

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОРДОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н. П. ОГАРЁВА  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ им. А. М. ПРОХОРОВА РАН»  
ИНСТИТУТ ХИМИИ ВЫСОКОЧИСТЫХ ВЕЩЕСТВ РАН  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н. И. ЛОБАЧЕВСКОГО  
ПРАВИТЕЛЬСТВО РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ

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

МАТЕРИАЛЫ  
18-й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ-ШКОЛЫ

Саранск, 15–18 сентября 2020 г.

**Конференция посвящается памяти академиков РАН  
Е.М. Дианова и В.В. Осико**



МИНИСТЕРСТВО  
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Национальный исследовательский  
Мордовский государственный университет  
имени Н. П. Огарёва



Нижегородский  
государственный  
университет  
им. Н. И. Лобачевского

САРАНСК  
ИЗДАТЕЛЬСТВО МОРДОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
2020

УДК 537.533.3:621.3.049.77

ББК В3

М 341

Редакционная коллегия:

*Н. С. Аверкиев, К. Н. Ельцов, К. Н. Ницев, П. А. Рябочкина (отв. ред.),  
С. А. Тарасенко, С. А. Хрущалина(отв. секр.)*

М 341 **Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение : материалы 18-й Междунар. науч. конф.-шк., Саранск, 15–18 сент. 2020 г. [Электронный ресурс]/ редкол.: Н. С. Аверкиев [и др.]. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2020. – 4,26 Мб.  
ISBN 978-5-7103-4006-6**

В сборник включены конспекты лекций и тезисы докладов 18-й Международной научной конференции-школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение», посвященные актуальным проблемам современного физического материаловедения. Рецензирование докладов осуществлено программным комитетом школы. Мероприятие проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-02-22003 Онлайн-конференции).

Научное издание

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

**Материалы  
18-й Международной научной конференции-школы**

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

ISBN 978-5-7103-4006-6

© Коллектив авторов, 2020  
© ФГБОУ ВО «МГУ  
им. Н. П. Огарёва», 2020  
© Оформление. Издательство  
Мордовского университета, 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

1. ВОЛОКОННЫЕ ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ  
*Буфетов И.А.*
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА ВСТАВОК НА ПЕРЕДАЧУ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ ФОТОННЫМИ СВЕТОВОДАМИ  
*Жукова Л.В., Львов А.Е., Салимгареев Д.Д., Южакова А.А.*
3. О ПОВЫШЕНИИ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ  
*Волынцев А.Б., Пономарев Р.С., Сосунов А.В.*
4. СРАВНЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СКРУЧЕННЫХ ВОЛОКОН НЕСТАНДАРТНЫХ ТИПОВ  
*Иванов О.В., Набиулин М.М.*
5. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАСЫЩАЮЩЕГОСЯ ПОГЛОТИТЕЛЯ И ДЛИНЫ РЕЗОНАТОРА ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА НА ПИКОВУЮ МОЩНОСТЬ ИМПУЛЬСА.  
*Мастин А.А., Рябочкина П.А.*
6. СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД В ТУЛИЕВОМ ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ С ПОМОЩЬЮ УГЛЕРОДНЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ  
*Арутюнян Н.Р., Камынин В.А., Мастин А.А., Образцова Е.Д., Рябочкина П.А.*
7. СОЗДАНИЕ ПЕРЕТЯЖЕК НА ВОЛОКОННЫХ ВСТАВКАХ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ОБОЛОЧЕЧНЫЕ МОДЫ  
*Бакуров Д.Д., Иванов О.В.*

### FIBER OPTICS

1. FIBER GAS LASERS  
*Bufetov I.A.*
2. COMPARISON OF POLARIZATION CHARACTERISTICS OF NON-STANDARD TWISTED FIBERS  
*Ivanov O.V., Nabiulin M.M.*
3. THE PASSIVELY MODE LOCKED FIBER LASER RESONATOR LENGTH AND SATURABLE ABSORBER PARAMETERS INFLUENCE ON PULSE PEAK INTENSITY AS GAIN INCREASED  
*Mastin A.A., Ryabochkina P.A.*
4. THE THULIUM DOPED FIBER LASER MODE-LOCKED BY CARBON NANOTUBE ABSORBER  
*Arutyunyan N.R., Kamynin V.A., Mastin A.A., Obraztsova E.D., Ryabochkina P.A.*
5. TAPERING FIBER INSERTIONS FOR CONTROLLING COUPLING TO CLADDING MODES  
*Bakurov D.D., Ivanov O.V.*

## НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НАНОПРОВОЛОКИ: РОСТ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
*Цырлин Г.Э.*
2. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ДВУМЕРНЫХ СИСТЕМАХ  
*Андрюшечкин Б.В.*
3. КВАНТОВАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ  
*Кравцов К.С.*
4. ОДНОФОТОННЫЕ ИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК  
*Климко Г.В., Рахлин М.В., Седова И.В., Сорокин С.В., Торопов А.А.*
5. ЗОНДОВЫЕ МЕТОДЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ ДИАГНОСТИКИ  
*Алексеев П.А.*
6. НИТЕВИДНЫЕ НАНОКРИСТАЛЛЫ ФОСФИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ: СИНТЕЗ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ  
*Большаков А.Д., Мухин И.С., Федоров В.В.*
7. СИНТЕЗ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ КРЕМНИЕВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК С ОРГАНИЧЕСКИМИ ЛИГАНДАМИ  
*Князев А.В., Конаков А.А., Сыров Е.В.*
8. ПОЛУЧЕНИЕ ТВЕРДОГО РАСТВОРА  $Cd_{1-x}Pb_xF_2$  МЕТОДОМ МЕХАНОСИНТЕЗА  
*Бучинская И.И., Ивановская Н.А.*
9. НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ВОЛОКНА ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА С МНОГОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОСПИННИНГА  
*Васин С.В., Низаметдинов А.М., Сергеев В.А.*
10. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ФОРМ КАРБИДА ТИТАНА  
*Вилков И.В., Кетков С.Ю., Обьедков А.М.*
11. ПОЛУЧЕНИЕ ОДНОМЕРНЫХ GaAs НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ С ПОМОЩЬЮ СВЕРХМАЛЫХ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА  
*Буравлев А.Д., Илькив И.В., Цырлин Г.Э.*
12. ОСАЖДЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ  $CaF_2$  И  $CeO_2$  НА СКОЛЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ ФЛЮОРИТА  
*Баранчиков А.Е., Гайнутдинов Р.В., Иванов В.К., Командин Г.А., Кузнецов С.В., Маякова М.Н., Новиков И.А., Табачкова Н.Ю., Теплоногова М.А., Федоров П.П.*
13. InGaAs ФОТОДИОДЫ НА ДИАПАЗОН 1.02 – 1.31 МКМ С МЕТАМОРФНЫМ БУФЕРНЫМ СЛОЕМ, ВЫРАЩЕННЫЕ НА ПОДЛОЖКАХ GaAs  
*Звонков Б.Н., Некоркин С.М., Самарцев И.В.*

14. ФОРМИРОВАНИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ Ge/Si СЛОЕВ НА Si/SiO<sub>2</sub>/Si (100)  
*Гагарин А.Г., Денисов С.А., Минеев М.Н., Павлов Д.А., Сушков А.А., Чалков В.Ю., Шенгуров В.Г.*
15. СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОПОРОШКОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ La<sub>1-x</sub>Re<sub>x</sub>Ga<sub>0.5</sub>Sb<sub>1.5</sub>O<sub>6</sub>, Bi<sub>1-x</sub>Re<sub>x</sub>Ge<sub>0.5</sub>Sb<sub>1.5</sub>O<sub>6</sub> (Re = Pr, Eu, Dy, Tb)  
*Гайтко О.М., Голодухина С.В., Егорышева А.В., Рябочкина П.А., Таратынова А.Д., Юрлов И.А., Хрущалина С.А.*
16. СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ ZrO<sub>2</sub>-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
*Веселова В.О., Егорышева А.В., Рябочкина П.А., Хрущалина С.А., Юрлов И.А.*
17. МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО НАЦЕЛИВАНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ В СИСТЕМЕ КРОВООБРАЩЕНИЯ  
*Герасимов М.В., Жарков М.Н., Пятаев М.А., Пятаев Н.А., Сокушев Д.С., Якобсон Д.Э.*
18. СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ МАГНЕТИТА, ПОКРЫТЫХ ОЛЕИНОВОЙ КИСЛОТОЙ И АМИНОСИЛАНОМ, ДЛЯ МАГНИТНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ И МРТ-ВИЗУАЛИЗАЦИИ  
*Громова Е.В., Егорова Е.И., Жарков М.Н., Пятаев Н.А., Шляпкина В.И., Якобсон Д.Э.*
19. ЦИТОТОКСИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ МАГНИТНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ НА КЛЕТКИ L-929 С ПОЛИМЕРНЫМИ МИКРОКАПСУЛАМИ, СОДЕРЖАЩИМИ НАНОЧАСТИЦЫ МАГНЕТИТА  
*Бродовская Е.П., Громова Е.В., Жарков М.Н., Пятаев Н.А., Сухоруков Г.Б., Тишин А.М.*

## NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGY

1. PHASE TRANSITIONS IN TWO-DIMENSIONAL SYSTEMS  
*Andryushechkin B.V.*
2. SINGLE PHOTON SOURCES BASED ON QUANTUM DOTS  
*Klimko G.V., Rakhlin M.V., Sedova I.S., Sorokin S.V., Toropov A.A.*
3. PROBE METHODS OF SURFACE DIAGNOSTICS  
*Alekseev P.A.*
4. SYNTHESIS OF COLLOIDAL SOLUTIONS OF SILICON QUANTUM DOTS WITH ORGANIC LIGANDS  
*Knyazev A.V., Konakov A.A., Syrov E.V.*
5. OBTAINING OF A SOLID SOLUTION Cd<sub>1-x</sub>Pb<sub>x</sub>F<sub>2</sub> BY THE MECHANOSYNTHESIS  
*Buchinskaya I.I., Ivanovskaya N.A.*

6. NANOCOMPOSITE FIBERS OF POLYVINYL ALCOHOL WITH MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES PRODUCED BY ELECTROSPINNING  
*Nizametdinov A.M., Sergeev V.A., Vasin S.V.*
7. SPIN LIGHT-EMITTING DIODES WITH (A<sub>3</sub>,Fe)B<sub>5</sub> INJECTORS  
*Dorokhin M.V., Lesnikov V.P., Ved M.V., Zdoroveyshchev A.V.*
8. THE RESEARCH OF HYBRID MATERIALS BASED ON MULTI-WALL CARBON NANOTUBES AND NANOSTRUCTURED FORMS OF TITANIUM CARBIDE  
*Ketkov S.Yu., Obyedkov A.M., Vilkov I.V.*
9. InGaAs PHOTODIODES IN THE RANGE 1.02–1.31 μm WITH A METAMORPHIC BUFFER LAYER GROWN ON GaAs SUBSTRATES  
*Nekorkin S.M., Samartsev I.V., Zvonkov B.N.*
10. FORMATION AND STRUCTURAL INVESTIGATIONS OF Ge/Si LAYERS ON Si/SiO<sub>2</sub>/Si (100)  
*Chalkov V.Yu., Denisov S.A., Gagarin A.G., Mineyev M.N., Pavlov D.A., Shengurov V.G., Sushkov A.A.*
11. SPECTRAL AND LUMINESCENT CHARACTERISTICS OF La<sub>1-x</sub>Re<sub>x</sub>Ga<sub>0.5</sub>Sb<sub>1.5</sub>O<sub>6</sub>, Bi<sub>1-x</sub>Re<sub>x</sub>Ge<sub>0.5</sub>Sb<sub>1.5</sub>O<sub>6</sub> (Re = Pr, Eu, Dy, Tb) NANOPOWDERS OF SOLID SOLUTIONS  
*Egorysheva A.V., Gajtko O.M., Golodukhina S.V., Khrushchalina S.A., Ryabochkina P.A., Taratynova A.D., Yurlov I.A.*
12. SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES OF ZrO<sub>2</sub>-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NANOPARTICLES  
*Egorysheva A.V., Khrushchalina S.A., Ryabochkina P.A., Veselova V.O., Yurlov I.A.*
13. MODELING OF MAGNETIC TARGETING OF DRUG CARRIERS IN THE BLOOD CIRCULATORY SYSTEM  
*Gerasimov M.V., Pyataev M.A., Pyataev N.A., Sokushev D.S., Yakobson D.E., Zharkov M.N.*
14. COMPARATIVE STUDY OF PHYSICAL-CHEMICAL AND BIOLOGICAL PROPERTIES OF MAGNETITE NANOPARTICLES COATED WITH OLEIC ACID AND AMINOSILANE FOR MAGNETIC HYPERTHERMIA AND MRI-VISUALISATION  
*Egorova E.I., Gromova E.V., Pyataev N.A., Shlyapkina V.I., Yakobson D.E., Zharkov M.N.*
15. CYTOTOXIC EFFECT OF MAGNETIC HYPERTHERMIA ON L-929 CELLS WITH POLYMERIC MICROCAPSULES CONTAINING MAGNETITE NANOPARTICLES  
*Brodovskaya E.P., Gromova E.V., Pyataev N.A., Sukhorukov G.B., Tishin A.M., Zharkov M.N.*

## ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

1. МОЩНЫЕ КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА  
*Соколовский Г.С.*
2. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ЛАЗЕРЫ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ  
*Никитин С.П.*
3. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ВКР ЛАЗЕРЫ В ВИДИМОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ  
*Зверев П.Г.*
4. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ В НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛАХ - КРИТИЧНЫЕ И НЕКРИТИЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ  
*Гречин С.Г., Николаев П.П., Туморин В.В.*
5. ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ ОПТИЧЕСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ  
*Калашиникова А.М.*
6. КРИСТАЛЛЫ ВGS И VGSE ДЛЯ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ  
*Гречин С.Г., Кочиев Д.Г., Николаев П.П., Туморин В.В.*
7. ВЛИЯНИЯ ВИННОЙ КИСЛОТЫ НА РОСТ КРИСТАЛЛОВ KDP  
*Грибко В.В., Прохоров А.П.*
8. ИК ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ИОНОВ  $Er^{3+}$  И  $Tm^{3+}$  ВО ФТОР- И ФТОРХЛОРГАФНАТНЫХ СТЕКЛАХ  
*Батыгов С.Х., Бреховских М.Н., Моисеева Л.В., Попов А.В.*
9. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ  $Y^{3+}$  НА СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ  $Ho^{3+}$  В КРИСТАЛЛЕ  $CaF_2$   
*Алимов О.К., Дорошенко М.Е., Нехороших А.В., Папашвили А.Г., Пирпоинт К.А.*
10. ДУХВОЛНОВОЙ ПГС НА КРИСТАЛЛЕ КТР ДЛЯ СРЕДНЕГО ИК СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА  
*Зверев П.Г., Сироткин А.А., Смирнов И.В.*
11. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ГАЛОГЕНИДОВ СЕРЕБРА И ТАЛЛИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ  
*Жукова Л.В., Корсаков А.С., Львов А.Е., Салимгареев Д.Д., Южакова А.А.*
12. ВЛАГОСТОЙКИЕ ВИЗУАЛИЗАТОРЫ ДЛЯ НАСТРОЙКИ ИНФРАКРАСНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ С БОЛЬШОЙ АПЕРТУРОЙ ПУЧКА  
*Гущин С.В., Кузьмин А.М., Ляпин А.А., Рябочкина П.А., Чернов М.В.*
13. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВЛК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХМИКРОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
*Артемов С.А., Беляев А.Н., Бушукина О.С., Костин С.В., Ляпин А.А., Рябочкина П.А., Таратынова А.Д., Хрущалина С.А.*

14. ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $Ho_2O_3$  НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХМИКРОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ  
*Артемов С.А., Артемов Е.А., Войццкий В.П., Ломонова Е.Е.,  
Рябочкина П.А.*

## **LASER MATERIALS AND TECHNOLOGY**

1. HIGH-POWER MID-INFRARED QUANTUM-CASCADE LASERS  
*Sokolovskii G.S.*
2. SOLIS STATE RAMAN LASERS IN VISIBLE SPECTRAL REGION. PROBLEMS AND PERSPECTIVES *Zverev P.G.*
3. FUNCTIONAL CAPABILITIES OF FREQUENCY CONVERSION IN NONLINEAR CRYSTALS – CRITICAL AND NON-CRITICAL PROCESSES.  
*Grechin S.G., Nikolaev P.P., Tumorin V.V.*
4. BGS AND BGSE CRYSTALS FOR NONLINEAR OPTICAL FREQUENCY CONVERSION  
*Grechin S.G., Kochiev D.G., Nikolaev P.P., Tumorin V.V.*
5. THE EFFECTS OF TARTARIC ACID ON KDP CRYSTAL GROWTH  
*Gribko V.V., Prokhorov A.P.*
6. INFLUENCE OF  $Y^{3+}$  IMPURITY ON SPECTROSCOPIC PROPERTIES OF  $Ho^{3+}$  OPTICAL CENTERS IN  $CaF_2$  CRYSTALS  
*Alimov O.K., Doroshenko M.E., Nekhoroshikh A.V., Papashvili A.G.,  
Pierpoint K.A.*
7. TWO-WAVELENGTH OPO BASED ON KTP CRYSTAL FOR MID-IR SPECTRAL REGION  
*Sirotkin A.A., Smirnov I.V., Zverev P.G.*
8. MODELING OF OPTICAL PRODUCTS BASED ON SILVER AND THALLIUM HALOGENIDES FOR LASER EQUIPMENT  
*Korsakov A.S., Lvov A.E., Salimgareev D.D., Yuzhakova A.A.,  
Zhukova L.V.*
9. MOISTURE-RESISTANT VISUALIZERS FOR SETTINGS IN INFRARED LASER SYSTEMS WITH A LARGE BEAM APERTURE  
*Chernov M.V., Gushchin S.V., Kuzmin A.M., Lyapin A.A., Ryabochkina P.A.*
10. MODELING OF THE EVLC PROCESS USING LASER RADIATION OF THE TWO-MICRON SPECTRAL REGION  
*Artemov S.A., Belyaev A.N., Bushukina O.S., Khrushchalina S.A., Kostin S.V., Lyapin A.A., Ryabochkina P.A., Taratynova A.D.*

## НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1. ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ГИБРИДНОГО ПЕРОВСКИТА  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  – ПЕРСПЕКТИВНОГО МАТЕРИАЛА ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ  
*Аникеева В.Е., Болдырев К.Н., Попова М.Н., Семёнова О.И.*
2. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ  
*Болдин М.С., Дёмина П.Б., Дорохин М.В., Ерофеева И.В., Здравейцев А.В., Кузнецов Ю.М., Ланцев Е.А., Попов А.А., Трушин В.Н.*
3. СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ  $\text{ZrO}_2$ -2.5мол.%Y-(0.5, 0.7, 1.2)мол.% RSZ (R – Ce, Nd, Er, Yb)  
*Борик М.А., Ломонова Е.Е., Милович Ф.О., Мызина В.А., Рябочкина П.А., Сидорова Н.В., Табачкова Н.Ю., Щучкина А.В.*
4. ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В КРИСТАЛЛАХ  $\text{ZrO}_2$ - $\text{Yb}_2\text{O}_3$  ПОСЛЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ВОЗДУХЕ  
*Борик М.А., Волкова Т.В., Кулебякин А.В., Ломонова Е.Е., Мызина В.А., Милович Ф.О., Рябочкина П.А., Табачкова Н.Ю.*
5. СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КЕРАМИК И ПОРОШКОВ НИТРИДА КРЕМНИЯ, ПЛАКИРОВАННОГО ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВЫМ ГРАНАТОМ  
*Алексеева Л.С., Андреев П.В., Балабанов С.С., Болдин М.С., Дрожилкин П.Д., Каразанов К.О., Сметанина К.Е.*
6. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ  $\text{ZrO}_2$ - $\text{Sc}_2\text{O}_3$ - $\text{R}_2\text{O}_3$  (R = Y, Yb, Ce)  
*Борик М.А., Герасимов М.В., Кулебякин А.В., Ларина Н.А., Ломонова Е.Е., Мызина В.А., Рябочкина П.А., Сидорова Н.В., Табачкова Н.Ю.*
7. ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОЧИСТОГО ИЗОТОПНО-ОБОГАЩЕННОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ-28 ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ  
*Игнатова К.Ф., Комишина М.Е., Куржелев И.А., Трошин О.Ю.*
8. ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ И ПРОПУСКАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ ГАЛОГЕНИДОВ СЕРЕБРА В БРАГЕРЦОВОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ Жукова Л.В., Корсаков А.С., Львов А.Е., Салимгареев Д.Д., Южакова А.А.
9. ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ ЛЮМИНОФОРОВ В ОКСИФТОРИДНЫХ СТЕКЛАХ И ОКСИДНЫХ И ФТОРИДНЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛАХ Аветисов И.Х., Аветисов Р.И., Маякова М.Н., Петрова О.Б., Рунина К.И., Стрекалов П.В.
10. СТРУКТУРА И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ В СИСТЕМЕ  $\text{PbF}_2$  –  $\text{ErF}_3$   
*Маякова М.Н., Петрова О.Б., Рунина К.И., Смирнов В.А.*

11. ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА Eu/Gd-СОАКТИВИРОВАННЫХ СВИНЦОВЫХ ФТОРОБОРАТНЫХ СТЕЛКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ  
*Величкина Д.А., Петрова О.Б., Рунина К.И.*
12. АПКОВЕРСИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ  
*Бубнов М.К., Гуцин С.В., Ермаков А.С., Кузнецов С.В., Кузьмин А.М., Ляпин А.А., Рябочкина П.А., Чернов М.В.*
13. ЛОКАЛЬНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ ДИФРАКЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ПСЕВДО  $\alpha$ -ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПТЗВ, ДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТОДОМ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ  
*Андреев П.В., Гудзь Д.А., Сметанина К.Е.*
14. ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ МЕЛКИХ ДОНОРОВ В КРЕМНИИ И ГЕРМАНИИ: УЧЕТ КОРОТКОДЕЙСТВУЮЩЕГО ПОТЕНЦИАЛА  
*Конаков А.А., Михайлова А.М., Ревин А.А.*
15. ВЫРАЩИВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ AgBr - AgI И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ  
*Жукова Л.В., Корсаков А.С., Корсаков М.С., Львов А.Е., Салимгареев Д.Д., Шохина Ю.В., Южакова А.А.*
16. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ AgBr – AgI  
*Егорова К.А., Жукова Л.В., Корсаков А.С., Львов А.Е., Пестерева П.В., Салимгареев Д.Д., Южакова А.А.*
17. СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ ОКСИДОМ ЦЕРИЯ  
*Петрова О.Б., Савенко Л.М., Серкина К.С., Степанова И.В.*
18. ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ВОЗДУХЕ И В ВАКУУМЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ 2Y-0.8RSZ(R-Ce, Nd, Tb, Er, Yb)  
*Борик М.А., Кулебякин А.В., Ломонова Е.Е., Милович Ф.О., Мызина В.А., Рябочкина П.А., Сидорова Н.В., Табачкова Н.Ю.*
19. ВЛИЯНИЕ НЕСТЕХИОМЕТРИИ ШИХТЫ И УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФАЗЫ  $Bi_2GeO_5$   
*Аветисов И.Х., Гуслистов М.И., Зыкова М.П., Петрова О.Б., Рунина К.И., Степанова И.В.*
20. МЕТОДИКА ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК КАРБОКСИЛИРОВАНИЕМ  
*Бузаева М.В., Ефимов М.С., Макарова И.А., Сергеев В.А., Фролов И.В.*
21. ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ, ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ОКСИДОМ ГАДОЛИНИЯ  
*Борик М.А., Кулебякин А.В., Ломонова Е.Е., Милович Ф.О., Мызина В.А., Табачкова Н.Ю., Числов А.С.*

22. КРИСТАЛЛЫ ГРУППЫ БОРАТОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТГЦ ИЗЛУЧЕНИЯ *Андреев Ю.М., Гречин С.Г., Ланский Г.В., Мамрашев А.А., Николаев Н.А., Николаев П.П.*
23. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ФАЗОВОГО СОСТАВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА И КОБАЛЬТА *Андреев П.В., Ланцев Е.А., Сметанина К.Е.*
24. РАЗБАВЛЕННЫЙ МАГНИТНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК GaMnAs, СФОРМИРОВАННЫЙ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ *Данилов Ю.А., Звонков Б.Н., Зубков С.Ю., Крюков Р.Н., Николичев Д.Е.*
25. СВЕТОИЗЛУЧАЮЩАЯ ГЕКСАГОНАЛЬНАЯ ФАЗА 9R-Si *Белов А.И., Конаков А.А., Королев Д.С., Марычев М.О., Михайлов А.Н., Муртазин Р.И., Никольская А.А., Павлов Д.А., Тетельбаум Д.И.*
26. КРАСНЫЕ ЛЮМИНОФОРЫ НА ОСНОВЕ ФТОРХЛОРИДНО-ЦИРКОНИЙНЫХ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ МАРГАНЦА *Батыгов С.Х., Бреховских М.Н., Глушкова В.В., Моисеева Л.В.*
27. ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩАЯ СТЕКЛОКЕРАМИКА В СИСТЕМЕ (Li,Na)<sub>2</sub>O-(Ga,Al)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> *Голубев Н.В., Зиятдинова М.З., Игнатъева Е.С., Козлова Е.О., Лопатина Е.В., Маурус А.А., Сигаев В.Н.*
28. ФОРМИРОВАНИЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ СТРУКТУР В НАТРИЕВОБОРАТНЫХ СТЕКЛАХ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ *Липатъев А.С., Лотарев С.В., Сигаев В.Н., Федотов С.С.*
29. ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ КАНАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА В СИТАЛЛЕ С ОКОЛОНУЛЕВЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ *Липатъев А.С., Лотарев С.В., Савинков В.И., Сигаев В.Н., Федотов С.С., Шахгильдян Г.Ю.*
30. ПРОЗРАЧНЫЕ ЛИТИЕВОАЛЮМОСИЛИКАТНЫЕ СИТАЛЛЫ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ТЕРМИЧЕСКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ В ОБЛАСТИ НУЛЕВЫХ ЗНАЧЕНИЙ *Лопатина Е.В., Лотарев С.В., Наумов А.С., Савинков В.И., Сигаев В.Н., Шахгильдян Г.Ю.*
31. ПРОЗРАЧНЫЙ ЛИТИЕВО-АЛЮМОСИЛИКАТНЫЙ СИТАЛЛ, АКТИВИРОВАННЫЙ ИОНАМИ НЕОДИМА, С ТКЛР, СТАБИЛИЗИРОВАННЫМ ВБЛИЗИ НУЛЕВОГО ЗНАЧЕНИЯ *Лотарев С.В., Наумов А.С., Савинков В.И., Сигаев В.Н.*
32. ПРОЗРАЧНЫЕ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПОВЫШЕННОЙ ТВЕРДОСТИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ MgO-ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> *Савинков В.И., Сигаев В.Н., Шахгильдян А.Ю., Шахгильдян Г.Ю.*

33. ФОРМИРОВАНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ МИКРОПОЛОСТЕЙ В ОБЪЕМЕ НАНОПОРИСТОГО СТЕКЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ *Липатьев А.С., Лотарев С.В., Охримчук А.Г., Пресняков М.Ю., Сигаев В.Н., Федотов С.С., Шахгильдян Г.Ю.*
34. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ НА СТРУКТУРУ ВОЛНОВОДОВ В Ag<sub>2</sub>O-ZnO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> СТЕКЛЕ *Липатьев А.С., Лотарев С.В., Сигаев В.Н., Федотов С.С., Шахгильдян Г.Ю.*
35. ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА *Зюзин А.М., Карнеев А.А., Наумкин В.В., Янцен Н.В.*
36. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ФАЗЫ В УГЛЕРОДСОДЕРЖАЮЩЕМ ПОЛИМЕРНОМ КОМПОЗИТЕ *Зюзин А.М., Карнеев А.А., Наумкин В.В., Янцен Н.В.*

### NEW FUNCTIONAL MATERIALS

1. OPTICAL SPECTROSCOPY OF THE HYBRID PEROVSKITE CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> – A PROMISING MATERIAL OF OPTOELECTRONICS *Anikeeva V.E., Boldyrev K.N., Popova M.N., Semenova O.I.*
2. SYNCHROTRON RADIATION AND LUMINESCENCE SPECTROSCOPY OF NOVEL MATERIALS *Pankratov V.*
3. STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND MECHANICAL PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS OF PARTIALLY STABILIZED ZIRCONIUM DIOXIDE ZrO<sub>2</sub>-2.5mol.%Y-(0.5, 0.7, 1.2)mol.%RSZ (R – Ce, Nd, Er, Yb) *Borik M.A., Lomonova E.E., Milovich F.O., Myzina V.A., Ryabochkina P.A., Sidorova N.V., Schuchkina A.V., Tabachkova N.Yu.*
4. FEATURES OF PHASE TRANSITIONS IN ZrO<sub>2</sub>-Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> CRYSTALS AFTER HEAT TREATMENT IN AIR *Borik M.A., Kulebyakin A.V., Lomonova E.E., Milovich F.O., Myzina V.A., Ryabochkina P.A., Tabachkova N.Yu., Volkova T.V.*
5. STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF SILICON NITRIDE CERAMICS AND POWDERS PLATED WITH YTTRIUM-ALUMINUM GARNET *Alekseeva L.S., Andreev P.V., Balabanov S.S., Boldin M.S., Drozhilkin P.D., Karazanov K.O., Smetanina K.E.*
6. PHASE TRANSFORMATIONS IN ZrO<sub>2</sub>-Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (R = Y, Yb, Ce) SOLID SOLUTIONS *Borik M.A., Gerasimov M.V., Kulebyakin A.V., Larina N.A., Lomonova E.E., Myzina V.A., Ryabochkina P.A., Sidorova N.V., Tabachkova N.Yu.*
7. PREPARATION OF HIGH-PURITY ISOTOPICALLY ENRICHED SILICON DIOXIDE-28 BY SOL-GEL METHOD *Ignatova K.F., Komshina M.E., Kuzhelev I.A., Troshin O.Yu.*

8. STUDY OF REFLECTION AND TRANSMISSION SPECTRA OF SILVER HALIDE POLYCRYSTALS IN THE TERAHERTZ FREQUENCY RANGE *Korsakov A.S., Lvov A.E., Salimgareev D.D., Yuzhakova A.A., Zhukova L.V.*
9. LUMINESCENT HYBRID MATERIALS BASED ON METAL-ORGANIC PHOSPHORS IN OXYFLUORID GLASSES AND OXIDES AND FLUORIDES POLYCRYSTALS *Avetisov I.Ch., Avetisov R.I., Mayakova M.N., Petrova O.B., Runina K.I., Strekalov P.V.*
10. STRUCTURE AND LUMINESCENT PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS IN THE PbF<sub>2</sub>-ErF<sub>3</sub> SYSTEM *Mayakova M.N., Petrova O.B., Runina K.I., Smirnov V.A.*
11. LUMINESCENT PROPERTIES OF Eu/Gd-CO-DOPED LEAD FLUOROBORATE GLASS-CERAMICS *Velichkina D.A., Petrova O.B., Runina K.I.*
12. UPCONVERSION POLYMER MATERIALS TO INCREASE EFFICIENCY OF SOLAR CELLS *Bubnow M.K., Chernov M.V., Ermakov A.S., Gushchin S.V., Kuzmin A.M., Kuznetsov S.V., Lyapin A.A., Ryabochkina P.A.*
13. LOCAL XRD ANALYSIS OF THE NEAR  $\alpha$ -TITANIUM ALLOY PT3V PREPARED BY ROTARY SWAGING *Andreev P.V., Gudz D.A., Smetanina K.E.*
14. ELECTRONIC STATES SHALLOW DONORS IN SILICON AND GERMANIUM: ACCOUNTING FOR SHORT-RANGE POTENTIAL *Konakov A.A., Mikhaylova A.M., Revin A.A.*
15. GROWING AgBr – AgI SINGLE CRYSTALS AND INVESTIGATION OF THEIR PHASE DIAGRAM *Korsakov A.S., Korsakov M.S., Lvov A.E., Salimgareev D.D., Shokhina Y.V., Yuzhakova A.A., Zhukova L.V.*
16. RESEARCH OF AgBr – AgI PHASE DIAGRAM *Egorova K.A., Korsakov A.S., Lvov A.E., Pestereva P.V., Salimgareev D.D., Yuzhakova A.A., Zhukova L.V.*
17. SPECTRAL PROPERTIES OF BISMUTH GERMANATE GLASSES DOPED WITH CERIUM OXIDE *Petrova O.B., Savenko L.M., Serkina K.S., Stepanova I.V.*
18. HEAT TREATMENTS EFFECTS IN AIR AND IN VACUUM ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PARTIAL STABILIZED ZIRCONIUM CRYSTALS 2Y-0.8RSZ (R – Ce, Nd, Tb, Er, Yb) *Borik M.A., Kulebyakin A.V., Lomonova E.E., Milovich F.O., Myzina V.A., Ryabochkina P.A., Sidorova N.V., Tabachkova N.Yu.*
19. INFLUENCE OF BATCH NON-STOICHIOMETRY AND SYNTHESIS CONDITIONS ON FERROELECTRIC PHASE Bi<sub>2</sub>GeO<sub>5</sub> CRYSTALLIZATION *Avetisov I.Ch., Guslistov M.I., Petrova O.B., Runina K.I., Stepanova I.V., Zykova M.P.*

20. INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ZIRCONIA CRYSTALS PARTIALLY STABILIZED WITH GADOLINIA  
*Borik M.A., Chislov A.S., Kulebyakin A.V., Lomonova E.E., Milovich F.O., Myzina V.A., Tabachkova N.Yu.*
21. BORATE CRYSTALS FOR THZ WAVE GENERATION  
*Andreev Yu.M., Grechin S.G., Lanskii G.V., Mamrashev A.A., Nikolaev N.A., Nikolaev P.P.*
22. STUDY OF PHASE COMPOSITION HOMOGENEITY OF HARD ALLOYS BASED ON TUNGSTEN CARBIDE AND COBALT  
*Andreev P.V., Lantsev E.A., Smetanina K.E.*
23. LIGHT-EMITTING HEXAGONAL 9R-Si PHASE  
*Belov A.I., Konakov A.A., Korolev D.S., Marychev M.O., Mikhaylov A.N., Murtazin R.I., Nikolskaya A.A., Pavlov D.A., Tetelbaum D.I.*
24. LUMINESCENT GLASS-CERAMICS IN THE SYSTEM (Li,Na)<sub>2</sub>O-(Ga,Al)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>  
*Golubev N.V., Ignat'eva E.S., Kozlova E.O., Lopatina E.V., Maurus A.A., Sigaev V.N., Ziyatdinova M.Z.*
25. FORMATION OF BIREFRINGENT STRUCTURES IN SODIUM BORATE GLASSES BY LASER BEAM  
*Lipatiev A.S., Lotarev S.V., Sigaev V.N., Fedotov S.S.*
26. LASER WRITING OF CHANNEL WAVEGUIDE IN ULTRA-LOW EXPANSION GLASS-CERAMICS  
*Lipatiev A.S., Lotarev S.V., Savinkov V.I., Shakhgildyan G.Yu., Sigaev V.N., Fedotov S.S.*
27. LITHIUM ALUMOSILICATE TRANSPARENT GLASS-CERAMICS WITH ADJUSTABLE THERMAL COEFFICIENT OF LINEAR EXPANSION IN THE AREA OF ZERO VALUES  
*Lopatina E.V., Lotarev S.V., Naumov A.S., Savinkov V.I., Shakhgildyan G.Yu., Sigaev V.N.*
28. TRANSPARENT LITHIUM ALUMINOSILICATE GLASS-CERAMICS ACTIVATED BY NEODYMIUM IONS WITH CTE STABILIZED NEAR ZERO  
*Lotarev S.V., Naumov A.S., Savinkov V.I., Sigaev V.N.*
29. TRANSPARENT GLASS-CERAMICS MATERIALS WITH INCREASED HARDNESS IN THE MgO-ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> SYSTEM  
*Savinkov V.I., Sigaev V.N., Shakhgildyan A.Yu., Shakhgildyan G.Yu.*
30. FORMATION OF ANISOTROPIC MICROVOIDS IN THE VOLUME OF NANOPOROUS GLASS BY FEMTOSECOND LASER PULSES  
*Fedotov S.S., Lipatiev A.S., Lotarev S.V., Okhrimchuk A.G., Presniakov M.Yu., Shakhgildyan G.Yu., Sigaev V.N.*
31. INFLUENCE OF LASER WRITING PARAMETERS ON THE WAVEGUIDES STRUCTURE IN Ag<sub>2</sub>O-ZnO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> GLASS  
*Fedotov S.S., Lipatiev A.S., Lotarev S.V., Shakhgildyan G.Yu., Sigaev V.N.*
32. CRYSTALLINE PHASES IN A CARBON-CONTAINING POLYMER COMPOSITE  
*Karpeev A.A., Naumkin V.V., Yantsen N.V., Zyuzin A.M.*

## ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ

1. ИНТЕРФЕЙСНЫЕ ЭФФЕКТЫ В НАНОСТРУКТУРАХ  
*Ивченко Е.Л.*
2. ЭФФЕКТЫ ХОЛЛА В ДВУМЕРНЫХ СИСТЕМАХ  
*Тарасенко С.А.*
3. ЧТО ТАКОЕ СИЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ГЕКСАБОРИДА САМАРИЯ)?  
*Глушков В.В.*
4. ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ В СИСТЕМАХ С МАГНИТНЫМИ СКИРМИОНАМИ  
*Денисов К.С.*
5. ИНТЕРФЕЙСНЫЕ СОСТОЯНИЯ В ДВУМЕРНЫХ ГЕТЕРОПЕРЕХОДАХ СО СПИН-ОРБИТАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ОБЩЕГО ВИДА  
*Зайнагутдинов А.Р., Тележников А.В.*
6. ДИНАМИКА КРАЕВЫХ СОСТОЯНИЙ И ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ В ПРИСУТСТВИИ БАРЬЕРОВ  
*Кулаков Д.А., Хомицкий Д.В.*
7. УЧЕТ КОРОТКОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЧАСТИ ПОТЕНЦИАЛА ПРИ РАСЧЕТЕ ОСНОВНОГО СОСТОЯНИЯ МЕЛКИХ ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ  
*Конаков А.А., Михайлова А.М., Ревин А.А.*

## ELECTRONIC PHENOMENA IN NANOSTRUCTURES

1. HALL EFFECTS IN TWO-DIMENSIONAL SYSTEMS  
*Tarasenko S.A.*
2. INTERFACE STATES IN TWO-DIMENSIONAL HETEROJUNCTIONS WITH A SPIN-ORBIT INTERACTION OF A GENERAL TYPE  
*Telezhnikov A.V., Zaynagutdinov A.R.*
3. DYNAMICS OF EDGE STATES AND WAVE PACKETS ON THE SURFACE OF TOPOLOGICAL INSULATORS IN THE PRESENCE OF BARRIERS  
*Khomitsky D.V., Kulakov D.A.*
4. CALCULATION OF THE GROUND STATE OF SHALLOW IMPURITY CENTERS IN SEMICONDUCTORS TAKING INTO ACCOUNT THE SHORT-RANGE POTENTIAL  
*Konakov A.A., Mikhaylova A.M., Revin A.A.*

## ИНДУСТРИАЛЬНАЯ ФОТОНИКА

1. ПРИМЕНЕНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ ОПТИКИ В КАНАЛЕ ВОЛС ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОТ ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ДАТЧИКОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА КАЧАЮЩЕМСЯ ОСНОВАНИИ  
*Бушмакин И.М., Кошелев А.В., Фатьянов С.В.*

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

Саранск, 15–18 сентября 2020 г.

