institute, Moscow*

<sup>3</sup>*A.V. Shubnikov Institute of Crystallography, RAS, Moscow*

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

The NaF-CaF<sub>2</sub> system is one of the simplest fluoride systems. It has the eutectic type phase diagram that has been studied by different research groups. The NaF-CaF<sub>2</sub> system was the basis to develop more complex multicomponent ionic melts that were utilized in metallurgy and atomic energy industry. Authors [1-3] indicated that they have observed CaF<sub>2</sub>-based solid solutions in the NaF-CaF<sub>2</sub> system that could be used for the development of fluoride-ion solid electrolytes, but this part of the aforementioned NaF-CaF<sub>2</sub> phase diagram has yet to be studied in details.

We have studied the phase formation in the NaF-CaF<sub>2</sub> system using differential scanning calorimetry (DSC), X-ray diffraction (XRD), electron microscopy (SEM) and X-ray spectroscopy microanalysis (XRSMA) methods. We synthesized the corresponding high temperature samples in flux melt at 950-1050°C according to the following reaction:  $\text{CaCl}_2 + 2\text{NaF} = \text{CaF}_2 + 2\text{NaCl}$ . Lower temperature preparation of Ca<sub>1-x</sub>Na<sub>x</sub>F<sub>2-x</sub> specimens at room temperature has been carried out by their co-precipitation from aqueous Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> with NaF excess. The latter technique allowed synthesis of metastable Ca<sub>1-x</sub>Na<sub>x</sub>F<sub>2-x</sub> nanopowders (ca. 50 nm diameter) with x = 0,035. The solubility of NaF in CaF<sub>2</sub> depended on the temperature in a complex manner: it reached its maximum value of 3,5 ± 0,5 mol % NaF (x = 0,035) at 1200 ± 50 °C (temperature corresponding to the fluorite diffuse phase transition), decreased to its minimum of < 0,4 mol % at 920 ± 25 °C and then grew up to 2 ± 0,2 mol.% at eutectic temperature (818 °C).

Ionic conductivity of Ca<sub>1-x</sub>Na<sub>x</sub>F<sub>2-x</sub> samples has been carried out by impedance spectroscopy technique (pressed pellets, silver electrodes). Cold-pressed Ca<sub>0,965</sub>Na<sub>0,035</sub>F<sub>1,965</sub> nanopowder specimen exhibited 1 · 10<sup>-4</sup> - 3 · 10<sup>-4</sup> Sm/cm electrical conductivity at 40°C; and electrical conductivity of n-CaF<sub>2</sub> nanoceramics at 53°C was 10<sup>3</sup> times higher than electrical conductivity of CaF<sub>2</sub> single crystals under the same conditions.

This work was supported by RFBR grant № 15-08-02481-a.

1. F.Delbove, *Silicates Industriels* **32**, 2659 (1967).
2. W. Bollmann, R.Reimann, *Phys. Stat. Sol. A.* **16**, 187 (1973).
3. M. Natsuhara, et al., *Solid State Ionics* **40/41**, 874 (1990).

## CONTROL OF CURVATURE THE OF PROFILE OF X-RAY OPTICAL ELEMENTS

V.V. Gribko<sup>1</sup>, V.N. Tryshin<sup>2</sup>, A.S. Markelov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Lobachevsky state university of Nizhni Novgorod, Nizhny Novgorod*

<sup>2</sup>*Research Institute of Physics and Technology University of Nizhni Novgorod,  
Nizhniy Novgorod*

*E-mail: [gribkovladimir@icloud.com](mailto:gribkovladimir@icloud.com)*

One of the objectives is to develop a X-ray optical elements for two-dimensional focusing [1] and collimation of the X-ray beams. On the result of control of the curved of X-ray elements affects the deviation of local curvature of the bending of the set. In this case important to develop adaptive methods of X-ray optics, allowing adjusting the convergence of the X-ray beams by controlling the profile bending of the crystal.

In this paper, we investigate experimentally the variation of the temperature of the curvature of the profile of the surface diffractive elements on the example of the monocrystalline plate Si (400) as part of a three-layer structure - substrate-adhesive monocrystalline plate. Experimental research of the profile of the surface of the monocrystalline plate was carried out on a diffractometer D8 Discover.

From the information obtained by us, it was found that the initial curvature of the surface monocrystal plate depends on the shrinkage of the adhesive, elastic parameters components the bending unit and their size. The initial curvature of the monocrystalline plate depends on its temperature bonding. The initial curvature of the monocrystalline plate depends on its temperature bonding.

1. T. Chen, Journal of Technical Physics **72**, 92-94 (2002).
2. A.V. Andreev, A.A Konovko, Surface. X-ray, synchrotron and neutron research **1**, 28-32 (2003).

## THE PHASE ANALYSIS OF KTP:HF AND KTP:ZR CRYSTALS GROWN USING THE FLUX METHOD

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

Potassium titanyl phosphate (KTP) crystals doped with hafnium and zirconium 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<sub>2</sub>O, 14 mol.% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 14 mol.% TiO<sub>2</sub>, 30 mol.% WO<sub>3</sub>. A part of TiO<sub>2</sub> required by the stoichiometry were replaced by HfO<sub>2</sub> or ZrO<sub>2</sub> 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<sub>1-x</sub>Hf<sub>x</sub>OPO<sub>4</sub> and KTi<sub>1-x</sub>Zr<sub>x</sub>OPO<sub>4</sub> crystals with (HfO<sub>2</sub> or ZrO<sub>2</sub>)/TiO<sub>2</sub> ratio in the starting compositions in a range from 0,01 to 0,13 with a 0,02 step, so the total number of samples was 15 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 in the range from 20 to 80° (2θ) with a constant step of 0,02° and 2 s/step counting time at room temperature on a Shimadzu XRD-7000 powder diffractometer using filtered Cu-Kα radiation. Rotation of the sample was setted in its own plane with a speed of 1 rev/sec. Phase analysis showed that all samples are single-phases similar to the pure KTP (PDF № 00–035–0802). Cell parameters and cell volume for all samples were refined using the TOPAS-Academic software. The structure of pure KTP (ICSD 66570) was used as a zero-order approximation. The increase of the cell volume is related to the increase of the proportion of substitution of titanium atoms by impurity 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 impurity atoms. According to the powder XRD data we can conclude that some part of the Hf and Zr from initial compositions used for growing incorporated in the KTP crystal structure. It would allow to specify distribution coefficients of Hf and Zr by KTP crystal in combination with the elemental analysis data.

1. K.Iliev et al., *J. of Crystal Growth* **100**(1–2), 225–232 (1990).
2. D.P. Shumov et al. *Cryst. Res. Tech.* **25**(11), 1245-1250 (1990).

COMBUSTION SYNTHESIS OF GERMANOPHOSPHATES  
 $\text{Gd}_{11}\text{O}_{10}(\text{GeO}_4)(\text{PO}_4)_3$ , DOPED WITH  $\text{Yb}^{3+}$  -  $\text{Er}^{3+}$  IONS IN PAIRS,  
AND THEIR LUMINESCENT PROPERTIES

V.A. Krutko<sup>1</sup>, M.G. Komova<sup>1</sup>, D.I. Pominova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>N.S.Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry RAS, Moscow

<sup>2</sup>A.M.Prokhorov Institute of General Physics RAS, Moscow

E-mail: [krutko@igic.ras.ru](mailto:krutko@igic.ras.ru)

Germanophosphates  $\text{Ln}_{11}(\text{GeO}_4)(\text{PO}_4)_3\text{O}_{10}$  (gross composition  $\text{Ln}_{11}\text{GeP}_3\text{O}_{26}$ ) are heat-resistant compounds (melting point  $> 1500^\circ\text{C}$ ). They crystallize in triclinic system (space group P1) and have high isomorphous capacity of rare earth ions, since form a series of isostructural compounds from Pr to Ho on REE row [1]. In their structure germanium is isomorphous replaces silicon in silikophosphates  $\text{Ln}_{11}\text{SiP}_3\text{O}_{26}$ , which are of interest as templates for the up-conversion phosphors [2]. Usually, complex phosphates  $\text{Ln}_{11}\text{GeP}_3\text{O}_{26}$  are synthesized using ammonia coprecipitation reaction components followed by annealing sol stepwise to the final temperature  $1400^\circ\text{C}$ . This paper shows the possibility of synthesis of phosphors  $\text{Gd}_{11}\text{GeP}_3\text{O}_{26}:\text{Yb}^{3+} - \text{Er}^{3+}$  by sol-gel technology (combustion method), followed by annealing sol at  $1200^\circ\text{C}$ .

Up-conversion luminescence spectra were registered for  $\text{Er}^{3+}$  ions in the electronic transitions  $^2\text{H}_{11/2}, ^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ,  $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$  in compounds  $\text{Gd}_{9,9}\text{Yb}_{0,99}\text{Er}_{0,11}\text{GeP}_3\text{O}_{26}$  and  $\text{Gd}_{10,12}\text{Yb}_{0,77}\text{Er}_{0,11}\text{GeP}_3\text{O}_{26}$  (fig. 1), the values of the energy output of these phosphors were 0,45 and 0,41%, respectively.

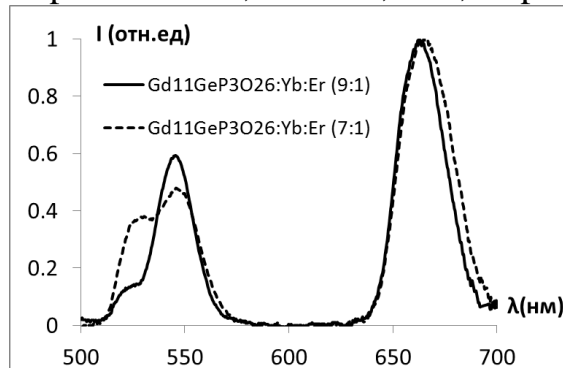


Fig. 1. The spectra of up-conversion luminescence  $\text{Gd}_{9,9}\text{Yb}_{0,99}\text{Er}_{0,11}\text{GeP}_3\text{O}_{26}$  and  $\text{Gd}_{10,12}\text{Yb}_{0,77}\text{Er}_{0,11}\text{GeP}_3\text{O}_{26}$  ( $\lambda = 974 \text{ nm}$ ,  $P = 2,5 \text{ W}$ )

This work was supported by RFBR (grant №15-08-08467).

1. B.F. Dzhurinsky, G.V. Lysanova, J. Inorgan. Chemistry **43**, 2065 (1998).
2. A. Ryabova, D. Pominova, V. Krut'ko et al., Photonics & Lasers in Med. **2**, 117 (2013).



## SINGLE-CRYSTAL INI: NEW MATERIAL FOR IR OPTICS

P.P. Fedorov<sup>1</sup>, S.V. Kuznetsov<sup>1</sup>, E.V. Chyvilina<sup>2</sup>, A.A. Gasanov<sup>3</sup>,  
V.G. Plotnichenko<sup>4</sup>, V.V. Voronov<sup>1</sup>, P.A. Popov<sup>5</sup>, V.V. Osiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow*

<sup>2</sup>*LANHIT, Moscow*

<sup>3</sup>*Giredmet ASC "Rosatom" company, Moscow*

<sup>4</sup>*Fiber Optics Research Center, Russian Academy of Sciences, Moscow*

<sup>5</sup>*Petrovski Bryansk State University, Bryansk*

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

Single crystals of thallium halides, TlCl-TlBr (KRS-6) and TlBr-TlI (KRS-5) solid solutions, as well as cesium iodide, CsI, have been the primary far-infrared optical materials for more than 50 years despite their high toxicity (KRS crystals) or hygroscopicity (CsI). Indium monoiodide, InI, can be a good alternative material to these substances. Orthorhombic indium monoiodide (*Cmcm* space symmetry group) melts congruently at 365 °C; InI is not hygroscopic, and it is chemically stable. We synthesized InI from the corresponding elements using quartz installation under ambient pressure. Obtained InI was purified by rectification under argon, capillary and recrystallization purification techniques. InI single crystals (14 mm diameter, 70 mm length) were grown by Bridgman-Stockbarger method in isolated quartz vessels (2 mm per hour crystallization rate).

Our InI single crystal ( $a = 4,76465(35)$ ,  $b = 12,77656(82)$ ,  $c = 4,90717(35)$  Å unit cell parameters) had a perfect  $\langle 0k0 \rangle$  cleavage. Edge of its absorption band in the visible spectrum range has been determined by 2,01 eV forbidden zone width. InI transparency in IR spectrum range spanned to 51  $\mu\text{m}$  (fig. 2); its heat conductivity ( $k$ ) decreased from 1.03 W/(m K) at 100 K to 0,58 W/(m K) at 300 K, whereas its heat capacity grew from 44,7 J/(mol K) at 100 K to 52,7 J/(mol K) at 300 K, respectively.

Our work has been carried out under the Agreement № 14.604.21.0130 (RFMEFI60414X0130 unique identifier).

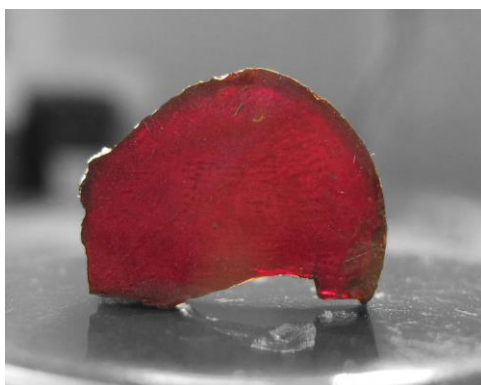


Fig. 1. InI single crystal plate, chipped along the cleavage

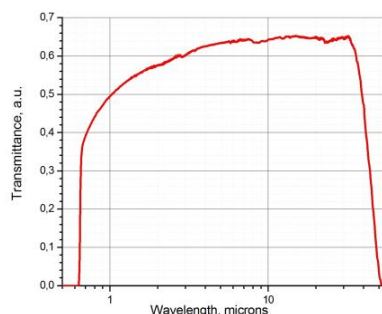


Fig. 2. InI plate transmission spectrum (1,80 mm thick)

# FLUORIDE NANOPARTICLE-CONTAINING DIAMOND FILM LUMINESCENT COMPOSITES

S.V. Kuznetsov<sup>1</sup>, V.S. Sedov<sup>1,2</sup>, V.G. Ralchenko<sup>1,2</sup>, M.N. Mayakova<sup>1</sup>,  
S.S. Savin<sup>3</sup>, K.P. Zhuravlev<sup>4</sup>, A.K. Martyanov<sup>1</sup>, I.D. Romanishkin<sup>1</sup>,  
A.A. Khomich<sup>4</sup>, P.P. Fedorov<sup>1,5</sup>, V.I. Konov<sup>1,2</sup>, V.V. Osiko<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Moscow Technological University, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino, Russia

<sup>5</sup>Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

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

Diamonds are the traditionally used material for making passive optics elements, such as: high transparency lenses and windows that can transmit high power radiation in the microwave to UV part of the spectrum. Their high heat conductivity and X-ray transparency are important for making masks for X-ray lithography. During last 15 years, scientists exhibited an increasing interest in diamond materials in biomedicine and quantum optics because of the opportunity to form impurity-based color-centers in diamond crystal lattice. However, making the latter color centers is a complicated task due to their relatively low concentrations and obstacles in their generation, so making optically active diamonds has become one of the problems of modern technology.

One can solve this problem via composite material venue and produce a diamond matrix, containing in-grown fluoride nanoparticles in its body, by plasmochemical precipitation of diamond from the gaseous phase. This method allows modulation of the synthesized material properties by variation of the chemical composition of the in-grown nanoparticles.

We have synthesized diamond films containing in-grown fluoride nanoparticles, and recorded up-conversion luminescence spectrum for LaF<sub>3</sub>:Yb:Er-containing specimen (974 nm pumping) and photoluminescence spectrum for EuF<sub>3</sub>-containing sample (473 nm pumping). The diamond film with EuF<sub>3</sub> in-grown particles exhibited a luminescence spectrum different from the luminescence spectrum of starting intrinsic EuF<sub>3</sub>: the former spectrum contained the most intensive so-called “red” luminescence line at ca. 611,6 nm (fig. 1). This fact indicated the lower site symmetry of the europium ions in the diamond:EuF<sub>3</sub> film compared to EuF<sub>3</sub> initial powder.

This work was partially supported by the President of Russian Federation Stipend № 2575.2015.2 to Sedov V.S. and RFBR 16-29-11784-ofi-m grant.

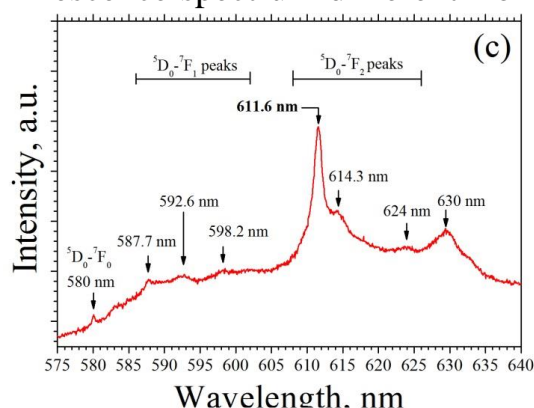


Fig.1. Luminescence spectrum of diamond:EuF<sub>3</sub> film

## OXYFLUORIDE BORATE AND BOROSILICATE GLASS ACTIVATED RARE EARTH ELEMENTS

T.S. Sevostjanova, E.V. Zhukova, V.A. Sirotina,  
A.V. Khomyakov, O.B. Petrova

*D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow*  
*E-mail: [t.sevostjanova@mail.ru](mailto:t.sevostjanova@mail.ru)*

Oxyfluoride glass and glass-ceramic (GC) are promising matrixes for introducing the rare earth activators, as combine luminescent properties of fluoride crystals having a low energy phonon spectrum, with the manufacturability and high mechanical and chemical resistance of oxide glasses. Oxyfluoride lead, barium and mixed glass as precursors for GC, synthesized in different systems: silicate [1], borate [2], germanate [3], tellurite [4].

In this study we were obtained borosilicate glass batch composition from  $80 \text{ PbF}_2 - x \text{ B}_2\text{O}_3 - (20-x) \text{ SiO}_2$  (where  $x = 0, 5, 10, 15$  and  $20$ ) and  $70 \text{ PbF}_2 - x \text{ B}_2\text{O}_3 - (30-x) \text{ SiO}_2$  (where  $x = 0, 10, 20$  and  $30$ ) and activated compositions wherein Pb is partially substituted with Eu, Er and Yb in concentrations ranging from 1 to 6 mol.%. Studies of glasses by X-ray spectral microanalysis (INCA Energy 3-D MAX, Oxford Instruments) showed that the synthesis is volatilized to 20% fluorine, and aluminum is included in the glass in an amount of 4 – 5 wt.%.

For the obtained glasses were determined the characteristic temperature and the coefficient of linear thermal expansion (dilatometry method), density, microhardness (Vickers method, PMT-3), refractive indices (method Lodochnikova for  $\lambda = 488, 540$  and  $619$  nm), the permittivity and conductivity (E7-12, 1 MHz, silver contacts), absorption spectra (Varian Cary 5000), luminescence spectra (QE65000 (Ocean Optics) and Fluorolog FL3-22 (Horiba Jobin Yvon)). Carried crystallization of glass in different temperature-time conditions, obtained GC, which is one cubic crystalline phase of  $\beta\text{-PbF}_2$ .

This research was financially supported by the Russian Scientific Foundation (grant number № 14-13-01074).

1. O.B. Petrova, A.V. Khomyakov, *Opt. Spectrosc.* **114**, 876 (2013).
2. O.B. Petrova, T.S. Sevostjanova, M.O. Anurova, A.V. Khomyakov, *Opt. Spectrosc.* **120(2)**, 260 (2016).
3. B. Klimesz, G. Dominiak-Dzik, M. Zelechower, W. Ryba-Romanowski, *Opt. Mat.* **30**, 1587 (2008)
4. B. Burtan, Z. Mazurak, J. Cisowski, M. Czaja, et al., *Opt. Mat.* **34**, 2050 (2012)

EFFECTS OF TEMPERATURE ON THE STRUCTURE  
AND MORPHOLOGY OF Ge LAYERS, GROWN BY “HOT WIRE”  
METHOD ON THE Si(100)

A.V. Zaycev, S.A. Denisov, V.N. Trushin, A.V. Nezhdanov, S.A. Matveev,  
V. Yu. Chalkov, V.G. Shengurov  
*Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod*  
*E-mail: [andrew1994a@mail.ru](mailto:andrew1994a@mail.ru)*

Vapor deposition methods are promising for the production of micro and optoelectronic devices based on epitaxial Ge. We have recently reported receiving quality layers by decomposing hydride ( $\text{GeH}_4$ ) on "hot wire" [1].

The purpose of this work - the study of structural perfection and morphology of the Ge layers, grown under different temperature conditions on Si (100) substrates.

Ge layers of thickness 0,5 – 4 microns were deposited on Si (100) in a high-vacuum plant at puffing monogermane to a pressure of  $4 \cdot 10^{-4}$  Torr.  $\text{GeH}_4$  decomposition occurred at heated to 1300-1500 °C tantalum strip, placed opposite the substrate. We studied two temperature growth mode: at a constant temperature of the substrate ( $T_s = 350$  °C) and at two temperatures (350 °C and 500 °C). Also studied the effect postgrowth annealing (at 800 °C/30 min) grown at a constant temperature of 350 °C of Ge layers.

The results of these studies have shown that the structural perfection of the layers grown at two-temperature mode is better than at the single-temperature mode. According to X-ray diffraction rocking curve width at half of its maximum intensity (FWHM) of the layer of Ge(004) was 3,1 arcmin. In the first case and 5,7 arcmin. in a second. However, if two temperature growth mode, there was a slight roughening of the surface of the Ge layers.

Annealing layers improves the structural perfection of the layers: after anneal FWHM = 2,6 arcmin. The layer surface maintaining smooth as after cultivation: RMS value of surface roughness less than 1 nm.

The work was supported by grants of the President of the Russian Federation (MK-7021.2015.2) and RFBR (№ 15-02-99664).

1. V.G. Shengurov, S.A. Denisov, V.Yu. Chalkov et al., Technical Physics Letters **41**(1), 36 (2015).

## YTTRIA-ALUMINOBORATE GLASSES AS X-RAY DETECTION MATERIAL

M.Z. Ziyatdinova<sup>1</sup>, A.S. Shkuratko<sup>1</sup>, N.V. Golubev<sup>1</sup>, S.S. Gizha<sup>2</sup>,  
A.V. Masalov<sup>2</sup>, A.G. Turyanskiy<sup>2</sup>, I.V. Pirshin<sup>2</sup>, V.N. Sigaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow,*

<sup>2</sup> *P.N. Lebedev Physical Institute, LPI, Moscow,*

*E-mail: [m.z.ziyatdinova@gmail.com](mailto:m.z.ziyatdinova@gmail.com)*

Scintillation is one of the basic methods of ionizing radiation detection [1]. Glass, because of its low-cost, large-volume production possibilities, is attractive as a scintillator material. Nevertheless, glasses possess a large number of point defects which result in low X-ray conversion efficiency [1]. This can be partly overcome by increasing the absorption coefficient or the optical path of X-rays. Fiber scintillators increase the energy resolution and reduce the light loss of spectrometric measurements [2].

We have recently shown that yttria-aluminoborate glasses  $\text{Ln}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Sb}_2\text{O}_3$  ( $\text{Ln} = \text{Y, Tb, Ce, Gd}$ ) demonstrate green luminescence under X-rays, and the introduction of heavy elements results in the increase of luminescence [3]. The aim of the present work is to study luminescence efficiency of glasses as a function of  $\text{Tb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  content. The dependence of emission intensity on replacement of the light elements by the  $\text{PbO}$  has been also studied. The introduction of  $\text{BaO}$  into the glass composition decreased significantly the tendency to crystallization: the difference between  $T_g$  values and exopeak extremum temperatures according to DSC curves has increased from about 160 to 245 °C.

The scintillating efficiency of about 25 % of that of the  $\text{CdWO}_4$  crystal indicates that these glasses are useful for detecting X-rays.

This work is financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant 14.Z50.31.0009).

1. M. J. Weber, *J. of Lum.* **100**, 35 (2002).
2. N.V. Klassen, V.N. Kurlov, S.N. Rossolenko et al., *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics* **73**, 1451 (2009).
3. M.Z. Ziyatdinova, N.V. Golubev, G.E. Malashkevich et al., *JACCT* **29**(7), 23 (2015).

# INVESTIGATION STRUCTURAL FEATURES OF ALUMINUM FOILS AFTER ELECTROLYTIC ANODIZING OF METHODS SEM AND AFM

D.S. Gorbunov, V.P. Mishkin, E.N. Lyotova, A.V. Dolganov, K.N. Nishchev  
*Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

Efficient and technologically simple method of synthesis of self-assembled nanostructured materials with periodic of location of nanopores on macroscopic surfaces is the anodizing process. The technology of anodizing in recent years has become actively develop with the ability to use the anodizing process to obtain porous films with a given morphology and, consequently, with definite properties. By changing the anodization conditions is possible to obtain anodic aluminum oxide with a wide range of structural morphological and electro physical characteristics [1, 2, 3].

In this work for investigation micro- and nanostructured Al — foils is used methods of SEM and AFM. For obtain definite surface structure, Al – foils were subjected to an electrolytic anodization with different voltage values and time characteristics.

Analysis of SEM and AFM images revealed there is developed a periodic nanostructure on the surface of the foils subjected to anodizing. Two types of structures have been obtained with the provisional name "tubular" - structural unit is a tube with dimensions of the order 130×36 nm (fig. 1 a) and «semispherical» - structural unit has the form of a semisphere with a diameter of about 70 nm (fig. 1 b).

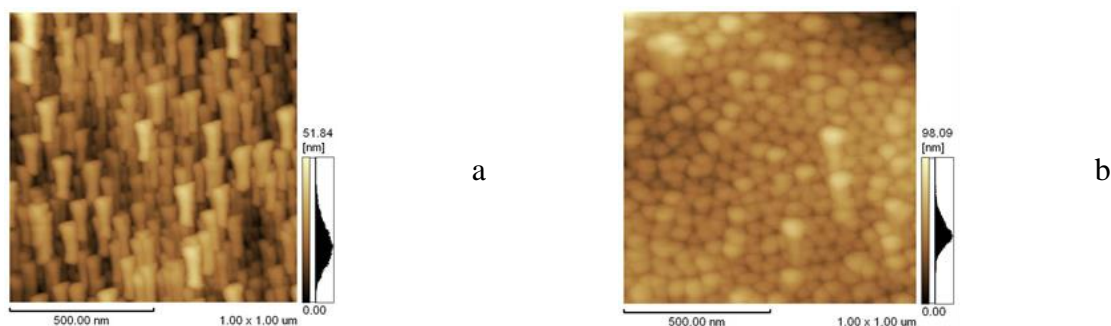


Fig. 1. AFM – surface image of Al – foils after foils electrolytic anodization;  
(a) – «tubular» structure, (b) – «hemispherical structure»

1. A. Mozalev [et al.], *Electrochimica Acta.* **48**, 3155 (2003).
2. G. D. Sulka, *Nanostructured Materials in Electrochemistry*, Weinhei, WILEY VCH. 2008.
3. M.M. Filyak, O.N. Kanygina, *Vestnik OGU* **1**, 150 (2013).

**ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
И ТЕХНОЛОГИИ**

## К ИСТОРИИ СОЗДАНИЯ ЛАЗЕРА

В.В. Осико<sup>1</sup>, М.Н. Попова<sup>2</sup>

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

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

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

Лазерная генерация впервые была получена 15 мая 1960 г. Теодором Мейманом на кристалле рубина. Мейман, в то время сотрудник частной компании, связанной с самолетостроением, вел работу один, несмотря на запрет начальства заниматься этой «неперспективной» тематикой, и победил в драматической гонке нескольких американских и советских исследовательских групп. Мейман написал интересную книгу о тех событиях и своей последующей жизни [1].

Созданию лазера предшествовала интенсивная работа в США и СССР, и Нобелевскую премию «За фундаментальную работу в области квантовой электроники, которая привела к созданию усилителей и генераторов, основанных на принципе мазера – лазера» получили Ч. Таунс, сотрудник МПТ, и Н.Г. Басов и А.М. Прохоров, сотрудники ФИАН им. П.Н. Лебедева. Мейман несправедливо не был удостоен Нобелевской премии. Сам он в своей книге пишет: «Было бы более разумно отдать должное русскому физику Фабриканту. Хотя он и не создал лазер, он предложил идею лазера раньше, чем появились первые работы по лазеру».

Действительно, первая работа, имеющая непосредственное отношение к лазеру, была выполнена еще до войны в СССР. В 1939 г. В.А. Фабрикант защитил в ФИАН докторскую диссертацию, в которой были сформулированы условия отрицательного поглощения и предлагался метод создания инверсной населенности в газовом разряде.

Вернемся к времени создания первого лазера. Н.Г. Басов еще в начале 1959 г. организовал в ФИАН поисковые работы по лазерам. Добившись их финансирования (апрель 1960 г.), он обратился к заведующему лабораторией люминесценции ФИАН М.Д. Галанину с предложением сделать рубиновый лазер. М.Д. Галанин, А.М. Леонтович и З.А. Чижикова занялись этой работой. Весной 1961 г. была собрана лазерная установка, а 18 сентября 1961 г. была получена генерация. В сентябре 1961 г. я, тогда студентка МФТИ, пришла в группу А.М. Леонтовича на практику. В этой лекции я расскажу о той поре, а также о первых лазерных работах на Украине и в других республиках СССР. «При известных недостатках системы власти тех времен в стране осуществлялась стратегически взвешенная программа научного и технического развития. Лазерные исследования были частью этой программы», - пишет зав. Отделением оптики ФИАН А.В. Масалов в послесловии к сборнику статей, посвященному 50 – летию лазера [2].