**Сопредседатели конференции-школы:**

**И. А. Щербаков** академик РАН, Научный руководитель Федерального исследовательского центра «Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН»  
**М. Ф. Чурбанов** –академик РАН, Научный руководитель Института химии высококчистых веществ РАН

**Организационный комитет:**

**С.М. Вдовин** – ректор МГУ им. Н. П. Огарёва, председатель  
**К.Н. Нищев** – директор ИФХ МГУ им. Н. П. Огарёва, заместитель председателя  
**С.А. Хрущалина** –ученый секретарь

**Программный комитет**

**П.А. Рябочкина** – д.ф.-м.н., МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия, председатель;  
**Н.С. Аверкиев** – д.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф.Иоффе, С.-Петербург, Россия;  
**М.В. Дорохин** – д.ф.-м.н., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород, Россия;  
**К.Н. Ельцов** – д.ф.-м.н., ИОФ РАН, Москва, Россия;  
**Е.В. Жариков** – д.т.н., РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия;  
**П.Г. Зверев** – д.ф.-м.н., ИОФРАН, Москва, Россия;  
**А.М. Зюзин** – д.ф.-м.н., МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия;  
**Е.Е. Ломонова** – д.т.н., ИОФРАН, Москва, Россия;  
**Г.Е. Малашкевич** – д.ф.-м.н., Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Республики Беларусь, Минск, Беларусь;  
**К.Н. Нищев** – к.ф.-м.н., МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия;  
**М.Н. Попова** – д.ф.-м.н., Институт спектроскопии РАН, Москва, Россия;  
**В.В. Семашко** – д.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия;  
**С.Л. Семенов** – д.ф.-м.н., НЦВО им. Е.М. Дианова РАН, Москва, Россия;  
**Г.С. Соколовский** – д.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург, Россия;  
**С.А. Тарасенко** – д.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия;  
**П.П. Федоров** – д.х.н., ИОФРАН, Москва, Россия;  
**Е.В. Чупрунов** – д.ф.-м.н., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород, Россия;  
**А.С. Cefalas** – Ph.D., National Hellenic Research Foundation, Athens, Greece;  
**I. Sildos** – Ph.D., Tartu University, Tartu, Estonia.

**Спонсоры и официальные партнеры**



РОССИЙСКИЙ  
ФОНД  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

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

Основные направления деятельности РФФИ:

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



**Журнал «ФОТОНИКА»(PHOTONICS RUSSIA)**–глубокое и подробное освещение вопросов, связанных с фотонными и оптическими технологиями, оптическими материалами и элементами, используемыми в оптических системах, оборудовании и станках.

# ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

## ВОЛОКОННЫЕ ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

И.А. Буфетов

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва  
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва*

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

Волоконные световоды с твердотельной сердцевиной из стекол различного состава имеют некоторые неизбежные ограничения с точки зрения ширины и положения спектральной области прозрачности, оптической прочности, устойчивости к тепловым нагрузкам и влажности. Данные обстоятельства являются серьезным ограничением для разработки лазеров на таких световодах.

Создание волоконных световодов с полый сердцевиной (ВСПС) [1] позволило значительно расширить возможности разработки волоконных лазерных источников излучения, прежде всего за счет использования газов в качестве активных сред. Так, были созданы газовые волоконные лазеры в среднем ИК диапазоне на переходах молекулы ацетилена в полном световоде из кварцевого стекла ([2], длина волны накачки 1.53 мкм, длина волны генерации 3.1 мкм, средняя выходная мощность более ватта в непрерывном режиме). Использование нелинейных свойств различных газов позволило получить в полном световоде генерацию излучения суперконтинуума в недоступных ранее спектральных диапазонах (см., напр., [3], где получено излучение в диапазоне от 1.2 мкм до 0.126 мкм).

Развитие микроструктурированных оптических волокон с полый сердцевиной позволило также создать рамановские волоконные лазеры (РВЛ) с газом в качестве рамановской среды усиления. Важным преимуществом таких РВЛ является возможность использования молекул легких газов с высокой энергией колебательных квантов. Рамановские сдвиги в таких газах достигают  $4155\text{ см}^{-1}$  (легкий водород),  $2987\text{ см}^{-1}$  (дейтерий),  $2917\text{ см}^{-1}$  (метан). Все эти значения намного превышают максимальный рамановский сдвиг в световодах из кварцевого стекла ( $1330\text{ см}^{-1}$ ). Например, одинокасадный РВЛ на основе колебательного перехода в молекулах  $^1\text{H}_2$  может обеспечить преобразование длины волны  $1.06 \rightarrow 1.9$  мкм. Начиная с 1.56 мкм, однокаскадное рамановское преобразование позволяет напрямую получать лазерное излучение на длине волны 4.4 мкм. Поэтому значительный прогресс в рамановских лазерах среднего ИК диапазона может быть достигнут с использованием хорошо зарекомендовавших себя волоконных лазеров ближнего ИК диапазона в качестве накачки.

Впервые РВЛ на ВСПС с фотонно-кристаллической структурой отражающей оболочки световода (ФКС) на колебательном переходе в молекуле  $^1\text{H}_2$  (конверсия  $535\text{ нм} \rightarrow 683\text{ нм}$ ) был продемонстрирован в 2002 году [4]. Давление водорода в сердцевине ФКС составляло 17 бар.

РВЛ накачивался бнс импульсным излучением. Водородные РВЛ также могут использовать вращательные переходы молекулы  $^1\text{H}_2$ . В этом случае рамановский сдвиг частоты составляет  $587\text{см}^{-1}$  [5].

Эффективная рамановская генерация была также продемонстрирована в заполненных водородом ВСПС с накачкой около  $1\text{мкм}$  [6,7]. В этих работах была достигнута эффективность квантового преобразования до 80% [6] и 60% [7] для рамановской генерации на длинах волн  $1.8\text{ мкм}$  и  $1.9\text{мкм}$ , соответственно. С использованием  $1.56\text{мкм}$  излучение накачки, недавно был реализован рамановский волоконный лазер на длине волны  $4.4\text{ мкм}$ . Этот РВЛ работал по аналогичной схеме с молекулами самого легкого изотопа водорода  $^1\text{H}_2$  (протий) в качестве активной среды [8].

Полые сердцевины оптических волокон в настоящее время изготавливаются, главным образом, из кварцевого стекла из-за его превосходных технологических свойств. Вклад собственного оптического поглощения кварцевого стекла в оптические потери ВСПС зависит от механизма локализации света волокна.

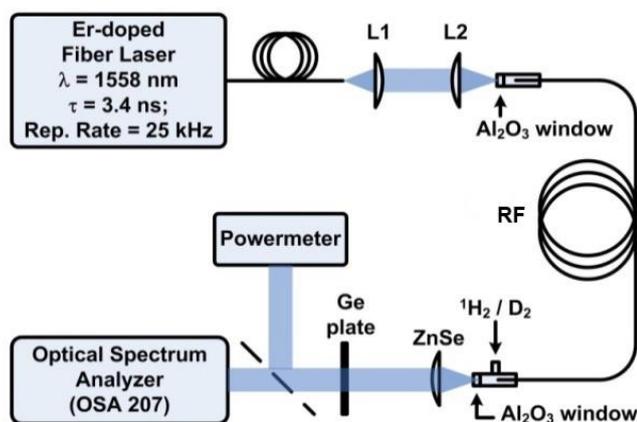


Рис. 1. Схема экспериментального РВЛ на револьверном световоде.

L1 и L2 – асферические линзы из кварцевого стекла; RF – револьверный световод;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – сапфировые окна на газовых вакуумных ячейках на концах ВСПС; ZnSe – коллимирующая линза из селенида цинка; Ge- полированная пластинка из германия толщиной  $2\text{ мм}$ .

Следует отметить, что волноводный механизм ФКС с поллой сердцевиной основан на значительном проникновении излучения в микроструктурированную отражающую оболочку (как минимум на несколько периодов структуры оболочки). Поэтому ФКС на основе кварцевого стекла теряют свои превосходные свойства в области длин волн  $\lambda > 3\text{ мкм}$ . Значительное увеличение оптического поглощения кварцевого стекла в этой области приводит к увеличению оптических потерь в ФКС [9]. Поэтому для волоконных лазеров среднего ИК диапазона следует использовать другой тип ВСПС. Хорошим выбором является ВСПС, в котором реализуется антирезонансный механизм отражения излучения на границе сердцевина – оболочка [10] и, кроме того, граница между поллой сердцевиной и отражающей оболочкой имеет

отрицательную кривизну [11]. В частности, так называемые револьверные волокна с полый сердцевинной, удовлетворяют обоим этим условиям [9]. РВЛ на основе револьверных волокон позволили генерировать одномодовое излучение на длине волны 4.4 мкм с квантовой эффективностью более 50% [12]. В этой работе РВЛ накачивался импульсным (наносекундным) эрбиевым волоконным лазером со средней выходной мощностью около 10 Вт и генерировал излучение в среднем ИК диапазоне со средней мощностью более 1.5 Вт (см. рис. 1–2).

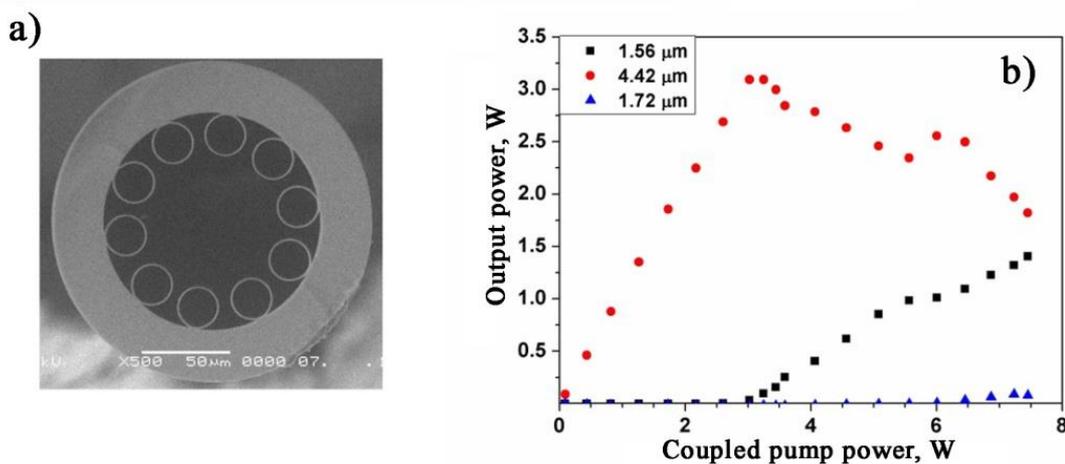


Рис. 2. (а) – фотография скола револьверного волоконного световода, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа (диаметр полый сердцевинны составляет 75 мкм); (б) – зависимость средней мощности на выходе РВЛ от средней величины мощности накачки, введенной в полую сердцевину (красные точки – непреобразованное излучение накачки; черные квадраты – излучение колебательного стока на  $\lambda = 4.42 \mu\text{m}$ ; синие треугольники – излучение вращательной стоковой компоненты с  $\lambda = 1.72 \mu\text{m}$ ).

Рамановские лазеры на основе газонаполненных револьверных световодов могут стать универсальным инструментом для генерации на новых длинах волн в среднем ИК диапазоне, поскольку могут быть использованы различные комбинационно-активные газы и их смеси. Например, молекулы другого изотопа водорода, дейтерия ( $D_2$ ), могут быть использованы для достижения рамановской генерации около 3 мкм. На рисунке 3 показан выходной спектр РВЛ на револьверном волоконном световоде, заполненном смесью  $^1H_2$  и  $D_2$ . Его схема аналогична схеме на рисунке 1, но револьверный световод имеет несколько другие размеры поперечного сечения, что приводит к необходимому расположению полос прозрачности револьверного волоконного световода в области длин волн 1.55 и 3 мкм (рис. 3 (а)). Излучение на выходе лазера содержит стоковые компоненты, возникающие в результате рамановской генерации на колебательных и вращательных переходах обоих газов (рис. 3 (б)).

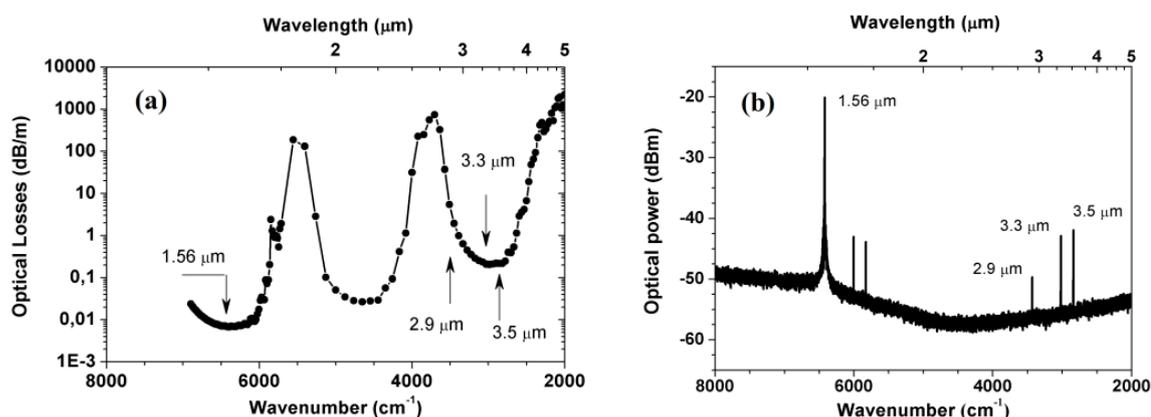


Рис. 3. (а) – расчетный спектр оптических потерь в револьверном волоконном световоде для РВЛ, генерирующего в спектральном диапазоне 2.9-3.5 мкм; (b) – спектр излучения на выходе РВЛ. Пиковое значение мощности импульсного излучения накачки на длине волны 1.56 мкм составляло 1.4 кВт. В качестве активной среды использовалась смесь молекулярных газов  $^1\text{H}_2$  и  $\text{D}_2$  с парциальными давлениями 2 и 28 атм, соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант №19-12-00361).

1. R.F. Cregan, et al., *Science* **285**, 1537 (1999).
2. M. Xu, F. Yu, J. Knight, *Opt. Lett.* **42**(10), 4055(2017).
3. F. Belli et al., *Optica* **2** (4), 292 (2015).
4. F. Benabidet al., *Science* **298**, 399 (2002).
5. F. Benabidet al., *Phys. Rev. Lett.* **94**, 123903 (2004).
6. A. Benoit et al., *Proc. SPIE, Nonlinear Freq. Gener. Convers., Mater. Devices XVI*, **10088**, 100880H (2017).
7. A.V. Gladyshev et al., *Quantum Electron.* **45**, 807 (2015).
8. A.V. Gladyshevet al., *Quantum Electron.* **47**, 491 (2017).
9. I.A. Bufetovet al., *Fibers* **6**, 39 (2018).
10. N.M. Litchinitseret al., *Opt. Lett.* **27**, 1592 (2002).
11. A.D. Pryamikovet al., *Optics Express* **19**, 1441 (2011).
12. M.S. Astapovicht et al., *Photonics Technology Lett.* **31**(1), 78 (2019).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА ВСТАВОК НА ПЕРЕДАЧУ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ ФОТОННЫМИ СВЕТОВОДАМИ

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

Фотонные структуры в оптических материалах востребованы различными областями науки и техники, поскольку позволяют управлять проходящим излучением, передавать энергии высокой мощности, выполнять селекцию по длине волны [1]. В связи с этим в настоящее время активно разрабатываются фотонно-кристаллические световоды (ФКС) для оптического диапазона спектра. Для среднего и дальнего ИК диапазонов в Уральском федеральном университете на основе галогенидов серебра и одновалентного таллия разрабатываются ФКС, обладающие широким диапазоном пропускания 2–25 мкм без окон поглощения, оптическими потерями до 0.5 дБ/м, гибкостью и высокой механической прочностью [2].

В данной работе были рассмотрены ФКС с разным количеством вставок с малым показателем преломления и активной сердцевиной с большим показателем преломления в диапазоне длин волн 5–20 мкм. Все элементы структуры изготовлены на основе кристаллов системы  $\text{AgBr} - \text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$  [2]. При сравнении структур с разным количеством вставок было выявлено, что с увеличением числа включений происходит уменьшение количества мод вплоть до одномодового режима работы ФКС (рис.1), а также монотонное снижение эффективного показателя преломления во всем спектральном диапазоне.

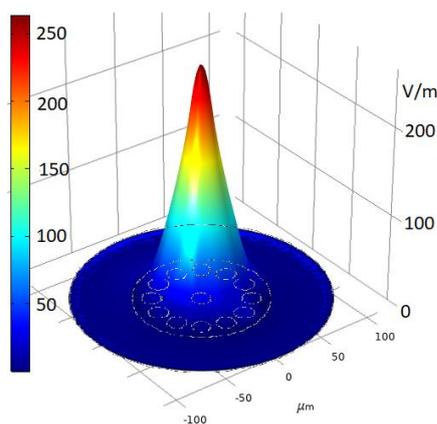


Рис. 1. Распределение энергии в поперечном сечении одномодового ФКС на длине волны 10.6 мкм.

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

1. D. Broeng, Opt. Fiber Technol. **5**, 305 (1999).
2. L.V. Zhukova et al., Opt. and Spectroscopy **125(6)**, 933 (2018).

## О ПОВЫШЕНИИ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ

А.Б. Волынцев, Р.С. Пономарев, А.В. Сосунов

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

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

Интегрально-оптические модуляторы (ИОМ) на основе кристалла ниобата лития (НЛ) подробно описаны в научной литературе как эффективные широкополосные устройства для управления оптическим сигналом. Однако они обладают рядом особенностей, таких как дрейф рабочей точки ИОМ и нелинейностью передаточной характеристики, из-за чего для коррекции их работы невозможно применять широко распространенные стандартные ПИД-контроллеры. В научной литературе эта проблема затрагивалась неоднократно [1,2], однако до сих пор исчерпывающее решение не предложено.

Показатель преломления НЛ зависит от температуры и приложенного электрического поля. Объединяющим материальным фактором является сам кристалл НЛ, структура и свойства его приповерхностного слоя, в котором формируются протонообменные волноводы и электроды. Ранее мы показали [3], что предварительный отжиг пластин НЛ приводит к восстановлению его структуры и снятию внутренних напряжений. На основании полученных результатов были изготовлены экспериментальные образцы ИОМ с целью исследования их оптических характеристик и стабильности рабочей точки.

Экспериментальные образцы ИОМ, изготавливались при идентичных технологических параметрах, при этом половина образцов была получена на подложках НЛ с восстановленной структурой. Для исследования процесса дрейфа рабочей точки мы подавали на электроды ИОМ постоянное электрическое напряжение ( $\pm 8$  В с шагом 0.5 В) от малошумящего источника. Характеристикой процесса дрейфа рабочей точки ИОМ является время, в течение которого стабилизируется выходная оптическая мощность. Рабочая точка ИОМ с восстановленной структурой подложки требует для перехода в равновесное состояние в среднем втрое меньше времени.

В результате проведенных исследований удалось снизить погонные потери в кристалле с 0.15 до 0.1 Дб/см, средние оптические потери с 8.5 до 5.5 дБ в ИОМ и многократно уменьшить эффективное время релаксации рабочей точки ИОМ.

Данная работа выполнена в рамках программы государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, договор № 13.G25.31.0004.

1. J.P. Salvestrini et al., J. Lightwave Technol. **29**, 1522 (2011).
2. L.R. Hofer et al., IEEE Trans. Contr. Syst. Technol. **25**, 1890 (2017).
3. A. Sosunov et al., Optical Materials. **88**, 176 (2019).

# СРАВНЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СКРУЧЕННЫХ ВОЛОКОН НЕСТАНДАРТНЫХ ТИПОВ

О.В. Иванов<sup>1,2,3</sup>, М.М. Набиулин<sup>1</sup>

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

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

<sup>3</sup>Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск  
Email: [mans73@yandex.ru](mailto:mans73@yandex.ru)

Поляризационные явления, возникающие в скрученных оптически волокнах известны давно [1]. Скручивание волокон используется для контроля поляризации мод, распространяющихся в оптических волокнах, настройки рабочей длины волны в волоконных решётках, компенсации двойного лучепреломления в волокне, а также управлением дисперсией.

Распространяющиеся в скрученном волокне моды, испытывают циркулярное двулучепреломление. Поляризация распространяющихся в волокне мод вращается на величину, пропорциональную углу скручивания волокна [2]. Коэффициент пропорциональности определяется фотоупругими константами материалов, составляющих волокно. Интерес представляет изучение вращения поляризации в нестандартных волокнах со специальным легированием, с воздушной сердцевиной, и др.

В работе проводится экспериментальное исследование и сравнение поляризационных характеристик мод, распространяющихся в скрученных волокнах различных типов, таких как Fujikura, Corning, и нескольких видов волокна Fiberscore, в том числе с высоким содержанием германия.



Рис.1. Схема экспериментальной установки.

Экспериментальная установка включает в себя источник лазерного излучения (1550 нм), волоконный контроллер поляризации, отрезок волокна, фиксатор волокна, вращатель волокна и поляриметр (KeysightN7781B). Длина волокна варьируется от 5 до 30 см.

Измерено изменение поляризации мод, распространяющихся в различных типах волокон при различных углах скручивания волокна, и для различных отрезков волокна.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-47-730738).

1. R. Ulrich, A. Simon, Appl. Opt. **18**, 2241 (1979).
2. O.V. Ivanov, J. Opt. Soc. Am. A **22**, 716 (2005).

# ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАСЫЩАЮЩЕГОСЯ ПОГЛОТИТЕЛЯ И ДЛИНЫ РЕЗОНАТОРА ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА НА ПИКОВУЮ МОЩНОСТЬ ИМПУЛЬСА

А.А. Мاستин<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Технопарк-Мордовия, Саранск*

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

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

В работе на основе решения уравнения Шредингера [1] моделировалась импульсная лазерная генерация в тулиевом волоконном кольцевом лазере в режиме пассивной синхронизации мод при аномальной дисперсии резонатора.

В результате моделирования выявлено влияние длины резонатора лазера, а также параметров нелинейного насыщающегося поглотителя на срыв одноимпульсного режима генерации. На рис. 1 показаны зависимости пиковой мощности импульса от усиления активного волокна при различных длинах пассивного волокна резонатора и параметрах насыщающегося поглотителя. Маркерами на зависимостях указаны максимальные значения пиковой мощности, при которой сохраняется одноимпульсный режим генерации.

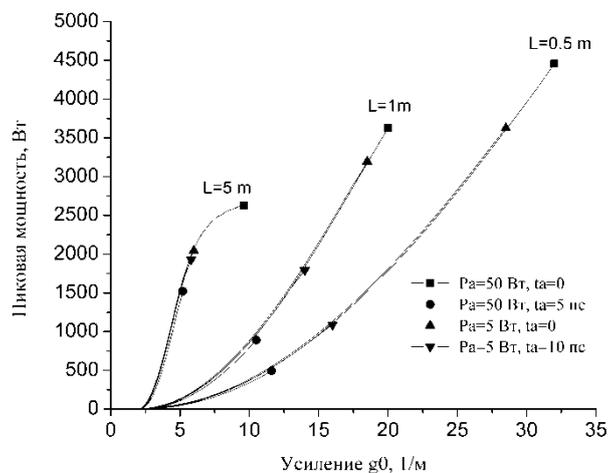


Рис. 1. Зависимости пиковой мощности импульса от усиления для различных длин пассивного волокна в резонаторе лазера.

В работе показано, что максимальная энергия и пиковая мощность импульса достигаются в лазере с поглотителем с максимальной мощностью насыщения и минимальным временем релаксации потерь.

Увеличение длины резонатора приводит к появлению низкоинтенсивного пьедестала на профиле интенсивности импульса, приводящего к ограничению роста пиковой мощности импульса.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, грант № 18-42-130001.

## СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД В ТУЛИЕВОМ ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ С ПОМОЩЬЮ УГЛЕРОДНЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ

Н.Р. Арутюнян<sup>1</sup>, В.А. Камынин<sup>1</sup>, А.А. Мاستин<sup>2</sup>, Е.Д. Образцова<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*Технопарк-Мордовия, Саранск*

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

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

Целью работы являлось исследование влияния глубины модуляции углеродных поглотителей на условия генерации тулиевого волоконного лазера в режиме синхронизации мод.

Интерес к использованию углеродных поглотителей для синхронизации мод лазеров вызван возможностями варьирования параметров углеродных поглотителей в широком диапазоне, а также относительной простотой их изготовления [1].

Лазер выполнен в линейной схеме с кольцевыми волоконными зеркалами. Углеродные поглотители выполнены в виде полимерных пленок на основе производных целлюлозы с диспергированными в объеме углеродными нанотрубками [1]. Для использования в составе лазера пленки зажимались между волоконными коннекторами. Таким образом, были получены углеродные поглотители с волоконным входом и выходом, которые в резонаторе работали на пропускание.

Для характеристики нелинейной оптической характеристики пропускания волоконных поглотителей использовалась схема [2], в которой проводилось сравнение энергии импульса сигнала прошедшего через поглотитель и энергии референтного импульса.

В работе показано, что увеличение толщины пленки с углеродными нанотрубками приводит к увеличению глубины модуляции и интенсивности насыщения поглотителя.

Увеличение глубины модуляции поглотителя приводит к повышению необходимой накачки для запуска импульсного режима генерации, а также к повышению максимально достигаемой энергии импульса.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, грант № 18-42-130001.

1. А.В. Таусенев и др., Квантовая электроника **37(3)**, 205 (2007).
2. G. Sobonet al., Sci. Rep. **7**, 45491 (2017).

# СОЗДАНИЕ ПЕРЕТЯЖЕК НА ВОЛОКОННЫХ ВСТАВКАХ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ОБОЛОЧЕЧНЫЕ МОДЫ

Д.Д. Бакуров<sup>1,2</sup>, О.В. Иванов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск  
E-mail: [dynamite.98@mail.ru](mailto:dynamite.98@mail.ru); [olegivvit@yandex.ru](mailto:olegivvit@yandex.ru)

Интерес к исследованиям волоконных вставок обусловлен возможностью возбуждения с их помощью оболочечных мод, которые могут использоваться в волоконно-оптических датчиках [1]. Изменение коэффициента преобразования в оболочечные моды при включении в него вставки специального волокна происходит в результате того, что часть интенсивности из моды сердцевины переходит не в сердцевину вставки, а в ее оболочку [2]. Коэффициент преобразования зависит от длины вставки, поэтому его можно контролировать путем изменения этой длины.

В работе реализуется способ корректировки длины вставки с помощью нагрева и вытягивания в аппарате для сваривания оптических волокон. Вставка специального волокна (SM450, SM600) разогревается короткими разрядами электрической дуги ( $t=180\dots220$  мс) и вытягивается подвешенным к волокну грузом. Было проведено исследование зависимости изменения радиуса оболочки волокна от количества разрядов и времени разряда. Результаты измерений показали, что оптимальное время разряда составляет около 200мс. Спектры пропускания в зависимости от числа разрядов изображены на рисунке.

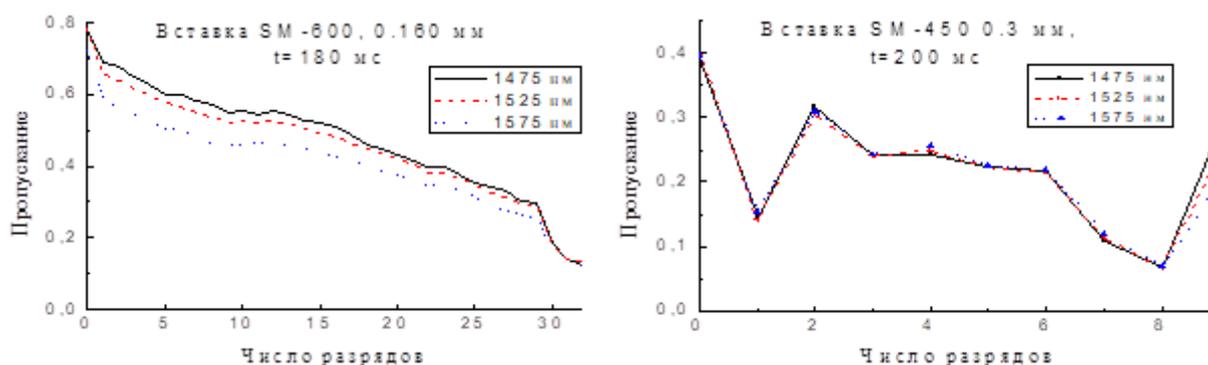


Рис. 1. Зависимость коэффициента пропускания от количества разрядов.

Из полученных зависимостей пропускания от числа разрядов видно, что при времени разряда 180мс достаточно 10–15 разрядов, чтобы получить необходимое значение коэффициента пропускания около 30%.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-47-730738).

1. Y. Kong et al., IEEE Sens. J. **18**, 8747 (2018).
2. О.В. Иванов, Радиотехн. и электрон. **63**,1041 (2018).

# FIBER OPTICS

## FIBER GAS LASERS

I.A. Bufetov

*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

*Dianov Fiber Optics Research Center, Moscow, Russia*

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

Solid-core fibers made of soft glasses of various compositions have some inevitable restrictions in terms of spectral position and width of transparency region, optical strength, resistance to thermal loads and humidity. This fact is a serious limitation for development of glass fiber lasers.

The creation of hollow core fiber waveguides [1] has significantly expanded the possibilities of fiber laser sources development, primarily through the use of gases as active media. So, gas fiber lasers were created in the mid-IR range using transitions of an acetylene molecule in a hollow silica glass fiber ([2], pump wavelength of 1.53  $\mu\text{m}$ , generation wavelength of 3.1  $\mu\text{m}$ , an average output power of more than a watt in a continuous mode). Using the nonlinear properties of various gases allowed one to obtain supercontinuum emission in a hollow fiber in the previously inaccessible spectral range (see, e.g., [3], where radiation was obtained in the range from 1.2  $\mu\text{m}$  to 0.126  $\mu\text{m}$ ).

The development of hollow core microstructured optical fibers paved also the way to Raman fiber lasers (RFL) with gas as a Raman gain medium. An important advantage of such fibers is a possibility to use molecules of light gases with high energy of vibrational quanta. Raman shifts in such gases are as high as 4155  $\text{cm}^{-1}$  (light hydrogen), 2987  $\text{cm}^{-1}$  (deuterium), 2917  $\text{cm}^{-1}$  (methane). All these values are much higher than the maximal Raman shift in glass fibers (1330  $\text{cm}^{-1}$  for phosphosilicate fibers). For example, one cascaded RFL based on vibrational transition in  $^1\text{H}_2$  molecules can provide a wavelength conversion 1.06  $\rightarrow$  1.9  $\mu\text{m}$ . Starting with 1.56  $\mu\text{m}$  one cascaded Raman conversion allows obtaining directly a laser generation at 4.4  $\mu\text{m}$ . Therefore, a significant progress in mid-IR range Raman lasers can be achieved with the use of well-established near-IR fiber lasers as pump units.

For the first time RFL based on hollow-core (HC) photonic crystal fibers (PCF) with the use of a vibrational transition in  $^1\text{H}_2$  molecule (conversion 535 nm  $\rightarrow$  683 nm) was demonstrated in 2002 [4]. The hydrogen pressure in HC-PCF was 17 bar. RFL was pumped by a 6 ns pulse radiation. Hydrogen RFL can also use rotational transitions of the molecule. In this case Raman frequency shift is 587  $\text{cm}^{-1}$  [5].

Efficient stimulated Raman scattering was also demonstrated in hydrogen-filled HC fibers pumped around 1  $\mu\text{m}$  [6,7]. In those works quantum conversion efficiency as high as 80% [6] and 60% [7] was achieved for Raman generation at

1.8  $\mu\text{m}$  and 1.9  $\mu\text{m}$ , respectively. Using 1.56  $\mu\text{m}$  pump radiation, 4.4  $\mu\text{m}$  Raman fiber laser has been recently realized in similar scheme with molecules of the lightest hydrogen isotope  $^1\text{H}_2$  (protium) as an active medium [8].

Hollow core optical fibers are mainly made of silica due to its excellent technological properties. The contribution of own optical absorption of silica to the optical losses of the hollow core fiber depends on a light localization mechanism of the fiber.

Note that the waveguiding mechanism of HC-PCF is based on a considerable penetration of radiation into the microstructured reflecting cladding on several periods of cladding structure. Thus, silica based HC-PCF lose their excellent properties in the wavelength region  $\lambda > 3 \mu\text{m}$ . A substantial increase of silica optical absorption in this region results in an increase of optical losses in HC-PCF [9]. Therefore, another type of HCF should be used for lasers in mid-IR. A good choice is HC fiber which use antiresonant waveguiding mechanism [10] and, additionally, have core cladding boundary with negative curvature [11]. In particular, hollow core revolver fibers meet these conditions well[9]. RFL based on revolver fibers enabled one to generate a single-mode radiation at the wavelength 4.4  $\mu\text{m}$  with quantum efficiency more than 50% [12]. This RFL was pumped by the ns pulse erbium fiber laser with average output power of  $\sim 10 \text{ W}$ . Its scheme is shown in fig. 1.

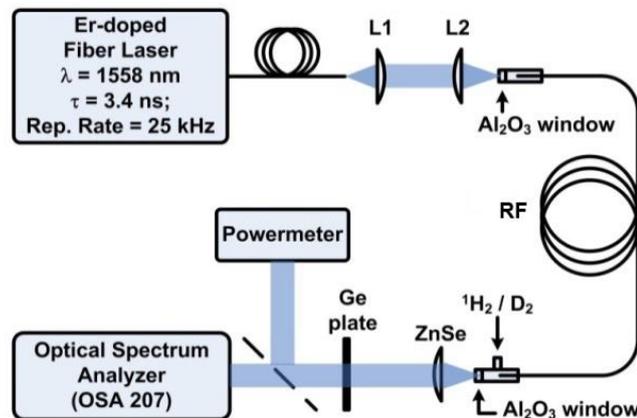


Fig. 1. Scheme of the experimental setup. L1 and L2 – aspheric fused silica lenses; RF – revolver fiber;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – sapphire windows of the gas cells at the HCF ends; ZnSe – collimating lens made of zinc selenide; Ge – 2-mm-thick germanium plate.

A cross-section of the revolver fiber and the dependence of the average output power on the pump power are shown in fig. 2.

Raman lasers based on gas-filled revolver fibers can become a versatile tool for generation at new wavelengths in mid-IR, because various Raman-active gases and their mixtures can be implemented. For example, another hydrogen isotope, deuterium  $\text{D}_2$ , can be used to achieve Raman generation around 3  $\mu\text{m}$ . Fig. 3 (b) shows an output spectrum of a RFL based on revolver fiber filled with a mixture of  $^1\text{H}_2$  and  $\text{D}_2$ . Its scheme is similar to the one in fig. 1, but the revolver fiber has a slightly different size of the cross-section, that results in proper positions of transparency bands of the revolver fiber for 1.55 and 3  $\mu\text{m}$  radiation (fig. 3 (a)). The radiation at the output of the laser contains

the Stokes components that arise as a result of Raman generation on the vibrational and rotational transitions of both gases (fig. 3 (b)).

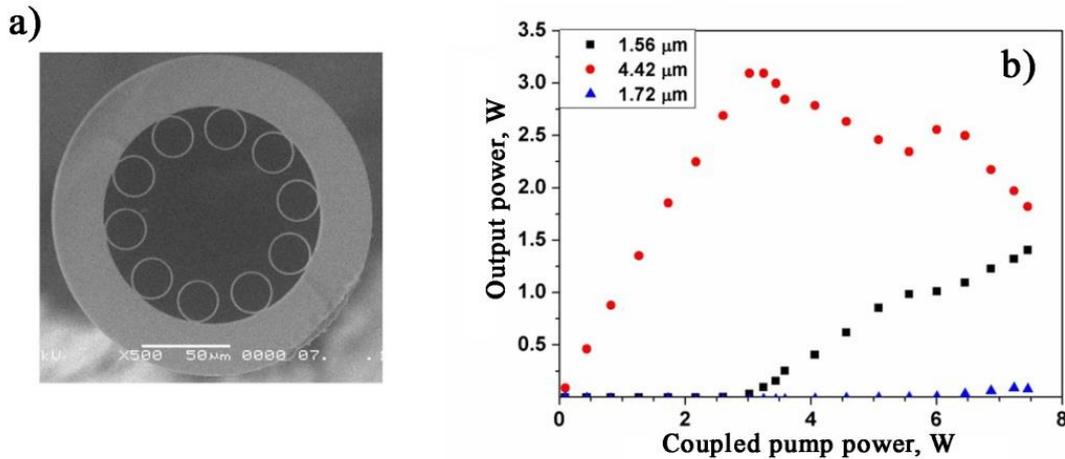


Fig. 2. (a) – SEM picture of the revolver fiber cross-section. The hollow core diameter is 75 μm. (b) – the average power at the RFL output vs. pump power launched into the hollow core; red dots – non-converted pump  $\lambda = 1.56 \mu\text{m}$ ; black squares – vibrational Stokes radiation  $\lambda = 4.42 \mu\text{m}$ ; blue triangles – rotational Stokes radiation  $\lambda = 1.72 \mu\text{m}$ .

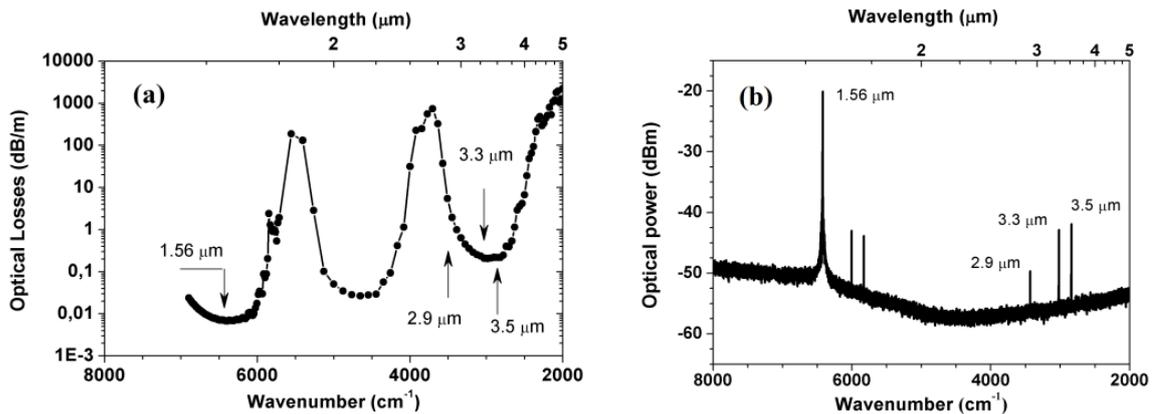


Fig. 3. (a) – calculated spectrum of optical losses for revolver fiber that was developed to realize RFL for 2.9-3.5 μm spectral region; (b) – output spectrum of the gas RFL. Peak pump power at  $\lambda=1.56 \mu\text{m}$  coupled into the revolver fiber core was 14 kW. A mixture of  $^1\text{H}_2$  and  $\text{D}_2$  at partial pressures of 2 and 28 atm, respectively, was used as an active medium.

This work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 19-12-00361).

1. R.F. Cregan, et al., *Science* **285**, 1537 (1999).
2. M. Xu, F. Yu, J. Knight, *Opt. Lett.* **42(10)**, 4055(2017).
3. F. Belli et al., *Optica* **2 (4)**, 292 (2015).
4. F. Benabid et al., *Science* **298**, 399 (2002).
5. F. Benabid et al., *Phys. Rev. Lett.* **94**, 123903 (2004).
6. A. Benoit et al., *Proc. SPIE, Nonlinear Freq. Gener. Convers., Mater. Devices XVI*, **10088**, 100880H (2017).
7. A.V. Gladyshev et al., *Quantum Electron.* **45**, 807 (2015).
8. A.V. Gladyshev et al., *Quantum Electron.* **47**, 491 (2017).
9. I.A. Bufetov et al., *Fibers* **6**, 39 (2018).
10. N.M. Litchinitser et al., *Opt. Lett.* **27**, 1592 (2002).

- 11.A.D. Pryamikov et al., Optics Express **19**, 1441 (2011).
- 12.M.S. Astapovich et al., Photonics Technology Lett. **31 (1)**, 78 (2019).

# COMPARISON OF POLARIZATION CHARACTERISTICS OF NON-STANDARD TWISTED FIBERS

O.V. Ivanov<sup>1,2,3</sup>, M.M. Nabiulin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia*

<sup>2</sup>*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Ulyanovsk, Russia*

<sup>3</sup>*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia*

Email: [mans73@yandex.ru](mailto:mans73@yandex.ru)

Polarization phenomena in twisted optical fiber have been known for a long time [1]. Fiber twisting is used to monitor polarization of modes propagating in optical fiber, to adjust fiber grating operating wavelength, to compensate fiber birefringence and to control polarization mode dispersion.

The modes propagating in twisted fiber are under the effect of circular birefringence. Rotation of polarization of modes propagating in the fiber is proportional to the twisting fiber angle [2]. The proportionality coefficient is determined by the photo-elastic constants of the optical fiber material. It is of particular interest to study polarization rotation in non-standard fibers, such as fibers with special doping, an air core, etc.

This paper presents an experimental investigation and comparison of the polarization characteristics of the modes propagating in various types of twisted fibers such as Fujikura, Corning, and several types of optical fiber from Fibercore, including ones with high germanium concentration.

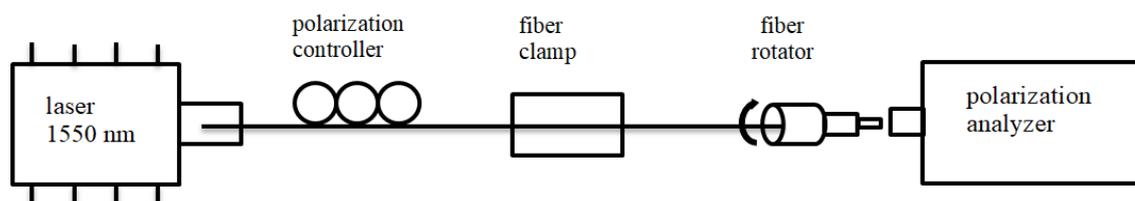


Fig. 1. Experimental setup.

The experimental setup consists of laser (wavelength 1550 nm), polarization controller, fiber clamp, fiber rotator and polarization analyzer (Keysight N7781B). The fiber length was varied from 5 to 30 cm.

We measured the change in polarization of modes propagating in various types of twisted fibers as a function of twisting angle and for different fiber lengths.

The work was supported by Russian Foundation of Basic Research (project № 16-47-730738).

1. R. Ulrich, A. Simon, *Appl. Opt.* **18**, 2241 (1979).
2. O.V. Ivanov, *J. Opt. Soc. Am. A* **22**, 716 (2005).

# THE PASSIVELY MODE LOCKED FIBER LASER RESONATOR LENGTH AND SATURABLE ABSORBER PARAMETERS INFLUENCE ON PULSE PEAK INTENSITY AS GAIN INCREASED

A.A. Mastin<sup>1</sup>, P.A. Ryabochkina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Technopark-Mordovia, Saransk, Russia

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

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

We simulated passively mode locked pulsing in fiber laser ring cavity with anomalous dispersion. Thulium active fiber as amplification medium was considered. The work is aimed to find how the saturable absorber and cavity length effects the highest achievable pulse peak intensity and energy as gain increased. To find this we simulated pulse dynamics in Shrodinger model [1] for fiber lasers with different cavity length, saturation intensity and relaxation time absorbers.

The fig. 1 shows pulse peak intensity for considered cases as gain increased.

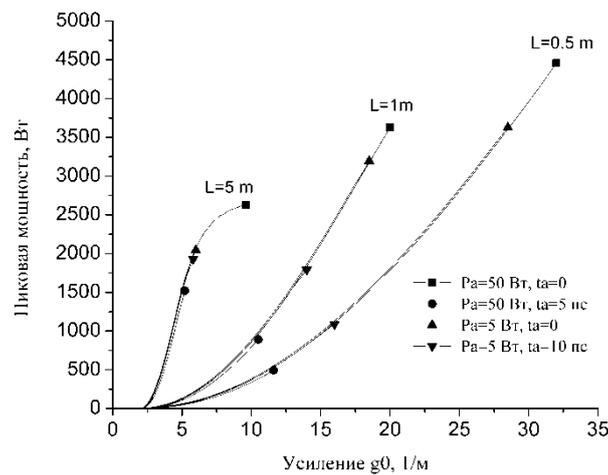


Fig. 1. The pulse peak intensity dependences as gain increased. The lines are found for different cavity length and absorber saturation intensity and relaxation time. The markers depict the pulse highest achievable peak intensity while single pulse regime per cavity round trip exists.

We found that for any cavity length highest pulse peak intensity corresponds to laser with highest absorber saturation intensity and shortest relation time. As cavity length increased on pulse profile low intensity pedestal appears which restricts pulse peak intensity growth as gain increased.

1. O.G. Okhotnikov, *Fiber Lasers*, Weinheim, Germany: Wiley, 2012.

# THE THULIUM DOPED FIBER LASER MODE-LOCKED BY CARBON NANOTUBE ABSORBER

N.R.Arutyunyan<sup>1</sup>, V.A.Kamynin<sup>1</sup>, A.A. Mastin<sup>2</sup>, E.D. Obraztsova<sup>1</sup>, P.A.Ryabochkina<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*Technopark-Mordovia, Saransk, Russia*

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

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

The work is aimed to determine the influence of carbon nanotube based saturable absorber modulation depth on mode lock pulsing of thulium doped fiber laser.

The interest to carbon nanotube based absorbers is explained by availability to tune its parameters in wide range and by relatively low cost of its production [1].

The fiber laser is made in linear scheme that is closed by fiber ring-like mirrors. Carbon absorber is manufactured by dispersion of carbon nanotubes in cellulose film [1]. The film was set between fiber optic connectors and in such a way was used in a transmission in the cavity.

To characterize the nonlinear transmission properties of saturable absorbers we used fiber optic scheme [2] in which we compare the energy of picosecond laser pulse that passed through absorber and energy of referent pulse.

As a result, we show that absorber film width increasing led to increase of absorber modulation depth and saturation intensity.

Also we show that laser with absorber that have more deep modulation depth have more higher mode lock start pump level and its pulse energy can have more higher energy.

1. A.V. Tausenevet al., Quantum Electronics **37(3)**, 205 (2007).
2. G. Sobonet al., Sci. Rep.**7**, 45491 (2017).

# TAPERING FIBER INSERTIONS FOR CONTROLLING COUPLING TO CLADDING MODES

D.D. Bakurov<sup>1,2</sup>, O.V. Ivanov<sup>1,2</sup>

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

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

*E-mail: dynamite.98@mail.ru; olegivvit@yandex.ru*

The interest in the investigation of optical fiber insertions is due to the possibility of excitation of cladding modes that can be used in fiber optical sensors [1]. The change in the coupling coefficient into cladding modes when a special fiber insertion is made occurs as a result of the fact that some part of the intensity from the core mode is not guided by the core of the insertion, but goes to its cladding [2]. The coupling coefficient depends on the length of the insertion; therefore it can be controlled by changing its length.

In this paper, we implement a method for adjusting the length of the insertion by heating and drawing it in an optical fiber splicer. The insertion of a special fiber (SM450, SM600) is heated by short discharges of electric arc ( $t = 180 \dots 220$  ms) and is pulled by a load suspended at the fiber end. We studied the dependence of the change in the cladding radius on the number of discharges and the discharge time. The measurement results showed that the optimal discharge time is about 200 ms. The transmission through the insertion as function of the number of discharges is shown in the following figures.

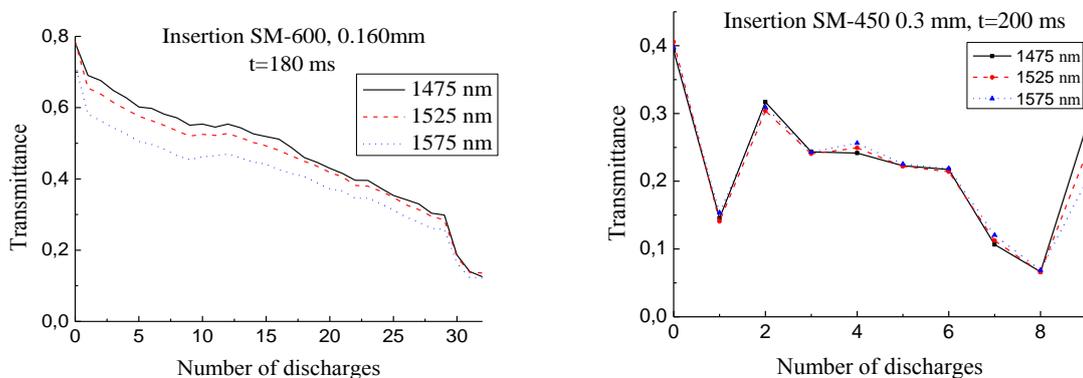


Fig. 1. Dependence of transmittance on the number of discharges.

From the obtained dependences of the transmittance on the number of discharges, it can be seen that 10–15 discharges are sufficient to obtain the necessary transmittance of about 30% for discharge time of 180 ms.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 16-47-730738).

1. Y. Kong et al., *IEEE Sens. J.* **18**, 8747 (2018).
2. O.V. Ivanov, *Radioengineering and electronics* **63**, 1041 (2018).

# НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НАНОПРОВОЛОКИ: РОСТ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Г.Э. Цырлин

*Санкт-Петербургский Академический университет им Ж.И. Алферова  
РАН, Санкт-Петербург*

*Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург  
Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

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

Прогресс в технологических методах выращивания и диагностики наноструктур различного типа, достигнутый в последнее время, продолжает буквально на наших глазах преобразовать информационный мир и повседневную жизнь человека. Фундаментальные и прикладные исследования методов создания и свойств наноструктур в конденсированных средах принято объединять общим термином «наноматериалы и нанотехнологии». В некотором смысле понятие нанотехнологии даже шире традиционного подразделения областей знаний – физики, химии, биологии и других дисциплин, поскольку управление свойствами системы на атомарном уровне стирает различия между объектами исследования. Полупроводниковые гетероструктуры, впервые синтезированные в 1960-х годах, быстро нашли применение в оптоэлектронных устройствах и высокоскоростной СВЧ электронике. Затем были созданы наноструктуры с одномерным (квантовые ямы), двумерным (квантовые проволоки) и трехмерным (квантовые точки) ограничением носителей заряда, приводящим к квантованию спектра энергетических состояний. Уникальные транспортные, электрические, оптические, адсорбционные и иные характеристики ансамбля наноструктур определяются их размером и морфологией. Наличие нетривиальной связи между физическими характеристиками частиц и их геометрией делает актуальной задачу контролируемого выращивания наноструктур с заданным размером, плотностью и формой.

В лекции рассматриваются фундаментальные и прикладные аспекты синтеза, свойств и приложений одномерных полупроводниковых наноструктур, перпендикулярных поверхности подложки. Такие наноструктуры называются нитевидными нанокристаллами (ННК), иначе – нановискерами. Полупроводниковые ННК обычно выращиваются на предварительно подготовленных поверхностях. В большинстве случаев используется активация поверхности металлическими каплями – катализаторами роста. Исследования ростовых процессов и свойств ННК процессов в настоящее время привлекают большой интерес. Это объясняется, в первую очередь, перспективными применениями ННК в различных областях микроэлектроники, оптоэлектроники, наномеханики и нанобиотехнологии. На основе можно создавать полевые и

гетеробиполярные транзисторы, светоизлучающие устройства со сверхнизким энергопотреблением, различные типы сенсоров, зонды для атомно-силовых микроскопов, автоэмиссионные катоды, туннельные диоды, одноэлектронные транзисторы, однофотонные излучатели и т.д. Чрезвычайно эффективная релаксация упругих напряжений на боковой поверхности позволяет выращивать бездислокационные ННК в сильно рассогласованных гетероэпитаксиальных системах, что невозможно в двумерных пленках. Ансамбли полупроводниковых ННК также представляют собой уникальный объект для проведения фундаментальных исследований процессов роста и свойств одномерных наноструктур. К наиболее интересным фундаментальным вопросам относятся: физика нуклеации в системах пониженной размерности, модификация свободной энергии за счет поверхностных эффектов, кристаллографическая структура ННК, одномерный транспорт носителей, эффекты размерного квантования, большие отношения площади поверхности объема к объему площади поверхности, высокая чувствительность проводимости к управлению полем и к модификации поверхности кристалла. Одномерность объектов, сосуществование нескольких фаз вещества при их формировании, наличие нетривиальных размерных эффектов делает актуальной задачу моделирования процессов роста и физических свойств ННК.

Несмотря на значительный технологический прогресс, достигнутый в последнее время в области синтеза и диагностики полупроводниковых ННК, физика полупроводниковых ННК является развивающейся, а не завершенной областью нанотехнологии. Поэтому целью лекции является не только описание достигнутых результатов, но и анализ наиболее актуальных проблем. В целом развитие исследований в области полупроводниковых ННК необходимо для решения важнейшей задачи: создания новых материалов с контролируемыми свойствами и широкой областью применения на основе непланарных нанообъектов. Следует подчеркнуть, что ННК формируются не в результате процессов самоорганизации, как многие другие наноструктуры, а за счет предварительной подготовки поверхности. Возможность прецизионного контроля диаметра, высоты, формы, плотности, структуры и состава ННК является, на наш взгляд, главным преимуществом, позволяющим существенно улучшить свойства материала и создать новое поколение функциональных наноустройств с качественно новыми характеристиками.

## ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ДВУМЕРНЫХ СИСТЕМАХ

Б.В. Андрюшечкин

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

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

Лекция посвящена структурным фазовым переходам в двумерных системах, а именно, в монослойных пленках, адсорбированных на монокристаллические поверхности металлов.

Важность исследования структурных фазовых переходов в адсорбированных слоях обусловлена тем, что для многих процессов, приводящих к возникновению наноструктур на поверхности (самоорганизация, эпитаксиальный рост), определяющим фактором является атомная структура первого слоя адсорбата (монослоя). В этой связи крайне актуальной становится методика создания монослоев с заданной структурой и умение контролировать превращения между различными поверхностными фазами на уровне атомных перемещений.

В общем случае структура монослоя определяется конкуренцией между латеральным взаимодействием атомов на поверхности и потенциалом подложки, а также температурой [1]. В зависимости от температуры поверхности и/или степени покрытия на одной и той же поверхности могут наблюдаться двумерные (2D) газ, жидкость, а также твердые упорядоченные фазы. По отношению к решетке подложки наблюдаемые фазы можно разделить на соразмерные, несоизмерные или частично соразмерные. Изменение температуры или степени покрытия может приводить к структурным переходам между этими фазами. Основными факторами, определяющими характер таких переходов, является соотношение потенциального рельефа подложки и латерального взаимодействия между адсорбированными атомами, рассогласование параметров решеток двумерного слоя и подложки, а также температура.

Традиционно исследования фазовых переходов на поверхности проводились в пленках газов, физсорбированных на металлах или графите, с использованием различных дифракционных методов.

Данный подход был связан с тем, что для данных систем взаимодействие адсорбата с подложкой могло бы быть описано достаточно просто (например, с использованием потенциала Леннарда-Джонса), что и позволяло строить теоретические модели фазовых переходов.

Одним из самых активных исследуемых фазовых переходов являлся, так называемый, переход из соразмерной в несоизмерную фазу [2–4]. При этом области с соразмерной фазой оказываются разделенными полосами или гексагональной сеткой несоизмерной фазы («доменными стенками») с плотностью атомов выше или ниже, чем в соразмерной области. Данный эффект этот был открыт в работе Френкеля и Конторовой в конце тридцатых годов, в который было показано, что если вы будете сжимать соразмерную решетку находящийся на каком-то потенциале это оказывается что равномерного сжатие решетки не происходит а

происходит возникновение доменных стенок (или солитонов), которые разделяют области с соразмерной структурой. На рисунке 1 представлен модельный рисунок доменных стенок, которые могут реализовываться на гексагональной подложке.

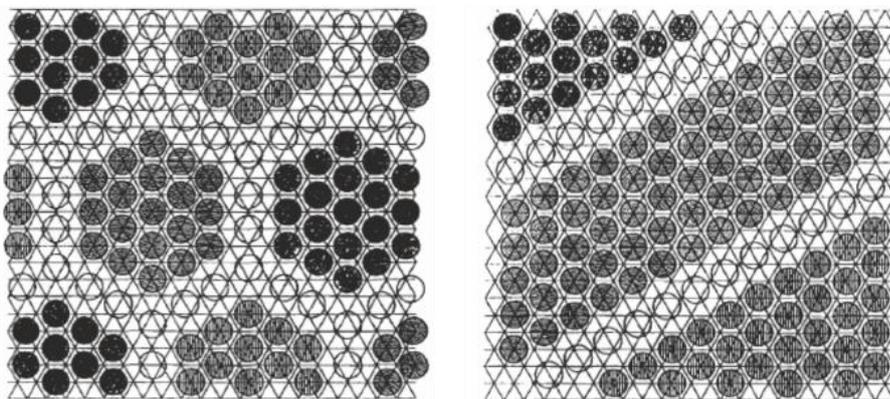


Рис.1. Гексагональные и линейные доменные стенки на гексагональной подложке для структур  $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$ .

Оказывается, что доменные стенки могут или повторять симметрию подложки, то есть быть гексагональными, так и быть линейными. Первые экспериментальные свидетельства существования доменных стенок были получены для следующих систем: Kr/Graphite, Xe/Pt (111), H<sub>2</sub>/Graphite. Но оказалось что дифракционных методов недостаточно для полного описания фазовых переходов на атомном уровне, и, безусловно, нужно применение сканирующей туннельной микроскопии. Однако для случаев физсорбированных газов даже применение СТМ не дало очень ярких результатов в виду того, что даже при гелиевых температурах молекулы газа оставались достаточно слабо связанными с поверхностью. В этой связи можно рассмотреть другую систему, такую как система галогены на металлах, которая может являться альтернативной модельной системой для исследования фазовых переходов.

Уже к концу восьмидесятых годов прошлого века было опубликовано достаточно большое количество различных работ, в которых исследовалась адсорбция галогенов на металлические поверхности. В основном все эти работы были стимулированы возможными каталитическими приложениями. В обзоре Роберта Джонса, опубликованном в 1988 году [5], было отмечено, что галогены формируют большое количество упорядоченных адсорбированных фаз в зависимости от степени покрытия и температуры. Тем самым было показано, что они являются потенциальными удобными модельными системами для исследования фазовых переходов.

Дополнительно оказалось, что многие дифракционные картины, которые наблюдаются для многих пар галоген-металл, оказываются во многом схожими с дифракционными картинами, наблюдаемыми в пленках физсорбированных газов на поверхности металлов и графита. Это свидетельствует о возможной близости фазовых переходах в этих системах.