1. Т.Н. Maiman, *The Laser Odyssey*. Laser Press, 2000.
2. А.В. Масалов, *Отделение оптики ФИАН: первые работы по созданию лазеров*. М.: РАН, ФИАН им. П.Н. Лебедева, 2010.



А.М.ПРОХОРОВ И СТАНОВЛЕНИЕ КАЗАНСКОЙ ШКОЛЫ  
ПО КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

В.В.Семашко

*Казанский (Привожский) федеральный университет, Казань*

*E-mail: [vadim.semashko@kpfu.ru](mailto:vadim.semashko@kpfu.ru)*

В докладе рассказывается о вехах развития направления «квантовая электроника» в Казанском университете (КГУ/КФУ) и о той роли, которую сыграл Александр Михайлович Прохоров и сотрудники ФИАН/ИОФАН в становлении этого направления. Приводятся достижения КГУ/КФУ в области лазерной физики в прошлые годы и обсуждаются развивающиеся современные направления исследований.

1. А.В. Аганов, М.Х. Салахов, *История физики и астрономии в Казанском университете за 200 лет*, Казань : Изд-во Казанского государственного ун-та, 2007.
2. Н.С. Альтшулер, В.А. Голенищев-Кутузов, А.Л. Ларионов, *Хроники научной и личной жизни С.А. Альтшулера*, Казань : Изд-во Казанского государственного ун-та, 2011.

## ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ НА ОСНОВЕ ПРОЗРАЧНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ

П.А. Рябочкина

*Национальный исследовательский Мордовский государственный универ-  
ситет, Саранск*

*E-mail: [ryabochkina@freemail.mrsu.ru](mailto:ryabochkina@freemail.mrsu.ru)*

В настоящее время оптическая керамика, легированная редкоземельными и переходными ионами, является перспективным материалом для оптических элементов лазеров. Технология изготовления оптической лазерной керамики имеет ряд преимуществ по сравнению с технологией роста монокристаллов. Она позволяет получать активные оптические элементы большего размера, с высокой концентрацией, а также градиентом ионов активаторов. В ряде случаев керамическая технология позволяет получать материалы, выращивание которых в виде монокристаллов затруднено. Кроме того, согласно мнению ряда специалистов, налаженное промышленное производство лазерной керамики может обеспечить ее меньшую стоимость по сравнению с технологией выращивания монокристаллов.

В докладе будет представлен материал, отражающий современное состояние развития технологий получения лазерной керамики в России и за рубежом, а также ее применение в качестве активной среды твердотельных лазеров с диодной накачкой.

Будут представлены результаты исследований, направленные на создание твердотельных лазеров с диодной накачкой на основе лазерной керамики  $Y_3Al_5O_{12}$  и  $Y_2O_3$ , легированной редкоземельными ионами, которые проводятся в Национальном исследовательском Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарева совместно с учеными из Фрязинского филиала Института радиотехники им. В.А. Котельникова РАН (г. Москва) и Шанхайского института керамики (г. Шанхай, КНР).

## О ГОЛОГРАФИИ: ЧТО ЭТО ТАКОЕ, КАК ОНА ВОЗНИКЛА И ДЛЯ ЧЕГО НУЖНА

А.В. Крайский

*Физический институт им.П.Н. Лебедева РАН, Москва*

*E-mail: [kraiski@ci.lebedev.ru](mailto:kraiski@ci.lebedev.ru)*

В докладе кратко рассматривается понятие голографии как метода полной записи и воспроизведения световых полей и каковы ее основные применения. На основе понятия интерференции света и дифракции волн на периодической структуре поясняется основная идея голографии. Кратко рассказывается о регистрирующих голографических средах, рассматривается история дифракционных решеток, как предшественников голографии сложных изображений. Рассматривается история создания основных голографических схем и мотивация авторов этих схем: Габора, Денисюка, Лейта.

Рассматриваются примеры применения изобразительных и защитных голограмм как наиболее употребляемых сейчас видов голограмм, голографической интерферометрии, нашедшей достаточно широкую известность в инженерных науках, возможности записи поляризации светового поля. Кратко обсуждается возникшая с участием автора голография изменяющихся во времени световых полей, позднее расширенная рядом авторов на основе других физических эффектов в специфических областях (фотонное эхо, среды с выжигаемыми спектральными провалами). Упоминаются голографические сенсоры, как потенциальный новый вид диагностических устройств.

Вкратце рассматривается фотография в натуральных цветах Липпмана (Нобелевская премия по физике 1908 г.) как базис, на котором развивалась голография Денисюка.

# ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА $\text{Na}_2\text{O-GeO}_2$ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ

С.В. Фирстов<sup>1,2</sup>, М. Zhao<sup>3,4</sup>, L. Su<sup>3</sup>, Q.H. Yang<sup>4</sup>, Е.Г. Фирстова<sup>1</sup>,  
С.В. Алышев<sup>1</sup>, Е.М. Дианов<sup>1</sup>

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

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

<sup>3</sup> Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, China

<sup>4</sup> School of Materials Science and Engineering Shanghai University, China

E-mail: [sergei\\_firstov@mail.ru](mailto:sergei_firstov@mail.ru)

Активные среды, легированные висмутом, привлекли внимание после создания первого висмутового лазера [1]. В отличие от сред с редкоземельными ионами, оптические свойства стекол с висмутом существенно зависят от структуры и химического состава стеклянной матрицы. Это обстоятельство позволило разработать висмутовые лазеры, которые способны генерировать излучение в спектральном диапазоне от 1150 до 1775 нм [2, 3]. В этой связи изучение новых стеклянных матриц, легированных висмутом, представляет научный и практический интерес.

В настоящей работе проводилось изучение синтезированных в тигле натрий-германатных стекол, легированных висмутом. Изучено влияние добавки оксида натрия на спектрально-люминесцентные свойства стекол. На рис. 1 представлены спектры возбуждения и люминесценции исследованных стекол. Методом комбинационного рассеяния (КР) были изучены структурные изменения, происходящие при вариации химического состава стекла. Спектры КР исследуемых стекол, содержащих различное количество оксида висмута, приведены на рис. 2.

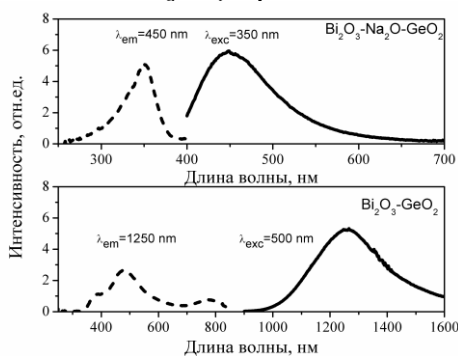


Рис. 1. Спектры возбуждения (штриховая) и люминесценции (сплошная) исследуемых стекол

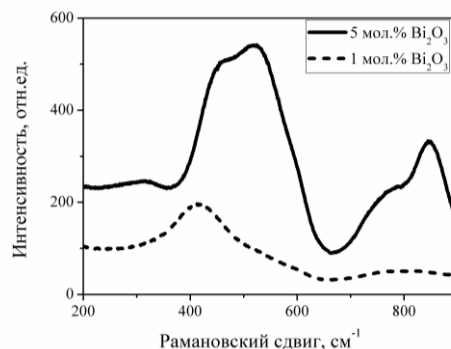


Рис. 2. КР спектры  $\text{Na}_2\text{O-GeO}_2$  с висмутом

Авторы работы благодарят В.В. Колташева за измерение КР спектров. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 15-52-53127) и Государственного фонда естественных наук Китая (№ 16141101107).

1. Е.М. Dianov et al. Quantum Electron. **35**, 1083 (2005).
2. I.A. Bufetov, Е.М. Dianov, Laser Phys. Lett., **6**, 487 (2009).
3. S.V. Firstov et al. Opt. Lett., **39**, 6927 (2014).

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ АП-КОНВЕРСИОННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ  
КРАСНОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ИОНОВ  $\text{Ho}^{3+}$  В КРИСТАЛЛЕ  
 $\text{LiYbF}_4:\text{Ho}^{3+}$

О.Г. Гориев, Б.Н. Казаков, В.В. Семашко

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

E-mail: [goriev.o.g@gmail.com](mailto:goriev.o.g@gmail.com)

Люминесценция кристалла  $\text{LiYbF}_4:\text{Ho}^{3+}$  (0.2 ат.%) возбуждалась излучением полупроводникового лазерного диода с мощностью 0,755 Вт и  $\lambda = 933\text{ нм}$ . Форма продольных сечений и профилей люминесценции существенно зависят от положения  $\Delta z$  перетяжки лазерного луча относительно передней поверхности кристалла. Проекция продольного сечения люминесценции кристалла на направление распространения лазерного луча определены как горизонтальные профили.

Когда перетяжка находится внутри кристалла ( $\Delta z = 0 \div 2,5\text{ мм}$ ), в нем формируется узкий канал вдоль лазерного луча с наиболее интенсивной люминесценцией ионов  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Ho}^{3+}$  (рис. 1а).

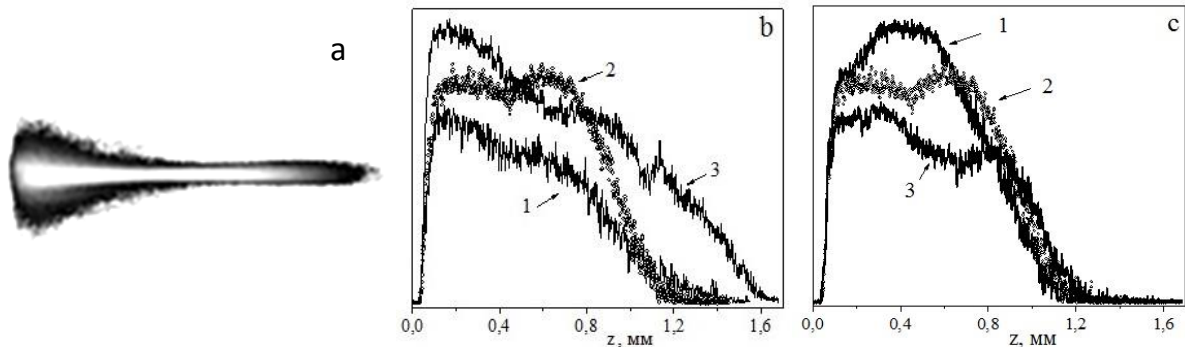


Рис. 1. Фотография продольного сечения R-люминесценции ионов  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\Delta z = 1.2\text{ мм}$  (а); горизонтальные профили по оси канала люминесценции ионов  $\text{Yb}^{3+}$  (1), ионов  $\text{Ho}^{3+}$  : для R-люминесценции (2) и G-люминесценции (3),  $\Delta z = 1.2\text{ мм}$  (б); горизонтальные профили по оси канала R-люминесценции ионов  $\text{Ho}^{3+}$  при  $\Delta z = 1,05\text{ мм}$  (1),  $1,2\text{ мм}$  (2),  $1,35\text{ мм}$  (3) (с)

Обнаружено, что канал резко сужается при положении перетяжки лазерного луча в интервале  $\Delta z = 1,05 \div 1,35\text{ мм}$ . Это приводит к сильному увеличению объемной плотности энергии в канале. В результате возникает синхронизация излучения ионов  $\text{Yb}^{3+}$  с образованием мощного когерентного излучения. Это приводит населенность уровня  ${}^5\text{F}_5$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$  к почти инверсному состоянию, которое быстро распадается.

В продольных профилях вдоль оси канала проявляются как минимум два различных механизма заселения энергетических уровней ионов  $\text{Ho}^{3+}$ , с которых происходит зеленая (G-переход  $\{{}^5\text{F}_4, {}^5\text{S}_2\} \rightarrow {}^5\text{I}_8$ ) и красная (R-переход  ${}^5\text{F}_5 \rightarrow {}^5\text{I}_8$ ) люминесценция (рис. 1б). Для красной люминесценции один из механизмов возбуждения обусловлен взаимодействием  $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Ho}^{3+}$ , а второй —  $\text{Ho}^{3+} \rightarrow \text{Ho}^{3+}$ . Эти механизмы проявляются в разных участках канала, а их вклады зависят от положения перетяжки лазерного луча внутри кристалла (рис. 1с).

## ВИДИМАЯ И БЛИЖНЯЯ ИК - ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СВИНЦОВЫХ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ В СТЕКЛАХ $\text{SiO}_2$

А.В. Харахордин<sup>1</sup>, В.О. Соколов<sup>1</sup>, В.Г. Плотниченко<sup>1</sup>,  
А.Ю. Лаптев<sup>2</sup>, А.Н. Гурьянов<sup>2</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: [kharakhordin@fo.gpi.ru](mailto:kharakhordin@fo.gpi.ru)

Стекла, легированные висмутом, представляют собой новый класс оптически активных материалов, обладающих широким спектром люминесценции в ближнем ИК диапазоне длин волн. Однако, для улучшения характеристик данных материалов необходимо лучшее понимание природы висмутовых центров.

Изучение стекол, легированных другими элементами, близкими к висмуту по свойствам, может дать дополнительную информацию о природе висмутовых центров, а также возможность разработки новых активных материалов для использования в волоконной оптике. Одним из таких элементов является свинец.

В работах [1,2] наблюдалась ИК люминесценция в области 1,1–1,2  $\mu\text{m}$  и вблизи 1,4  $\mu\text{m}$  в волоконных световодах на основе кварцевых и германат-силикатных стекол, легированных свинцом, заготовки для которых изготавливались методом MCVD. Никаких обоснованных моделей свинцовых центров ИК люминесценции в этих работах не предлагалось.

Для наших исследований использовались заготовки световодов, изготовленные MCVD-методом, с сердцевиной из стекла  $\text{SiO}_2$ , легированного свинцом. Из заготовок вырезались цилиндрические образцы толщиной 2 мм.

Экспериментальное изучение спектров пропускания, люминесценции и возбуждения люминесценции стекол  $\text{SiO}_2:\text{Pb}$  показало, что при относительно низком содержании  $\text{PbO}$  (~0,1 вес.%) в этих стеклах наблюдается видимая люминесценция в областях 300-450 и 500-600 нм и ИК люминесценция в областях 850-950, 1000-1200 и 1300-1400 нм.

Согласно нашим расчетам, люминесценция в области 300-450 нм обусловлена трех- и двухкоординированными атомами  $\text{Pb}$ , в области 500-600 нм — двухкоординированными атомами  $\text{Pb}$ . ИК люминесценция в области 1000-1200 нм может быть обусловлена центром, представляющим собой междоузельный ион  $\text{Pb}^+$  в сетке  $\text{SiO}_2$ , а в областях 850-950 нм и 1300-1400 нм — центром, представляющим собой комплекс, образованный междоузельным атомом  $\text{Pb}^0$  и двумя кислородными вакансиями.

1. I.A. Bufetov, et al., Opt. Express **17**(16), 13487-13892 (2009).
2. A.S. Zlenko, et al., Quant. Electronics **42**(4), 310-314 (2012).

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРЕШЕТОК В ЩЕЛОЧНОСИЛИКАТНЫХ СТЕКЛАХ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ.

С.С. Федотов<sup>1</sup>, А.С. Липатьев<sup>1</sup>, С.В. Лотарев<sup>1</sup>, И.С. Глебов<sup>1</sup>,  
П.Г. Казанский<sup>1,2</sup>, В.Н. Сигаев<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>*РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва*

<sup>2</sup>*University of Southampton, United Kingdom*

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

Периодические наноструктуры, формирующиеся в объеме стекол под действием фемтосекундных лазерных импульсов, являются предметом многих исследований, в большинстве из которых средой для формирования нанорешеток является кварцевое стекло. В последние годы получены свидетельства возникновения нанорешеток и в объеме многокомпонентных стекол: ULE (Corning), Borofloat33 (Schott)[1], AF32 [2], а также в GeO<sub>2</sub> [3], однако взаимосвязь химического состава стекла, условий и механизмов формирования в нем нанорешеток, их структуры и химических процессов, сопровождающих их появление, на сегодня практически не изучена. В то же время показано, что для многокомпонентных стекол количество импульсов, которое требуется для создания нанорешетки с фазовым сдвигом, сопоставимым с возникающим в кварцевом стекле, многократно возрастает [2].

В данной работе на примере системы Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> изучалось влияние щелочных оксидов на формирование нанорешеток в бинарных силикатных стеклах. В качестве источника лазерного излучения использовался фемтосекундный регенеративный усилитель Pharos SP ( $\lambda = 1030$  нм, параметры импульсов, использованных в данном эксперименте: длительность 600 фс, энергия 86 нДж, частота следования 200 кГц). Данные СЭМ подтвердили формирование нанорешеток с характерным периодом структуры 200 - 300 нм в стеклах составов с 10 и 15 мол.% Na<sub>2</sub>O, а также с 5 мол.% (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O). С помощью количественного микроанализа двулучепреломления показан эффект насыщения фазовой задержки, возникающей в двулучепреломляющих нанорешетках при длительном воздействии фемтосекундного пучка, на одном и том же уровне для стекол с разным содержанием Na<sub>2</sub>O от 0 до 15 мол.%. В то же время минимальное количество импульсов, требуемое для возникновения нанорешетки, существенно (на порядок) меняется в зависимости от содержания щелочного оксида.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант № 14.Z50.31.0009) и РФФИ (гранты 16-03-00541 и 16-03-00541).

1. S. Richter et al., Opt. Mat. Ex. **3**, 189607 (2013).
2. S. Fedotov et al., Appl. Phys. Lett. **108**, 071905 (2016).
3. F. Zhang et al., J. Opt. Soc. Am. B. **31**, 860-864 (2014).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НА СВОЙСТВА СТЕКОЛ СИСТЕМЫ As-S ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Л.А. Мочалов<sup>1,2,3</sup>, А.В. Костров<sup>1</sup>, А.В. Сириковский<sup>1</sup>, А.В. Нежданов<sup>2</sup>,  
А.И. Машин<sup>2</sup>, А.В. Воротынцев<sup>3</sup>, А.М. Воротынцев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

<sup>3</sup> *Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород*

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

Образцы стекол системы As-S получали в две стадии. Синтез шихты проводили взаимодействием элементарных As и S в низкотемпературной аргоновой плазме. Для получения монолитных образцов после стадии осаждения реактор отпайкой отделяли от основной системы и проводили гомогенизацию стеклообразующего расплава в качающейся печи. Температура гомогенизации не превышала 750 °С в течение 1 часа. После гомогенизации реактор извлекали из печи и отверждали расплав в стекло. Получены образцы системы As-S диаметром 5 мм, длиной до 10 мм, с содержанием S от 50 до 70 мол. %.

Исследовано влияние температуры стенок реактора в зоне разряда на выход и состав получаемых стекол. Установлено, что в интервале температур 150-250 °С, выход близок к 100 %, состав получаемых стекол соответствует задаваемому составу.

Исследовано влияние давления в системе в интервале 1,9-19 мм.рт.ст. на состав получаемых стекол. Установлено, что с увеличением давления в реакторе возрастает температура его стенок (с 200 °С до 350 °С), что приводит к отклонению состава получаемых стекол от заданного до 5%.

Методом спектроскопии комбинационного рассеяния установлено, что продукты плазмохимического взаимодействия аморфны. На отдельных участках присутствует кристаллическая фаза As<sub>4</sub>S<sub>4</sub> и S. Методом ДСК установлено, что температура стеклования стекол полученных предложенным методом и традиционным (плавлением элементов в вакуумированных ампулах) сопоставима.

Загрязняющего действия материала аппаратуры в условиях эксперимента не выявлено. Содержание кремния в полученных стеклах находится на уровне  $(1-2) \cdot 10^{-4}$  мас.%, что соответствует его содержанию в исходной сере.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №15-42-02402 и правительства Нижегородской области.



## ГЕНЕРАЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА НА КРИСТАЛЛАХ $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}$ И $\text{LiYF}_4:\text{Pr}$

А.А. Ляпин<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, В.В. Семашко<sup>2</sup>, В.Г. Гориева<sup>2</sup>,  
С.Л. Кораблева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, Саранск*

<sup>2</sup>*Казанский федеральный университет, Казань*

*E-mail: [andrei\\_lyapin@mail.ru](mailto:andrei_lyapin@mail.ru)*

В настоящее время активно разрабатываются твердотельные лазеры, излучающие в видимой области спектра. Данные лазеры получили широкое применение в различных областях науки и техники: оптическая спектроскопия, голография, биомедицинские технологии, развлекательная индустрия и другие.

Одной из возможностей получения лазерной генерации в видимом диапазоне длин волн является использование в качестве активных сред материалов легированных ионами  $\text{Pr}^{3+}$ . Развитие синих диодных лазеров позволило в 2004 году получить генерацию на длине волны 640 нм на кристалле  $\text{LiYF}_4:\text{Pr}$  в условиях полупроводниковой накачки [1]. К настоящему времени лазерная генерация получена на различных кристаллах  $\text{LiYF}_4:\text{Pr}$ ,  $\text{LiLuF}_4:\text{Pr}$ ,  $\text{LiGdF}_4:\text{Pr}$ ,  $\text{KY}_3\text{F}_{10}:\text{Pr}$ ,  $\text{LaF}_3:\text{Pr}$ ,  $\text{BaY}_2\text{F}_8:\text{Pr}$ ,  $\text{YAlO}_3:\text{Pr}$ , легированных ионами  $\text{Pr}^{3+}$  [1-4]. Однако поиск оптимальной матрицы для празеодимовых лазеров с диодной накачкой видимого диапазона спектра остается актуальной задачей.

В настоящей работе была получена лазерная генерация на кристаллах  $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}$  и  $\text{LiYF}_4:\text{Pr}$  на длине волны 640 нм в условиях диодной накачки на уровень  $^3\text{P}_2$  ионов  $\text{Pr}^{3+}$ . Максимальная выходная мощность лазеров в обоих случаях составила 340 мВт. Дифференциальный КПД генерации по поглощенной мощности составил 9 % и 8,5 % для лазеров на кристаллах  $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}$  и  $\text{LiYF}_4:\text{Pr}$ , соответственно. Также в работе обсуждается потенциальные возможности улучшения выходных характеристик лазеров на кристаллах  $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Pr}$  и  $\text{LiYF}_4:\text{Pr}$ , выращенных методом Бриджмена.

Работа выполнена при финансовой поддержке НИР в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 3.384.2014/К и государственного задания № 0708 0210059 611 («Организация проведения научных исследований»).

1. A. Richter, et al., Opt. Lett. **29**, 26380 (2004).
2. B. Xu, et al., Opt. Express. **19**, 1191 (2011).
3. Z. Liu, et al., J. Opt. Soc. Amer. B **30**, 302 (2013).
4. P.W. Metz, et al., Opt. Lett. **39**, 3193 (2014).

# ДИСКРИМИНАЦИЯ ВЫСШЕЙ МОДЫ В ТРИГОНАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ МИКРОСТРУКТУРАХ С СЕРДЦЕВИНОЙ ДИАМЕТРОМ 100 МКМ И ДВОЙНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

П.В. Безбородкин<sup>1</sup>, К.В. Дукельский<sup>2</sup>, В.В. Демидов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург

E-mail: vovess@mail.ru

Микроструктурированные световоды на основе кварцевого стекла с большой (диаметром в несколько десятков микрометров) сердцевинной рассматриваются в качестве перспективных элементов для создания мощных волоконных лазеров с высоким порогом проявления нелинейных эффектов и дифракционно-ограниченным качеством выходного излучения. Наличие в конструкции таких световодов наружной оболочки, с одной стороны, обеспечивает механизм накачки активной области сердцевинной, однако с другой – препятствует делокализации группы высших мод за пределы сердцевинной и внутренней оболочки. По этой причине разработка структур с большой сердцевинной, гарантирующих дифференциальное усиление фундаментальной ( $LP_{01}$ ) моды, является актуальной задачей в сфере лазерных технологий.

Цель данной работы заключалась в адаптации концепции двойной оболочки к структурам с симметрией сечения пониженной размерности (тригональной,  $C_{3v}$ ) [1] и исследовании влияния геометрии внутренней оболочки на интенсивность дискриминации высшей ( $LP_{11}$ ) моды (Рис. 1).

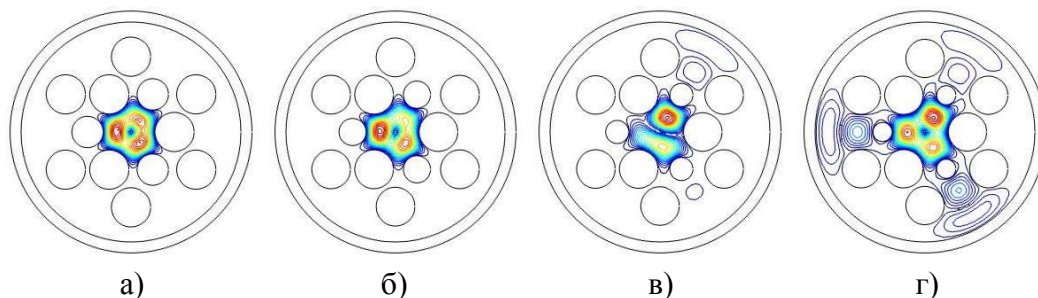


Рис. 1. Эволюция поперечного распределения электрического поля моды  $LP_{11}$  ( $HE_{21}$ ) в зависимости от соотношения ( $K$ ) размеров малых и больших отверстий структуры: а)  $K = 0,80$ ; б)  $K = 0,70$ ; в)  $K = 0,60$ ; г)  $K = 0,50$ . Длина волны излучения 1064 нм.

Было установлено, что при уменьшении параметра  $K$  от 0,80 до 0,50 величина интеграла перекрытия поля моды  $LP_{11}$  с активной областью, занимающей 80 % площади сердцевинной диаметром 100 мкм, снижается от 72,5 % до 45,8 %, что способствует усилению преимущественно  $LP_{01}$  моды. Величина интеграла перекрытия поля моды  $LP_{01}$ , не испытывающей, в отличие от моды  $LP_{11}$ , пространственного расщепления в условиях тригональной симметрии  $C_{3v}$ , составляет 78,9 % при  $K = 0,50$ .

1. В.В. Демидов и др., Оптический журнал **79**, 52 (2012).

# КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЛАНТАНОБОРОГЕРМАНАТНОГО СТЕКЛА С ПОМОЩЬЮ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ПРОСТРАНСТВЕННО-МОДУЛИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

А.С. Липатьев<sup>1</sup>, Т.О. Липатьева<sup>1</sup>, А.С. Ларькин<sup>1,2</sup>, Е.В. Лопатина<sup>1</sup>,  
С.В. Лотарев<sup>1</sup>, П.Г. Казанский<sup>1,3</sup>, В.Н. Сигаев<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

<sup>3</sup>*University of Southampton, United Kingdom*

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

Создание активных кристаллических областей заданной архитектуры с высоким пространственным разрешением в объеме стекла под действием лазерного излучения чрезвычайно актуально для развития оптоэлектроники и интегральной оптики. Недавно с помощью коррекции аберраций, возникающих при фокусировке фемтосекундного пучка в объеме стекла, путем его пространственной модуляции была показана возможность создания в стекле кристаллических волноводов с потерями на распространение на уровне 3 дБ/см, а также разветвителей на их основе [1, 2].

В данной работе изучалась кристаллизация лантаноборогерманатного (ЛБГ) стекла вблизи состава сегнетоэлектрика  $\text{LaBGeO}_5$  с использованием дифракционных оптических элементов (ДОЭ). В качестве источника лазерного излучения использовалась иттербиевая фемтосекундная лазерная система (длина волны 1030 нм, длительность, энергия и частота следования импульсов 300 фс, до 100 мкДж, до 500 кГц).

С помощью ДОЭ были получены лазерные пучки, согласованные с модами Эрмита-Гаусса высокого порядка, которые фокусировались в объеме ЛБГ стекла с целью его кристаллизации. Полученные кристаллические структуры изучены методами оптической микроскопии, микроспектрометрии комбинационного рассеяния и количественного микроанализа двулучепреломления. Продемонстрировано одновременное формирование 8 кристаллических каналов при делении исходного лазерного пучка на 11 пучков за счет введения решетки Даммана перед фокусирующим объективом. Из-за неравномерного распределения энергии импульса ( $\pm 10\%$ ) в пучках, которая является критически важным параметром для устойчивой кристаллизации, профиль каналов несколько различался, что говорит о необходимости использования более прецизионных ДОЭ и дальнейшей оптимизации параметров лазерного облучения.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант № 14.Z50.31.0009) и РФФИ (грант № 16-33-60081 и 14-03-00931).

1. A. Stone, et al., Scientific reports **5**, 10391 (2015).
2. A. Stone, et al., JOSA B **30**(5), 1234-1240 (2013).

## СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СО СТРУКТУРОЙ КОЛЬКВИРИИТА $\text{LiCa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{AlF}_6:\text{Ce}^{3+}$

А.А. Шавельев, А.С. Низамутдинов, В.В. Семашко, М.М. Марисов

*Казанский федеральный университет, Казань*

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

Фторидные кристаллы со структурой кольквириита  $\text{LiCaAlF}_6$  и  $\text{LiSrAlF}_6$ , активированные различными ионами, широко известны как активные среды твердотельных лазеров и детекторов частиц. Однако эти матрицы характеризуются низкой изоморфной емкостью кристаллической решетки по отношению к ионам церия, что приводит к низким значениям выходной энергии. С другой стороны, в этих матрицах обнаружены 3 типа примесных центров ионов  $\text{Ce}^{3+}$ , что приводит к еще большему ухудшению лазерной эффективности. В последние годы исследуются смешанные кристаллы, активированные редкоземельными ионами, для целей поиска оптимального химического состава и увеличения коэффициента распределения, а также улучшения лазерных характеристик. Как было показано ранее, изменение химического состава в кристаллах дает возможность контролировать коэффициент распределения примесных ионов, оптические свойства и фотохимическую стабильность. Здесь мы представляем данные о спектральных свойствах серии смешанных кристаллов  $\text{Ce}^{3+}:\text{LiCa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{AlF}_6$ , выращенных методом Бриджмена.