Достоинством систем выбора системы галогены на металлах является возможность наблюдать многие фазовые переходы при комнатной температуре. Хотя на момент начала исследований большинство систем галоген/металл были уже изучены интегральными методами, и для каждой из них были предложены свои структурные модели, понимания структурных превращений на поверхности металлов под воздействием галогенов достигнуто не было, ввиду практически полного отсутствия работ выполненных в реальном пространстве с использованием сканирующей туннельной микроскопии.

Целью работы являлось изучение механизма структурных фазовых переходов в адсорбированных слоях галогенов на поверхности г.ц.к. металлов при их латеральном сжатии в условиях сверхвысокого вакуума.

Объектами исследования являлись монокристаллические грани меди, серебра и золота. Рассматривались все грани (111), (100) и (110), которые, соответственно, представляли поверхность гексагональной симметрии, симметрии 4-порядка и прямоугольной решеткой. В качестве адсорбатов рассматривались галогены: хлор и йод. Такой выбор объектов позволил варьировать рассогласование параметров решеток галогена и подложки в максимально широких пределах, так как постоянная решетки серебра (2.89 Å) максимальна, а меди (2.56 Å) минимальна среди ряда г.ц.к. металлов. С другой стороны, хлор и йод (без учета фтора) представляют минимальный и максимальный размер атома галогена: диаметры Ван-дер-Ваальса равны 3.6 Å и 4.0-4.3 Å, соответственно.

Основным методом исследования являлась сканирующая туннельная микроскопия. Все исследования проводились в условиях сверхвысокого вакуума при давлении лучше, чем  $10^{-10}$  Торр. Помимо этого, конечно, использовалась электронная спектроскопия, дифракция медленных электронов, термодесорбционная масс-спектрометрия. Все экспериментальные методы дополнялись расчетами в рамках теории функционала плотности с использованием пакета VASP на базе вычислительных кластеров РАН, МФТИ, МГУ, ИОФ РАН.

В лекции представлены результаты исследований, проводимых в отделе технологий и измерений атомного масштаба ИОФРАН [6]. Все результаты могут быть разделены на четыре группы, отражающие различные типы структурных фазовых переходов на поверхности:

1. Переход беспорядок-порядок, т.е. упорядочение на субмонослойных покрытиях.
2. Переход из соразмерной в несоразмерную фазу.
3. Реконструкционные фазовые переходы.
4. Формирование поверхностных галогенидных фаз.

На первом этапе исследования мы рассмотрели **субмонослойную стадию адсорбции галогенов** на поверхность г.ц.к. металлов. Было установлено, что на начальной стадии адсорбции хлора на гранях (111) г.ц.к. металлов (Ag, Cu, Au) происходит формирование квазиодномерных цепочечных и нанопористых структур с расстояниями между атомами

хлора меньшими, чем в двумерной структуре  $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$ , имеющей большую плотность (рис. 2). Атомные структуры, формируемые атомами галогенов на поверхности г.ц.к. металлов на субмонослойной стадии адсорбции, обусловлены непрямыми электронным и/или упругим взаимодействиями между атомами галогенов через подложку. В дальнейшем при увеличении степени покрытия эти нанопористые структуры постепенно превращаются к  $1/3$  монослоя в простую структуру  $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$ .

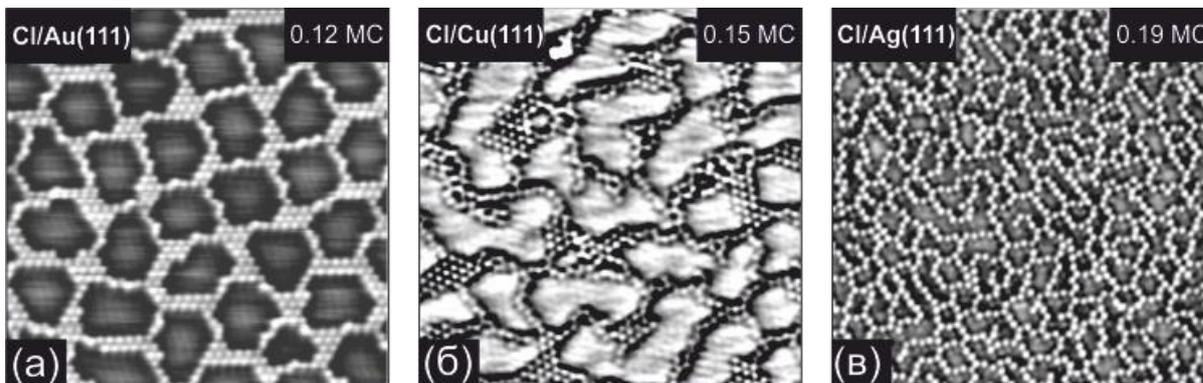


Рис. 2. СТМ-изображения ( $200\times 200 \text{ \AA}^2$ , 5 К) нанопористых структур из атомов хлора, формируемых на гранях Au(111) (а), Cu(111) (б) и Ag(111) (в) в субмонослойной области покрытий.

В ходе изучения фазового перехода из **соразмерной в несоразмерную фазу** будут получены ответы на вопросы: Как происходит сжатие соразмерной решетки? Является ли сжатие изотропным и однородным? Как зависит характер перехода от симметрии решетки подложки?

В частности, на примере адсорбции хлора на поверхность Ag(111) установлено, что механизм сжатия соразмерной решетки  $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$  (переход соразмерная – несоразмерная фаза) включает в себя формирование краудионов (рис. 3) и их конденсацию в сверхплотные линейные доменные стенки. Показано, что подобный механизм может быть общим и определять фазовые переходы в слое галогенов на гранях (111) г.ц.к. металлов.

Модель линейных доменных стенок описывает процесс сжатия решетки галогенов на грани (110) г.ц.к. металлов в том случае, если предпочтительным местом адсорбции галогена является положение между четырьмя атомами подложки (I/Cu(110), I/Ag(110)). Если наиболее выгодным местом адсорбции является короткое мостиковое положение, то сжатие решетки галогена происходит в результате реконструкционных переходов (Cl/Cu(110)).

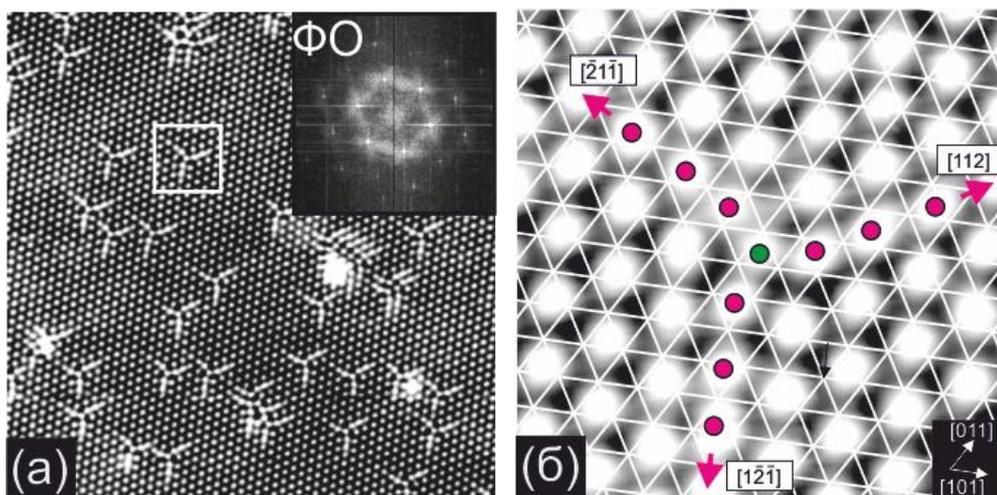


Рис. 3. (а) – СТМ-изображение ( $330 \times 330 \text{ \AA}^2$ , 5 К), полученное для степени покрытия хлором 0.34 МС. На вставке приведен фурье-образ; (б) – СТМ-изображение с высоким разрешением решетки хлора с наложенной сеткой, узлы которой соответствуют решетке  $\text{Ag}(111)$ . Дефект внедрения в решетку  $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ\text{-Cl}$  (дополнительный атом хлора) показан зеленым кружком, а атомы, формирующие краудидон, показаны фиолетовыми кружками.

На грани (100) г.ц.к. металлов сжатие соразмерной решетки галогенов реализуется только при значительном превышении расстояния галоген-галоген в исходной соразмерной структуре над диаметром Ван-дер-Ваальса галогена (случай I/Cu(100)). Установлено, что в этом случае сжатие происходит за счет серии фазовых переходов первого и второго рода, включая 2D плавление.

Третьим этапом исследований являлись реконструкционные **фазовые переходы**, которые индуцированы адсорбцией галогенов. В этом случае была сделана попытка расшифровать детальную атомную структуру реконструкционных фаз и установить условия формирования реконструкций.

На рисунке 4 показан пример, это опять же хлор на серебре (111), в котором после формирования доменных стенок возникает действительно сложная картина дифракции медленных электронов, которая тоже входит в семейство « $n \times n$ » и содержит группы пятен вокруг положений  $3 \times 3$ . На детальном СТМ-изображении видно, что сформировались очень интересные объекты с такими дырочками – это островки размером  $15\text{--}30 \text{ \AA}$ , локальная периодичность которых  $3 \times 3$ . То есть расстояние между дырками – это утроенное расстояние между атомами подложки. Островки антифазны друг другу, и, поэтому, эту систему можно рассматривать как систему антифазных доменов с локальной структурой  $3 \times 3$ , что, согласно теории дифракции, приводит к расщеплению пятен в обратном пространстве. И мы, действительно, видим на дифракционных картинах расщепление вокруг положений пятен  $3 \times 3$ . Так как домены расположены хаотично, то величина расщепления не поддается точной оценке. Поэтому в общем случае структуру можно описать только как «расщепленную»  $3 \times 3$ .

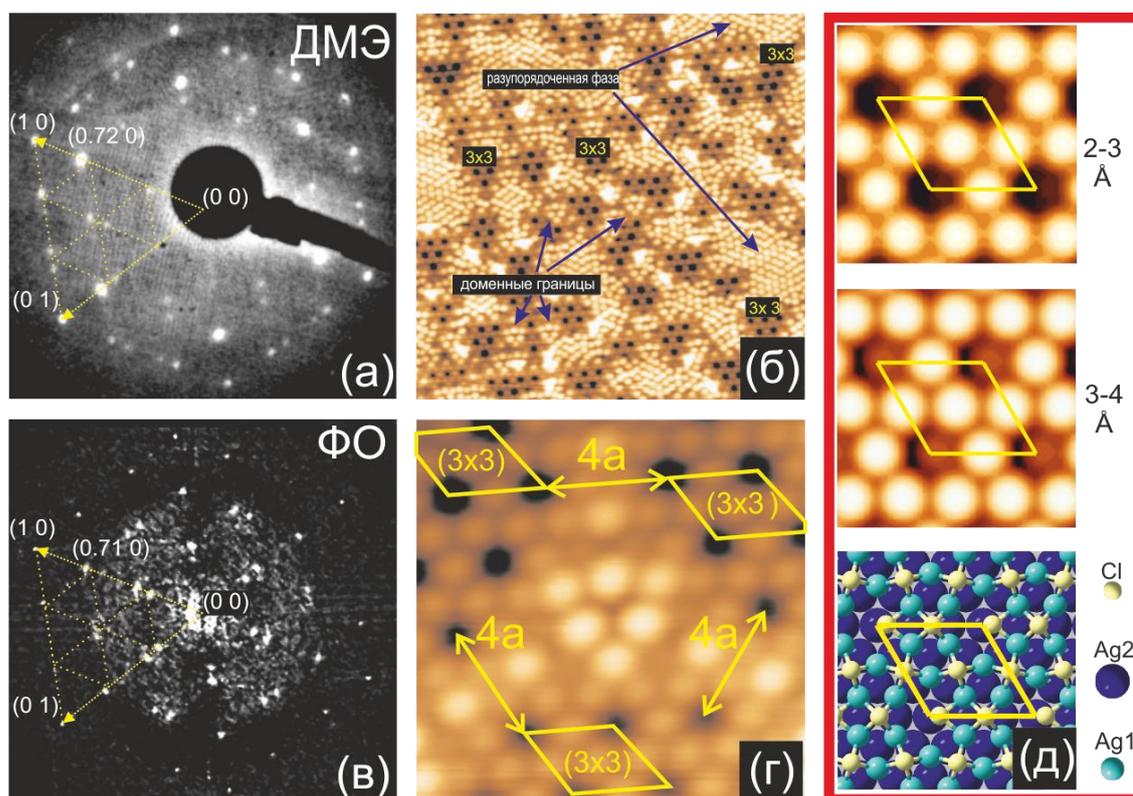


Рис. 4. (а) – СТМ-изображение ( $330 \times 330 \text{ \AA}^2$ , 5 К), полученное для степени покрытия хлором 0.34 МС. На вставке приведен фурье-образ; (б) – СТМ-изображение с высоким разрешением решетки хлора с наложенной сеткой, узлы которой соответствуют решетке Ag(111). Дефект внедрения в решетку ( $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ )R30°-Cl (дополнительный атом хлора) показан зеленым кружком, а атомы, формирующие краудион, показаны фиолетовыми кружками.

Нам также удалось установить, как устроена и сама эта реконструкция. Тоже достаточно интересно. Оказалось, что здесь полностью меняется конфигурация атомов. В рамках ячейки  $3 \times 3$  из подложки выбрасываются лишние атомы. Остаются только шесть атомов, три – в положениях г.ц.к. и три – в положениях г.п.у. Они формируют треугольники. Между соседними такими ячейками формируются места для адсорбции атомов хлора, но уже с симметрией примерно 4 порядка. Атомы хлора заполняют эти места и формируют такую  $(3 \times 3)$  структуру. Атомы хлора в данном случае расположены чуть ниже, чем в других структурах. Поэтому видно, что эти домены как бы немножко утоплены по отношению к нереконструированной части подложки. Эта модель была подробно рассчитана с использованием теории функционала плотности, и можно с большой вероятностью считать существование именно такой реконструкции доказанной. В этой связи мы считаем, что и большинство других структур типа « $n \times n$ », наблюдаемых на (111) гранях г.ц.к. металлов также обусловлены реконструкцией поверхности, а не однородным сжатием слоя галогена.

Очень интересная серия реконструкционных фазовых переходов наблюдается в системе хлор на меди (110), потому что именно для этого случая предпочтительным местом адсорбции хлора является положение короткого мостика. В этом случае простое сжатие решетки, как мы

говорили, невозможно, и поэтому здесь сразу начинается серия фазовых переходов. На начальной стадии адсорбции начинают формироваться специфические полосы, которые выглядят как доменные стенки. Однако при увеличении степени покрытия они не собираются как в случае простого перехода из соразмерной в несоизмерную фазу, а, наоборот, разбегаются. Оказалось, что в центре каждой доменной стенки присутствует дополнительный ряд атомов меди. По мере увеличения степени покрытия ряды исчезают, и, в конце концов, при степени покрытия 0.5 МС формируется простая решетка  $c(2 \times 2)$ , но при этом атомы находятся в положении и короткого мостика.

Интересно, что сжатие уже такой решетки не происходит по механизму доменных стенок, а тоже происходит по механизму реконструкции. Вместо того чтобы просто сжимать слой система, наоборот, наращивает дополнительные пьедесталы из атомов меди (показаны оранжевыми кругами) и помещает дополнительные атомы хлора на эти пьедесталы. В результате чего хлор как бы остаётся разнесенным на два этажа: на нижнем этаже присутствует структура  $c(2 \times 2)$ , а на верхнем этаже атомы хлора находятся на этих пьедесталах. По мере увеличения степени покрытия число таких объектов растёт, растёт, растёт, и, в конце концов, они смыкаются, и образуется уже несоизмерная решетка хлора на уже сплошной поверхности меди (110). Но на этом дело не заканчивается – в конце концов – вся система начинает фасетироваться. Вместо плоскости (110) возникают плоскости с ориентацией (210), на которых также располагается хлор. Емкость у такой лестницы, лежащей на поверхности, больше чем у простой плоской поверхности. Вероятно, это является причиной того, что такое фасетирование становится выгодной. И, в конце концов, вся поверхность зарастает вот такими фасетками.

Таким образом, что если наиболее выгодным местом адсорбции галогена является короткое мостиковое положение, то характер фазовых переходов очень сложный, и он всегда должен включать реконструкцию.

И четвертое направление исследований – это **поверхностные галогенидные фазы**, структура и свойства которых отличаются от свойств объемных кристаллов. Действительно, было получено, что при некоторых условиях получают объекты, которые по своим свойствам уже не являются хемосорбированными фазами, в то же время, они еще не являются другими галогенидными полноценными фазами. Существование такого вида структур доказано для ряда систем: Cl/Au(111), Cl/Ag(111), I/Cu(111), I/Ag(111), I/Ag(100).

На рисунке 5 приведен такой пример для поверхности золота (111) после взаимодействия с молекулярным хлором. После формирования решетки  $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$ , в отличие от серебра, здесь не происходит сжатия решетки, вместо этого возникают новые объекты вытянутой формы. В результате расчетов методом функционала плотности нам их удалось интерпретировать как молекулы, как квазимолекулы  $\text{AuCl}_2$ . По мере увеличения степени покрытия вся поверхность заполняется вот такими

молекулами, и, в конце концов, они формируют упорядоченную такую решетку, похожую на решетку пчелиных сот, определяемую достаточно сложной элементарной ячейкой. И в пределах этой элементарной ячейки по кругу расположены молекулы, а в центре присутствуют два адсорбированных атома хлора в положениях г.ц.к. и г.п.у.

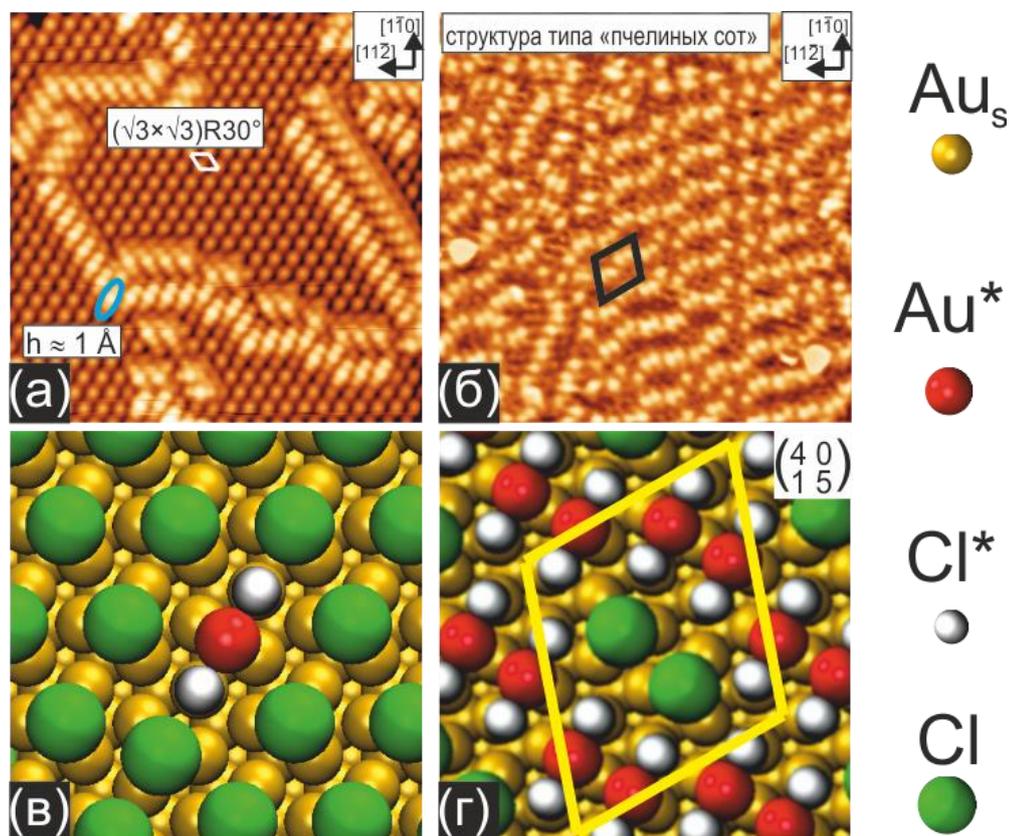


Рис. 5. (а), (б) – СТМ-изображения ( $120 \times 120 \text{ \AA}^2$ ;  $T = 5 \text{ K}$ ) хлорированной при 130 К поверхности Au(111), демонстрирующие сжатие слоя хлора в структуру типа «пчелиных сот»; (в) – сосуществование фазы  $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$  и цепочечной структуры; (г) – исчезновение фазы  $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$  и формирование структуры типа «пчелиных сот».