Изучение спектров поглощения показало, что коэффициент поглощения в смешанных кристаллах  $\text{LiCa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{AlF}_6:\text{Ce}^{3+}$  в 3 раза больше чем в  $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}^{3+}$  при одинаковом количестве  $\text{CeF}_3$  во всех соединениях. Спектры поглощения представлены в виде одной широкой полосы, представляющей свертку линий поглощения всех примесных центров ионов  $\text{Ce}^{3+}$ , существующих в данных кристаллах. Также показаны время-разрешенные спектры люминесценции ионов церия в смешанных кристаллах структуры кольквириита в температурном диапазоне от 5 К до 300 К. Мы изучили спектрально-кинетические характеристики  $5d-4f$  переходов церия в серии образцов смешанных кристаллов  $\text{LiCa}_{1-x}\text{Sr}_x\text{AlF}_6$  и обнаружили 3 оптически-неэквивалентных примесных центров ионов  $\text{Ce}^{3+}$ .

1. M. Dubinskii, V. Semashko, et al., J. Modern Opt. **40**, 1-5 (1993).
2. S. Wakahara, T. Yanagida, et al., Rad. Meas. **56**, 111-115 (2013).
3. V. Semashko, M. Dubinskii, et al., Las. Phys. **5**, 69-72 (1995).
4. V. Castillo, G. Quarles, et al., Proc. of SPIE, **4970**, 22-34 (2003).
5. A. Nizamutdinov, V. Semashko, et al., JETP Letters **91**, 21-23 (2010).

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКИ $\text{SrV}_4\text{O}_7$ И $\text{PbV}_4\text{O}_7$ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ, СТЕКЛООБРАЗНОМ И РАСПЛАВЛЕННОМ СОСТОЯНИЯХ МЕТОДАМИ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАСSEЯНИЯ СВЕТА

А.А. Соболев<sup>1</sup>, В.Е. Шукшин<sup>1</sup>, А.И. Зайцев<sup>2</sup>

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

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

E-mail: [shukshinve@lst.gpi.ru](mailto:shukshinve@lst.gpi.ru)

Детально изучены поляризованные спектры комбинационного рассеяния света (КРС) в монокристаллах диборатов стронция  $\text{SrV}_4\text{O}_7$  (SBO) и свинца  $\text{PbV}_4\text{O}_7$  (PBO) при 300 К. Проведён анализ колебательных спектров КРС этих соединений. Изучено изменение спектров КРС внутренних колебаний бор-кислородных комплексов при переходе от кристаллического в стеклообразное и расплавленное состояние. На основе полученных результатов анализируются закономерности формирования бор-кислородных комплексов в стеклах, расплавах и кристаллах диборатных составов  $\text{SrO} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$  и  $\text{PbO} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$  в сравнении с исследованным ранее составом  $\text{Li}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$ .

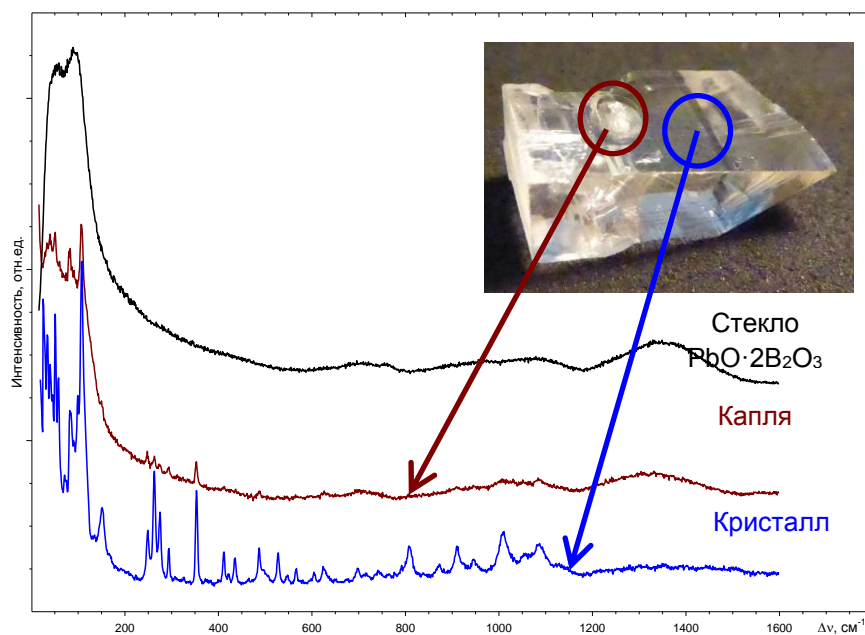


Рис. 1. Спектры КРС кристаллического РВО и капли застывшего на его поверхности расплава

## ЛАЗЕР НА ПОЛИКРИСТАЛЛЕ $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ С СЕЛЕКТИВНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

О.Ю. Биткина<sup>1,2</sup>, А.П. Савикин<sup>1</sup>, О.Н. Еремейкин<sup>1,2,3</sup>

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

<sup>2</sup> ООО «МелСиТек», Дзержинск

<sup>3</sup> Институт химии высокочистых веществ РАН, Нижний Новгород  
E-mail: [oybitkina@gmail.com](mailto:oybitkina@gmail.com)

Лазеры с длиной волны генерации перестраиваемой в спектральном диапазоне 2-3 мкм активно применяются для обнаружения малых концентрации молекулярных газов [1]. В настоящее время одной из перспективных задач является создание лазера на основе поликристаллов халькогенидов цинка с шириной линии спектра генерации порядка 1 нм. В данной работе в качестве активной среды использовался поликристалл  $\text{CrZnSe}$ .

Для осуществления перестройки длины волны лазера была собрана V-образная схема резонатора с призмным селектором. В качестве селектора использовались призмы из  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CaF}_2$ , расположенных под углом Брюстера. Активная среда резонатора представляла собой поликристалл  $\text{CrZnSe}$  толщиной 2 мм, на заднюю поверхность которого было нанесено «глухое» зеркало в спектральном диапазоне 2500-2900 нм. Усиливающий элемент был закреплен в медный радиатор, для уменьшения влияния тепловой линзы, наводимой источником накачки. В качестве источника накачки использовалось линейно-поляризованное излучение  $\text{Tm}:\text{YLF}$ -лазера на длине волны 1908 нм. Излучение из резонатора выводилось через выходное зеркало с коэффициентом пропускания на длине волны генерации порядка 20 %.

В данной работе была осуществлена перестройка длины волны генерации в диапазоне в диапазоне 2,5-2,68 мкм с помощью призмы из  $\text{SiO}_2$ . Перестройка с помощью этой призмы в более длинноволновый диапазон ограничивалась поглощением призмы на длине волны 2,7 мкм.

С помощью призмы из  $\text{CaF}_2$  длина волны  $\text{CrZnSe}$ -лазера перестраивалась в диапазоне 2,5-2,9 мкм. Дальнейшая перестройка ограничивалась уменьшением добротности зеркал резонатора и уменьшением в данном спектральном диапазоне коэффициента усиления активной среды.

Спектр генерации имел изрезанный вид, обусловленный поглощением паров воды в диапазоне длин волн 2,6-2,9 мкм. Ширина линии составила порядка 30 нм.

1. А.С. Егоров, О.Н. Еремейкин, А.П. Савикин, Квантовая электроника **42** (12), (2012).

## ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА ДВУХМИКРОННОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ Tm:YLF И Ho:YAG С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

С.Д. Великанов, К.В. Воронцов, В.А. Гарюткин, Н.Г. Захаров,  
В.Б. Коломеец, А.В. Ларионов, Г.Н. Номаконов, Ю.Н. Фролов  
*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-  
исследовательский институт экспериментальной физики, Саров*  
*E-mail: [voroncov.kv@ya.ru](mailto:voroncov.kv@ya.ru)*

Спектральный диапазон излучения тулиевых лазеров сосредоточен в области длин волн  $\sim 1,8 \div 2,1$  мкм и подходит для применения в различных сферах, в том числе для накачки гольмиевых сред. Так лазер на основе кристалла Tm:YLF имеет спектр излучения близкий к максимумам поглощения кристаллов Ho:YAG и Ho:YLF.

В последние годы Tm:YLF лазеры с диодной накачкой исследуются различными научными группами. В работах [1, 2] максимальная мощность накачки лазера на основе одного цилиндрического активного элемента с легированием 3 ат.% составляла  $\sim 70$  Вт и была ограничена термомеханической прочностью кристалла. В работах [2, 3] максимальная мощность накачки была повышена до  $135 \div 300$  Вт за счет установки в резонатор двух активных элементов с легированием 3,5 и 2,5 ат.%, соответственно. Однако в этих случаях использовались четыре источника накачки, что сильно усложняет конструкцию лазера.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований непрерывного Tm:YLF лазера на основе одного цилиндрического активного элемента с торцевой двухсторонней накачкой излучением лазерных диодных модулей. Расчеты показали, что увеличение мощности накачки Tm:YLF лазера до  $\sim 200$  Вт без разрушения кристалла и существенного снижения эффективности генерации возможно при уменьшении легирования до 2 ат.%.

В экспериментах с генерацией Tm:YLF лазера на  $\sigma$ -поляризации максимальная мощность накачки достигала значения 185 Вт и не приводила к разрушению активного элемента. Спектр излучения находился на длине волны  $\sim 1910$  нм и с помощью эталона Фабри-Перо отстраивался на  $\sim 1908$  нм при накачке кристалла Ho:YAG. В Ho:YAG лазере с односторонней накачкой излучением Tm:YLF лазера получена эффективность преобразования  $\sim 60$  %.

В случае генерации Tm:YLF лазера на  $\pi$ -поляризации максимальная мощность накачки составляла 145 Вт. Спектр генерации находился в области  $\sim 1890$  нм и с помощью эталона Фабри-Перо мог быть согласован с максимумом поглощения кристалла Ho:YLF на длине волны  $\sim 1892$  нм.

1. Н.Г. Захаров, О.Л. Антипов, А.П. Савикин и др., Квантовая электроника **39**, № 5, 410-414 (2009).
2. M. Schellhorn, Appl. Phys. B **91**, 71-74 (2008).
3. X. Duan, Y. Shen, B. Yao, et al., Adv. Solid State Lasers **68**, 343 (2014).

## ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНАЯ СИСТЕМА ГЕНЕРАТОР-УСИЛИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ Ho:YAG

С.Д. Великанов, К.В. Воронцов, В.А. Гарюткин, Н.Г. Захаров,  
Г.М. Мищенко, А.В. Мухин, А.С. Надёжин, Н.И. Николаев, Ю.Н. Фролов  
*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-  
исследовательский институт экспериментальной физики, Саров*  
*E-mail: [Nikitagz@rambler.ru](mailto:Nikitagz@rambler.ru)*

В настоящее время к разработке твердотельных лазеров, работающих в области  $\sim 2$  мкм проявляется большой интерес [1]. В первую очередь это связано с тем, что излучение с такой длиной волны попадает в одну из полос прозрачности атмосферы. Двухмикронное излучение оказывается востребованным для решения различных задач в промышленности и медицине. Кроме того, импульсно-периодическое излучение с длиной волны  $\sim 2$  мкм может использоваться для накачки параметрических генераторов света на кристалле  $ZnGeP_2$  [1, 2].

Среди лазерных кристаллов, излучающих в области  $\sim 2$  мкм, наиболее широкое практическое распространение получил алюмоиттриевый гранат  $Y_3Al_5O_{12}$  (YAG), легированный ионами  $Ho^{3+}$  [1]. Он обладает высокой механической прочностью и хорошей теплопроводностью. Эффективная накачка кристаллов Ho:YAG может быть осуществлена излучением тулиевых лазеров с длиной волны  $\sim 1,9$  мкм.

Особый интерес представляет импульсно-периодическая генерация Ho:YAG систем с высокой пиковой мощностью. При этом одним из наиболее важных ограничивающих факторов повышения энергии импульсов за счет снижения частоты следования является время жизни возбужденного состояния, на которое влияют процессы ап-конверсии. Процессы ап-конверсии приводят к снижению эффективности лазера и образованию сильной тепловой линзы в активных элементах, что особенно сильно проявляется при низкой частоте следования импульсов. Для уменьшения данных явлений можно применять кристаллы с пониженным легированием.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований Ho:YAG системы, состоящей из задающего генератора и трех усилителей. Частота следования импульсов составляла порядка 100 Гц. Были проведены исследования влияния степени легирования активных элементов на работу лазерного источника. Модуляция добротности задающего генератора осуществлялась акустооптическим затвором на основе кристаллического кварца. Эффективность преобразования излучения накачки в импульсно-периодическую генерацию достигала 10 %. Параметр распространения пучка  $M^2$  составил  $\sim 1,3$ .

1. В.М. Walsh, Laser Physics. **19**(4), 855–866 (2009).
2. P.A. Budni, L.A. Pomeranz, M.L. Lemons et al., J. Opt. Soc. Am. **B 17**, 723-728 (2000).



ИДЕНТИФИКАЦИЯ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ,  
ИНДИВИДУАЛЬНЫХ АТОМОВ Вi И Вi-КЛАСТЕРОВ  
В АКТИВИРОВАННЫХ ВИСМУТОМ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Л.Д. Исхакова<sup>1</sup>, Ф.О. Милович<sup>1</sup>, В.М. Машинский<sup>1</sup>, А.С. Зленко<sup>1</sup>,  
М.В. Пресняков<sup>2</sup>, А.Л. Васильев<sup>2</sup>, Б.И. Галаган<sup>3</sup>,  
С.Е. Сверчков<sup>3</sup>, Е.М. Дианов<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>«НИЦ» Курчатовский институт, Москва

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

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

Методами рентгеновской и электронной дифракции, сканирующей аналитической и просвечивающей микроскопии высокого разрешения изучены распределение элементов и природа нановключений в волоконных световодах (ВС) и преформах для них. Составы сердцевин подразделяются на серии: I - Вi:SiO<sub>2</sub>, II - Вi:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>, III - Вi:GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>, IV - Вi:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> и V - Вi:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>- GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>. В них идентифицированы нанокристаллические включения металлического Вi, Вi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, кварца, кристобалита, GeO<sub>2</sub> и Вi<sub>4</sub>(GeO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. Наличие нановключений может являться причиной оптических потерь в волоконных световодах. Показано, что нановключения могут образовываться в происходящих с достаточно высокой скоростью процессах изготовления преформ и ВС даже при низких концентрациях легирующих элементов. Установлена зависимость природы нановключений от концентрации Вi и соотношения концентраций катионов в сердцевинах ВС. Наибольшая склонность к процессам образования нанокристаллов обнаружена в германо-силикатных ВС (серия III). Фосфоросиликатные системы неустойчивы под воздействием электронного пучка (200 кэВ), что проявляется во времени наноразмерной гетерогенностью состава, наноструктурным расслоением стекла и частичным плавлением образца.

Новые возможности для визуализации индивидуальных атомов открывает растровая просвечивающая электронная микроскопия (STEM) с корректором сферической аберрации и высокоугловым кольцевым детектором (HAADF). Данным методом исследованы активированные висмутом стекла системы MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> с изученными ранее спектроскопическими характеристиками. Впервые идентифицированы как индивидуальные ионы Вi, так и Вi-кластеры и установлена зависимость размеров Вi-кластеров от концентрации висмута в составе стекол. В соответствии с размерами кластеров в магниево-алюмо-силикатных стеклах с содержанием висмута порядка 0,25 ат.% наиболее вероятными формами представляются Вi-димеры и Вi-мономеры. При этом соотношение долей димеров и мономеров изменяется при переходе от окислительных к восстановительным условиям синтеза стекла. С увеличением концентрации висмута количество атомов в Вi-кластерах увеличивается.

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И ГЕНЕРАЦИОННЫЕ  
СВОЙСТВА КЕРАМИКИ  $Y_2O_3$  И КРИСТАЛЛОВ  
СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ИТТРИЕМ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ,  
ЛЕГИРОВАННЫХ РЗ-ИОНАМИ ( $Er^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$ ,  $Ho^{3+}$ )

А.Н. Чабушкин<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>2</sup>, В.В. Балашов<sup>3</sup>,  
Ю.Л. Копылов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет, Саранск*

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

<sup>3</sup>*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

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

Твердотельные лазеры, генерирующие излучение в ближнем ИК спектральном диапазоне (1,5-2,1 мкм) представляют большой интерес для различных практических применений: в линиях связи, в медицине, в лидарных устройствах. В качестве активных сред твердотельных лазеров, генерирующих излучение в спектральном диапазоне 1,5-1,65 мкм используются кристаллы, стекла и керамические материалы, легированные ионами  $Er^{3+}$ . В качестве источников лазерного излучения в области 1,9-2,1 мкм могут использоваться твердотельные лазеры на основе материалов, легированных ионами  $Tm^{3+}$  и  $Ho^{3+}$  [1-2].

Перспективным направлением в современной лазерной физике является синтез тугоплавких оксидных материалов, обладающих уникальными физико-химическими свойствами. К таким соединениям относятся кристаллы  $Y_2O_3$  и  $ZrO_2-Y_2O_3$ . В то же время существуют определенные проблемы при выращивании монокристаллов  $Y_2O_3$ , легированных РЗ-ионами, больших размеров и необходимого оптического качества [3]. В связи с этим, значительный акцент делается на развитие технологии получения высокопрозрачной керамики на основе  $Y_2O_3$ , легированной РЗ-ионами.

В настоящей работе приводятся результаты исследования спектрально-люминесцентных и генерационных свойств кристаллов стабилизированного иттрием диоксида циркония ( $ZrO_2-Y_2O_3$ ) и керамики оксида иттрия ( $Y_2O_3$ ), легированных ионами  $Er^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$  и  $Ho^{3+}$ . Также представлены рекомендации по их использованию в качестве активных сред твердотельных лазеров с диодной накачкой.

1. В.М. Walsh, Laser Physics **19**(4), (2009).
2. Ch. Krankel, IEEE Journal of selected topics in quantum electronics **21**(1), (2015)
3. K. Petermann, G. Huber, L. Fornasiero, Journal of Luminescence **87**, 89 (2000).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ СПЕКТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ИОНОВ НЕОДИМА В АНИЗОТРОПНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Г.В. Шилова, П.Г. Зверев, А.А.Сироткин

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

*E-mail: [shilova@lst.gpi.ru](mailto:shilova@lst.gpi.ru)*

Одним из перспективных путей получения терагерцевого излучения является использование двухчастотных лазеров с последующей генерацией разностной частоты. Известно, что спектр люминесценции примесных редкоземельных ионов сильно изменяется в анизотропном кристалле в зависимости от его ориентации. Его максимум сдвигается от одной длины волны к другой и может существовать ориентация, дающая лазерную генерацию на двух длинах волн одновременно. Ранее в работе [1] была продемонстрирована двухчастотная генерация на кристалле  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ .

Целью настоящей работы было исследовать возможность управления спектральной зависимостью коэффициента усиления в ионах  $\text{Nd}^{3+}$  на оптическом переходе  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$  в области 1,06 мкм в анизотропных кристаллах  $\text{SrWO}_4$ ,  $\text{YLiF}_4$ ,  $\text{YVO}_4$  и  $\text{YAlO}_3$ .

В экспериментальной установке использовался диодный лазер с волоконным выводом излучения, который давал деполяризованное излучение на длине волны 808 нм. Возбуждающее излучение фокусировалось на исследуемом образце, который мог вращаться в плоскости перпендикулярной падающему лучу. Оптическая система из двух линз и призмы Глана-Томпсона селектировала люминесценцию только одной поляризации и направляла на входную щель спектрометра. Спектр люминесценции регистрировался с помощью спектрометра и ССД линейки, сопряженной с персональным компьютером. Образцы были вырезаны перпендикулярно оптической оси С, вращение кристалла позволяло выделять люминесценцию с поляризацией плавно меняющейся от  $\pi$  до  $\sigma$ .

Максимум спектра люминесценции для ионов  $\text{Nd}^{3+}$  в кристалле  $\text{SrWO}_4$  для  $\pi$ -поляризации наблюдается на длине волны 1055,9 и для  $\sigma$ -поляризации наблюдается на 1062,7 нм. При повороте кристалла на угол  $45^\circ$  к оси С наблюдается одинаковая интенсивность обеих линий. Это свидетельствует о возможности получения двухчастотной генерации в лазере с активным элементом  $\text{Nd}^{3+}:\text{SrWO}_4$  с данной ориентацией.

В работе также были исследованы поляризационные зависимости спектров люминесценции ионов  $\text{Nd}^{3+}$  в кристаллах  $\text{YVO}_4$ ,  $\text{YAlO}_3$ ,  $\text{SrWO}_4$  и определены ориентации, при которых возможна двухчастотная генерация.

1. A.A. Sirotkin, S.V. Garnov, V.I. Vlasov, et al., *Quantum Electron.* **42**, 420–426 (2012).

# МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В СРЕДЕ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

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, природа которого связана с совместным действием нелинейных и дисперсионных эффектов [1].

Для волнового пакета, распространяющегося в соответствующей среде с групповой скоростью, которая равна скорости перемещения БВП можно преобразовать уравнение для амплитуды огибающей волнового пакета к виду [2, 3, 4]:

$$\frac{\partial}{\partial z} \bar{A} - if^2(z) D \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \bar{A} + if(z) R |\bar{A}|^2 \bar{A} = 0 \quad (1)$$

где  $\tau = t - \frac{\partial \beta}{\partial \omega} z$  – время в бегущей системе координат,  $\beta = n_0 \omega / c$  – постоянная распространения волнового пакета в световоде, функция  $f(z)$  – функция, определяемая глубиной и частотой модуляции показателя преломления волновода.

Исследованы условия возникновения, область существования, и другие характеристики модуляционной неустойчивости волновых пакетов, распространяющихся в нелинейной среде с бегущей волной показателя преломления. Получены зависимости интегрального инкремента усиления от частоты отстройки при различных параметрах среды и БВП.

Показана возможность распада квазинепрерывного волнового пакета на последовательность ультракоротких импульсов на более коротких длинах распространения с меньшей длительностью и большей амплитудой по сравнению с нелинейными средами, в которых бегущая волна показателя преломления отсутствует.

1. G. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, Springer, (2007).
2. В.П. Торчигин, Квантовая электроника **22**(5), 509 (1995).
3. В.Н. Kolner, IEEE Journal of Quantum Electronics **30**( 8), 1951 (1994)
4. И.О. Золотовский, В.А. Лапин, Д.И. Семенцов, Квантовая электроника **46**(1), 39–44 (2016).

# АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ АП-КОНВЕРСИОННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ С ПОМОЩЬЮ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СПЕКТРОВ

А.В. Михеев<sup>1,2</sup>, Б.Н. Казаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань

<sup>2</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

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

С помощью корреляционных спектров проанализированы механизмы возбуждения зелёной и красной ап-конверсионной люминесценции кристалла  $\text{LiYbF}_4:\text{Ho}^{3+}(0,2 \text{ ат.}\%)$ . Для возбуждения люминесценции использовалось излучение полупроводникового лазерного диода с мощностью 0,755 Вт и  $\lambda_{\text{ex}} = 933 \text{ нм}$ . Спектры люминесценции регистрировались при различных положениях  $\Delta z$  перетяжки лазерного луча относительно кристалла, т.е. при различной объемной плотности энергии излучения накачки в кристалле (аналог Z-сканирования). Для выявления статистической взаимосвязи между зависимостью от  $\Delta z$  интенсивности люминесценции  $J(\lambda_0, \Delta z)$  на фиксированной длине волны  $\lambda_0$  и аналогичной зависимостью  $J(\lambda, \Delta z)$  на всех остальных длинах волн  $\lambda$ , вычислялся коэффициент корреляции Пирсона  $r(\lambda_0, \lambda)$ . С его помощью строился корреляционный спектр  $R(\lambda_0, \lambda) = 0.5(1 + r(\lambda_0, \lambda))$ . Переходы между уровнями энергии ионов  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Ho}^{3+}$ , происходящие на длинах волн  $\lambda$ , для которых  $R(\lambda_0, \lambda) \approx 1$ , играют определяющую роль в формировании населенности уровня энергии, отвечающего за люминесценцию на длине волны  $\lambda_0$ .

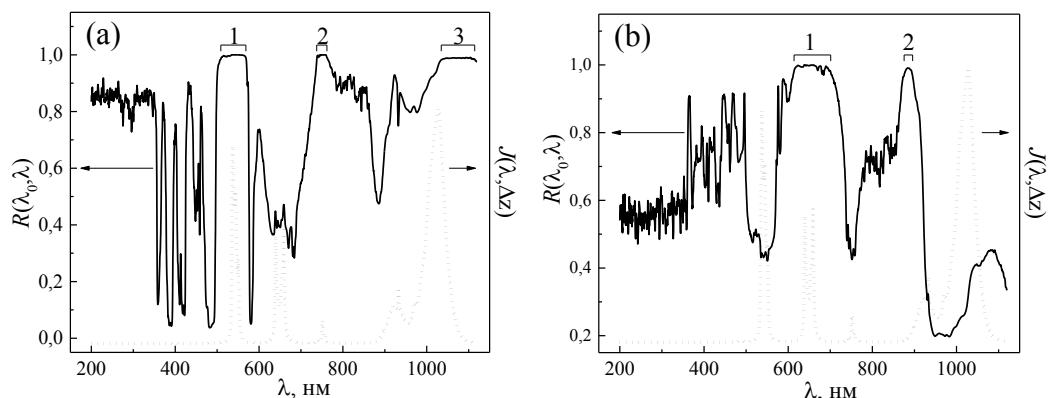


Рис. 1. Корреляционные спектры для зелёной (а)  $\lambda_0 = 544 \text{ нм}$  и красной (б)  $\lambda_0 = 640 \text{ нм}$  люминесценции кристалла  $\text{LiYbF}_4:\text{Ho}^{3+}(0,2 \text{ ат.}\%)$  - сплошная линия. Пронумерованные скобки указывают на участки корреляционного спектра, в пределах которых  $R(\lambda_0, \lambda) \approx 1$ . Спектр люминесценции при  $\Delta z = 2 \text{ мм}$  - пунктирная линия

Корреляционные спектры (рис. 1) позволили установить главные механизмы возбуждения зелёной люминесценции  $\text{Ho}^{3+}(\{^5\text{F}_4, ^5\text{S}_2\} \rightarrow ^5\text{I}_8)$ : 1)  $\{^5\text{H}_5, ^5\text{H}_6, ^5\text{G}_2\} \rightarrow \{^5\text{F}_4, ^5\text{S}_2\}$ ,  $^5\text{I}_6 \rightarrow \{^5\text{F}_4, ^5\text{S}_2\}$ ; 2)  $^5\text{I}_4 \rightarrow \{^5\text{F}_4, ^5\text{S}_2\}$  и красной люминесценции  $\text{Ho}^{3+}(^5\text{F}_5 \rightarrow ^5\text{I}_8)$ : 1)  $\{^5\text{G}_4, ^3\text{K}_7\} \rightarrow ^5\text{F}_5$ ,  $^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{F}_5$ ; 2)  $^5\text{I}_5 \rightarrow ^5\text{F}_5$ . Процессы 1) вызваны передачей энергии от ионов  $\text{Yb}^{3+}$  и/или от излучения накачки к ионам  $\text{Ho}^{3+}$ , а процессы 2) - инфракрасной люминесценцией  $^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{I}_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$ .

## ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ КРИСТАЛЛОВ DKDP

А.Н. Носкова, А.П. Прохоров

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

*E-mail: [anna\\_13.08@mail.ru](mailto:anna_13.08@mail.ru)*

Ведущие производители новых поколений лазеров с высокой импульсной энергией, лазеров со сверхвысокой пиковой мощностью, лазеров со сверхкороткой длительностью излучения заинтересованы в нелинейно-оптических элементах высокого качества. Наиболее подходящими нелинейно-оптическим материалом для указанных выше лазерных комплексов является кристалл KDP и его дейтерированный аналог DKDP [1, 2]. На сегодняшний день для удовлетворения требований ведущих производителей лазерной техники кристаллы, используемые в электрооптических приборах, должны иметь высокий процент дейтерирования (>97,5 %) и обладать достаточно высоким омическим сопротивлением (>10 ГОм). Таким образом, измерение электропроводности является важной характеристикой данных кристаллов.

Исследования показали, что на величину удельной электропроводности оказывают влияние ростовые дефекты и метод выращивания кристаллов. Образцы для измерений изготавливались в виде прямоугольного параллелепипеда размерами от 8×8×16 мм до 20×20×10 мм. Кристаллы, из которых вырезались образцы для измерений, выращивались двумя методами: скоростной рост профилированных моносекториальных кристаллов и традиционный рост монокристаллов из раствора. Измерения удельной электропроводности проводились при комнатной температуре. На торцы образцов с помощью полноразмерных электродов подавалось напряжение 4500 В ( $U$ ). Удельная проводимость ( $\sigma$ ) рассчитывалась по формуле (1).

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{R * S}{L}, \quad (1)$$

$R = \frac{U}{I}$  – сопротивление образца;  $I$  – величина тока;  $\rho$  – удельное сопротивление образца;  $S$  – площадь поперечного сечения образца;  $L$  – длина образца.

1. В.М. Пузиков, В.И. Сало, М.И. Колыбаева и др., *Монокристаллы KDP/DKDP для мощных лазеров. Выращивание, свойства, применение*, Харьков: Ин-т монокристаллов, 336 (2004).
2. А.Н. Левченко, Вестник Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, Серия «Радиофизика и электроника» **16**(927), 22-30 (2010).

# ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ $\text{Nd}^{3+}$ НА СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО ФОСФАТНОГО СТЕКЛА

А.А. Степко

*Российский химико-технологический университет*

*им. Д.И. Менделеева, Москва*

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

Стекла на фосфатной основе, активированные редкоземельными ионами, широко применяются в качестве активных сред твердотельных лазеров, и исследования по совершенствованию составов не прекращаются [1]. Значительное неоднородное уширение рабочих лазерных переходов в стеклах обуславливает возможность перестройки длины волны лазерной генерации, а также возможность генерации импульсов ультракороткой длительности [2, 3].

Целью работы являются синтез стекол на фосфатной основе сложного состава, активированных ионами  $\text{Nd}^{3+}$  и исследование их оптических свойств. В результате экспериментов были установлены параметры варки и выработки стекол составов (мольн.%) (100-X) ( $52,17 \text{ P}_2\text{O}_5$ ,  $8,384 \text{ BaO}$ ,  $17,059 \text{ K}_2\text{O}$ ,  $5,35 \text{ SiO}_2$ ,  $9,624 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ,  $7,386 \text{ B}_2\text{O}_3$ ) + X  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ , где X = 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,6; 3,2; 6,4.

Исследования по определению времени затухания люминесценции и квантового выхода показали, что данная фосфатная матрица является хорошей основой для получения люминесцирующих сред с высоким квантовым выходом в диапазоне концентраций ионов  $\text{Nd}^{3+}$  от  $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-1}$  до  $7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-1}$ , и высокой оптической однородностью даже при варке в тиглях малого объема, что особенно важно для создания мелкосерийных изделий с особыми свойствами. Исследования спектральных характеристик полученных образцов стекол выявили наличие широкой полосы люминесценции вблизи 1053 нм, ширина которой составляет  $\sim 27$  нм. Также важным результатом проведенной работы является возможность введения в разработанную матрицу больших количеств оксидов РЗЭ (до 7-8 мольн.%) с сохранением значительного квантового выхода ( $\sim 40$  %), что открывает возможность соактивации стекла различными РЗЭ с целью создания высокоэффективных люминесцирующих сред.

1. Н.Е. Алексеев и др., *Лазерные фосфатные стекла*, М.: Наука, 1980.
2. А.А. Бадалян и др., *Квантовая электроника* **14**, 2195-2197(1987).
3. L. Hu, et al., *High Power Laser Science and Engineering* **2**, (2014).

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЧИСТЫХ ТЕЛЛУРИТНЫХ СТЕКОЛ

М.П. Смаев<sup>1</sup>, В.В. Дорофеев<sup>2</sup>, А.Г. Охримчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Международный центр лазерных технологий, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва*

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

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

Стекла на основе диоксида теллура характеризуются низкой энергией фононов и могут быть получены с предельно низкой концентрацией переходных металлов и гидроксильных групп, что делает их прозрачными в ближней и средней областях ИК. Хорошие вязкоупругие характеристики, механическая прочность и высокий показатель преломления делают теллуридные стекла чрезвычайно привлекательными для волноводных устройств ИК оптики. Мы исследовали высокочистые цинк- и вольфрамат-теллуридные стекла, модифицированные оксидами молибдена, лантана или висмута. Сткла были получены плавлением смеси высокочистых оксидов в золотом или платиновом тиглях в реакторе из кварцевого стекла в атмосфере кислорода. Использовали оксиды  $\text{TeO}_2$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{MoO}_3$  собственного производства и коммерчески доступные оксиды  $\text{ZnO}$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . Содержание переходных металлов в полученных стеклах не превышало 1-2 ppm, поглощение гидроксильных групп на  $\sim 3$  мкм составляло  $0,001-0,01 \text{ см}^{-1}$ .

Методом Z-сканирования был экспериментально определён коэффициент керровской нелинейности  $g$ , характеризующий изменение показателя преломления  $Dn = g \times I$ . Образцы помещались на моторизованную систему позиционирования и сдвигались относительно фокуса линзы вдоль оси пучка фемтосекундного лазера (180 фс, 1030 нм, 1 кГц). Для всех образцов получено  $g > 0$ . Наибольшая  $g$  была получена для теллуридного стекла с добавкой оксида висмута:  $g = 5,6 \times 10^{-6} \text{ см}^2/\text{ГВт}$ .

Стекла, модифицированные оксидами вольфрама и висмута, были протестированы на предмет лазерной записи канальных волноводов. С этой целью пучком фемтосекундного лазера, сфокусированным под поверхностью полированной пластинки объективом с  $\text{NA}=0,85$ , с различной энергией, частотой повторения импульсов, и скоростью сканирования пластинки была записана серия треков изменённого показателя преломления. Пороговая энергия модификации стекла составила  $E_{ir} = 14$  нДж. В широком диапазоне энергий импульса (14–160 нДж) получены гладкие однородные треки. Результаты исследований свидетельствуют о перспективности исследованных составов стёкол для создания нелинейных волноводных устройств.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант № 14.Z50.31.0009) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 15-43-02185 и 15-03-08324).



## НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ДВУХФОТОННОМ МЕЖЗОННОМ ПИКОСЕКУНДНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ КРИСТАЛЛА $\text{PbWO}_4$

В.И. Луканин, А.Я. Карасик

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

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

Предложен экспериментальный метод исследования динамики нелинейных процессов при межзонном двухфотонном пикосекундном возбуждении кристаллов вольфраматов. Метод продемонстрирован при возбуждении кристалла  $\text{PbWO}_4$  последовательностью мощных 25 пикосекундных импульсов с длиной волны 523,5 нм и непрерывным пробным излучением с длиной волны 633 нм. Измерение пропускания пробного излучения при возбуждении кристалла позволяет в широком временном диапазоне от единиц наносекунд до единиц секунд исследовать влияние двухфотонного межзонного поглощения, Керровской и тепловой нелинейности показателя преломления на свойства излучения накачки. Временное разрешение регистрирующей аппаратуры позволяет различать быстрые и медленные нелинейные процессы, имеющие электронную и тепловую природу, включая генерацию тепловой линзы и термодиффузию. При вырожденном двухфотонном возбуждении кристалла в отсутствие внешнего пробного излучения показан альтернативный метод исследования динамики трансформации наведенного поглощения и соответственно динамики развития нелинейных процессов.

Мы исследовали динамику нелинейных процессов при межзонном возбуждении кристалла  $\text{PbWO}_4$  последовательностью пикосекундных импульсов и непрерывным пробным излучением во временном диапазоне от единиц наносекунд до единиц секунд. Выявлены временные области, обусловленные влиянием нелинейного процесса ДФП на рост и релаксацию наведенного однофотонного поглощения в наносекундном – секундном диапазоне длительностей. Рассмотрены процессы, связанные с генерацией и миграцией электронных возбуждений к ловушкам. Показано, что в параксиальной области пикосекундного возбуждения кристалла наводится термолинза, определены временные рамки образования этой линзы и ее разрушения вследствие процесса термодиффузии. Процесс релаксации электронных возбуждений с уровней ловушек в основное состояние происходит за времена порядка сотни миллисекунд. При вырожденном пикосекундном двухфотонном возбуждении кристалла продемонстрирована динамика трансформации пропускания пробной волны.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 16-02-00338 и грантом РФФИ № 14-22-00248.

# СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ ИОНОВ ТУЛИЯ В КРИСТАЛЛАХ ИТТРОФЛЮОРИТА

Е.А. Вагапова<sup>1</sup>, О.К. Алимов<sup>2</sup>, М.Е. Дорошенко<sup>2</sup>, К.А. Мартынова<sup>2</sup>,  
В.А. Конюшкин<sup>2</sup>, А.Н. Накладов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

<sup>2</sup>*Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

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

Исследование фторидных кристаллов ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SrF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$ ) и их твердых растворов ( $\text{CaF}_2:\text{SrF}_2$ ,  $\text{CaF}_2:\text{BaF}_2$ ,  $\text{SrF}_2:\text{BaF}_2$ ,  $\text{CaF}_2:\text{YF}_3$ ), легированных ионами тулия, обусловлено возможностью создания на их основе эффективных компактных лазеров в области двух микрон с диодной накачкой. Особенностью фторидных кристаллов, является процесс формирования в них различных типов оптических центров (от одиночных до различных кластеризованных центров) с ионами  $\text{P}^{3+}$  и, как правило, с компенсацией избытка заряда активатора междуузельными ионами фтора [1, 2]. Следовательно, спектрально-генерационные характеристики фторидов, легированных ионами  $\text{Tm}^{3+}$ , сильно зависят от типа оптических центров и от матрицы, используемой в качестве активного элемента.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния концентрации фторида иттрия на спектрально-кинетические характеристики оптических центров ионов тулия в кристалле иттрофлюорита  $\text{CaF}_2:\text{YF}_3$  методом селективного лазерного возбуждения.

В качестве источника возбуждения ионов  $\text{Tm}^{3+}$  использовалось излучение параметрического лазера (Solar 604 ОРО). Измерение кинетики затухания и спектров люминесценции проводилось на монохроматоре МДР-23. Регистрация 2 мкм излучения осуществлялось фотосопротивлением PbS, сигнал с которого поступал на цифровой осциллограф Tektronix, сопряженный с компьютером.

Измерены спектры поглощения, люминесценции и кинетики затухания люминесценции. На основании спектрально-кинетических исследований кристалла  $\text{CaF}_2:\text{YF}_3:0,1$  вес.%  $\text{TmF}_3$  обнаружены три типа оптических центров тулия: кластеризованный низкосимметричный центр, кластеризованный Y-Tm центр со свойствами близкими к тетрагональному центру, что и в кристалле  $\text{CaF}_2$ , высокосимметричный долгоживущий центр с тетрагональным локальным окружением ионов  $\text{Tm}^{3+}$ . Проведена оценка времен жизни этих центров, которые равны  $t_1 \sim 5$  ms,  $t_2 \sim 15$  ms,  $t_3 \sim 170$  ms соответственно.

1. N. Strickland, G.D. Jones, Phys. Rev. B **56**, 10916 (1997).
2. О.К. Alimov, М.Е. Doroshenko, V.A. Konyushkin at al., J. of Lumin. **167**, 16 (2015).

# ТРЕХМИКРОННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ИОНОВ ГОЛЬМИЯ В КРИСТАЛЛЕ YSGG ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ КОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Ю.В. Керв<sup>1</sup>, П.Г. Зверев<sup>2</sup>, А.А. Сироткин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

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

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

Твердотельные лазеры, работающие в спектральной области от 1,5 до 3 мкм, находят большое практическое применение для медицины и биологии. Кристаллы, активированные ионами гольмия, используются для создания лазеров, работающих в этой области спектра. В работе [1] был продемонстрирован лазер на кристалле YSGG, соактивированном ионами  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Cr}^{3+}$  с ламповым возбуждением, работавший на оптическом переходе  $^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7$  в области 2,84-3,05 мкм. В активном элементе происходила каскадная передача возбуждения от ионов  $\text{Cr}^{3+}$  к ионам  $\text{Yb}^{3+}$  и дальше  $\text{Ho}^{3+}$ . В результате возникала инверсия населенности между уровнями  $^5\text{I}_6$  и  $^5\text{I}_7$  и развивалась генерация. Время жизни возбуждения на уровне  $^5\text{I}_6$  в ионах  $\text{Ho}^{3+}$  в кристалле  $\text{Ho}^{3+}\text{Yb}^{3+}\text{Cr}^{3+}:\text{YSGG}$  составляет 470 мкс, что значительно короче времени жизни уровня  $^5\text{I}_7$  (9,8 мс). В результате генерация может наблюдаться только короткое время, до тех пор пока не сравняются населенности уровней  $^5\text{I}_6$  и  $^5\text{I}_7$ .

Целью настоящей работы было экспериментально исследовать возможность получения лазерной генерации на самоограниченном переходе  $^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7$  в ионах  $\text{Ho}^{3+}$  в кристалле  $\text{Ho}^{3+}\text{Yb}^{3+}\text{Cr}^{3+}:\text{YSGG}$  при накачке наносекундными импульсами лазерного излучения с длиной волны 1,14-1,18 мкм.

В качестве источника возбуждения использовалось излучение лазера Малсан-203 на кристалле LiF с  $\text{F}^{2-}$  центрами окраски плавно и непрерывно перестраиваемого в спектральной области 1,1-1,25 мкм с накачкой Nd:YAG лазером [2]. Энергия импульсов излучения с длиной волны около 1,16 мкм равнялась 25 мДж при длительности импульсов 20 нс и частоте следования импульсов 5 Гц. Кристалл  $\text{Ho}^{3+}\text{Yb}^{3+}\text{Cr}^{3+}:\text{YSGG}$  был изготовлен в виде цилиндра диаметром 3 мм и длиной 65 мм. Использовалась продольная схема возбуждения. При использовании плоских зеркал с коэффициентом отражения близким к 100 % наблюдалась генерация с длиной волны в области 3 мкм. Обсуждается дальнейшая оптимизация оптических элементов резонатора лазера с целью получения эффективной генерации такого лазера.

1. А.Ф. Умысков, Ю.Д. Заварцев, А.И. Загуменный и др., Квантовая электроника **23**, 791 (1996).
2. Т.Т. Басиев, П.Г. Зверев, А.Г. Папашвили, и др., Квантовая электроника **24**, 591 (1997).



**LASER MATERIALS  
AND TECHNOLOGY**

## TO HISTORY OF CREATION OF THE LASER

V.V. Osiko<sup>1</sup>, M.N. Popova<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*Institute of Spectroscopy, RAS, Troitsk, Moscow, Russia*

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

Laser emission was first observed on May 15, 1960, by Th. Maiman in ruby. Maiman was with the Hughes Aircraft Company at that time. He was not allowed to work with “unpromising” ruby but he continued alone and, finally, has won a dramatic race between several American and Soviet research groups. Maiman has described these events and his life in an interesting book [1].

Intensive studies in the USA and USSR preceded invention of the laser. The Nobel prize in physics “for fundamental work in the field of quantum electronics, which has led to the construction of oscillators and amplifiers based on the maser-laser principle” was given to Charles Townes (the MIT), Nicolay Basov, and Aleksandr Prokhorov (the Lebedev Physical Institute). Theodore Maiman was unjustly deprived of the Nobel prize. He writes in his book: “It would be reasonable to recognize the Russian physicist Fabricant. Although he did not create a laser, he suggested the idea of a laser earlier than the first laser works appeared”.

Indeed, the first work directly related to laser was performed in the USSR before the War. In 1939 in the Lebedev Physical Institute, V.A. Fabricant has defended his Dr. Sci. Thesis, in which conditions for a negative absorption were formulated and the method was suggested to create the inverted population in a gas discharge.

Let us return to the time when the first laser started to operate. As early as at the beginning of 1959, N.G. Basov has organized research in the Lebedev Physical Institute, aimed to create a laser. In April 1960, he succeeded in getting funding and addressed the head of the luminescence laboratory M.D. Galanin with a suggestion to create a ruby laser. M.D. Galanin, A.M. Leontovich, and Z.A. Chizhikova started to work on this problem. In the spring of 1961 the laser setup was ready but the lasing was first observed on September 18, 1961. In September 1961, I have entered the research group of Dr. Leontovich, as student of the Moscow Institute of Physics and Technology. In this lecture I’ll remember this time and also tell about first laser studies in Ukraine and other Soviet republics. “Notwithstanding certain shortcomings of the soviet system, a strategically balanced program of scientific and technical development was realized in the country. Laser studies were a part of this program”, - writes the head of the Optical Division of the Lebedev Physical Institute A.V. Masalov in the afterword to the collection of articles dedicated to the 50<sup>th</sup> anniversary of the laser era [2].

1. T.H. Maiman, *The Laser Odyssey*. Laser Press, 2000.
2. A.V. Masalov. *LPI Division of Optics: The first work on lasers*. Moscow : LPI, 2010.

ALEXANDER M. PROKHOROV AND KAZAN QUANTUM  
ELECTRONICS SCHOOL'S FORMATION

V.V. Semashko

*Kazan federal University, Kazan, Russia*

*E-mail: [vadim.semashko@kpfu.ru](mailto:vadim.semashko@kpfu.ru)*

Development retrospectives of Kazan quantum electronics school are presented. The important role of Alexander M. Prokhorov and his colleagues from Physical Institute and General Physics Institute of Russian Academy of Science to enhance optical spectroscopy and laser physics in Kazan are demonstrated. The progress of Kazan university in above mentioned fields and recent activities are discussed.

1. A.V. Aganov, M.Kh. Salakhov, *The history of physics and astronomy in Kazan University for the period of 200 years*, Kazan : Kazan State University, 2007.
2. N.S. Altshuler, V.A. Golenishev-Kutuzof, A.L. Larionov, *An annals of scientific activity and personal life of S.A.Altshuler*, Kazan : Kazan State University, 2011.

## SOLID DIODE-PUMPED LASERS BASED ON A TRANSPARENT OPTICAL CERAMICS

P.A. Ryabochkina

*National Research Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia*

*E-mail: [ryabochkina@freemail.mrsu.ru](mailto:ryabochkina@freemail.mrsu.ru)*

In present time, optical ceramics doped with rare-earth and transition ions, is a promising material for optical elements of lasers. The manufacture of optical laser ceramic has several advantages compared with single-crystal growth technology. It allows to get active optical elements with larger size, with a high concentration, as well as the gradient of concentration of ion activators. In some cases the ceramic technique allows to obtain materials that are difficult to grow as a single crystal. In addition, according to some experts, well-established industrial production of ceramic lasers can provide their lower cost compared to the crystal growth technology.

In this report the current state of development of technologies for the production of laser ceramics in Russia and overseas will be presented, as well as its use as the active medium of solid-state diode-pumped lasers. It will also present the results of research aimed at creating a solid-state diode-pumped lasers based on laser ceramics and  $Y_3Al_5O_{12}$  and  $Y_2O_3$ , doped with rare earth ions, which are carried out at the National Research Mordovia State University in collaboration with scientists from the Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics (RAS), Fryazino Branch and the Shanghai Institute of Ceramics (Shanghai, China).



## ABOUT HOLOGRAPHY: WHAT IT IS, HOW IT APPEARED AND WHAT IT IS NEEDED FOR

A.V. Krayskiy

*Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: [kraiski@ci.lebedev.ru](mailto:kraiski@ci.lebedev.ru)*

The concept of holography as a method of recording and reconstruction of the full light fields and its main usage are briefly described in the report. The core idea of holography is explained based on the concept of interference and diffraction of light waves by a periodic structure. Briefly are described the holographic recording media. Briefly it is discussed the history of diffraction gratings, as a precursor of holography of complex images. It is briefly described the history of the creation of the basic holographic schemes and motivation of the authors of these schemes: Gabor Denisyuk, Leith.

The author considers examples of usage of the visual and security holograms as the most popular types of holograms now, holographic interferometry that is widely known and used in the engineering science. The opportunity to record the light field polarization is also discussed in the report. It is briefly discussed the holography of varying in time light field, that later extended by several authors on the basis of other physical effects in specific areas (photon echo, media with burns spectral hole). Briefly are mentioned holographic sensors, as a potential new type of diagnostic devices.

Briefly is discussed the Lippmann photography in natural colors (Nobel Prize in Physics 1908) as a basis on which was developed Denisyuk holography.

# LUMINESCENT PROPERTIES OF BI-DOPED Na<sub>2</sub>O-GeO<sub>2</sub> GLASSES

S.V. Firstov<sup>1,2</sup>, M. Zhao<sup>3,4</sup>, L. Su<sup>3</sup>, Q.H. Yang<sup>4</sup>, E.G. Firstova<sup>1</sup>, S.V. Alyshev<sup>1</sup>,  
E.M. Dianov<sup>1</sup>

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

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

<sup>3</sup> *Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, China*

<sup>4</sup> *School of Materials Science and Engineering Shanghai University, China*

E-mail: [sergei\\_firstov@mail.ru](mailto:sergei_firstov@mail.ru)

The active media doped with bismuth attracted great interest after the development of the first bismuth laser [1]. In contrast to the glasses doped with rare-earth ions, the optical properties of Bi-doped glasses strongly depend on the structure and chemical composition of the glass matrix. As a result, the active media for bismuth lasers capable of generating radiation in the spectral range from 1150 to 1775 nm have been developed [2, 3]. Therefore, a study of a new glass matrix doped with bismuth is of scientific and practical interest.

In this paper, we report the results on the luminescent properties of Bi-doped sodium-germanate glasses. These samples were prepared using a crucible technique. Fig. 1 shows the excitation and luminescence spectra of the synthesized glasses. The effect of sodium oxide addition on the luminescent properties of the glasses was studied. The structural transformations of glass structure induced by the variation of the chemical composition were investigated by means of the Raman spectroscopy. The measured Raman spectra of the glasses containing different amounts of bismuth oxide are illustrated in Fig. 2.

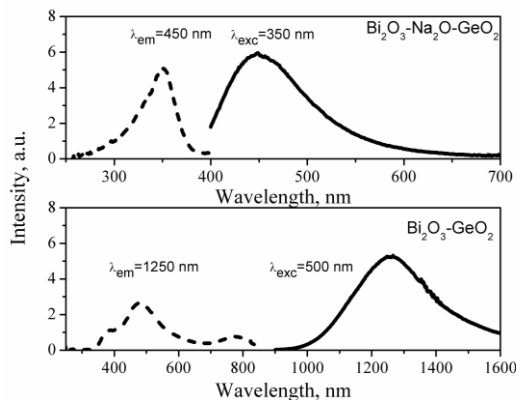


Fig. 1. Excitation (dashed) and luminescence (solid) spectra of the investigated glasses

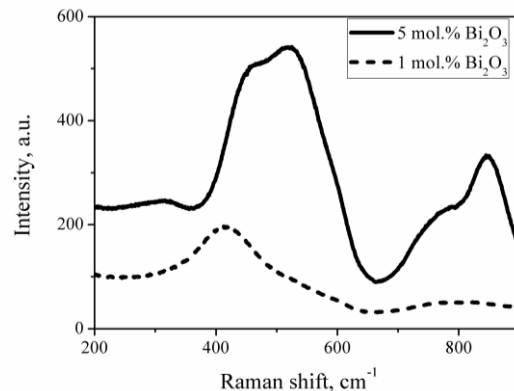


Fig. 2. Raman spectra of Na<sub>2</sub>O-GeO<sub>2</sub> doped with different content of Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Authors are grateful to V.V. Koltashev for the measurements of Raman spectra.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 15-52-53127) and National Natural Science Foundation of China (NSFC) (grant 16141101107).

1. E.M. Dianov et al. *Quantum Electron.* **35**, 1083 (2005).
2. I.A. Bufetov, E.M. Dianov, *Laser Phys. Lett.* **6**, 487 (2009).
3. S.V. Firstov et al. *Opt. Lett.* **39**, 6927 (2014).

# ANALYSIS OF THE MECHANISMS OF UPCONVERSION EXCITATION OF RED LUMINESCENCE OF LiYbF<sub>4</sub> CRYSTAL DOPED WITH Ho<sup>3+</sup> IONS

O.G. Goriev, B.N. Kazakov, V.V. Semashko

*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

*E-mail: goriev.o.g@gmail.com*

The luminescence of Ho<sup>3+</sup>(0,2 at. %):LiYbF<sub>4</sub> crystal was excited by radiation of the laser diode (0,755 W) at wavelength  $\lambda = 933\text{nm}$ . The shape of luminescence longitudinal sections and beam profiles essentially depends on the position of the laser beam waist with respect to the front surface of the crystal ( $\Delta z$ ). The projections of the longitudinal section of the crystal's luminescence on the axis of laser beam are defined as horizontal profiles.

When the waist is inside the crystal ( $\Delta z = 0 \div 2,5 \text{ mm}$ ), a narrow channel is forming along the laser beam with the most intense luminescence of Yb<sup>3+</sup> and Ho<sup>3+</sup> ions (fig. 1a).

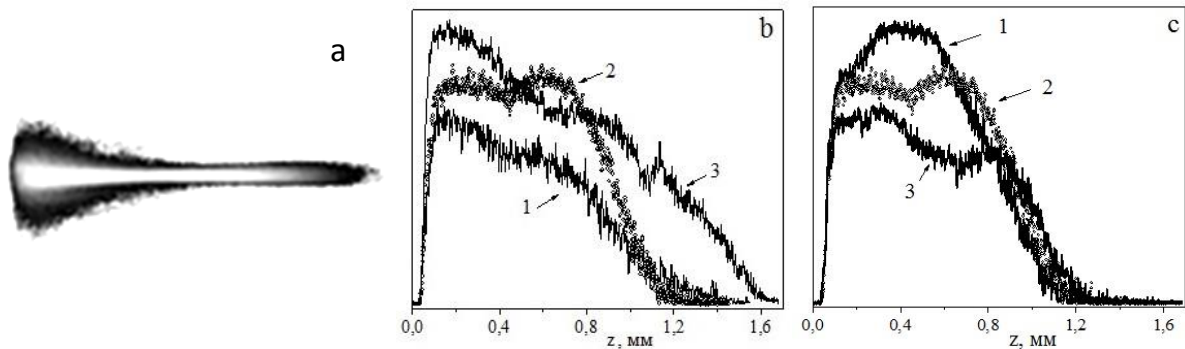


Fig. 1. Photo of longitudinal section of R-luminescence of Ho<sup>3+</sup> ions,  $\Delta z = 1,2 \text{ mm}$  - (a); horizontal profiles of the axis of luminescence channel of Yb<sup>3+</sup> ion (1), R-luminescence (2) and G-luminescence of Ho<sup>3+</sup> ions (3) for  $\Delta z = 1,2 \text{ mm}$  - (b); horizontal profiles of the channel axis of R-luminescence of Ho<sup>3+</sup> ions for  $\Delta z = 1,05 \text{ mm}$  (1),  $1,2 \text{ mm}$  (2),  $1,35 \text{ mm}$  (3) - (c)

It was found that the channel narrows sharply when the waist position of the laser beam is in the range of  $\Delta z = 1,05 \div 1,35 \text{ mm}$ . This leads to a large increase in the volumetric density of energy in the channel. As a result, the synchronization of Yb<sup>3+</sup> ion radiation occurs with arising strong coherent radiation. This brings the population of <sup>5</sup>F<sub>5</sub> energy level of Ho<sup>3+</sup> ions to nearly inverse state, which rapidly decays. In the longitudinal profiles of the channel axis at least two different mechanisms of population of Ho<sup>3+</sup> ion energy levels can be observed from which green (G-transition {<sup>5</sup>F<sub>4</sub>, <sup>5</sup>S<sub>2</sub>} → <sup>5</sup>I<sub>8</sub>) and red (R-transition <sup>5</sup>F<sub>5</sub> → <sup>5</sup>I<sub>8</sub>) luminescence (Fig. 1b) begins. For the red luminescence one of excitation mechanisms is based on the interaction Yb<sup>3+</sup> → Ho<sup>3+</sup>, and the second — on Ho<sup>3+</sup> → Ho<sup>3+</sup> interaction. These mechanisms occur in different parts of the channel, and their contributions are dependent on the position of the waist of the laser beam inside the crystal (fig. 1c).

## VISIBLE AND NEAR-INFRARED LUMINESCENCE OF Pb-ACTIVE CENTERS IN SiO<sub>2</sub> GLASSES

A.V. Kharakhordin<sup>1</sup>, V.O. Sokolov<sup>1</sup>, V.G. Plotnichenko<sup>1</sup>, A.Yu. Laptev<sup>2</sup>,  
A.N. Guryanov<sup>2</sup>.

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

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

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

Bi-doped glasses represent a new class of optically active materials, having a wide luminescence region in the near IR range. However, a better understanding of the origin of bismuth centers is needed to improve the performance of these materials.

Investigation of glasses doped with other elements, similar to bismuth in their properties, can provide an additional information on the origin of Bi-centers, as well as the possibility of developing new active materials for use in fiber optics. One of such elements is lead.

In [1, 2] the infrared luminescence was observed within 1,1-1,2  $\mu\text{m}$  and near 1,4  $\mu\text{m}$  in optical fibers based on silica and germanate-silicate glasses doped with lead, which preforms were fabricated by MCVD method. No valid models of lead infrared luminescence centers were suggested in these papers.

For our studies we used the optical fiber preforms produced by MCVD method with a SiO<sub>2</sub>-glass core doped with lead. Cylindrical 2 mm thick samples were cut from such fiber preforms and then measured.

Experimental study of the transmission, luminescence and luminescence excitation spectra of SiO<sub>2</sub>:Pb glasses has shown that at a relatively low PbO content ( $\sim 0,1$  wt.%) the visible luminescence within 300-450, 500-600 nm and infrared luminescence within 850-950, 1000-1200, 1300-1400 nm are observed in these glasses.

According to our calculations, the luminescence in the 300-450 nm region is related to three- and twofold coordinated Pb atoms, and that within 500-600 nm is due to twofold coordinated Pb atoms. IR luminescence in the 1000-1200 nm region can be attributed to the center, representing an interstitial Pb<sup>+</sup> ion in the SiO<sub>2</sub> network, and that in the 850-950 nm and 1300-1400 nm regions is due to the center, being a complex formed by interstitial Pb<sup>0</sup> atom and two oxygen vacancies.

1. I.A. Bufetov, et al., *Opt. Express.* **17**(16), 13487-13892 (2009).
2. A.S. Zlenko, et al., *Quant. Electronics.* **42**(4), 310-314 (2012).

STUDY OF INFLIENCE OF PREPARATION PARAMETERS  
ON THE PROPERTIES OF As-S CHALCODENIDE GLASSES OBTAINED  
VIA PLASMA ENHANCED CHEMICAL VAPOR DEPOSITON

L.A. Mochalov<sup>1,2,3</sup>, A.V. Kostrov<sup>1</sup>, A.V. Stricovsky<sup>1</sup>, A.V. Nezhdanov<sup>2</sup>,  
A.I. Mashin<sup>2</sup>, A.V. Vorotyntsev<sup>3</sup>, V.M. Vorotyntsev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Institute for Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod*

<sup>2</sup> *N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod*

<sup>3</sup> *Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russia*

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

The usage of plasma allows to provide the chemical reaction at a lower temperature of the reactor's walls in comparison with the "traditional" thermal method. The decreasing of the temperature of preparation seems to be an actual task from the point of reduction of contamination from the materials of setup.

In fact, the process of preparation was divided on two stages – the synthesizing of the batch and the following melting and homogenization of the glasses. The homogenization was carried out at the temperature of 750 °C during one hour. The bulk samples of As-S glasses with S content from 50 to 70 mol.% were prepared.

The influence of the reactor's walls temperatures in the discharge zone on the yield of the glasses was investigated. It was found that at the temperature range of 150-250 °C, the yield is close to 100 % and content of the glasses accurately correlates with the parameters of deposition.

The effect of pressure in the range of 1,9-19 Torr was investigated as well. It was found that the increasing of pressure brings about the increasing of temperature of the reactor walls from 200 °C to 350 °C. In its turn, it causes a 5 % deviation of composition of the final glasses from the initial parameters.

The data of Raman spectroscopy prove that the products of plasma chemical interactions are mainly amorphous. Partly the crystalline phase is presented by As<sub>4</sub>S<sub>4</sub> and S<sub>8</sub>. The data of DSC study of the PECVD samples are correlated with the same obtained for the samples prepared by «traditional» method (fusion of elements in evacuated ampoules).

The contamination from the materials of setup has not been observed. The silicon content in the final glass is at a level of  $(1-2) \cdot 10^{-4}$  wt.%, that is equal to the level of contamination of the initial substances. The work was supported by grant RFBR № 15-42-02402 and Government of the Nizhny Novgorod region.

# LASER OSCILLATION IN VISIBLE SPECTRUM ON $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4\text{:Pr}$ AND $\text{LiYF}_4\text{:Pr}$ CRYSTALS

A.A. Lyapin<sup>1</sup>, P.A. Ryabochkina<sup>1</sup>, V.V. Semashko<sup>2</sup>, V.G. Gorieva<sup>2</sup>,  
S.L. Korableva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Research Mordovian State University, Saransk*

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

*E-mail: [andrei\\_lyapin@mail.ru](mailto:andrei_lyapin@mail.ru)*

At present solid-state lasers emitting in the visible range are actively developed. These lasers are widely used in various fields of science and technology: optical spectroscopy, holography, biomedical technology, entertainment industry and et al.

Using as active media materials doped with  $\text{Pr}^{3+}$  is one of the possibilities of obtaining lasing in the visible wavelength range. The development of the blue laser diode has allowed in 2004 to obtain lasing at a wavelength of 640 nm on the crystal  $\text{LiYF}_4\text{:Pr}$  under LD pumping [1]. By now lasing was obtained at various crystals  $\text{LiYF}_4\text{:Pr}$ ,  $\text{LiLuF}_4\text{:Pr}$ ,  $\text{LiGdF}_4\text{:Pr}$ ,  $\text{KY}_3\text{F}_{10}\text{:Pr}$ ,  $\text{LaF}_3\text{:Pr}$ ,  $\text{BaY}_2\text{F}_8\text{:Pr}$ ,  $\text{YAlO}_3\text{:Pr}$  doped with  $\text{Pr}^{3+}$  [1-4]. But search for an optimal matrix for praseodymium diode-pumped lasers in the visible spectrum range is still an urgent task.

In this paper, laser oscillation on  $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4\text{:Pr}$  and  $\text{LiYF}_4\text{:Pr}$  crystals at a wavelength of 640 nm under LD pumping of the  $^3\text{P}_2$  level of  $\text{Pr}^{3+}$  ions was obtained. Maximum output power of lasers in both cases was 340 mW. The slope efficiency of the absorbed power was 9 % and 8.5 % for lasers on  $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4\text{:Pr}$  and  $\text{LiYF}_4\text{:Pr}$  crystals, respectively. Also in the paper, we discuss the potential for improving of the output characteristics of the lasers based on the  $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4\text{:Pr}$  and  $\text{LiYF}_4\text{:Pr}$  crystals grown by Bridgman method.

Contract grant sponsors the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (the project part of the State Assignment in the sphere of scientific activities № 3.384.2014/K and State Assignment № 07080210059 611).

1. A. Richter, et al., *Opt. Lett.* **29**, 26380 (2004).
2. B. Xu, et al., *Opt. Express.* **19**, 1191 (2011).
3. Z. Liu, et al., *J. Opt. Soc. Amer. B* **30**, 302 (2013).
4. P.W. Metz, et al., *Opt. Lett.* **39**, 3193 (2014).

# THE STRUCTURE STUDY OF NONLINEAR OPTICAL MATERIALS $\text{SrB}_4\text{O}_7$ & $\text{PbB}_4\text{O}_7$ IN CRYSTAL, VITREOUS AND MELTING STATES BY RAMAN SPECTROSCOPY TECHNIQUE

A.A. Sobol<sup>1</sup>, V.E. Shukshin<sup>1</sup>, A.I. Zaitsev<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*Kirensky Institute of Physics, RAS, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia*

*E-mail: [shukshinve@lst.gpi.ru](mailto:shukshinve@lst.gpi.ru)*

The polarized Raman Spectra of single crystal strontium  $\text{SrB}_4\text{O}_7$  (SBO) and lead  $\text{PbB}_4\text{O}_7$  (PBO) diborates at 300 K are recorded and studied in details. The assignment of vibrational spectra of these compounds was made. Изучено The originating from internal vibrations of boron-oxygen complexes Raman spectra transformation was studied at crystal-melt transition and crystal-glass one. Based on this data the rules of boron-oxygen complexes forming in glasses, melts and crystals of  $\text{SrO}\cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$  and  $\text{PbO}\cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$  compounds were analyzed in comparison with ones for  $\text{Li}_2\text{O}\cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$  compound, which was studied earlier.

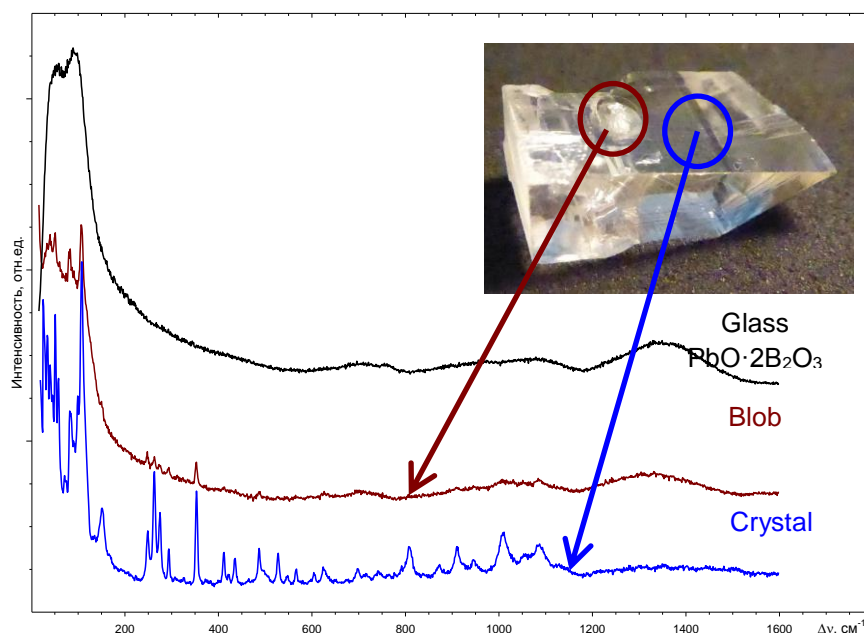


Fig. 1. The Raman Spectra of PBO crystal and the blob of melt frozen on its face

## SELECTIVITY POLYCRYSTALLINE $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ LASER SYSTEM

O.Yu. Bitkina<sup>1,2</sup>, A.P. Savikin<sup>1</sup>, O.N. Ereneykin<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>2</sup>*LLC «MelSyTech», Dzerzhinsk, Russia*

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

*E-mail: oybitkina@gmail.com*

Tunable mid – IR solid –state laser system operating in the 2–3 spectral range are in great demand for a variety medical, industrial and other applications [1]. At the present time development of the laser system based on zinc chalcogenide polycrystalline with the output linewidth about 1 nm it is one of the future problem. In that work  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  polycrystalline was used as gain element.

We used V-scheme of laser cavity with a  $\text{SiO}_2$  and  $\text{CaF}_2$  prism selector located at the Brewster angle relative to the optical axis of the cavity. The gain element was a polycrystalline  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ , The  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  thickness was 3 mm and the one side of the polycrystalline had a reflective coating at 2,5 – 2,9  $\mu\text{m}$  spectral range.

The active element was secured in a copper radiator to reduce the effect of the thermal lens induced pumping source. The Tm:YLF laser *1* emitting at a wavelength of 1,9  $\mu\text{m}$  was used for pumping. We used output mirror of  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  laser cavity made on the ZnSe substrate with the transmittance  $T \approx 20\%$  at a wavelength of 2,5 – 2,9  $\mu\text{m}$ .

We demonstrated cavity with  $\text{SiO}_2$  prism selector. In this configuration 2,5 – 2,68 tuning range was obtained. Tuning was limited prism strong absorption at the wavelength 2,7  $\mu\text{m}$ .

We used  $\text{CaF}_2$  prism selector for obtaining tuning curve at 2.5 – 2.9  $\mu\text{m}$  spectral range. In this case tuning was limited a decrease in the Q – factor of the resonator mirrors and gain of  $\text{CrZnSe}$  polycrystalline at 2.9  $\mu\text{m}$  wavelength.

The dips in  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  laser emission spectrum can be explained by water vapor absorption at 2,5–2,9  $\mu\text{m}$  wavelength range. Laser linewidth was approximately 30 nm.

1. A.S. Egorov, O.N. Ereneykin, A.P. Savikin, et al., Quantum Electronics **42** (12), (2012).



## THE 2- $\mu\text{m}$ WAVEBAND LASER SYSTEM BASED ON Tm:YLF AND Ho:YAG CRYSTALS WITH DIODE PUMPING

S.D. Velikanov, C.V. Vorontsov, V.A. Garutkin, N.G. Zakharov,  
A.V. Larionov, G.N. Nomakonov, V.B. Kolomeets, Yu.N. Frolov

*Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia*

*E-mail: [voroncov.kv@ya.ru](mailto:voroncov.kv@ya.ru)*

The radiating waveband of the thulium lasers is collected in the 1,8÷2,1  $\mu\text{m}$  band and is convenient for using in different spheres including the holmium active medium pumping. Thus, the laser based on Tm:YLF crystal has the radiation spectrum which is close to the absorption maxima of Ho:YAG and Ho:YLF crystals.

In recent years the continuous-wave (CW) lasers based on the Tm:YLF crystals with the diode pumping are being investigated by the different scientific groups. The maximum pumping power of the laser based on the one cylindrical active element doping 3 at.% was  $\sim 70$  W and it was bounded by the termomechanical crystal strength that is pointed in papers [1, 2]. The maximum pumping power was increased up to 135÷300 W due to the resonator installation of two active elements doping 3,5 at.% and 2,5 at.%, was specified in papers [2, 3]. However, in these cases four pumping sources are used that complicates the laser construction.

The current paper represents the the numerical modeling and experimental investigation results of the CW Tm:YLF laser based on the one cylindrical active element with the dual end pumping of the laser diode modules. It has been calculated that it is necessary to decrease the crystal doping up to 2 at.% for increasing the Tm:YLF laser pumping power up to  $\sim 200$  W without any active element breakdown. Herewith, the generation efficiency decrease will be insignificant.

The maximum pumping power reached 185 W mark and it did not lead to the active element breakdown of the Tm:YLF laser based on the  $\sigma$ -polarized in experiments. The radiation spectrum was  $\sim 1910$  nm wave range and was adjusted to  $\sim 1908$  nm by using Fabry-Perot etalon for the maximum absorption coordination of the Ho:YAG crystal. The conversion efficiency of  $\sim 60$  % was obtained in the Ho:YAG laser with the single-pass pumping of the Tm:YLF laser radiation.

In case of the Tm:YLF laser generation on the  $\pi$ -polarization the maximum pumping power was equaled to 145 W. The generation spectrum was  $\sim 1890$  nm wave range and could be agreed with the maximum absorption coordination of the Ho:YLF crystal with  $\sim 1892$  nm wavelength by using Fabry-Perot etalon.

1. N.G. Zakharov, O.L. Antipov, A.P. Savikin et al., *Quantum Electron.* **39**(5), 410-414 (2009).
2. M. Schellhorn, *Appl. Phys. B.* **91**, 71-74 (2008).
3. X. Duan, Y. Shen, B. Yao, et al., *Adv. Solid State Lasers.* **68**, 343 (2014).

## THE HIGH-ENERGY SYSTEM OF THE MASTER OSCILLATOR-POWER AMPLIFIER BASED ON THE Ho:YAG CRYSTAL

S.D. Velikanov, C.V. Vorontsov, V.A. Garutkin, N.G. Zakharov,  
G.M. Mishjenko, A.V. Muhin, A.S. Nadezhin, N.I. Nikolaev, Yu.N. Frolov  
*Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute  
of Experimental Physics, Sarov*  
*E-mail: Nikitagz@rambler.ru*

Nowadays, there is a great interest to the solid-state lasers engineering, working in the spectral range of  $\sim 2 \mu\text{m}$  [1]. Primarily, it is due to the fact that the radiation with such a wavelength falls into one of the atmospheric transparency bands. The 2- $\mu\text{m}$  waveband radiation became requested for various practical task solutions in different fields of industry and medicine. Moreover, the pulse-periodic radiation with  $\sim 2 \mu\text{m}$  wavelength can be used for pumping the optical parametric oscillator based on  $\text{ZnGeP}_2$  crystal [1, 2].

Among the laser crystals, radiating in spectral range  $\sim 2 \mu\text{m}$ , the widest practical use was obtained by ion-implanted  $\text{Ho}^{3+}$  the yttrium aluminum garnet  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (YAG) [1]. The YAG has high mechanical strength and satisfactory thermal conductivity. The efficient Ho:YAG crystal pumping can be realized by the thulium laser radiation with  $\sim 1,9 \mu\text{m}$  wavelength.

The pulse-periodic generation of the Ho:YAG systems represents a great interest which is a sequence of laser pulses with a high peak power. Besides, one of the most important limiting factors of the increasing pulse energy is the excited state lifetime due to decreasing repetition rate that is influenced by the up-conversion processes. The up-conversion processes lead to the decreasing laser efficiency and to formation of the strong thermal lensing in the active elements that is especially shown at low pulse repetition rate. To decrease that negative effect it is possible to apply the crystals with the reduced doping level.

At the current work the results of the numerical modeling and the experimental investigations of the Ho:YAG systems consisting of the master oscillator and three power amplifiers are represented. The pulse repetition rate was about 100 Hz. The investigations of the doping level influence of the active elements on the laser source work were produced. The Q-switching of the master oscillator was implemented by the acousto-optic modulator based on the crystalline quartz. The conversion efficiency of the radiation pumping into the pulse-periodic generation reached 10 %. The beam propagation-factor was  $M^2 \sim 1,3$ .

1. B.M. Walsh, *Laser Physics* **19**(4), 855–866 (2009).
2. P.A. Budni, L.A. Pomeranz, M.L. Lemons et al., *J. Opt. Soc. Am.* **B 17**, 723-728 (2000).

## IDENTIFICATION OF NANOCRYSTALLINE INCLUSIONS, INDIVIDUAL Bi-ATOMS AND Bi-CLUSTERS IN Bi-DOPED OPTICAL MATERIALS

L.D. Iskhakova<sup>1</sup>, F.O. Milovich<sup>1</sup>, V.M. Mashinsky<sup>1</sup>, A.S. Zlenko<sup>1</sup>,  
M.V. Presniakov<sup>2</sup>, A.L. Vasil'ev<sup>2</sup>, B.I. Galagan<sup>3</sup>, S.E. Sverchkov<sup>3</sup>, E.M. Dianov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> *NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia*

<sup>3</sup> *Prokhorov General Physics Institute, RAS, Moscow, Russia*

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

The nature of nanocrystalline inclusions and distribution of dopants in the bismuth-doped silicate fibers and preforms were studied by X-ray and electronic diffractions, analytical scanning and transmission electron microscopy. The compositions of the cores were Bi:SiO<sub>2</sub> (series I), Bi:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (II), Bi:GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> (III), Bi:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> (IV) and Bi:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>- GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> (V). Nanocrystals of metallic Bi, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, quartz, cristobalite, GeO<sub>2</sub> and Bi<sub>4</sub>(GeO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> were observed in these glasses. Such inclusions can lead to the background optical losses growth in Bi-doped fibers. It was demonstrated that nanocrystalline inclusions can be formed during perform and optical fiber fabrication processes which occur with high enough speed of temperature change and with low dopants concentrations. Nature of nanocrystalline inclusions in the preforms and fibers varies considerably depending upon the bismuth concentration and the ratio of cations concentration in the core glass. The highest tendency to form nanoinclusions was found in the preforms of series III with Bi:GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> core and a relatively high content of germanium and bismuth oxides. Glasses containing phosphorus (series V) were unstable under prolonged influence of the electron beam (200 keV) and this complicates their investigation. Unstability was manifested as glass stratification and melting. That becomes apparent in time. At first the nanometer-scale heterogeneities were appeared and then a partial melting of sample was observed.

New possibilities for visualization of individual atoms are opened by scanning transmission electron microscopy (STEM) with a high-angle annular dark field (HAADF) detector. The strong atomic number dependence of HAADF-STEM imaging is very effective for the direct observation of heavy elements inside amorphous glasses consisting of relatively light elements. HAADF-STEM has been applied by us for the research of Bi-doped MgO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> glasses with examined early luminescent description. First both the individual Bi-ions and Bi-clusters were identified and dependence of Bi-clusters sizes with the increase of Bi-concentration was established. According to the clusters sizes in Mg-Al-silicate glasses with the Bi content about 0,25 at. % the most probable forms of Bi-incorporation are Bi-dimers and Bi-monomers. The dimers and monomers quantity ratio changes as result of transition from oxidizing to reducing medium of synthesis. When Bi-concentration raises, the amount of atoms in clusters increases.

## GROWING SINGLE CRYSTALS OF $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2$ SOLID SOLUTIONS AND THEIR PHYSICAL PROPERTIES

S.N. Ushakov<sup>1,2</sup>, M.A. Uslamina<sup>1</sup>, P.P. Fedorov<sup>1,2</sup>, V.V. Osiko<sup>2</sup>, K.N. Nishchev<sup>1</sup>,  
V.M. Kyashkin<sup>1</sup>, A.A. Pynenkov<sup>1</sup>, S.V. Kuznetsov<sup>2</sup>, E.V. Tyutyayev<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> A.M. Prokhorov General Physics Institute, RAS, Moscow, Russia

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

Crystals of rare earth-doped  $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2$  solid solutions have become increasingly popular in quantum electronics [1, 2]. We have developed new techniques for growing said single crystals with the use of crystal growth installation with inductive heating, and we have grown sets of the doped  $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2$  solid solution crystals with different Ca/Sr ratios under various conditions (e.g., growing rate, etc.). All  $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$  single crystals have been characterized by X-ray diffraction as well as Raman, infrared/visible, and optical spectroscopy in order to control their structure, optical quality and other physical properties.

As per X-ray diffraction data,  $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$  crystals of the following three groups with 1, 2, 3, 5, 7, and 10 mol.%  $\text{SrF}_2$  (the 1-st group); 25, 30, 35, 40, 47, and 55 mol.%  $\text{SrF}_2$  (the 2-nd group); 0,05, 0,1, 0,2, 0,4, 0,6, and 0,8 mol.%  $\text{SrF}_2$  (the 3-rd group), grown at  $v = 6, 12$  and  $48$  mm/hour growth rate each, contained single fluorite-type phase only, and their crystal lattice parameters increased linearly with the increase of  $\text{SrF}_2$  content (grouping of these three sets was done according to the melting points of produced crystals). Raman spectra of  $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$  crystals contained only one line at  $323\text{-}283\text{ cm}^{-1}$  with the line frequency migrating steadily from  $323\text{ cm}^{-1}$  for  $x = 0$  to  $283\text{ cm}^{-1}$  for  $x = 1$  when  $x$  value has been varied. Half-width of the aforementioned line in Raman spectra of  $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$  crystals changed from  $9\text{ cm}^{-1}$  for  $x = 0$  to  $16\text{ cm}^{-1}$  for  $x = 0,55$  and then back to  $9\text{ cm}^{-1}$  for  $x = 1$ . UV/visible spectra of  $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$  crystals confirmed their transparency in this part of the spectrum down to  $200\text{ nm}$  (Karimov et al. [3] indicated that  $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$  absorption started at  $120\text{-}130\text{ nm}$ ). Low intensity absorption bands at about  $230, 250$  and  $300\text{ nm}$  were related, perhaps, to some microimpurities. Edge of  $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$  absorption interval in IR spectra has been observed at  $12\text{-}14$  microns ( $12$  microns for  $x = 0$  and  $14$  microns for  $x = 1$ ).

The aforementioned single crystal growth technique for high optical quality  $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2$  solid solution crystals can be implemented for manufacturing of the corresponding rare earth-doped  $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$  single crystals without significant modifications.

1. P.P. Fedorov, I.I. Buchinskaya, Russ. Chem. Rev. **81**(1), 1-20 (2012).
2. E.G. Chernevskaya, Optika i Spektroskopiya **10**(5), 640-643 (1961).
3. D.N. Karimov, O.N. Komar'kova, N.I. Sorokin, et al., Crystallography Reports **55**(3), 518-524 (2010).

SPECTRAL-LUMINESCENT AND LASER PROPERTIES OF  $Y_2O_3$   
CERAMICS AND STABILIZED DIOXED ZIRCONIA BY YTTRIUM  
DOPED RE-IONS ( $Er^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$ ,  $Ho^{3+}$ )

A.N. Chabushkin<sup>1</sup>, P.A. Ryabochkina<sup>1</sup>, E.E. Lomonova<sup>2</sup>, V.V. Balashov<sup>3</sup>,  
Yu.L. Kopulov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia*

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

<sup>3</sup> *Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Fryazino Branch,  
Russian Academy of Science, Fryazino, Russia*

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

Laser systems with wavelengths in the near infrared spectral range (1,5-2,1  $\mu m$ ) region can be found in communication lines, several fields of medicine, in LIDAR systems, in gas detection. Compact diode-pumped solid-state lasers based on  $Er^{3+}$  doped materials have been widely studied as 1,5-1,65  $\mu m$  laser sources. The most common laser systems for the generation of laser radiation with wavelengths in the 2  $\mu m$  region are based on thulium- and holmium-doped crystals or glasses [1-2].

New oxide crystals for solid state lasers with the extremely high melting points attract attention of researchers. The sesquioxides of  $Y_2O_3$  are promising host materials for rare-earth doped solid-state lasers due to their high thermal conductivity. However, the high-melting points have hindered the growth of high-quality crystals [3]. A significant focus is on the development of technology for high-transparent ceramics based on  $Y_2O_3$ , doped with rare-earth elements.

This paper presents the study of spectral-luminescent and lasing properties of crystals yttrium-stabilized dioxed zirconia ( $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ ) and  $Y_2O_3$ , doped with  $Er^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$ ,  $Ho^{3+}$ , and development of recommendations for their use as active media for solid-state lasers under diode pumped.

1. B.M. Walsh, Laser Physics **19**(4), (2009).
2. Ch. Krankel, IEEE Journal of selected topics in quantum electronics **21**(1), (2015).
3. K. Petermann, G. Huber, L. Fornasiero, Journal of Luminescence **87**, 89 (2000).

# INVESTIGATION OF POLARIZATION DEPENDENCIES OF FLORESCENCE SPECTRA OF NEODYMIUM IONS IN ANISOTROPIC CRYSTALS

G.V. Shilova, P.G. Zverev, A.A. Sirotkin

*A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: [shilova@lst.gpi.ru](mailto:shilova@lst.gpi.ru)*

The dual wavelength lasers are used for the oscillation of terahertz radiation via difference frequency generation. It is well known that the fluorescence band of  $\text{Nd}^{3+}$  ions strongly varies in anisotropic crystal with its orientation so that its maximum shifts from one wavelength to another. Recently the  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  laser with two wavelength output was demonstrated [1].

The aim of this work was to investigate the possibility to control the spectral dependence of the amplification gain of  $\text{Nd}^{3+}$  ions at  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$  optical transition around 1,06  $\mu\text{m}$  in  $\text{SrWO}_4$ ,  $\text{YLiF}_4$ ,  $\text{YVO}_4$ , and  $\text{YAlO}_3$  anisotropic crystals.

The experimental setup utilized a diode laser at 808 nm with depolarized fiber output. The excitation radiation was focused into the investigated sample with plane parallel surfaces that could be rotated in the plane perpendicular to the excitation beam. Collimation lenses and the Glan prism selected the fluorescent radiation with the fixed polarization and directed it onto the entrance slit of the spectrometer. The fluorescence spectrum was registered by a linear CCD connected to PC. The samples were cut perpendicular to the optical axis C. Their rotation smoothly changed the registered fluorescence polarization from  $\pi$  to  $\sigma$  orientation.

The maximum of the fluorescence spectrum of  $\text{Nd}^{3+}$  ions in  $\text{SrWO}_4$  crystal for  $\pi$ -orientation was observed at 1055.9 nm and for  $\sigma$ -orientation at 1062,7 nm. The intensities of both lines became equal for fluorescence polarization with  $45^\circ$  with respect to optical axis C. We assume that this orientation of  $\text{Nd}^{3+}:\text{SrWO}_4$  crystal is perspective for developing a dual wavelength laser.

In this report we also present and discuss the polarization dependencies of the fluorescence bands of  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$  transition in  $\text{Nd}^{3+}$  ions in  $\text{YLiF}_4$ ,  $\text{YAlO}_3$ , and  $\text{YVO}_4$  anisotropic crystals. The orientation of these crystals for dual wavelength laser development is proposed.

1. A.A. Sirotkin, S.V. Garnov, V.I. Vlasov, et al., *Quantum Electron.* **42**, 420–426 (2012).

# MODULATION INSTABILITY OF WAVE PACKETS IN MEDIUM WITH A RUNNING REFRACTIVE INDEX WAVE

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].

For a wave packet propagating in an appropriate environment with the group velocity, which is equal to the speed of movement BVPP can transform the equation for the amplitude envelope of the wave packet to the form [2, 3, 4]:

$$\frac{\partial}{\partial z} \bar{A} - if^2(z)D \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \bar{A} + if(z)R|\bar{A}|^2 \bar{A} = 0, \quad (1)$$

where  $\tau = t - \frac{\partial \beta}{\partial \omega} z$  - time in traveling in a coordinate system,  $\beta = n_0 \omega / c$  - the propagation constant of the wave packet in the fiber, the function  $f(z)$  - the function defined by the depth and frequency modulation of the refractive index of the waveguide.

The conditions for the occurrence, the existence region, and other characteristics of the modulation instability of wave packets propagating in a nonlinear medium with a refractive index of a traveling wave. The dependence of the integral gain increment of the frequency detuning for different parameters of the environment and RRIW.

The possibility of the collapse of the quasi-continuous wave packet in the sequence of ultrashort pulses at shorter wavelengths spread with shorter duration and greater amplitude in comparison with non-linear environments in which the traveling wave of the refractive index is not available.

1. G. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, Springer, 2007.
2. V.P. Torchigin, *Quantum Electron.* **25** (5), 484 (1995).
3. B.H. Kolner, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **30**(8), 1951 (1994)
4. I.O. Zolotovskii, et al., *Quantum Electronics* **46**(1), 39 (2016).

# ANALYSIS OF THE EXCITATION MECHANISMS OF THE UP-CONVERSION LUMINESCENCE USING THE CORRELATION SPECTRA

A.V. Mikheev<sup>1,2</sup>, B.N. Kazakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

<sup>2</sup> Kazan Federal University, Kazan, Russia

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

The excitation mechanisms of the green and red up-conversion luminescence of the LiYbF<sub>4</sub>:Ho<sup>3+</sup>(0,2 %) crystal were analyzed by correlation spectra. The luminescence was excited by the near-infrared radiation of the laser diode at the wavelength of 933 nm. The radiation power was 0,755 W. The luminescence spectra were recorded at different positions  $\Delta z$  of the laser beam waist relative to the crystal, i.e. at different volumetric energy density of the pump radiation in the crystal (similar to Z-scan technique). The Pearson product-moment correlation coefficient  $r(\lambda_0, \lambda)$  was calculated to determine a statistical relationship between the luminescence intensity  $J(\lambda_0, \Delta z)$  dependence on  $\Delta z$  at fixed wavelength  $\lambda_0$  and a similar dependence of  $J(\lambda, \Delta z)$  at all other wavelengths  $\lambda$ . The correlation spectrum was determined by the formula  $R(\lambda_0, \lambda) = 0,5(1+r(\lambda_0, \lambda))$ . The transitions between the energy states of Yb<sup>3+</sup> and Ho<sup>3+</sup> ions, occurring at wavelengths  $\lambda$ , for which  $R(\lambda_0, \lambda) \approx 1$ , play a determining role in population of the energy state, responsible for the luminescence at the wavelength  $\lambda_0$ .