Таким образом, в лекции был представлен обзор работ посвященных структурным фазовым переходам в монослоях галогенов на поверхности металлов. Согласно нашему анализу, для ряда систем картина взаимодействия галогенов с поверхностями металлов далека от завершения. Действительно, для большинства систем, недавно пересмотренных с использованием СТМ в сочетании с ТФП расчетами, были получены новые данные. Следовательно, есть основания ожидать, что дальнейший пересмотр систем, изученных в 1970–80-х гг., может предоставить много новой интересной информации о фазовых переходах в двумерных пленках. В дальнейшей работе следует делать акцент на низкотемпературные СТМ-исследования, которые дают возможность изучать структуру и взаимодействия на поверхности на атомарном уровне.

Знания о структурах, формируемых галогенами на поверхности металлов, важны для понимания коадсорбционных структур галоген-кислород, возникающих на поверхности металлического катализатора при окислении олефинов. В частности, в реакции частичного окисления

этилена на серебряном катализаторе при участии хлора в качестве промотора.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ в рамках грантов: № 08-02-01456-а, № 08-02-01396-а, № 10-02-90476-Укр\_а, № 15-02-99542-а и № 20-02-00767-а.

1. G.A. Samorjai, M.A. Van Hove, *Adsorbed Monolayers on Solid Surfaces*, Berlin: Springer, 1979.
2. И.Ф. Люксютов, А.Г. Наумовец, В.Л. Покровский, *Двумерные кристаллы*, Киев: Наукова думка, 1988.
3. P. Bak, *Rep. Prog. Phys.* **45**, 587 (1982).
4. B.N.J. Persson, *Surf. Sci. Rep.* **15**, 1 (1992).
5. R.G. Jones, *Prog. Surf. Sci.* **27**, 25 (1988).
6. B.V. Andryushechkin et al., *Surf. Sci. Rep.* **73**, 83 (2018).

# КВАНТОВАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

К.С. Кравцов

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

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

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

В лекции будет дан краткий обзор современных квантовых технологий, в первую очередь, квантовых вычислений и квантовых коммуникаций. Более подробно будут рассмотрены задачи квантовой связи и квантовой криптографии: начиная от первых принципов и заканчивая особенностями реализации как оптоволоконных каналов, так и каналов связи по открытому пространству.

Развитие современных квантовых технологий тесно связано с так называемой второй квантовой революцией, т.е. этапом развития науки, на котором ученые научились управлять отдельными квантовыми объектами, а не только большими ансамблями частиц, проявляющими квантовые свойства, как это было ранее. В результате появилась возможность использовать эти неклассические свойства для решения различных задач: для вычислений, для обмена секретными ключами, для реализации различных сенсоров и др. Ряд выдающихся теоретических работ показал, что квантовые свойства позволяют решать эти задачи на принципиально недостижимом классическим путем уровне. Например, квантовые компьютеры позволяют эффективно решать ряд задач, для которых эффективный классический алгоритм неизвестен (по-видимому, не существует). Квантовая криптография позволяет организовать обмен секретными ключами с гарантиями секретности, основанными не на предположениях о возможностях злоумышленников, а на фундаментальных законах физики. В настоящее время огромное количество исследований посвящены практической реализации этих теоретических предсказаний и во многих областях уже были достигнуты большие успехи. Наиболее развитой в этом смысле областью является направление квантовых коммуникаций, которому и будет посвящена основная часть настоящей лекции.

## ОДНОФОТОННЫЕ ИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Г.В. Климко, М.В. Рахлин, И.В. Седова, С.В. Сорокин, А.А. Торопов  
*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*  
*E-mail: [maximrakhlin@mail.ru](mailto:maximrakhlin@mail.ru)*

Многообразие технологически доступных систем квантовых точек (КТ) позволяет изготавливать однофотонные излучатели в широком спектральном диапазоне от среднего ультрафиолетового до инфракрасного диапазона. Особый интерес представляет зелено-красный диапазон длин волн, который соответствует области наибольшей чувствительности современных однофотонных лавинных фотодиодов [1]. Коммерческие устройства данного типа на основе полупроводниковых КТ в настоящее время недоступны из-за отсутствия воспроизводимой технологии изготовления однофотонных источников с необходимыми характеристиками (плотность КТ, чистота и яркость однофотонного излучения). В данной работе мы представляем исследования оптических свойств источников одиночных фотонов видимого спектрального диапазона на основе КТ InAs/AlGaAs и CdSe/ZnSe.

Одиночные КТ CdSe/ZnSe представляют особый интерес из-за возможности получения однофотонного излучения в зеленом спектральном диапазоне вплоть до комнатной температуры [2]. Тем не менее нерешенной проблемой является воспроизводимый рост структур с достаточно малой поверхностной плотностью КТ. Нами разработаны режимы роста, в результате которых образуется единый слой КТ с поверхностной плотностью КТ менее  $10^{10}$  см<sup>-2</sup>. Преимущества КТ InAs/AlGaAs заключаются в возможности достижения однофотонного излучения в красном спектральном диапазоне с использованием хорошо разработанных эпитаксиальных методов роста КТ [3]. Потенциальным недостатком ранее исследованных одиночных КТ InAs/AlGaAs является увеличенное содержание Al в одиночной КТ, приводящее к значительному (до 1 мэВ) усилению анизотропного обменного расщепления экситона, что препятствует генерации запутанных по поляризации фотонных пар [4]. Мы исследовали влияние тонкой прослойки GaAs между нижним барьерным слоем AlGaAs и КТ InAs, что позволило существенно уменьшить расщепление тонкой структуры экситона. Для обоих типов КТ, помещенных в цилиндрические фотонные наноантенны, продемонстрировано однофотонное излучение с высокой скоростью генерации.

Авторы благодарят за финансовую поддержку Российский Фонд Фундаментальных Исследований (проект № 18-02-01212).

1. N. Gisin et al., *Nat. Phys.* **20**, 317 (2009).
2. O. Fedorych et al., *Appl. Phys. Lett.* **100**, 61114 (2012).
3. A. Polimeni et al., *Phys. Rev. B* **59**, 5064 (1999).
4. J.J. Finley et al., *Phys. Rev. B* **66**, 153316 (2002).

## ЗОНДОВЫЕ МЕТОДЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ ДИАГНОСТИКИ

П.А. Алексеев

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

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

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) – это семейство методов, основанных на взаимодействии между поверхностью и наноразмерной иглой (зонда). Функционализация зонда позволяет картировать топографию [1], электрические [2] и магнитные поля [3], электрическую проводимость [4], механические свойства [5] и интенсивность оптического излучения [6]. Помимо многомодовой диагностики, СЗМ позволяет выполнять нанолитографию [7] с помощью локального анодного окисления или наноцарапания.

Доклад содержит обзор различных СЗМ методов, а также недавние примеры СЗМ диагностики III-V полупроводниковых нанопроводов и ван-дер-Ваальсовых гетроструктур (графен, MoSe<sub>2</sub>). GaAs нанопровода исследовались методом проводящей атомно-силовой микроскопии, которая позволила выявить влияние пассивации поверхности на поверхностные электронные состояния и проводимость [8]. Также было исследовано влияние механической деформации на электронные свойства III-As нанопроводов [9,10]. Для количественной характеристики электромеханических эффектов, механические свойства нанопроводов были также определены СЗМ методами [11]. Были определены вклады в проводимость тензорезистивного и пьезоэлектрического эффектов.

Для ван-дер-Ваальсовых гетероструктур было показано формирование 20 нм наноленты и 10 нм нанозазора в графене и MoSe<sub>2</sub> методом локального анодного окисления [12]. Электронные свойства MoSe<sub>2</sub> на графене были изучены для разного количества слоев MoSe<sub>2</sub> [13].

Работа поддержана грантом президента МК-1543.2020.2.

1. F.J. Giessibl, Science **267**, 68 (1995).
2. W. Melitz et al., Surf. Sci. Reports **66**, 1 (2011).
3. D. Rugar et al., Nature **430**, 329 (2004).
4. D. Mikulik et al., Nano Energy **41**, 566 (2017).
5. C.A. Amo et al., ACS Nano **11**, 8650 (2017).
6. M. Dunaevskiy et al., Appl. Phys. Lett. **103**, 053120 (2013).
7. R. Garcia, A.W. Knoll, E. Riedo, Nature Nanotechnol. **9**, 577 (2015).
8. P.A. Alekseev et al., Nano Letters **15**, 63 (2015).
9. P.A. Alekseev et al., Phys. Stat. Sol. (RRL) **12**, 1700358 (2018).
10. P.A. Alekseev et al. Nano Letters **19**, 4463 (2019).
11. M. Dunaevskiy et al. Nano Letters **17**, 3441 (2017).
12. P. Alekseev et al., Tech. Phys. Lett. **44**, 381 (2018).
13. B. Borodin et al., Semicond. Sci. and Technol. **34**, 125007 (2019).

# НИТЕВИДНЫЕ НАНОКРИСТАЛЛЫ ФОСФИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ: СИНТЕЗ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ

А.Д. Большаков<sup>1,2</sup>, И.С. Мухин<sup>1,2</sup>, В.В. Федоров<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский Академический университет им Ж.И. Алферова  
РАН, Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

<sup>3</sup>*Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург*

*E-mail: [bolshakov@live.com](mailto:bolshakov@live.com)*

Нитевидные нанокристаллы (иначе ННК, нанопроволоки, нанопровода) – структуры уникальной квазиодномерной геометрии, высокого аспектного соотношения: радиусом порядка 100нм и длиной до нескольких десятков микрон. Современные ростовые эпитаксиальные технологии позволяют относительно простыми методами синтезировать ННК по механизму пар-жидкость-кристалл различных полупроводниковых соединений (Si, Ge, III-V и II-VI), а также гетероструктуры на их основе. Среди всех бинарных соединений III-V фосфид галлия выделяется наименьшим рассогласованием по постоянной решетки с кремнием, что делает этот материал крайне привлекательным с точки зрения интеграции структур III-V на кремниевой платформе. Кроме того, геометрия ННК также способствует эффективной релаксации упругих напряжений даже при синтезе на рассогласованных подложках, что делает этот подход перспективным для прикладных решений. Помимо указанных выше преимуществ, GaP обладает низким коэффициентом поглощения в широком спектре, включая видимый диапазон, что делает такие наноструктуры перспективными элементами фотонных схем при использовании их в качестве микроскопических волноводов. Несмотря на непрямозонную структуру, GaP может быть разбавлен мышьяком и/или азотом, что делает этот материал прямозонным и позволяет реализовывать активные элементы оптоэлектроники на их основе. В купе с резонаторными свойствами ННК, последнее обеспечивает возможность создания локальных лазерных источников для применения в области обработки и передачи данных.

В этой работе мы расскажем о современных достижениях в области синтеза фосфидных ННК методом молекулярно-пучковой эпитаксии, включая методы создания массивов упорядоченных наноструктур, о возможностях реализации наногетероструктур на их основе, а также о возможностях использования ННК для создания приборов оптоэлектроники.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-32-70200).

# СИНТЕЗ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ КРЕМНИЕВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК С ОРГАНИЧЕСКИМИ ЛИГАНДАМИ

А.В. Князев, А.А. Конаков, Е.В. Сыров

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

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

В последние десятилетия значительный интерес вызывает использование полупроводниковых и металлических квантовых точек в различных областях биомедицины: медицинской диагностике, в частности, раковых заболеваний, доставке лекарств, оптическом биоимиджинге, тераностике. В основном используются оптические свойства таких частиц. В то же время типичные коллоидные квантовые точки селенида кадмия или металлических наночастиц, в том числе и золота, являются токсичными для организма человека. Расширение возможностей оптических методик в биомедицине требует поиска новых светоизлучающих нанообъектов, безопасных для биологических организмов. Решением могло бы стать использование растворов кремниевых нанокристаллов, покрытых органическими лигандами.

Нами разрабатывается новая методика получения коллоидных растворов кремниевых квантовых точек с органическим покрытием на основе ионно-синтезированных нанокристаллов кремния в оксидных матрицах. Модификация пассивированной поверхности нанокристаллов кремния производится в ходе фотохимической реакции. Реакция оксидированной поверхности нанокристаллов кремния со смесью аклилбензолов (изомеров ксилола, этилбензола, изопропилбензола и т.д.) проходит при комнатной температуре и облучении реакционной смеси в УФ диапазоне. Продуктом реакции является коллоидный раствор нанокристаллов кремния с модифицированной углеводородными группами поверхностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-53-45056 ИНД\_а).

# ПОЛУЧЕНИЕ ТВЕРДОГО РАСТВОРА $Cd_{1-x}Pb_xF_2$ МЕТОДОМ МЕХАНОСИНТЕЗА

И.И. Бучинская, Н.А. Ивановская

ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва

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

Механосинтез является эффективным способом получения наноразмерных частиц. Нанокристаллические фториды – одни из перспективных функциональных материалов для фотоники и ионики твердого тела [1]. В настоящей работе изучена возможность получения нанокристаллического твердого раствора  $Pb_{1-x}Cd_xF_2$  ( $x \sim 0.33$ ) путем помола смеси кристаллических исходных компонентов  $PbF_2$  и  $CdF_2$  в высокоэнергетической шаровой планетарной мельнице Retsch PM-200 ( $m_{\text{шаров}}/m_{\text{вещества}} = 100\text{г}/5\text{г}$ ) в защитной атмосфере Ar в течение 15 часов с промежуточным отбором проб для рентгенофазового анализа (РФА). РФА показал (рис. 1(а)), что на начальной стадии помола образуется ромбическая фаза на основе  $PbF_2$ , затем постепенно происходит образование новой кубической фазы с параметром решетки  $a = 5.76(8) \text{ \AA}$ , что очень близко к параметру решетки состава  $Pb_{0.67}Cd_{0.33}F_2$ . За 15 часов синтез происходит практически полностью (РФА не обнаруживает примеси исходных компонентов). Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) показала большую неоднородность частиц по размеру: 10–100 нм (рис. 1(б)).

Уширение рентгеновского профиля полученного продукта происходит в результате измельчения частиц и, возможно, из-за частичного «механогидролиза».

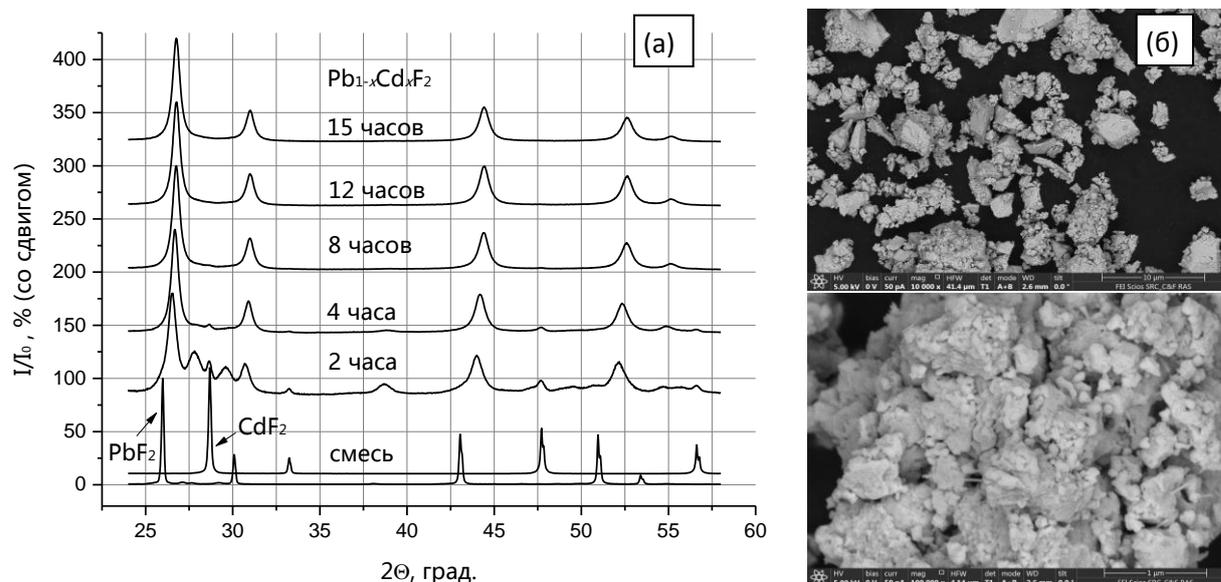


Рис. 1. (а) – динамика изменения спектров РФА порошка во время помола; (б) – СЭМ-изображения частиц  $Pb_{1-x}Cd_xF_2$  ( $x = 0.33$ ).

1. С.В. Кузнецов, В.В. Осико, Е.А. Ткаченко, П.П. Федоров, Успехи химии **75**, 1193 (2006).

# НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ВОЛОКНА ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА С МНОГОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОСПИННИНГА

С.В. Васин<sup>1</sup>, А.М. Низаметдинов<sup>1</sup>, В.А. Сергеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск  
E-mail: [svasin@ulireran.ru](mailto:svasin@ulireran.ru)

Полимерные композиты с углеродными нанотрубками (УНТ) обладают рядом уникальных электрофизических и физико-механических свойств, позволяющих как создавать новые элементы электроники, так и улучшать характеристики существующих [1]. Известно, что свойства таких нанокompозитов определяются как свойствами УНТ, так и характером их распределения и ориентацией в полимерной матрице [2].

Для управления ориентацией УНТ в полимерной матрице применяется ряд методов: Ленгмюра-Блоджетт, воздействия электрическим или/и магнитным полем и др. В качестве одного из таких методов может использоваться электроспиннинг. Суть этого метода состоит в получении тонких волокон нанокompозита в результате действия электростатических сил на электрически заряженную струю раствора или расплава. Этим методом можно получать волокна диаметром от 5 до 800 нм [3]. Такие волокна с ориентированными УНТ можно использовать при создании плоских и объемных структур в полимерной электронике.

Нами была спроектирована и собрана установка, реализующая метод электроспиннинга. Пример волокон поливинилового спирта (ПВС) с добавлением 1% многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), полученных с помощью данной установки, показаны на рисунке 1. Видно, что данным методом возможно получить массив волокон нанокompозита, ориентированных в одной плоскости.

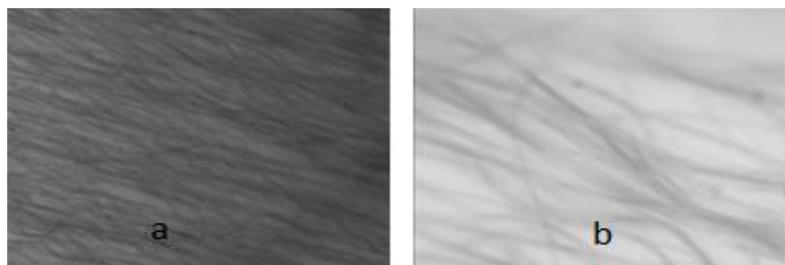


Рис. 1. Изображения волокон ПВС, полученные с помощью оптического микроскопа (а – ПВС с добавлением 1% MWCNT, б – 10-кратное увеличение изображения (а))

Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Ульяновской области, проект № 19-42-730011.