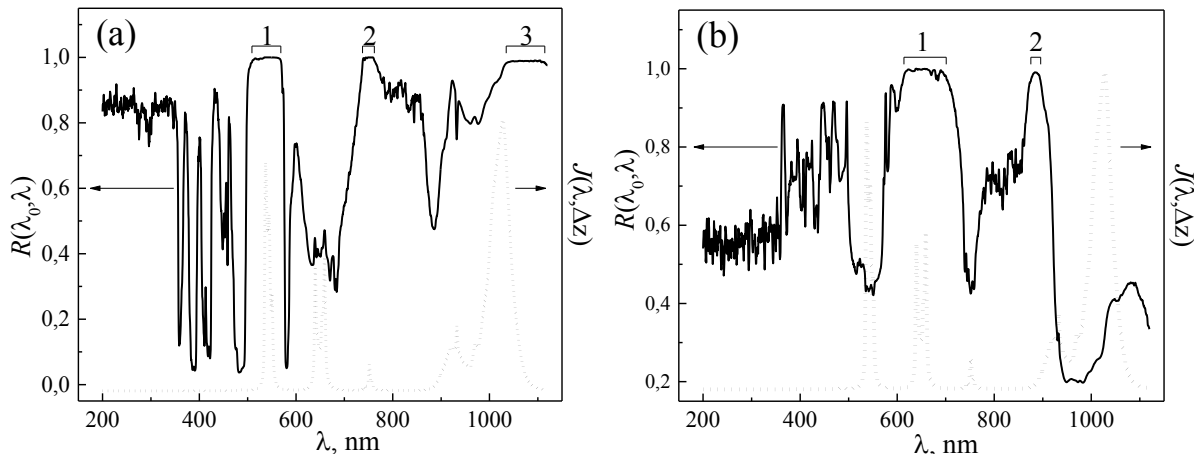


Fig. 1. Solid line - correlation spectra of the green (a)  $\lambda_0 = 544$  nm and red (b)  $\lambda_0 = 640$  nm luminescence of LiYbF<sub>4</sub>:Ho<sup>3+</sup>(0,2 %) crystal. Numbered brackets indicate areas of the correlation spectrum where  $R(\lambda_0, \lambda) \approx 1$ . Dotted line - luminescence spectrum at  $\Delta z = 2$  mm

The correlation spectra (fig. 1) made it possible to determine the major excitation mechanisms of the green luminescence Ho<sup>3+</sup>(<sup>5</sup>F<sub>4</sub>, <sup>5</sup>S<sub>2</sub>) → <sup>5</sup>I<sub>8</sub>): 1) {<sup>5</sup>H<sub>5</sub>, <sup>5</sup>H<sub>6</sub>, <sup>5</sup>G<sub>2</sub>} → {<sup>5</sup>F<sub>4</sub>, <sup>5</sup>S<sub>2</sub>}, <sup>5</sup>I<sub>6</sub> → {<sup>5</sup>F<sub>4</sub>, <sup>5</sup>S<sub>2</sub>}; 2) <sup>5</sup>I<sub>4</sub> → {<sup>5</sup>F<sub>4</sub>, <sup>5</sup>S<sub>2</sub>} and red luminescence Ho<sup>3+</sup>(<sup>5</sup>F<sub>5</sub> → <sup>5</sup>I<sub>8</sub>): 1) {<sup>5</sup>G<sub>4</sub>, <sup>3</sup>K<sub>7</sub>} → <sup>5</sup>F<sub>5</sub>, <sup>5</sup>I<sub>7</sub> → <sup>5</sup>F<sub>5</sub>; 2) <sup>5</sup>I<sub>5</sub> → <sup>5</sup>F<sub>5</sub>. The processes 1) are caused by the energy transfer from Yb<sup>3+</sup> ions and/or from the pump radiation to Ho<sup>3+</sup> ions, while the processes 2) are caused by the infrared luminescence Ho<sup>3+</sup>(<sup>5</sup>I<sub>7</sub> → <sup>5</sup>I<sub>8</sub>).



## MEASUREMENT OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF DKDP CRYSTALS

A.N. Noskova, A.M. Prokhorov

*Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod, Russia*

*E-mail: [anna\\_13.08@mail.ru](mailto:anna_13.08@mail.ru)*

Leading manufacturers of new generation lasers with high pulse energy, lasers with ultrahigh peak power, ultrashort radiation duration lasers are interested in nonlinear-optical elements of high quality. The most suitable nonlinear-optical material for the lasers above is KDP crystal and its deuterated analog DKDP. Today crystals used in electro-optical devices must have a high level of deuteration (>97,5 %) and high ohmic-resistance (>10 GOhm) to satisfy the requirements of the leading manufacturers of lasers. So the electrical conductivity measurement is very important characteristic of crystals.

The researches have shown that electrical conductivity magnitude is affected by the growth defects and crystal growth method. Samples were made as a rectangular parallelepiped sized from 8x8x16 mm to 20x20x10 mm. Samples were grown in 2 methods: the dynamic growth of profiled monosectorial crystals and traditional growth of single crystals in solution. The electrical conductivity measurements were taken in conditions of indoor temperature. On the face of samples was put under the voltage 4500 B (U) via full dimensional electrodes. The electrical conductivity was calculated using the formula (1).

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{R * S}{L}, \quad (1)$$

$R = \frac{U}{I}$  – the sample resistance;  $I$  – the current;  $\rho$  – the resistivity образца;  $S$  – cross-sectional area;  $L$  – the length of the sample.

1. V.M. Puzikov, V.I. Salo, M.I. Kolybaeva et. al., *Monocrystals KDP/DKDP for high power laser. The growth, properties, application*, Kharkiv, Institute of monocrystals, 336 (2004).
2. A.N. Levchenko, *Vestnik of Kharkiv Karazin National University «Radio Physics and Electronics»* **16** (927), 22-30 (2010).

# NONLINEAR PROCESSES IN TUNGSTATES CRYSTALS UNDER TWO-PHOTON PICOSECOND INTERBAND EXCITATION

V.I. Lukanin, A.Ya. Karasik

*Prokhorov General Physics Institute, RAS, Moscow, Russia*

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

A method of studying the nonlinear processes dynamics under two-photon interband picosecond excitation of the tungstates crystals is proposed. The method is demonstrated under excitation of  $\text{PbWO}_4$  crystal by a sequence of 25 ps powerful pulses with a wavelength of 523,5 nm and continuous probe radiation with wavelength 633 nm. The measurement of the transmittance of the probe radiation under excitation of the crystal allows us in a wide temporal range (from units of nanoseconds to a few seconds) investigate the influence of two-photon interband absorption, the Kerr and thermal nonlinearity of the refractive index on the properties of the laser radiation.

We show the influence of nonlinear process of two-photon absorption on the growth and relaxation of the induced single-photon absorption in nanosecond-second range of durations. The processes associated with the generation and migration of electronic excitations to the traps were revealed. It is shown that in the paraxial region of excitation of the crystal the thermal lens arises (fig. 1). We determined the time region of the formation of this lens and its destruction as a result of the process of thermal diffusion (fig. 2a). The process of the relaxation electronic excitations from the traps levels to the ground state occurs for hundreds milliseconds (fig. 2b). We demonstrate the dynamics of transformation of the probe wave transmission under degenerate two-photon picosecond excitation.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project number 16-02-00338) and the Russian Scientific Foundation (project number 14-22-00248).

## SPECTRAL AND KINETIC INVESTIGATIONS OF THULIUM IONS OPTICAL CENTERS IN YTTROFLURITE CRYSTALS

E.A. Vagapova<sup>1</sup>, O.K. Alimov<sup>2</sup>, M.E. Doroshenko<sup>2</sup>, K.A. Martynova<sup>2</sup>,  
V.A. Konyushkin<sup>2</sup>, A.N. Nakladov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Research University «MPEI», Moscow, Russia*

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

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

Investigation of fluorite crystals ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SrF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$ ) and their solid solutions ( $\text{CaF}_2:\text{SrF}_2$ ,  $\text{CaF}_2:\text{BaF}_2$ ,  $\text{SrF}_2:\text{BaF}_2$ ,  $\text{CaF}_2:\text{YF}_3$ ), impurity doped with thulium ions, is important due the possibility of their usage in developing of efficient compact diode-pumped laser for 2  $\mu\text{m}$  spectral region. The peculiarity of fluorite crystals is a creation of different types of the single and the clusterized optical centers which includes  $\text{RE}^{3+}$  ion and interstitial fluorine ion for charge compensation [1, 2]. The laser oscillation properties of fluorite materials impurity doped with  $\text{Tm}^{3+}$  strongly depend on the type of the optical center and the chemical composition of the active element matrix.

In this report we investigate the influence of yttrium fluoride concentration in  $\text{CaF}_2:\text{YF}_3$  crystal on the spectral and kinetic parameters of thulium optical centers by means of a site selective laser spectroscopy.

Optical parametric oscillator (Solar 604 OPO) was used to excite  $\text{Tm}^{3+}$  ions. The fluorescence and kinetic investigations were proceed with monochromator MDR-23. The registration scheme used PbS detector which was connected to the digital oscilloscope connected to PC.

Absorption and luminescence spectra, decay kinetics were measured. Spectral and kinetic investigations of  $\text{CaF}_2:\text{YF}_3:\text{TmF}_3(0,1 \text{ wt.}\%)$  crystal allowed to reveal three types of thulium optical centers. They are: clusterized low symmetry center; clusterized Y-Tm center with properties close to those of tetragonal center registered in  $\text{CaF}_2$  crystal; highly symmetrical long lifetime center with tetragonal local surrounding of  $\text{Tm}^{3+}$  ions. The relaxation lifetime of these optical centers was estimated to be equal to  $\tau_1 \sim 5 \text{ ms}$ ,  $\tau_2 \sim 15 \text{ ms}$ ,  $\tau_3 \sim 170 \text{ ms}$  correspondingly.

1. N. Strickland, G.D. Jones, Phys. Rev. B **56**, 10916 (1997).
2. O.K. Alimov, M.E. Doroshenko, V.A. Konyushkin, et al., J. of Lumin. **167**, 16 (2015).

## THREE MICRON OSCILLATION OF HOLMIUM IONS IN YSGG CRYSTAL EXCITED BY SHORT LASER PULSES

Yu.V. Kerv<sup>1</sup>, P.G. Zverev<sup>2</sup>, A.A. Sirotkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Research University «MPEI», Moscow, Russia*

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

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

Solid state lasers with the radiation output in 1,5-3  $\mu\text{m}$  spectral region are widely used for various kinds of practical applications in medicine and biology. Holmium doped crystals are used for developing efficient and compact lasers for this spectral region. Recently the laser oscillation of  $\text{Ho}^{3+}$  ions at  ${}^5\text{I}_6 \rightarrow {}^5\text{I}_7$  energy transition in 2,84-3,05  $\mu\text{m}$  spectral range was demonstrated in YSGG crystal co-doped with  $\text{Yb}^{3+}$  and  $\text{Cr}^{3+}$  ions with flash lamp pumping [1]. The cascade excitation transfer from  $\text{Cr}^{3+}$  ions to  $\text{Yb}^{3+}$  and further to  $\text{Ho}^{3+}$  ions occurred in the active medium. As a result the population inversion between  ${}^5\text{I}_6$  and  ${}^5\text{I}_7$  energy levels was developed and the laser oscillation was registered. The relaxation lifetime of  ${}^5\text{I}_6$  energy level in  $\text{Ho}^{3+}$  ions in  $\text{Ho}^{3+}\text{Yb}^{3+}\text{Cr}^{3+}:\text{YSGG}$  crystal is only 470  $\mu\text{s}$ . This is much shorter than that for  ${}^5\text{I}_7$  energy level (9,8 ms). So the oscillation is developed until the population inversion between these levels exists.

The aim of this work was to investigate the possibility to obtain laser oscillation at this self-restricted  ${}^5\text{I}_6 \rightarrow {}^5\text{I}_7$  optical transition in  $\text{Ho}^{3+}$  ions in  $\text{Ho}^{3+}\text{Yb}^{3+}\text{Cr}^{3+}:\text{YSGG}$  crystal under the excitation with nanosecond laser pulses with 1,14-1,18  $\mu\text{m}$  wavelength.

The radiation of Malsan-203 laser on  $\text{LiF:F}^{2-}$  color center laser was used as a pump source [2]. This laser system provides smoothly tunable radiation in 1,1-1,25  $\mu\text{m}$  spectral region under pumping with Nd:YAG laser. The pulse energy of the radiation with 1,16  $\mu\text{m}$  wavelength was about 25 mJ with the pulse duration 20 ns and pulse repetition rate 5 Hz. The sample of  $\text{Ho}^{3+}\text{Yb}^{3+}\text{Cr}^{3+}:\text{YSGG}$  crystal was prepared in the cylindrical shape with 4 mm diameter and 65 mm length. We used a longitudinal pump scheme. The laser oscillation at about 3  $\mu\text{m}$  wavelength was observed in the cavity composed with two high reflectivity mirrors. The optimization of optical elements in the laser cavity to obtain effective oscillation of such laser is discussed.

1. A.F. Umyskov, Yu.D. Zavartsev, A.I. Zagumennyi et al., *Quantum Electronics* **23**, 791-792 (1996).
2. T.T. Basiev, P.G. Zverev, A.G. Papashvili, et al., *Quantum Electronics* **27**, 574-578 (1997).

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ  
В НАНОСТРУКТУРАХ**

## СЛАБАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ И АНТИЛОКАЛИЗАЦИЯ В МНОГОДОЛИННЫХ НАНОСТРУКТУРАХ

Н.С. Аверкиев

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

Явление слабой локализации состоит в усилении рассеяния назад за счет интерференции волн, распространяющихся вдоль замкнутых траекторий по и против часовой стрелки. В процессе упругого рассеяния на примесях фазы волн изменяются так, что в точке возврата их они совпадают, то есть имеет место увеличение вероятности. Внешнее классически слабое магнитное поле не вызывает квантования свободного движения носителей заряда, но изменяет фазу волновой функции и следовательно уничтожает интерференцию и уменьшает вероятность возврата. Такое изменение вероятностей может проявляться в том, что проводимость в классически слабых магнитных полях возрастает, в отличие от классически магнитных полей, в которых проводимость уменьшается. Учет спин-орбитального взаимодействия означает, что волновые функции становятся спинорами и возврат такой волны в исходную точку приводит к разности фаз равной  $\pi$ , а это означает, что в нулевом поле происходит подавление рассеяния назад, и, следовательно, за счет интерференции проводимость возрастает и имеет место антилокализация. Соответственно, проводимость в слабых магнитных полях уменьшается [1].

В докладе будет рассмотрен еще один механизм рассеяния, приводящий к слабой локализации – междолинные переходы в двумерных слоях на поверхности теллура, в МДП структурах на поверхности кремния и в двумерных слоях графена. Оказывается, что в ряде случаев эквивалентные долины можно рассматривать как различные спиновые состояния, и тогда упругие переходы между долинами выглядят как процессы спиновой релаксации, и для описания магнетосопротивления можно применять идеологию [1]. Однако, в графене, в котором спин-орбитальное взаимодействие несущественно, ситуация необычная: без междолинных переходов, то есть «в отсутствие» спиновой релаксации имеет место антилокализация [2] (в так называемом диффузионном режиме, когда частица возвращается назад на длинах траекторий много больших длины свободного пробега). Нами построена теория слабой антилокализации в графене во всем диапазоне классически слабых магнитных полей (то есть приняты во внимание траектории, содержащие несколько рассеивателей) с учетом междолинных переходов продемонстрирован переход от антилокализации к слабой локализации и дано качественное объяснение знака магнетопроводимости при различных соотношениях времени сбоя фазы волновой функции и времени междолинных переходов. Эти особенности междолинных переходов качественно и количественно сравниваются с аналогичными процессами для электронов на поверхности кремния и дырок в аккумулирующих слоях на поверхности теллура.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН.

1. S. Hikami, A. Larkin, Y. Nagaoka, Prog. Theor. Phys. **63**, 707 (1980).
2. E. McCann, K. Kechedzhi, V.I. Fal'ko, H. Suzuura, T. Ando, B.L. Altshuler, Phys. Rev. Lett. **97**, 146805 (2006).

## ДРОЖАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

С.А. Тарасенко

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

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

Давным-давно, на заре создания квантовой механики Э. Шредингер обратил внимание на необычное свойство уравнения Дирака – оператор скорости и оператор Гамильтона не коммутируют друг с другом даже в отсутствие внешних полей. Некоммутативность может приводить к тому, что квантово-механическое состояние релятивистской частицы с определенным значением импульса не характеризуется определенным значением скорости: на равномерное и прямолинейное движение накладывается дрожание (нем. *Zitterbewegung*) [1, 2]. Частота таких осцилляций для дираковского электрона определяется параметром  $2mc^2/h \sim 10^{20}$  Гц и чрезвычайно высока, амплитуда – комптоновской длиной волны  $\lambda_C \sim 10^{-11}$  см – очень мала, поэтому непосредственное экспериментальное исследование эффекта в настоящее время невозможно.

В данной работе сообщается об обнаружении, теоретическом и экспериментальном исследовании аналога дрожащего движения для электронов в полупроводниках [3]. Эффект основан на том, что в системе со спин-орбитальным взаимодействием во внешнем магнитном поле, действующем на спин, скорость электрона не является сохраняющейся величиной, а содержит вклад, осциллирующий на ларморовской частоте. Поэтому прецессия спина в магнитном поле сопровождается орбитальным дрожанием электрона в реальном пространстве. Дрожание отдельных электронов можно сделать когерентным, если синхронизовать спиновую динамику электронов, например методами оптической ориентации. Когерентное дрожание ансамбля электронов сохраняется до тех пор, пока спиновая когерентность не разрушается процессами спиновой релаксации.

Эксперименты выполнены на образцах с напряженными эпитаксиальными слоями InGaAs *n*-типа. Межзонное оптическое возбуждение структур циркулярно поляризованным светом инициировало когерентную прецессию электронных спинов в магнитном поле и, следовательно, когерентное дрожание электронов проводимости. Дрожание электронного газа детектировалось как высокочастотный электрический ток, возникающий в образце в отсутствие приложенных переменных полей [3]. Разработанная теория когерентного дрожания электронов в полупроводниках хорошо описывает наблюдаемые в эксперименте зависимости амплитуды и частоты высокочастотного тока от магнитного поля, поляризации возбуждающего света и геометрии образцов.

1. E. Schrödinger, Sitz. Press. Akad. Wiss. Phys.-Math. **24**, 418 (1930).
2. W. Zawadzki, T.M. Rusin, J. Phys.: Condens. Matter **23**, 143201 (2011).
3. I. Stepanov, M. Ersfeld, A.V. Poshakinskiy, M. Lepsa, E.L. Ivchenko, S.A. Tarasenko and B. Beschoten, to be published.

## ТУННЕЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ В СВЕРХРЕШЕТКАХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ТГЦ РЕЗОНАТОРОМ

И.В. Алтухов<sup>1</sup>, М.С. Каган<sup>1</sup>, С.К. Папроцкий<sup>1</sup>, А.Н. Баранов<sup>2</sup>, Р. Тесье<sup>2</sup>,  
А.Д. Буравлев<sup>3</sup>, А.П. Васильев<sup>3</sup>, Ю.М. Задиранов<sup>3</sup>, Н.Д. Ильинская<sup>3</sup>,  
А.А. Усикова<sup>3</sup>, В.М. Устинов<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*IES, Université Montpellier 2, CNRS, Montpellier, France*

<sup>3</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: [kagan@cplire.ru](mailto:kagan@cplire.ru)*

Приведены данные о влиянии распределенного терагерцового (ТГц) резонатора на туннельный ток в сверхрешетках (СР) InAs/AlSb и GaAs/AlAs при комнатной температуре. СР, состоявшие из 60 и 100 периодов СР, соответственно, были расположены между сильно легированными верхним контактным слоем и подложкой. Металлические контакты к вытравленным меза-структурам диаметром 10-15 мкм имели форму кольца, образуя распределенный резонатор на длины волн в свободном пространстве от 110 до 160 мкм.

На вольтамперных характеристиках (ВАХ) InAs/AlSb в области нерезонансного туннелирования (при напряжениях, когда перекрытие основных состояний в соседних квантовых ямах и, соответственно, минизонная проводимость отсутствуют) была обнаружена серия максимумов, периодических по напряжению. Расстояние между ними коррелировало с резонансной частотой резонатора. Возникновение этих максимумов связывается с эффектом Пёрселла, т. е. с увеличением интенсивности спонтанного излучения в резонаторе по сравнению с интенсивностью спонтанного излучения в свободное пространство.

В резонаторных структурах на основе короткопериодных СР GaAs/AlAs исследовался вертикальный транспорт в режиме минизонной проводимости (в присутствии электрических доменов). Образование движущихся доменов, происходившее при некотором пороговом напряжении, сопровождалось скачкообразным уменьшением тока на ВАХ, которое могло достигать 50 %. Обнаружено, что при изменении параметров резонатора это пороговое напряжение существенно меняется. 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. Таким образом, этот опыт является указанием (разумеется, косвенным) на возбуждение резонатора за счет отрицательного сопротивления СР с доменами.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 14-02-01062) и программ РАН «Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов» и «Современные проблемы радиофизики».



МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КУЛОНОВСКИХ  
КОМПЛЕКСОВ В ТРИГОНАЛЬНЫХ КВАНТОВЫХ  
ТОЧКАХ GaAs/AlGaAs

М.В. Дурнев

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

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

В данной работе будут представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований магнитооптических эффектов в ненапряженных квантовых точках GaAs/AlGaAs, выращенных на поверхности GaAs(111)А. Такие квантовые точки обладают тригональной симметрией  $S_{3v}$  с осью третьего порядка  $z \parallel [111]$  и демонстрируют яркие эффекты, проявляемые в спектрах магнитолюминесценции [1]. В частности, магнитное поле, приложенное вдоль оси роста, смешивает состояния тяжелых дырок с проекциями спина  $\pm 3/2$  на эту ось и приводит к оптической активности «темных» экситонных и трионных состояний [2, 3]. В структурах с затвором продемонстрированы различные состояния одиночных точек с зарядом от  $-3|e|$  до  $+2|e|$  [4].

В работе будет представлена детальная теория тонкой структуры и спектров магнито фотолуминесценции возбужденных состояний электрон-дырочных комплексов, в которых электрон или дырка находятся на возбужденном уровне размерного квантования. Это так называемые «горячие» трионы  $X^{-*}$  (два электрона и дырка) и  $X^{+*}$  (электрон и две дырки), а также двукратно заряженный экситон  $X^{2-}$ . Положение и интенсивность спектральных линий определяется конкуренцией между обменным взаимодействием электрона и дырки и смешиванием состояний тяжелой дырки магнитным полем. Сравнение теории и экспериментов по фотолуминесценции одиночных точек позволяет однозначно идентифицировать зарядовое состояние точки, а также извлечь константы электрон-дырочного обмена и  $g$ -факторы носителей заряда в возбужденных состояниях [5].

Представлены данные по динамической поляризации ядер в таких структурах, наблюдаемой при резонансном возбуждении. Ядерная поляризация проявляется в виде поля Оверхаузера, действующего на спины электронов и дырок и приводящего к дополнительному вкладу в расщепление линий излучения  $X^+$  триона. Наблюдение одновременно «светлых» и «темных» состояний позволяет независимо измерить константы взаимодействия спинов ядер со спином электрона и дырки. Измеренное значение отношения констант сверхтонкого взаимодействия для дырки и электрона оказывается равным примерно 20 %. Построенная теория сверхтонкого взаимодействия дырки со спинами ядер в квантовых точках (111) показывает, что это значение зависит не только от свойств материала, но и от формы и размера квантовой точки [6].

1. М.В. Дурнев, ФТТ **57**, 1201 (2015).
2. G. Sallen, B. Urbaszek, M.M. Glazov, et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 166604 (2011).
3. M. V. Durnev, M. M. Glazov, E. L. Ivchenko, et al., Phys. Rev. B **87**, 085315 (2013).
4. L. Bouet, M. Vidal, T. Mano, N. Ha, T. Kuroda, M.V. Durnev et al., Appl. Phys. Lett. **105**, 082111 (2014).
5. M.V. Durnev, M. Vidal, L. Bouet, et al., arxiv:1511.08196 (2015).
6. M. Vidal, M.V. Durnev, L. Bouet, et al., arxiv:1603.02909 (2016).

# ТОНКАЯ СТРУКТУРА ЭКСИТОНОВ, ЛОКАЛИЗОВАННЫХ НА ОДИНОЧНЫХ АКЦЕПТОРАХ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ GaAs/AlGaAs

И.А. Кокурин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск

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

Тенденция к миниатюризации полупроводниковых устройств приводит к тому, что становится существенным легирование на уровне единичных примесных атомов. В частности, можно говорить о выделении отдельной отрасли полупроводниковой науки, именуемой «солотроника» (от англ. solitary dopant optoelectronics). Следует также отметить, что эксперименты с одиночными примесями дают возможность изучить пространственное распределение примесей в полупроводниках.

Существует два основных подхода к экспериментальному изучению одиночных примесей в полупроводниках: оптические методы и методы сканирующей микроскопии. В настоящее время реализованы эксперименты по оптической спектроскопии InAs квантовых точек, легированных одиночными примесями марганца. Однако, процент легированных точек, форма, размер и химический состав квантовой точки, а также расположение примеси внутри нее остаются случайными, что осложняет исследование и воспроизводимость результатов.

Оригинальная часть доклада посвящена исследованию одиночных примесей бериллия в квантовой яме (КЯ) GaAs/AlGaAs. Экспериментально получены спектры фотолюминесценции (ФЛ), обусловленной рекомбинацией экситона, локализованного на одиночной нейтральной примеси. Полученные результаты были сопоставлены с теоретической моделью, описывающей энергетическое положение и интенсивности оптических переходов экситона, локализованного на акцепторе. В рамках этой же модели исследовались спектры циркулярно поляризованной ФЛ в магнитном поле, изучено зеемановское расщепление и найдены эффективные g-факторы. Здесь следует отметить, что спектры ФЛ из КЯ обладают весьма богатой структурой, в первую очередь это связано с множеством линий экситонов, локализуемых на различных дефектах, неоднородностях интерфейсов КЯ и пр. Необходимой при этом становится идентификация ряда линий и построение соответствующих теоретических моделей, дающих представление о структуре многочастичных комплексов, положении спектральных линий, их интенсивности, поляризации и т. д.

Экситон, локализованный на акцепторе, обладает сложной энергетической структурой в силу наличия существенного обменного взаимодействия всех трех частиц (двух дырок и одного электрона) входящих в такой комплекс, а также влияния потенциала квантовой ямы. Обменное взаимодействие двух дырок носит ферромагнитный характер, в результате чего основное состояние такого комплекса имеет полный момент  $J = 2$ . Роль обменного взаимодействия дырок с электроном (тоже ферромагнитного) также существенна, так как это взаимодействие сильно возрастает в системах пониженной размерности по сравнению с объемным материалом. В объемном материале трехчастичных комплекс характеризуется величиной полного момента  $F = 1/2, 3/2, 5/2$ , а влияние эффекта размерного квантования дополнительно усложняет структуру уровней связанного экситона. Помимо этого, спектры ФЛ определяются также структурой уровней конечного состояния (нейтральный акцептор), образующегося после излучательной рекомбинации экситона.

Построенная модель позволила количественно описать тонкую структуру спектра микро-ФЛ экситона, локализованного на одиночном акцепторе бериллия в квантовой яме.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-12-00255).

# ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КРЕМНИЕВЫХ МДП-СТРУКТУРАХ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЛОЯМИ ОКСИДОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.М. Гурьянов

*Самарский государственный архитектурно-строительный университет,  
Самара*

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

Кремниевые МДП-структуры с диэлектрическими слоями оксидов редкоземельных элементов (ОРЗЭ) являются перспективными элементами для микро- и нанoeлектроники, поскольку ОРЗЭ могут быть отнесены к альтернативным диэлектрикам (диэлектрикам с высокой диэлектрической проницаемостью – high-k dielectrics). В данной работе исследовались свойства границы диэлектрик-полупроводник в кремниевых МДП-структурах с наноразмерными (20÷60 нм) диэлектрическими пленками оксидов скандия, эрбия, гольмия. Информацию о границе раздела диэлектрик-полупроводник можно получить, рассматривая генерационные процессы в МДП-структурах. Генерационные характеристики МДП-структур Al/R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/nSi/Al (R – символ редкоземельного элемента) определялись из релаксационных зависимостей емкости МДП-структуры  $C(t)$  при неравновесном обеднении поверхности кремния основными носителями заряда, создаваемом прямоугольными импульсами напряжения. Процесс релаксации емкости МДП-структуры, описывается уравнением:

$$-\frac{N\varepsilon_0\varepsilon_s}{2C_i} \frac{d}{dt} \left( \frac{C_i}{C} \right)^2 = n_i S + \frac{n_i \varepsilon_0 \varepsilon_s}{\tau_g C_\infty} \left( \frac{C_\infty}{C} - 1 \right) \quad (1)$$

где  $C_i$  – емкость диэлектрика, отнесенная к единице площади,  $\varepsilon_s$  – диэлектрическая проницаемость полупроводника. По релаксационным кривым неравновесной емкости определялись объемное время жизни неосновных носителей заряда  $\tau_g$  и удельная скорость поверхностной генерации  $S$ . Указанные зависимости регистрировались в темноте, при комнатной температуре. Длительность переходного процесса релаксации неравновесной емкости находилась в пределах 30÷500 мс. Рассчитанные значения скорости поверхностной генерации  $S$  и объемного времени жизни неосновных носителей заряда  $\tau_g$  имели соответственно величины 10÷90 см/с и 0,3÷4,5 мкс. Скорость поверхностной генерации в исследованных МДП-структурах Al/Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/nSi/Al, Al/Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/nSi/Al, Al/Ho<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/nSi/Al на порядок меньше аналогичного параметра в кремниевых МДП-структурах с термической двуокисью кремния в качестве диэлектрика, что свидетельствует о хорошем качестве границы ОРЗЭ – кремниевая подложка. Для сравнения, значение скорости поверхностной генерации в кремниевых МДП-структурах с термической двуокисью кремния в качестве диэлектрика составляет величину 200÷400 см/с.

# РЕЗОНАНСЫ В ПОГЛОЩЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КВАНТОВОЙ ПРОВОЛОКЕ

В.В. Карпунин

*Мордовский государственный педагогический институт*

*им. М.Е. Евсевьева, Саранск*

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

Получено аналитическое выражение для коэффициента поглощения (КП) электромагнитного излучения электронами квантовой проволоки, помещенной в магнитное поле. Использован анизотропный параболический потенциал конфайнмента. Рассмотрен случай поперечного магнитного поля по отношению к оси проволоки. Показан резонансный характер поглощения и найдено положение резонансных пиков в зависимости от частоты (рис.1), магнитного поля и угла наклона магнитного поля в плоскости  $xOz$  [1].

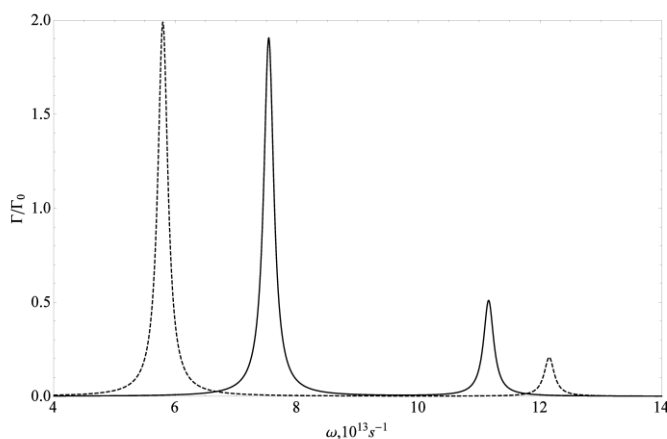


Рис.1. Зависимость КП электромагнитного излучения от частоты излучения;  $\omega_1 = 5 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 10 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$ ,  $\omega_c = 7.5 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$ ,  $\theta = \pi/3$  - сплошная кривая,  $\theta = \pi/6$  - пунктирная кривая,  $\tau = 10^{-13} \text{ c}$ ,  $T = 10 \text{ K}$ .

График имеет дублетную структуру. Эта структура обусловлена резонансом при условии, что частота излучения равна одной из двух гибридных частот  $\Omega_{1,2}$ . Поскольку гибридные частоты зависят от величины и направления поля, то и положение резонансных частот зависит от этих же параметров магнитного поля. Форма резонансных пиков в соответствии с выражением КП симметрична относительно точки резонансных максимумов.

Также исследовано рассеяние электронов на оптических фононах и показано, что оно приводит к дополнительным резонансным пикам в поглощении. Отметим, что как следует из литературы [2] наклонное к оси симметрии системы магнитное поле дает дополнительные возможности для изучения параметров спектра носителя заряда и данных рассеяния.

1. В.В. Карпунин, В.А. Маргулис, ФТП **50**, 785 (2016).
2. И.Л. Дричко, И.Ю. Смирнов, А.В. Суслов и др., ЖЭТФ **138**, 557 (2010).

# МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ КЕРРА И ИНДУЦИРОВАННАЯ СПИНОВАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ СОСТОЯНИЙ НОСИТЕЛЕЙ В ПОВЕРХНОСТНОЙ СВЕРХРЕШЁТКЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.А. Перов, А.С. Рульков

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

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

Изучение управляемых оптических свойств полупроводниковых сверхрешеток со спин-орбитальным взаимодействием (СОВ) в газе носителей является значимым в контексте практических приложений в спинтронике. Одним из достаточно перспективных кандидатов на роль структур с нетривиальными магнитооптическими свойствами является двумерный электронный газ в сверхрешетке на основе GaAs, AlGaAs и InAs с сильным СОВ Рашба, находящийся в квантующем магнитном поле [1]. При изучении магнитооптических свойств данных структур нами исследована частотная зависимость угла вращения Керра (полярный эффект Керра), выраженного через компоненты тензора динамической проводимости.

Расчет измеряемых магнитооптических величин, индуцированных полем электромагнитной волны, базируется на вычислении компонент тензора динамической проводимости в рамках теории линейного электродинамического отклика Кубо [2]. Вычисленные компоненты тензора проводимости определяют величину угла поворота плоскости поляризации и эллиптичность в полярном эффекте Керра. Особенности частотной зависимости комплексного угла Керра связаны с симметрией спиновых блоховских состояний электронов в магнитных подзонах. Противоположным по знаку значениям проекций спиновых поляризаций состояний электрона соответствуют частоты переходов, при которых отсутствует поглощение в среде, обусловленное ее гиротропией. Воздействие на электрон линейно поляризованного электромагнитного излучения терагерцового диапазона приводит к возникновению индуцированной спиновой плотности, что непосредственно является результатом учета СОВ. Следует отметить, что в модельных расчётах в отсутствие СОВ в газе носителей подобного течения магнитооптического эффекта Керра не наблюдается в силу коллинеарности электронного спина вектору внешнего магнитного поля в каждом квантовом состоянии и независимости операторов электронной скорости от спиновых матриц.

1. А.А. Перов, Л.В. Солнышкова, Письма в ЖЭТФ **88**, 717-723 (2008).
2. P.M. Oppeneer, T. Maurer, J. Sticht, et al., Phys. Rev. B **45**, 10924-10933 (1992).

## ДОЛИННО-ЗАВИСИМЫЙ СДВИГ ГУСА-ХЕНХЕН В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ СИЛИЦЕНА И ГРАФЕНА

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)*

Эффект Гуса-Хенхен (ГХ) [1], как известно, состоит в том, что пакет электромагнитных волн, падающих на границу раздела двух диэлектриков, испытывает продольное смещение в условиях полного внутреннего отражения. Причиной этого является интерференция волн, образующих пакет и приобретающих различные фазовые сдвиги при отражении. Таким образом, этот эффект может быть реализован в принципе и для других типов волн, например, для акустических или волн де Бройля. Работа Бинаккера с соавторами [2] инициировала изучение данного эффекта в графене и графеновых структурах. В отличие от графена, сильное спин-орбитальное взаимодействие в силиcene приводит к появлению щели в спектре вблизи дираковских точек, величину которой можно изменять внешним электрическим полем.

В данной работе смещение ГХ  $\sigma_r$  рассчитано для волнового пакета, отражающегося от интерфейса, разделяющего структуры (силициеновые или графеновые), характеризующиеся различными значениями параметров щели и потенциала. Наше рассмотрение показывает, что в щелевом графене величина  $\sigma_r$  зависит не только от кинематических характеристик начальных частиц, но и от принадлежности электронов определенной долине. В силиcene же зависимость эффективной щели от спинового и долинного индексов приводит к снятию не только долинного, но и спинового вырождения. Кроме того, в отличие от оптического эффекта, согласно нашим расчетам продольный сдвиг ГХ возникает и при частичном внутреннем отражении от границы неоднородности. Однако, при отражении от одиночного интерфейса величина смещения (которое может быть как положительным, так и отрицательным) в любом случае мала и составляет несколько фермиевских длин волн. Усиление эффекта, т. е. значительное увеличение абсолютной величины сдвига  $\sigma_r$  может быть достигнуто для электронного пакета, проходящего через потенциальный барьер конечной ширины в условиях резонанса. Мы рассмотрели зависимость  $\sigma_r$  от параметров потенциала и характеристик начального пакета. Показано, что в отличие от случая, рассмотренного выше, смещение ГХ в щелевом графене является долинно-вырожденным, а для силицена его величина зависит от произведения спинового и долинного индексов.

1. F. Goos and H. Hanchen, Ann. Phys. **436**, 333 (1947); **440**, 251 (1949).
2. C.W.J. Beenakker et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 146804 (2009).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫХ МАГНЕТИТ-СОДЕРЖАЩИХ МИКРОКАПСУЛ В БИООБЪЕКТАХ

М.А. Пятаев<sup>1</sup>, М.В. Герасимов<sup>1</sup>, М.Н. Жарков<sup>1</sup>, И.А. Юрлов<sup>1</sup>,  
П.С. Замышляев<sup>1</sup>, Р.Р. Ганеев<sup>1</sup>, Н.А. Пятаев<sup>1</sup>, Г.Б. Сухоруков<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Queen Mary University of London, London, UK

E-mail: pyataevma@mail.ru

В последние годы в качестве средства для направленной магнитно-управляемой доставки лекарств были предложены многослойные полиэлектролитные микрокапсулы, синтезированные из биоразлагаемых полимеров и содержащие магнитные наночастицы [1]. Однако до настоящего времени не была изучена динамика магнитных частиц во внешнем поле и не исследован механизм, который может приводить к локальному концентрированию микроконтейнеров с лекарственным препаратом.

В настоящей работе рассматриваются полимерные микрокапсулы, синтезированные из полиаргинина и декстран-сульфата, содержащие наночастицы магнетита в оболочке. Нами были исследованы их магнитные свойства и изучена возможность управления концентрацией капсул в живом организме с помощью магнитного поля.

Для описания механизма накопления капсул предложена модель движения ферромагнитных наночастиц в ламинарном потоке жидкости при наличии неоднородного магнитного поля. Как известно, в таком поле на частицу действует сила, пропорциональная градиенту поля и магнитному моменту частицы. Учитывая возможность вращения наночастицы в жидкости, в данном случае необходимо рассматривать средний магнитный момент и соответственно усредненную силу. Для определения магнитного момента в работе использовалась теория суперпарамагнитной жидкости, согласно которой зависимость магнитного момента от поля описывается формулой Ланжевена [2]. Для оценки пространственного распределения поля были проведены аналитические и численные исследования полей, создаваемых магнитами различной формы (цилиндр, усеченный конус). Также были проведены измерения магнитного пространственного распределения поля от магнита цилиндрической формы и прямые измерения силы, действующей на образцы коллоидного магнетита в этом поле. Результаты расчетов хорошо согласуются с проведенными измерениями. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (проект № 2952).

1. A.M. Pavlov, et al. *Adv. Mater.* **25**, (48) 6945 (2013).
2. М.И. Шлиомис, УФН **112**, 427 (1974).

## ПРОЯВЛЕНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВАНЬЕ-ШТАРКА В СВЕРХРЕШЕТКЕ С ОГРАНИЧЕННЫМ ЧИСЛОМ СЛОЕВ

К.Р. Власов, М.А. Пятаев

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, Саранск, Россия*

*E-mail: windsofoceans@gmail.com*

В 1960 году Г. Х. Ванье рассмотрел движение электронов в периодическом потенциале при наличии постоянного внешнего электрического поля [1]. Используя базис из блоховских волновых функций и разложение отдельных членов уравнения в ряды по степеням энергии, он показал, что в такой системе возникает дискретный энергетический спектр. Это явление получило название локализации Ванье-Штарка. Впоследствии доказательства существования Ванье-Штарковской локализации неоднократно подвергались критике [2,3], в частности, высказывались сомнения относительно необходимости возникновения локализованных состояний при любых параметрах потенциала и значениях электрического поля. Очевидно, что практически важным является вопрос об энергетическом спектре сверхрешетки, содержащей достаточно большое, но конечное число периодов.

Целью настоящей работы является исследования проявлений эффекта Ванье-Штарковской локализации в модельной одномерной системе, содержащей несколько десятков периодов, помещенной в однородное электрическое поле. В работе рассмотрено рассеяние электронов, налетающих из области с низкой потенциальной энергией на ступенчатый (немонотонный) потенциал, образованный периодическим потенциалом сверхрешетки и однородным электрическим полем при различных энергиях электронов.

Найдена максимальная плотность вероятности нахождения электрона в данном периоде как функция энергии электрона. Обнаружено, что в определенных интервалах энергий максимальная плотность вероятности осциллирует как функция энергии с периодом, соответствующим расстоянию между штарковскими уровнями. Предложен критерий, основанный на анализе амплитуды осцилляций, позволяющий количественно оценить степень выраженности Ванье-Штарковской локализации. С использованием этого критерия показано, что локализация Ванье-Штарка достаточно заметна, только в случае относительно высоких потенциальных барьеров и слабых электрических полей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (проект № 2.2665.2014).

1. G. H. Wannier, Phys. Rev. **117**, 432 (1960).
2. J. Zak, Phys. Rev. Lett. **20**, 1477 (1968).
3. J. Zak, Phys. Rev. B **43**, 4519 (1991).



# ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА НА СПЕКТР ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЭКСИТОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЕ GaAs/AlGaAs С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

М. В. Кочиев, Е.В. Уцына, В.А. Цветков, Н.Н. Сибельдин  
*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва*  
*E-mail: eucyna@bk.ru*

Исследования плазмонных эффектов вызывают повышенный интерес, поскольку они позволяют управлять интенсивностью и направленностью излучения в полупроводниковых наноструктурах. Существуют разнообразные варианты структур, в которых проявляются плазмонные эффекты. В данной работе мы исследовали влияние наночастиц золота на спектрально-кинетические характеристики полупроводниковой гетероструктуры с приповерхностной квантовой ямой.

Исследования проводились на структуре с двумя квантовыми ямами (КЯ) GaAs/AlGaAs толщиной 10 и 15 нм, разделенных барьерным слоем  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  толщиной 200 нм. Расстояние от поверхности образца до узкой КЯ составляло 15 нм. На поверхность образца наносился водный раствор с золотыми наночастицами, стабилизированными циклодекстрином, со средним диаметром 15 нм. Поверхностная концентрация наночастиц золота регулировалась изменением концентрации раствора. Образец помещался в гелиевый оптический криостат с регулировкой температуры. Измерения проводились при температуре 10 К. Внутриямное возбуждение образца осуществлялось пикосекундными импульсами Ti-сапфирового лазера. В спектре фотолюминесценции (ФЛ) квантовых ям наблюдались линии излучения экситонов, также была видна слабая линия излучения трионов в широкой КЯ. Нанесение золотых наночастиц на поверхность образца привело к тому, что наблюдался значительный сдвиг в более длинноволновую область и уширение линии ФЛ приповерхностной (узкой) КЯ. Влияние золотых наночастиц на спектр широкой КЯ (находящейся дальше от поверхности) было незначительным. Были измерены кинетические зависимости ФЛ обеих КЯ как чистого образца, так и с нанесенными золотыми наночастицами. Постоянные времени затухания ФЛ для чистой структуры составляют около 450 пс в узкой КЯ и 850 пс - в широкой КЯ. Для структуры с золотыми наночастицами на поверхности эти времена уменьшаются и составляют 200 и 600 пс, соответственно. Видно, что нанесение наночастиц золота на поверхность образца приводит к значительному изменению динамики ФЛ как приповерхностной КЯ, так и (в меньшей степени) – углубленной КЯ.

Аналогичные результаты были получены при нанесении золотой пленки на поверхность структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-02-12197).

# ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В СВЕРХРЕШЕТКАХ СО СПИН-ОРБИТАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

А.Р. Зайнагутдинов, А.В. Тележников

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

E-mail: [zoaya1066@mail.ru](mailto:zoaya1066@mail.ru), [telezhnikov@phys.unn.ru](mailto:telezhnikov@phys.unn.ru)

Изучение квантовых состояний электрона в сверхрешётках со спин-орбитальным взаимодействием (СОВ) является актуальной задачей физики конденсированного состояния. В данной работе в рамках модели Кронига-Пенни исследована электронная структура сверхрешётки, сформированной периодически повторяющимися слоями полупроводников с различными константами СОВ Дрессельхауза.

Для частного случая, когда волновые векторы  $|k_x| = |k_y|$  (сверхрешётка ориентирована по оси  $z$ ), получены два (из-за наличия СОВ) дисперсионных уравнения, каждое из которых определяет свою серию минизон (Рис. 1а). При этом состояния каждой серии (обозначенные индексами «+» и «-») имеют следующие спиновые плотности:  $S_z^\pm(z) = 0$ ,  $S_x^\pm(z) = -S_y^\pm(z)$ . Численный анализ дисперсионных уравнений показал, что ширина минизон, а также величина запрещенных зон существенно зависят от типа спиновой поляризации. Так, с ростом параметра  $|k_x|$  минизоны из серии с поляризацией «+» оказываются заметно уже аналогичных минизон из серии с поляризацией «-». При этом обе серии минизон смещаются вверх по энергии. Также установлено, что в этом частном случае интерфейсные состояния в сверхрешётке отсутствуют.

В общем случае, когда  $|k_x| \neq |k_y|$ , энергия минизон сильно зависит от соотношения между волновыми векторами  $|k_x|$  и  $|k_y|$ . Расчет зонной структуры сверхрешётки для этого случая был произведен численно (Рис.1б). Видно, что в противоположность рассмотренному ранее случаю наблюдается «антикроссинг» ветвей спектра. При этом открывается энергетическая щель.

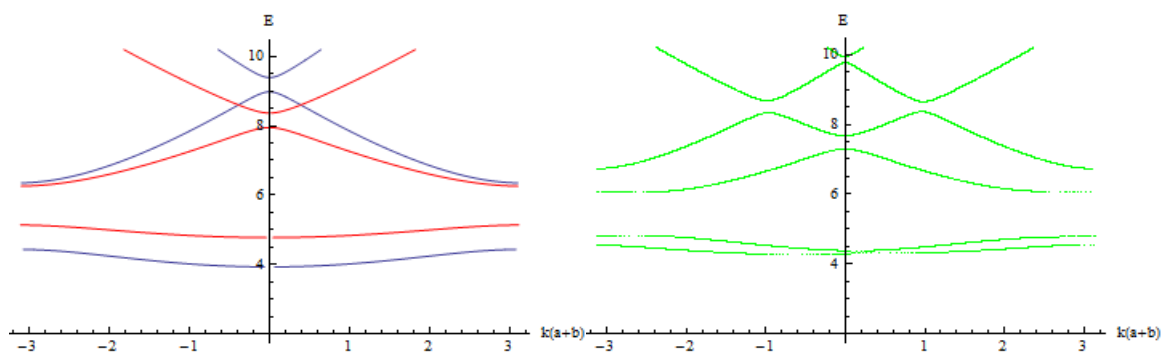


Рис. 1. Энергетический спектр сверхрешётки при  $|k_x| = |k_y|$  и  $k_y = 0$

**ELECTRONIC PHENOMENA  
IN NANOSTRUCTURES**

# ZITTERBEWEGUNG OF ELECTRONS IN SEMICONDUCTORS

S.A. Tarasenko

*A.F. Ioffe Physico-Technical Institute, Russian Ac. Sci., St. Petersburg*

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

Once upon a time, at the birth of quantum mechanics, E. Schrödinger drew attention to an unusual property of the Dirac equation: The operator of velocity and the Hamiltonian do not commute with each other even in the absence of external fields. This implies that the quantum-mechanical state of a relativistic particle with a definite value of the momentum may not be generally characterized by a certain value of the velocity: The uniform and linear motion of a particle may be superimposed with its trembling motion (Zitterbewegung) [1, 2]. The frequency of these oscillations for Dirac electrons is determined by the parameter  $2mc^2/h \sim 10^{20}$  Hz and is extremely high while the amplitude given by the Compton wavelength  $\lambda_C \sim 10^{-11}$  cm is very small. Both are inaccessible with present experimental techniques.

In this paper, we report the discovery, theoretical and experimental study of the trembling motion of conduction-band electrons in semiconductors, the phenomenon similar to the Zitterbewegung of relativistic particles [3]. Here, the effect originates from the fact that, in the presence of spin-orbit coupling and an external magnetic field, the electron velocity is not a conserved quantity and contains a contribution oscillating at the Larmor frequency. Therefore, the spin oscillations of electrons in the magnetic field are accompanied by the trembling orbital motion of the electrons in real space. Trembling motion of individual electrons can be made coherent if one synchronizes the electron spin precessions, e.g., by means of optical orientation. Coherent electron Zitterbewegung is maintained as long as the spin coherence is not destroyed by the processes of spin dephasing.

The experiments are performed on strained *n*-type InGaAs epilayers. The interband optical excitation of the samples by pulses of circularly polarized light triggers the coherent precession of electron spins in the magnetic field and thereby initiates the coherent Zitterbewegung. The trembling motion of the electron gas is detected then as a high-frequency electric current generated in the sample in the absence of any bias applied [3]. The developed theory of the coherent electron Zitterbewegung in semiconductors describes well the experimentally observed dependence of the amplitude and frequency of the high-frequency current on the magnetic field, the polarization of the exciting light, and the sample geometry.

1. E. Schrödinger, Sitz. Press. Akad. Wiss. Phys.-Math **24**, 418 (1930).
2. W. Zawadzki, T.M. Rusin, J. Phys.: Condens. Matter **23**, 143201 (2011).
3. I. Stepanov, M. Ersfeld, A.V. Poshakinskiy, M. Lepsa, E.L. Ivchenko, S.A. Tarasenko, and B. Beschoten, to be published.

## TUNNELING TRANSPORT IN SUPERLATTICES WITH DISTRIBUTED THZ CAVITIES

I.V. Altukhov<sup>1</sup>, M.S. Kagan,<sup>1</sup> S.K. Paprotskiy<sup>1</sup>, A.N. Baranov<sup>2</sup>, R. Teissier<sup>2</sup>,  
A.D. Buravlev<sup>3</sup>, N.D. Il'inskaya<sup>3</sup>, Yu.M. Zadiranov<sup>3</sup>, A.A. Usikova<sup>3</sup>,  
A.P. Vasil'iev<sup>3</sup>, V.M. Ustinov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*V.A. Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics,  
Russian Ac. Sci., Moscow*

<sup>2</sup>*IES, Université Montpellier 2, CNRS, Montpellier, France*

<sup>3</sup>*A.F. Ioffe Physico-Technical Institute, Russian Ac. Sci., St. Petersburg  
E-mail: [kagan@cplire.ru](mailto:kagan@cplire.ru)*

The studies of the effect of distributed terahertz (THz) cavity on the tunneling current in superlattices (SL) InAs/AlSb and GaAs/AlAs at room temperature are presented. The SLs consisted of 60 and 100 periods, respectively, were sandwiched between heavily doped cap layer and the substrate. Metallic contacts to the produced mesa structures had the form of a ring and formed a distributed cavity for free-space wavelengths of 110 to 160  $\mu\text{m}$ .

Several equidistant maxima were observed on current-voltage characteristics in the range of non-resonant tunneling (at voltages, when the overlapping of ground confined states in the neighboring quantum wells and corresponding miniband transport disappear). Voltage differences between the maxima were correlated to the resonant frequency of the cavity. The origin of these maxima is attributed to the Purcell effect that is the enhancement of spontaneous electromagnetic emission into the cavity as compared with the emission into free space.

The vertical transport in the short-period GaAs/AlAs SLs was studied in the region of miniband conductivity (at the presence of electric domains). The electric domain formation at a threshold voltage was accompanied by steep current drop. The current jump could reach 50 %. It has been found that this threshold voltage changes considerably under the variation of the cavity parameters. The shift of the threshold has been explained by the excitation of high-amplitude oscillations in the cavity. Indeed, if an ac voltage of comparable amplitude is applied to the sample with a nonlinear current-voltage characteristic in addition to the dc voltage, an additional dc voltage appears because of the detection and shifts the operating point. Thus, this experiment indicates the excitation of THz oscillations in the cavity owing to the negative resistance of the superlattice with domains.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 14-02-01062) and RAS programs "Basic research on nanotechnology and nanomaterials" and "Modern problems of radiophysics".

# MAGNETO-SPECTROSCOPY OF COULOMB COMPLEXES IN GaAs/AlGaAs TRIGONAL QUANTUM DOTS

M.V. Durnev

*A.F. Ioffe Physico-Technical Institute, Russian Ac. Sci., Saint-Petersburg*

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

This work is aimed at theoretical and experimental studies of magneto-optical effects in unstrained GaAs/AlGaAs quantum dots grown on the GaAs(111)A surface. These quantum dots possess a trigonal  $C_{3v}$  symmetry with a three-fold rotational axis  $z \parallel [111]$  and demonstrate bright effects observed in photoluminescence (PL) spectra [1]. Particularly, magnetic field directed along the growth axis mixes heavy-hole states with  $\pm 3/2$  spin projections onto the  $z$ -axis and leads to exciton and trion “dark” states optically active [2, 3]. In charge tunable gated structures different charge states of single dots with a charge varying from  $-3|e|$  to  $+2|e|$  are demonstrated [4].

In this work we will present a detailed theory of the fine structure and magneto-PL spectra of the excited states of the electron-hole complexes, in which electron or hole resides in the excited level of the size quantization. These are the so-called “hot” trions  $X^{-*}$  (two electrons and a hole) and  $X^{+*}$  (an electron and two holes), as well as a doubly charged exciton  $X^{2-}$ . Position and intensity of the spectral lines are determined by the interplay of the electron-hole exchange interaction and the magneto-induced mixing of heavy-hole states. Comparison of theory and experiment allows for a precise identification of the charge state of the dot and to extract the exchange constants and  $g$ -factors of the excited charge carriers [5].

We show the dynamic nuclear polarization which appears under a resonant excitation. Nuclear polarization manifests itself as an Overhauser field acting on electron and hole spins and leading to the additional contribution to the spectral splitting of the  $X^+$  trion. Simultaneous observation of both “bright” and “dark” states allows for independent extraction of hole and electron hyperfine constants. The ratio of these constants is found to be approximately 20 %. The developed theory of the hole-nuclear hyperfine interaction in (111) quantum dots predicts that this value depends not only on intrinsic material properties but also on the dot shape and size [6].

1. M.V. Durnev, *Solid State Physics* **57**, 1201 (2015).
2. G. Sallen, B. Urbaszek, M.M. Glazov, et al., *Phys. Rev. Lett.* **107**, 166604 (2011).
3. M.V. Durnev, M.M. Glazov, E.L. Ivchenko, et al., *Phys. Rev. B* **87**, 085315 (2013).
4. L. Bouet, M. Vidal, T. Mano, M. V. Durnev, et al., *Appl. Phys. Lett.* **105**, 082111 (2014).
5. M.V. Durnev, M. Vidal, L. Bouet, et al., arxiv:1511.08196 (2015).
6. M. Vidal, M.V. Durnev, L. Bouet, et al., arxiv:1603.02909 (2016).

# RESONANCES IN THE ABSORPTION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION IN A QUANTUM WIRE

V.V. Karpunin

*Evsevev Mordovia State Pedagogical Institute, Saransk*

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

An analytical expression for the absorption coefficient (AC) of electromagnetic radiation by electrons in a quantum wire placed in a magnetic field is obtained. We used the anisotropic parabolic confinement potential. The case of a transverse magnetic field with respect to wire axis is considered. Shows absorption resonance nature and position of peaks is found. The resonant peaks depending on the radiation frequency (fig. 1), the magnetic field and the magnetic field angle of inclination of the plane  $xOz$  [1].

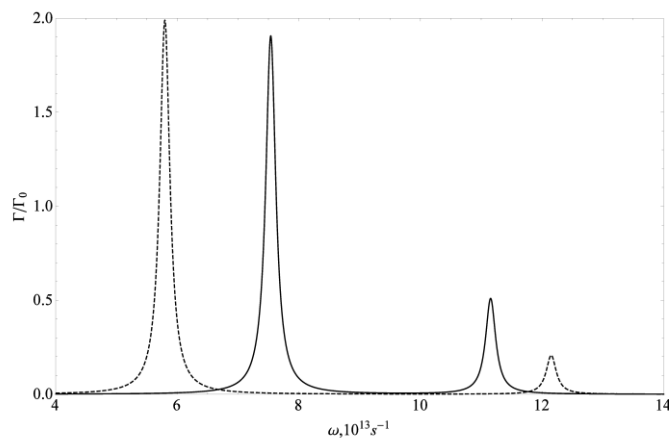


Fig.1 The dependence of the coefficient of the electromagnetic radiation on the radiation frequency;  $\omega_1 = 5 \cdot 10^{13} c^{-1}$ ,  $\omega_2 = 10 \cdot 10^{13} c^{-1}$ ,  $\omega_c = 7.5 \cdot 10^{13} c^{-1}$ ,  $\theta = \pi/3$ -solid curve,  $\theta = \pi/6$ -dashed curve,  $\tau = 10^{-13} c$ ,  $T = 10K$ .

The graph has a doublet structure. This structure due to resonance with the proceeded that the radiation frequency  $\omega$  is equal to one of two hybrid frequencies  $\Omega_{1,2}$ . Since hybrid frequencies dependent on the magnitude and direction of the field, and the positions of the resonant frequencies depends on the magnetic field of this parameters. The shape of the resonance peaks in accordance with the expression AC is symmetric with respect to the point of resonance peaks.

We investigated the scattering of electrons by optical phonons and show that it leads to additional resonance peaks in the absorption. It should be noted that it follows from [2] inclined to the axis of system symmetry magnetic field offers additional possibilities for the study of charge carrier spectrum parameters and the scattering data.

1. V.V. Karpunin, V.A. Margulis, *Semiconductors* **50**, 732 (2016).
2. I.L. Drichko, I.Yu. Smirnov, A.V. Suslov et al., *JETP* **111**, 495 (2010).

# VALLEY-DEPENDENT GOOS-HANCHEN SHIFT IN SILICENE AND GRAPHENE BASED STRUCTURES

E.S. Azarova, G.M. Maksimova

*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*

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

Goos-Henchen (GH) effect [1] is an optical phenomenon in which a light beam undergoes a lateral shift from the position predicted by geometrical optics, when totally reflected from a single interface of two media having different refraction indices. This is due to the wave interference: waves forming a package acquire different phase shifts upon reflection. Thus, this effect can be implemented for other types of waves, such as acoustic or de Broglie waves. Beenakker's paper [2] initiated a study of this effect in graphene and graphene based structures. Unlike graphene, the strong spin-orbit interaction in silicene leads to the appearance of gaps in the spectrum near the Dirac points, the value of which can be changed by an external perpendicular electric field.

In this paper, the GH shift  $\sigma_r$  is calculated for the wave packet reflected at the single interface separating the silicene or graphene structures, characterized by different values of the gap and potential parameters. Our consideration shows that in gapped graphene a value  $\sigma_r$  depends not only on the kinematic characteristics of the initial particles, but also on the electrons belonging to a certain valley. In silicene the effective gap dependence of on the spin and valley indices leads to the removal of not only the valley but also the spin degeneracy. In addition, in contrast to the optical effect, according to our calculation, the lateral beam shift occurs not only in the case of total, but also in the partial reflection. However, upon reflection from a single interface, the value of displacement (which can be both positive and negative) is of the order of several Fermi wavelengths. The greater effect, i.e., a significant increase in the absolute value of shift  $\sigma_r$  can be achieved for the electronic beam passing through the potential barrier of finite width in the resonance conditions. We have examined the dependence  $\sigma_r$  on the barrier parameters and characteristics of the initial wave packet. It is shown that in contrast to the case discussed above, the GH shift in gapped graphene is a valley-degenerate, and for silicene its value depends on the product of spin and valley indices.

1. F. Goos and H. Hanchen, *Ann. Phys.* **436**, 333 (1947); **440**, 251 (1949).
2. C.W.J. Beenakker et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 146804 (2009).



# MODELING OF SPATIAL DISTRIBUTION OF POLYELECTROLYTE MAGNETITE-CONTAINING MICROCAPSULES IN BIOLOGICAL OBJECTS

M.A. Pyataev, M.V. Gerasimov, M.N. Zharkov, I.A. Yurlov, P.S. Zamyshliaev,  
R.R. Ganeev, N.A. Pyataev, G.B. Sukhorukov  
*National Research Mordovia State University, Saransk, Russia*  
*E-mail: [pyataevma@mail.ru](mailto:pyataevma@mail.ru)*

Multilayer polyelectrolyte microcapsules made of biodegradable polymers with incorporated magnetite nanoparticles have been proposed recently for magnetically controlled target drug delivery [1]. However, the dynamics of the magnetic particles in the external field has not been studied yet and the mechanism which can lead to accumulation of microcontainers with drug in the magnetic field was not investigated.

In this paper, we consider polymeric microcapsules synthesized of polyarginine and dextran sulfate. The magnetite nanoparticles were imbedded in the capsule shell. We have studied their magnetic properties and the possibility of changing the concentration of capsules in the living organism using a magnetic field.

A model of the movement of ferromagnetic nanoparticles in a laminar flow of fluid in the presence of an inhomogeneous magnetic field is proposed to describe mechanism of capsules accumulation. It is well-known that a force proportional to the magnetic field gradient and the particle magnetic moment acts on the particle in such a field. Taking into account the possibility of nanoparticle rotation in the liquid, the average magnetic moment and the average force acting on a particle are to be considered in this case. To determine the average magnetic moment we use the theory of superparamagnetic liquids according to which dependence of the magnetic moment on the magnetic field is described by the Langevin formula [2]. To estimate the spatial distribution of field we have performed analytical and numerical study of fields generated by magnets of different shapes (cylinder, truncated cone). Furthermore, we have measured the magnetic field generated by a cylindrical permanent magnet and the force acting on samples of colloidal magnetite in this field. The results of calculation are in good agreement with the measurements.

The work is supported by Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project no. 2952).

1. A. M. Pavlov, et al. *Adv. Mater.* **25**, (48) 6945 (2013).
2. M. I. Shliomis, *Sov. Phys.- Uspekhi* **17**, 153 (1974).

# MANIFESTATION OF WANNIER-STARK LOCALIZATION IN A SUPERLATTICE WITH A FINITE NUMBER OF LAYERS

K.R. Vlasov, M.A. Pyataev

*National Research Mordovia State University, Saransk, Russia*

*E-mail: windsofoceans@gmail.com*

In 1960, G.H. Wannier investigated the motion of electrons in a periodic potential in the presence of a homogenous external electric field [1]. Using a basis of Bloch wave functions and expansion of individual terms of the equation in a series by powers of energy, he showed that a discrete energy spectrum appears in such system. This phenomenon was called Wannier-Stark localization. Later, evidence for the existence of Wannier-Stark localization has been criticized [2,3], in particular, doubts were raised about the necessity of localized state existence at any potential parameters and the values of the electric field. It is obvious that from practical point of view the most important problem is the one about energy spectrum of a superlattice containing sufficiently large but finite number of periods.

The aim of the present work is the study of the Wannier-Stark localization effect in a one-dimensional periodic system containing a few dozens of periods, placed in a homogeneous electric field. We consider the scattering of electrons coming from the region with low potential energy to the stepped (non-monotonic) potential formed by periodic superlattice potential and the homogeneous electric field potential.

The maximal probability density of electron finding in a given period as a function of electron energy was investigated. It was found that in certain intervals of energy the maximal probability density oscillates as a function of energy with the period corresponding to the distance between the Stark levels. A criterion based on the evaluation of the oscillation amplitude, allowing quantifying the degree of Wannier-Stark localization, was proposed. Using this criterion, we have shown that Wannier-Stark localization is quite noticeable only in the case of a relatively high potential barriers and weak electric field.

The work is supported by Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project no. 2.2665.2014).

1. G. H. Wannier, *Phys. Rev.* **117**, 432 (1960).
2. J. Zak, *Phys. Rev. Lett.* **20**, 1477 (1968).
3. J. Zak, *Phys. Rev. B* **43**, 4519 (1991).

# THE INFLUENCE OF GOLD NANOPARTICLES ON THE EXCITON LUMINESCENCE SPECTRUM IN GaAs/AlGaAs SEMICONDUCTOR QUANTUM-WELL STRUCTURES

M.V. Kochiev, E.V. Utsyna, V.A. Tsvetkov, N.N. Sibeldin  
*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*  
*E-mail: [eucyna@bk.ru](mailto:eucyna@bk.ru)*

Studies of exciton-plasmon interactions have attracted much interest recently because they can be harnessed to control the intensity and directionality of radiation in semiconductor nanostructures. Plasmonic effects manifest themselves in various types of heterostructures. Here, we examine the influence of gold nanoparticles deposited onto a semiconductor structure with a near-surface quantum well (QW) on the spectral and kinetic characteristics of the QW emission.

We investigated a GaAs/AlGaAs structure containing a 10-nm-wide QW in close proximity (15 nm) from the surface and a 15-nm-wide reference QW located deeper within the structure and separated from the first QW by a 200-nm-thick Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As barrier layer. An aqueous solution with gold particles stabilized by cyclodextrin with an average particle diameter of 15 nm was applied to the sample surface. The surface concentration of nanoparticles was regulated by varying the solution concentration. The sample was placed in a variable-temperature helium optical cryostat. The measurements were carried out at a temperature of 10 K. The intrawell excitation of the sample was performed by picosecond pulses from a Ti:sapphire laser. The photoluminescence (PL) spectra of both QWs feature exciton emission lines; the spectrum of the wider QW also feature a weak trion line. The deposition gold nanoparticles onto the sample surface led to a significant long-wavelength shift and broadening of the PL line corresponding to the near-surface QW. The influence of gold nanoparticles on the spectrum of the reference QW (located far from the surface) was negligible. The kinetic dependences of the PL from the two QWs were determined both for the bare sample and the sample coated with gold nanoparticles. The PL decay time constants for the narrow and wide QWs in the bare structure are about 450 and 850 ps, respectively. For the structure coated with gold nanoparticles, these times are 200 and 600 ps, respectively. Thus, the deposition of gold nanoparticles on the sample surface leads to changes in the PL dynamic of both the near-surface QW and, to a less extent, the reference QW.

Qualitatively similar results were obtained when a continuous gold film was deposited on the surface of the structure.

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 13-02-12197).

# ELECTRON STATES IN SUPERLATTICES WITH SPIN-ORBIT INTERACTION

A.R. Zaynagutdinov, A.V. Telezhnikov

*National Research Nizhny Novgorod State University of N.I. Lobachevsky,  
Nizhni Novgorod*

*E-mail: [zoya1066@mail.ru](mailto:zoya1066@mail.ru), [telezhnikov@phys.unn.ru](mailto:telezhnikov@phys.unn.ru)*

The study of quantum states of electron in superlattice with the spin-orbit coupling (SOC) is an actual problem of condensed matter physics. In this paper in the framework of model of Kronig-Penny was studied the electronic structure of the superlattice, formed by periodically repeating layers of semiconductors with different constants SOC Dresselhaus.

For the special case, when the wave vectors  $|k_x| = |k_y|$  (superlattice is oriented along the z axis), two dispersion equations (due to the presence of the SOC) was obtained. Each of which defines a series of miniband (Fig. 1a). In this case states belonging to each series (designated indices "+" and "-") have the following spin densities:  $S_z^\pm(z) = 0$ ,  $S_x^\pm(z) = -S_y^\pm(z)$ . Numerical analysis of the dispersion equations shows, that the width of the miniband as well as the value of band gaps depend strongly on the type of spin polarization. So, with an increase of the parameter  $|k_x|$ , miniband of a series with the polarization of "+" are considerably narrower than those of the miniband series with polarization "-". Moreover, both series of miniband are shifted up in energy. Also found that in this particular case the interface states in the superlattice are absent.

In the general case, when  $|k_x| \neq |k_y|$ , miniband energy strongly depends on the ratio between the wave vectors  $|k_x|$  and  $|k_y|$ . The calculation of the band structure of the superlattice for this case was produced by numerically (Fig. 1b). It can be seen, that in contrast to the case considered previously "anticrossing" branches of the spectrum is observed. This opens the energy gap.

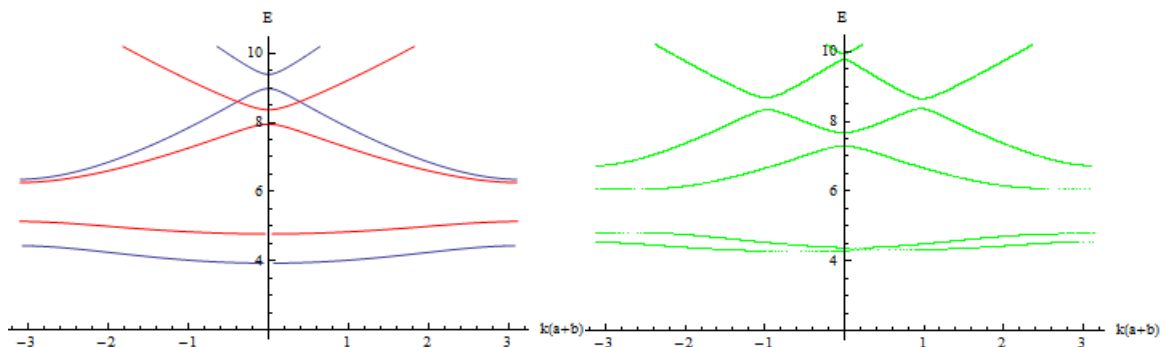


Fig. 1. The energy spectrum of the superlattice with  $|k_x| = |k_y|$  and  $k_y = 0$

## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абрамов А.Н.	55
Аверкиев Н.С.	198
Азарова Е.С.	206
Алимов О.К.	170
Алтухов И.В.	200
Алышев С.В.	148
Андрев П.В.	106, 110
Андреев Б.А.	34
Анурова М.О.	93
Афанасьев Ф.В.	67
Балашов В.В.	162
Баранов А.Н.	200
Безбородкин П.В.	154
Белолипецкий А.В.	34
Биткина О.Ю.	158
Болдырев К.Н.	27, 94, 102, 103
Борик М.А.	95, 97
Боричевский В.Р.	101
Боровикова Е.Ю.	103
Бредихин С.И.	95
Бублик В.Т.	95, 97, 101
Бузаева М.В.	90
Буланов Е.Н.	83
Буравлев А.Д.	200
Ваганова Е.С.	90
Вагапова Е.А.	170
Вайнер Ю.Г.	22
Ванецев А.С.	33
Васильев А.Л.	161
Васильев А.П.	200
Вахренев Р.Г.	31
Великанов С.Д.	159, 160
Ветчинников М.П.	91
Власов К.Р.	208
Волков И.А.	68
Волкова Т.В.	97
Воронов В.В.	31, 36, 37, 108
Воронцов К.В.	159, 160
Воротынцев А.В.	152
Воротынцев А.М.	152
Гадомский О.Н.	44
Гайтко О.М.	33
Галаган Б.И.	62, 161
Ганеев Р.Р.	207
Гарахин С.А.	34
Гарибин Е.А.	88
Гарюткин В.А.	159, 160
Гасанов А.А.	108
Герасимов М.В.	207
Гижа С.С.	113
Гладышев А.В.	60
Глебов И.С.	151
Голубев Н.В.	100, 113
Гольева Е.В.	39, 40
Горбунов Д.С.	114
Гориев О.Г.	149

Гориева В.Г.	153
Грачев Д.А.	34, 42
Грибко В.В.	110
Григорьев С.А.	80
Губин М.А.	61
Гурьянов А.М.	203
Гурьянов А.Н.	54, 60, 66, 150
Давыдова О.А.	90
Демидов В.В.	154
Денисов Б.Н.	63
Денисов С.А.	112
Денкер Б.И.	62
Дианов Е.М.	148, 161
Добрецова Е.А.	102, 103
Долганов А.В.	38, 114
Дорофеев В.В.	168
Дорошенко М.Е.	170
Дукельский К.В.	154
Дунаева Е.Э.	98
Дурнев М.В.	201
Дяденко М.В.	65
Егорова О.Н.	62
Елисеев В.В.	89
Еремейкин О.Н.	158
Ермаков Р.П.	37
Ермолаева Е.В.	93
Ершов А.В.	34, 42
Жарков М.Н.	35, 207
Жлуктова И.В.	56
Жукова Е.В.	111
Журавлев К.П.	109
Задиранов Ю.М.	200
Зазулин Я.А.	63
Зайнагутдинов А.Р.	210
Зайцев А.В.	112
Зайцев А.И.	157
Захаров В.Н.	57, 58
Захаров Н.Г.	159, 160
Зверев П.Г.	163, 171
Зиятдинова М.З.	100, 113
Зленко А.С.	161
Золотовский И.О.	164
Иванов В.А.	106
Ивлева Л.И.	98
Игнатьева Е.С.	100
Ильинская Н.Д.	200
Исупова Е.А.	106
Исхакова Л.Д.	55, 161
Кавтасьев Д.И.	57
Каган М.С.	200
Казаков Б.Н.	149, 165
Казанский П.Г.	91, 151, 155
Камынин В.А.	56, 62, 68
Карасик А.Я.	169
Карасик В.Е.	61
Карпунин В.В.	204
Керв Ю.В.	171
Киреев А.Н.	61

Климин С.А.	87, 96
Климов Е.С.	90
Князев А.В.	83
Князева С.С.	83
Ковгар В.В.	25
Кокурин И.А.	202
Колесников И.Е.	39
Колобкова Е.М.	99
Коломеец В.Б.	159
Колташев В.В.	55, 98
Колядин А.Н.	60
Комова М.Г.	107
Конов В.И.	109
Конюшкин В.А.	170
Копылов Ю.Л.	162
Кораблева С.Л.	153
Косолапов А.Ф.	60
Костров А.В.	152
Кочиев М.В.	209
Крайский А.В.	147
Крашенникова О.В.	83
Крутько В.А.	107
Крылов А.А.	61
Кузнецов С.В.	31, 36, 37, 88, 104, 108
Кузьмин Н.Н.	102
Кулебякин А.В.	95, 101
Курицына И.Е.	95
Кяшкин В.М.	33, 64
Лазарев В.А.	61
Лапин В.А.	164
Лапина В.А.	25
Лаптев А.Ю.	150
Ларионов А.В.	159
Ларькин А.С.	155
Латухина Н.В.	32
Левицкий И.А.	65
Легков А.М.	42
Леонов С.О.	61
Леонович Г.И.	57, 58
Лизункова Д.А.	32
Липатов Д.С.	66
Липатьев А.С.	91, 151, 155
Липатьева Т.О.	91, 155
Лобанов А.С.	54
Ломонова Е.Е.	33, 95, 97, 101, 162
Лопарева А.П.	38
Лопатина Е.В.	155
Лоренци Р.	100
Лотарев С.В.	91, 151, 155
Лугинина А.А.	36
Луканин В.И.	169
Лютова Е.Н.	114
Ляпин А.А.	153
Мазаев Л.С.	96
Максимова Г.М.	206
Малашкевич Г.Е.	25
Малеев О.В.	61
Марисов М.М.	156

Маркелов А.С.	110
Мартынова К.А.	170
Мартьянов А.К.	109
Масалов А.В.	113
Маслов В.А.	104
Матвеев С.А.	112
Машин А.И.	152
Машинский В.М.	161
Маякова М.Н.	31, 36, 37, 104, 109
Милович Ф.О.	95, 161
Михайлов М.Д.	39, 40
Михеев А.В.	165
Мишкин В.П.	38, 114
Мищенко Г.М.	160
Молчанова А.Д.	94
Мочалов Л.А.	152
Мухин А.В.	160
Мызина В.А.	95, 97, 101
Надёжин А.С.	160
Накладов А.Н.	170
Нежданов А.В.	112
Нежданов А.В.	152
Нетесова Н.П.	41
Низамутдинов А.С.	92, 156
Николаев Н.И.	160
Нищев К.Н.	38, 64, 68, 89, 104, 114
Новопольцев М.И.	89
Номаконов Г.Н.	159
Носкова А.Н.	166
Олешкевич С.В.	58
Осико В.В.	88, 95, 108, 109, 144
Охримчук А.Г.	60, 168
Палеари А.	100
Папко Л.Ф.	65
Папроцкий С.К.	200
Перов А.А.	205
Петрова О.Б.	93, 99, 111
Пиршин И.В.	113
Писарев Р.В.	94
Платонов А.В.	28
Плетенева Е.Н.	60
Плехович А.Д.	55
Плотниченко В.Г.	108, 150
Поминова Д.В.	31, 37, 107
Поносова А.А.	62
Попов П.А.	108
Попова М.Н.	144
Пресняков М.В.	161
Прохоров А.М.	166
Пыненков А.А.	64, 104
Пятаев М.А.	207, 208
Пятаев Н.А.	35, 207
Ральченко В.Г.	109
Рахимов Н.Ф.	92
Рогожина Г.А.	32
Рожнова Ю.А.	37
Романишкин И.Д.	109
Рульков А.С.	205



Рябинин А.В.	110
Рябова А.В.	31, 37
Рябочкина П.А.	33, 35, 97, 146, 153, 162
Рясной Н.В.	58
Савикин А.П.	158
Савин С.С	109
Сазонкин С.Г.	61
Сандуленко А.В.	39
Сверчков С.Е.	62, 161
Севостьянова Т.С.	111
Седов В.С.	109
Семашко В.В.	92, 145, 149, 153, 156
Семенов С.Л.	62
Семенцов Д.И.	164
Сергеев В.А.	90
Серяков С.В.	101
Сибельдин Н.Н.	209
Сигаев В.Н.	91, 100, 113, 151, 155
Сириковский А.В.	152
Сиротина В.А.	111
Сироткин А.А.	163, 171
Смаев М.П.	168
Смирнова Н.Н.	83
Соболь А.А.	157
Соколов В.О.	150
Соколов И.А.	39, 40
Сорокин Н.И.	104
Степанова И.В.	99
Степко А.А.	167
Сухоруков Г.Б.	35, 207
Табачкова Н.Ю.	33, 95, 97, 101
Тарабрин М.К.	61
Тарасенко С.А.	199
Тележников А.В.	210
Тесье Р.	200
Трушин В.Н.	110
Трушин В.Н.	112
Турьянский А.Г.	113
Усикова А.А.	200
Усламина М.А.	104
Устинов В.М.	200
Уцына Е.В.	209
Ушаков С.Н.	104
Фаддев М.А.	106, 110
Федоров П.П.	31, 36,37, 88, 104, 108,109
Федотов С.С.	91, 151
Филатова С.С.	56
Фирстов С.В.	54, 64, 148
Фирстова Е.Г.	148
Фролов И.В.	90
Фролов Ю.Н.	159, 160
Харахордин А.В.	150
Хомич А.А.	109
Хомяков А.В.	93, 111
Хотченкова Т.Г.	25
Храмов В.С.	38
Хрущалина С.А.	33, 35
Цветков В.А.	209

Цветков В.Б.	56, 62, 68
Чабушкин А.Н.	97, 162
Чалков В.Ю.	112
Чернышев В.А.	103
Чувилина Е.В.	108
Чунин И.И.	42
Чухловина Т.В.	98
Шавельев А.А.	156
Шахгильдян Г.Ю.	91
Шварц Н.Л.	24
Шенгуров В.Г.	112
Шилова Г.В.	163
Шкуратко А.С.	113
Шукшин В.Е.	157
Щукарев И.А.	44
Юрлов И.А.	207
Яблонский А.Н.	34
Яшков М.В.	55

## AUTHOR INDEX

Abramov A.N	71
Alimov O.K.	195
Altukhov I.V.	213
Alyshev S.V.	178
Andreev B.A.	49
Andreev P.V.	135
Anurova M.O.	123
Azarova E.S.	216
Balashov V.V.	189
Baranov A.N.	213
Belolipecky A.V.	49
Bitkina O.Yu.	184
Boldyrev K.N.	47, 124, 131, 132
Borik M.A.	125, 127
Borovikova E.Yu.	132
Bredikhin S.I.	125
Bublik V.T.	125
Bulanov E.N.	118
Buravlev A.D.	213
Chabushkin A.N	127, 189
Chalkov V. Yu.	140
Chernyshev V.A.	132
Chukhlovina T.V.	128
Chunin I.I.	52
Chyvilina E.V.	137
Denisov S.A.	140
Denker B.I.	76
Dianov E.M.	178, 187
Dobrecova E.A.	131, 132
Dolganov A.V.	50, 142
Doroshenko M.E.	195
Dunaeva E.E.	128
Durnev M.V.	214
Dyadenko M.V.	78
Egorova O.N.	76
Eremeykin O.N.	184
Ermolaeva E.V.	123
Ershov A.V.	49, 52
Faddeev M.A.	135
Fedorov P.P.	122, 133, 137, 138, 188
Filatova S.A.	72
Firstov S.V.	70, 77, 178
Firstova E.G.	178
Frolov I.V.	121
Frolov Yu.V.	185, 186
Gaitko O.M.	48
Galagan B.I.	76, 187
Ganeev R.R.	217
Garakhin S.A.	49
Garibin E.A.	122
Garutkin V.A.	185, 186
Gasarov A.A.	137
Gerasimov M.V.	217
Gizha S.S.	141
Golubev N.V.	130, 141
Gorbunov D.S.	142

Goriev O.G.	179
Gorieva V.G.	182
Grachev D.A.	49, 52
Gribko V.V.	134
Grigoriev S.A.	116
Gubin M.A.	75
Gur'yanov A.N.	70, 71, 180
Ignat'eva E.S.	130
Il'inskaya N.D.	213
Iskhakova L.D.	71
Iskhakova L.D.	187
Isupova E.A.	135
Ivanov V.A.	135
Ivleva L.I.	128
Kaftasev D.I.	73
Kagan M.S.	213
Kamenskiy D.	94, 124
Kamynin V.A.	72, 76
Karasik A.Ya.	194
Karasik V.E.	75
Karpunin V.V.	215
Kazakov B.N.	179, 192
Kerv Yu.V.	196
Kharakhordin A.V.	180
Khomich A.A.	138
Khomyakov A.V.	123, 139
Khottchenkova T.G.	45
Khramov V.S.	50
Khrushchalina S.N.	48
Kireev A.N.	75
Klimin S.A.	121, 126
Knyazev A.V.	118
Knyazeva S.S.	118
Kochiev M.V.	219
Kolobkova E.M.	129
Kolomeets V.B.	185
Koltashev V.V.	71
Koltyshev V.V.	128
Komova M.G.	136
Konov V.I.	138
Konyushkin V.A.	195
Kopulov Yu.L.	189
Korableva S.L.	182
Kostrov A.V.	181
Krashennnikova O.V.	118
Kraskiy A.V.	177
Krutko V.A.	136
Krylov A.A.	75
Kulebyakin A.V.	125
Kuritsyna I.E.	125
Kuz'min N.N.	131
Kuznetsov S.V.	122, 133, 137, 138, 188
Kyashkin V.M.	48, 77, 188
Kouhar V.V.	45
Lapin V.A.	191
Lapina V.A.	45
Laptev A.Yu.	180
Larionov A.V.	185

Lazarev V.A.	75
Legkov A.M.	52
Leonov S.O.	75
Leonovich G.I.	73, 74
Levitskii I.A.	78
Lobanov A.S.	70
Lomonova E.E.	48, 125, 127, 189
Lopareva A.P.	50
Lorenzi R.	130
Lukanin V.I.	194
Lyapin A.A.	182
Lyotova E.N.	142
Majakova M.N.	133, 138
Maksimova G.M.	216
Malashkevich G.E.	45
Maleev O.V.	75
Markelov A.S.	134
Martyanov A.K.	138
Martynova K.A.	195
Masalov A.V.	141
Mashin A.I.	181
Mashinsky V.M.	187
Maslov V.A.	133
Matveev S.A.	140
Mazaev L.S.	126
Mikheev A.V.	192
Milovich F.O.	125, 187
Mishjenko G.M.	186
Mishkin V.P.	50, 142
Mochalov L.A.	181
Molchanova A.D.	124
Muhin A.V.	186
Myzina V.A.	125, 127
Nadezhin A.S.	186
Nakladov A.N.	195
Netesova N.P.	51
Nezhdanov A.V.	140
Nezhdanov A.V.	181
Nikolaev N.I.	186
Nishev K.N.	50, 77, 133, 142, 188
Nomakonov G.N.	185
Noskova A.N.	193
Oleshkevich S.V.	74
Opitz J.	25, 45
Osiko V.V.	122, 125, 137, 138, 174, 188
Paleari A.	130
Papko L.F.	78
Paprotskiy S.K.	213
Petrova O.B.	123, 129, 139
Pirshin I.V.	141
Pisarev R.V.	124
Plekhovich A.D.	71
Plotnichenko V.G.	137
Plotnichenko V.G.	180
Pominova D.I.	136
Ponosova A.A.	76
Popov P.A.	137
Popova M.N.	174

Presniakov M.V.	187
Prokhorov A.M.	193
Pyataev M.A.	217, 218
Pyataev N.A.	217
Pynenkov A.A.	77, 133, 188
Ralchenko V.G.	138
Romanishkin I.D.	138
Ryabochkina P.A.	48, 127, 176, 182, 189
Ryasnoy N.V.	74
Savikin A.P.	184
Savin S.S.	138
Sazonkin S.G.	75
Sedov V.S.	138
Semashko V.V.	175, 179, 182
Sementsov D.I.	191
Semjonov S.L.	76
Sevostjanova T.S.	139
Shengurov V.G.	140
Shilova G.V.	190
Shkuratko A.S.	141
Shukshin V.E.	183
Shwartz N.L.	44
Sibeldin N.N.	219
Sigaev V.N.	130, 141
Sildos I.	25, 45
Sirotina V.A.	139
Sirotkin A.A.	190, 196
Sobol A.A.	183
Sokolov V.O.	180
Sorokin N.I.	133
Smirnova N.N.	118
Stepanova I.V.	129
Stricovsky A.V.	181
Su L.	148, 178
Sverchkov S.E.	76, 187
Sukhorukov G.B.	217
Tabachkova N. Yu.	48, 125, 127
Tarabrin M.K.	75
Tarassenko S.A.	212
Teissier R.	213
Telezhnikov A.V.	220
Trushin V.N.	140
Tryshin V.N.	134
Tsvetkov V.A.	219
Tsvetkov V.B.	72, 76
Turyanskiy A.G.	141
Tyutyaev E.V.	188
Ushakov S.N.	133, 188
Usikova A.A.	213
Uslamina M.A.	133, 188
Ustinov V.M.	213
Utsyna E.V.	219
Vagapova E.A.	195
Vanetsev A.S.	48
Vasil'ev A.L.	187
Vasil'iev A.P.	213
Velikanov S.D.	185, 186
Vlasov K.R.	218

Volkova T.V.	127
Voronov V.V.	137
Vorontsov C.V.	185, 186
Vorotyntsev A.V.	181
Vorotyntsev V.M.	181
Yablonsky A.N.	49
Yang Q.H.	148, 178
Yashkov M.V.	71
Yurlov I.A.	217
Zadiranov Yu.M.	213
Zaitsev A.I.	183
Zakharov N.G.	185, 186
Zakharov V.N.	73, 74
Zamyshliaev P.S.	217
Zaycev A.V.	140
Zaynagutdinov A.R.	220
Zhao M.	148, 178
Zharkov M.N.	217
Zhluktova I.V.	72
Zhukova E.V.	139
Zhuravlev K.P.	138
Ziyatdinova M.Z.	141
Zlenko A.S.	187
Zolotovskii I.O.	191
Zverev P.G.	190, 196

Научное издание

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

**Программа и материалы 15-й Международной научной  
конференции-школы**

Печатается в авторской редакции  
в соответствии с представленным оригинал-макетом

*Дизайн обложки Д.В. Мягкова*

Подписано в печать 20.09.16. Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 13,25.  
Тираж 150 экз. Заказ № 1207

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