1. С.В. Васин, М.С. Ефимов, В.А. Сергеев, ПЖТФ **46**, 26 (2020).
2. N.G. Sahoo et al., Prog. Polym. Sci. **35**, 837 (2010).
3. N. Bhardwaj, S.C. Kundu, Biotechnol. Adv. **28**, 325 (2010).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ФОРМ КАРБИДА ТИТАНА

И.В. Вилков, С.Ю. Кетков, А.М. Обьедков

*Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН,  
Нижний Новгород*

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

Гибридные материалы на основе многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), поверхность которых декорирована нанопокрытиями карбида титана различной морфологии, являются перспективными материалами для создания новых композиционных материалов, каталитических систем и сенсоров.

Ранее методом МОСVD с применением титаноцен дихлорида ( $\text{Cr}_2\text{TiCl}_2$ ) в качестве прекурсора нами был получен гибридный материал, представляющий собой МУНТ, поверхность которых декорирована сплошным нанодисперсным слоем TiC [1]. Мы продолжили исследование процесса осаждения покрытий TiC, не меняя температуру осаждения, но изменяя соотношение прекурсоров ( $\text{Cr}_2\text{TiCl}_2$ :МУНТ) в диапазоне от 1:1 до 1:10. Полученные материалы были охарактеризованы методами СЭМ, ПЭМ, ПЭМВР и РФА. Установлено, что полученные нами гибридные материалы содержат две кристаллические фазы: МУНТ и стехиометрическую фазу карбида титана.

Было установлено, что изменение массового соотношения прекурсоров ( $\text{Cr}_2\text{TiCl}_2$ :МУНТ) приводило к изменению наблюдаемых морфологических форм TiC. Так, при соотношениях прекурсоров меньших 3:1 наблюдались МУНТ, покрытые тонкими пленками TiC толщиной до 10 нм. Увеличение соотношения до 4:1 привело к образованию наночастиц TiC на поверхности декорированных МУНТ. При соотношении 5:1 наблюдалось формирование нанодендритов TiC с толщиной ветвей порядка 50 нм и нановискеров с толщинами ~ 200 нм и длиной более 5 мкм. При соотношении прекурсоров 6:1 и более происходило разрастание боковых ветвей с поверхности нановискеров, что впоследствии приводило к образованию трехмерных наноструктурированных форм – кубических мезокристаллов TiC размерами порядка 10 мкм, обладающих кубическим габитусом.

Работа была выполнена с использованием оборудования ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур».

1. К.В. Кремлев и др., Письма в ЖТФ **42**, 40 (2016).

# ПОЛУЧЕНИЕ ОДНОМЕРНЫХ GaAs НИТЕВИДНЫХ НАНО-КРИСТАЛЛОВ С ПОМОЩЬЮ СВЕРХМАЛЫХ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА

А.Д. Буравлев<sup>1</sup>, И.В. Илькив<sup>1,2</sup>, Г.Э. Цырлин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский Академический университет им Ж.И. Алфёрова  
РАН, Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург  
E-mail: [fiskerr@yandex.com](mailto:fiskerr@yandex.com)*

Нитевидные нанокристаллы (ННК) на основе АЗВ5 соединений обладают рядом уникальных свойств, вследствие чего такие структуры имеют широкие перспективы применения для создания на их основе различных устройств опто- и наноэлектроники, а также принципиально новых приборов, принцип действия которых основан на использовании квантово-размерных эффектов. Очевидно, что для создания большинства таких приборов требуются массивы нитевидных нанокристаллов с заданными параметрами такими, как диаметр и длина. Таким образом, разработка методов получения однородных, в том числе ультратонких, массивов одинаковых ННК с минимальным разбросом геометрических параметров является актуальной научной задачей.

Цель данной работы состояла в исследовании возможности получения массивов полупроводниковых GaAs ННК с использованием коллоидных наночастиц золота в качестве катализаторов роста. В экспериментах использовались коммерчески доступные коллоидные растворы наночастиц золота с размерами от 2 до 60 нм. Непосредственный синтез GaAs ННК осуществлялся методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Comcraft 21ТМ фирмы Riber.

В данной работе впервые было показано, что коллоидные наночастицы золота могут быть использованы в качестве катализаторов для роста массивов однородных GaAs ННК методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Было установлено, что из-за наличия слоя естественного окисла на Si(111) подложках требуется проведение дополнительных технологических операций по предварительному высокотемпературному отжигу подложек с целью увеличения числа вертикальных ННК. Кроме того, было обнаружено, что диаметры GaAs ННК намного больше размеров наночастиц, использованных для роста. Установлено, что с уменьшением размера золотых капель может усиливаться их каталитическая активность. Показано, что увеличение диаметров ННК может быть взаимосвязано с увеличением объема капель катализаторов вследствие адсорбции атомов кремния из подложки. Продемонстрировано, что этот процесс может контролироваться с помощью изменения длительности предварительного отжига. Также было установлено, что во время охлаждения образцов после проведения предварительного отжига может происходить кристаллизация накопленных каталитической каплей атомов Si, приводящая к формированию Si пьедесталов под каплей.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 18-72 10047.

## ОСАЖДЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ $\text{CaF}_2$ И $\text{CeO}_2$ НА СКОЛЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ ФЛЮОРИТА

А.Е. Баранчиков<sup>1</sup>, Р.В. Гайнутдинов<sup>2</sup>, В.К. Иванов<sup>1</sup>, Г.А. Командин<sup>3</sup>,  
С.В. Кузнецов<sup>3</sup>, М.Н. Маякова<sup>3</sup>, И.А. Новиков<sup>3</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>3</sup>,  
М.А. Теплоногова<sup>1</sup>, П.П. Федоров<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва*

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

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

Целью данной работы является повторение классического опыта ориентированного осаждения малых кристаллов квасцов на грани большого кристалла, опубликованного в 1933 году М. Шаскольской и А.В. Шубниковым [1], и исследование возможностей получения функциональных покрытий на поверхности монокристаллов флюорита.

Наночастицы флюорита, чистые и легированные неодимом, синтезировали методом осаждения фтороводородной кислотой из нитратных растворов. Пластины монокристалла фторида кальция ориентации (111) располагали горизонтально и полностью погружали в коллоидный раствор (маточный раствор или промывные воды с осажденным продуктом реакции). Варьировали время и температуру осаждения. Полученные образцы исследовали методами атомно-силовой микроскопии, РЭМ, ПЭМ и оптического пропускания. Наблюдаются неоднородное покрытие поверхности подложки субмикронными частицами. В скоплениях частиц просматриваются агломерирование в треугольные образования, которые соответствуют симметрии подложки. Данные ПЭМ свидетельствуют о когерентном нарастании частиц флюорита, севших на монокристаллическую подложку. Спектр оптического пропускания образцов демонстрирует наличие линий гидроксила. Термообработка подложки с осажденным слоем наночастиц флюорита приводит к формированию пористых слоев сложной топологии с ярко выраженной островной симметрией третьего порядка.

Диоксид церия изоструктурен флюориту, различие в параметрах ячейки невелико. Наночастицы  $\text{CeO}_2$  размером до 10 нм, синтезированные различными методами (гидролиз, термогидролиз, гидротермальная обработка и т.д.), осаждались на протяжении 15 суток на сколы монокристаллов  $\text{CaF}_2$ . Наночастицы преимущественно осаждались вдоль ступеней скола. Наблюдалось травление подложки щелочными растворами с выявлением выхода дислокаций на поверхность монокристалла.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 18-29-12050-мк.

1. В.К. Иванов, П.П. Федоров, А.Е. Баранчиков, В.В. Осико, Успехи химии **83**, 1204 (2014).

InGaAs ФОТОДИОДЫ НА ДИАПАЗОН 1.02–1.31 МКМ  
С МЕТАМОРФНЫМ БУФЕРНЫМ СЛОЕМ, ВЫРАЩЕННЫЕ  
НА ПОДЛОЖКАХ GaAs

Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин, И.В. Самарцев

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

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

Фотодиоды на диапазон длин волн 1.3–1.5 мкм, на подложках GaAs представляют интерес для замены используемых сейчас для этого диапазона приборов, сформированных на подложках InP. Одним из направлений является использование метаморфных буферных слоев [1–3].

В настоящей работе представлены результаты исследования структуры p-i-n диода на диапазон 1.02–1.31 мкм с метаморфным буферным слоем InGaAs со ступенчатым изменением состава. Фотодиодные структуры получены методом МОГФЭ на подложке GaAs с отклонением 2°.

Исследуемые структуры получены методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении. Метаморфный буферный слой выращивался в два этапа. Сначала на подложке GaAs при температуре 700 °С растиhsя слой InGaAs, состоящий из пятнадцати переходных слоев со ступенчатым изменением состава общей толщиной 1000 нм. Затем, производилось охлаждение до 560 °С и выращивание буферного слоя InGaAs, состоящего из 14 слоев общей толщиной 960 нм. Далее формировалась p-i-n структура InGaAs с содержанием индия около 50%.

На основе полученной гетероструктуры изготовлены фотодиоды. Со стороны структуры и подложке были нанесены Au омические контакты методом термического испарения в вакууме, затем была вытравлена мезаструктура диаметром 0.8 мм. Спектр фототока имеет максимум на длине волны 1.22 мкм, ширина спектра составляет 0.29 мкм. Исследования обратных вольт-амперных характеристик фотодиодов при комнатной температуре показали, что значения темновых токов составляют 10 мкА при величине обратного напряжения 5 В.

Таким образом, предложена технология двухтемпературного роста Метаморфных слоев InGaAs, на подложках GaAs. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение природы темновых токов с целью их минимизации, а также будет произведена оптимизация конструкции метаморфного буферного слоя для улучшения кристаллического качества гетероструктур.

1. H.-L. Wang et al., Chin. Phys. Lett. **26**, 014214 (2009).
2. D. Wu et al., Electronics Letters **44**, (2008).
3. И.В. Самарцев и др., ФТП **12**, (2018).

## ФОРМИРОВАНИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ Ge/Si СЛОЕВ НА Si/SiO<sub>2</sub>/Si (100)

А.Г. Гагарин<sup>1</sup>, С.А. Денисов<sup>2</sup>, М.Н. Минеев<sup>1</sup>, Д.А. Павлов<sup>2</sup>, А.А. Сушков<sup>2</sup>,  
В.Ю. Чалков<sup>2</sup>, В.Г. Шенгуров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Межведомственный Центр твердотельной микроэлектроники, Нижний Новгород*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

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

Сформированы и исследованы слои Ge/Si на подложках Si/SiO<sub>2</sub>/Si (100) (КНИ) при разных температурах роста. Слой Si выращен с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии, а слой Ge получен методом «горячей проволоки». Структурные исследования проведены с помощью высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе JEOLJEM-2100F (200кВ). Перспектива создания подобных структур сводится к наращиванию на них высокого качества лазерных структур, которые будут совместимы с кремниевой радиационно-стойкой КМОП-технологией.

Изображения поперечного среза гетероструктур КНИ, полученные с помощью высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), демонстрируют близкую к атомарно-гладкой поверхность приборного слоя Si. На ПЭМ-изображениях поперечного среза гетероструктур КНИ не было обнаружено контраста, связанного с дефектами. Исследования поперечного среза гетероструктур Ge/Si/КНИ показало, что отжиг подложки КНИ при температуре 900 °С не полностью устраняет с поверхности КНИ диоксид кремния, но при этом сохраняет скрытый в КНИ слой SiO<sub>2</sub>. Оставшийся после отжига на поверхности КНИ диоксид кремния способствует нарушению сплошности буферного слоя Si, выращенного на КНИ при температуре роста 800 °С. Уменьшение температуры роста буферного слоя Si с 800 до 600 °С привело к формированию сплошного буферного слоя Si. Релаксация упругих напряжений в процессе эпитаксиального роста слоя Ge на Si происходила с образованием преимущественно таких дефектов, как дислокации, которые прорастали к поверхности.

Несмотря на то, что в данной работе удалось подобрать такие температуры отжига КНИ и роста буферного слоя Si, при которых сохраняется скрытый в КНИ слой SiO<sub>2</sub> и формируются сплошные Ge/Si буферные слои, тем не менее требуются дальнейшие исследования, с целью уменьшить число дислокаций, зародившихся на гетерогранице Ge/Si и прорастающих к поверхности структуры Ge/Si/КНИ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-72-10061).

# СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОПОРОШКОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ

$\text{La}_{1-x}\text{Re}_x\text{Ga}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$ ,  $\text{Bi}_{1-x}\text{Re}_x\text{Ge}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  (Re = Pr, Eu, Dy, Tb)

О.М. Гайтко<sup>1</sup>, С.В. Голодухина<sup>1</sup>, А.В. Егорышева<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>2</sup>,  
А.Д. Таратынова<sup>2</sup>, И.А. Юрлов<sup>2</sup>, С.А. Хрущалина<sup>2</sup>

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

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

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

В настоящей работе представлены результаты исследования спектрально-люминесцентных свойств твердых растворов  $\text{La}_{1-x}\text{Re}_x\text{Ga}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  и  $\text{Bi}_{1-x}\text{Re}_x\text{Ge}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  ( $x = 0.05-0.5$ ) со структурой розиаита, легированных ионами  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ . Соединения данного типа являются малоизученными и характеризуются относительно большими расстояниями между РЗ-ионами, которые обусловлены особенностями их слоистой структуры [1]. Этот факт будет способствовать уменьшению концентрационного тушения и влиять на квантовый выход люминесценции РЗ-ионов, что делает выбранные материалы перспективными для разработки светодиодов.

Для возбуждения люминесценции ионов  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$  использовалось лазерное излучение с длинами волн  $\lambda = 457$  или  $351$  нм, которое соответствует полосам поглощения данных ионов. Сравнение полученных спектров люминесценции выявило ряд отличий для лантановых и висмутовых серий, при этом наиболее яркие различия наблюдались в спектрах ионов  $\text{Pr}^{3+}$  и  $\text{Eu}^{3+}$  (рис. 1). Для твердых растворов  $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ga}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  и  $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ge}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  они обусловлены эффективностью процессов кросс-релаксации ( ${}^1\text{D}_2 \rightarrow {}^1\text{G}_4$ )  $\rightarrow$  ( ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4$ ) и ( ${}^3\text{P}_0 \rightarrow {}^3\text{H}_4$ )  $\rightarrow$  ( ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^1\text{D}_2$ ) и связаны с различной частотой фононов. Различия в спектрах люминесценции серий  $\text{La}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Ga}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  и  $\text{Bi}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Ge}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  вызваны изменением симметрии локального окружения РЗ-ионов и свидетельствуют о том, что ион  $\text{Eu}^{3+}$  в висмутовых соединениях находится в позиции с более высокой симметрией, чем в лантановых.

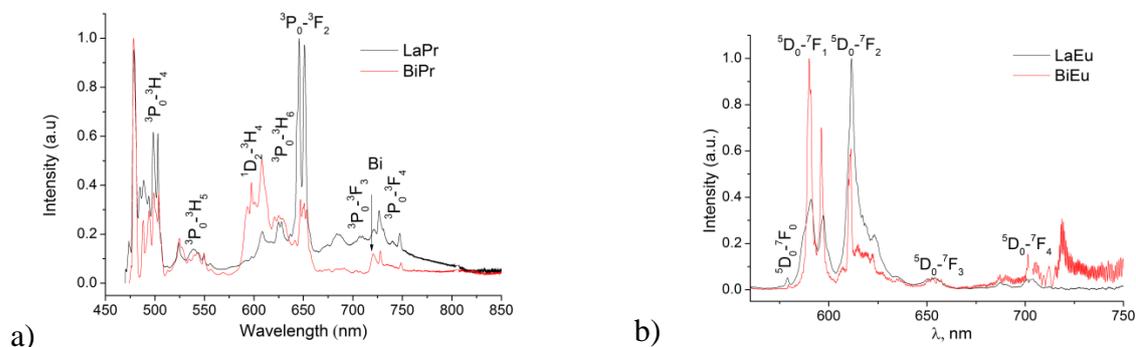


Рис. 1. Спектры люминесценции: а)  $\text{La}_{0.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Ga}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  и  $\text{Bi}_{0.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Ge}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  ( $\lambda_{\text{exc.}} = 457$  нм), б)  $\text{La}_{0.85}\text{Eu}_{0.15}\text{Ga}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  и  $\text{Bi}_{0.85}\text{Eu}_{0.15}\text{Ge}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  ( $\lambda_{\text{exc.}} = 351$  нм).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-12009.

1. A.V. Egorysheva et al., *Ceram. Int.* **42**, 13976 (2016).

## СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ $ZrO_2-Er_2O_3$

В.О. Веселова<sup>1</sup>, А.В. Егорышева<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>2</sup>, С.А. Хрущалина<sup>2</sup>,  
И.А. Юрлов<sup>2</sup>

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

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

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

В диэлектрических наночастицах, легированных редкоземельными ионами (РЗ), при их возбуждении лазерным излучением с высокой плотностью мощности в полосы поглощения этих ионов, наряду с люминесценцией возникает широкополосное «белое» излучение [1–5].

К настоящему времени у авторов различных работ нет единого мнения о природе данного излучения. Помнению ряда авторов широкополосное «белое» излучение, возникающее при возбуждении диэлектрических наноразмерных частиц с РЗ ионами лазерным излучением с высокой плотностью мощности, является тепловым.

В работах [3,4] нами также была выявлено, что широкополосное белое излучение, возникающие при возбуждении излучением с  $\lambda_{\text{изл}} = 970\text{ нм}$  наночастиц  $YPO_4:Yb$  с концентрацией ионов Yb выше 20 ат.%, является тепловым, а также был предложен механизм его возникновения.

В работе [5] нами изучены особенности возникновения и закономерности широкополосного «белого» излучения в наночастицах  $YVO_4:Er$  при возбуждении лазерным излучением с  $\lambda_{\text{изл}} = 1532\text{ нм}$ .

В настоящей работе методом соосаждения синтезированы наноразмерные диэлектрические частицы твердых растворов  $ZrO_2-Er_2O_3$  и  $YVO_4-ErVO_4$  с различными средними размерами. Изучены закономерности возникновения в них апконверсионной люминесценции и широкополосного «белого» излучения при возбуждении излучением с  $\lambda_{\text{изл}} = 1532\text{ нм}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-32-90135.

1. S.M. Redmond, S.C. Rand, S.L. Oliveira, Appl. Phys. Lett. **85**, 5517 (2004).
2. W. Streck et al., Opt. Express **19**, 14083 (2011).
3. S.A. Khrushchalina et al., JETP Lett. **103** (5), 302 (2016).
4. P.A. Ryabochkina et al., JETP Lett. **103** (12), 743 (2016).
5. S.A. Khrushchalina et al., J. of Lum. **205**, 560 (2019).

# МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО НАЦЕЛИВАНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ В СИСТЕМЕ КРОВООБРАЩЕНИЯ

М.В. Герасимов, М.Н. Жарков, М.А. Пятаев, Н.А. Пятаев, Д.С. Сокушев,  
Д.Э. Якобсон

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

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

В настоящее время активно развиваются методы целевой доставки лекарств, основанные на концентрации магнитных частиц в заданном месте с помощью постоянного магнитного поля. Для правильного выбора параметров магнитных носителей, таких как размер частиц, содержание магнитного материала, градиент магнитного поля и т.д., необходимо понимание механизма осаждения частиц в капиллярах. Сегодня имеется достаточно много работ [1–3], посвященных изучению движения магнитных частиц на основе анализа действующих на них сил. Мы обобщили этот подход с учетом диффузионного процесса и получили дифференциальное уравнение в частных производных для расчета концентрации магнитных микрокапсул в капилляре. Также на основании нашей теории мы определили параметры носителей, необходимые для их магнитного осаждения.

Результаты математического расчета сравнивались с экспериментом *in vitro*, выполненным на модели кровеносного сосуда. В качестве модели капилляра использовали полиэтиленовую трубку с внутренним диаметром 1 мм и длиной 10 см. Капилляр располагался рядом с бор-неодимовым постоянным магнитом цилиндрической формы с максимальной индукцией 0.47 Тл у его основания. Для эксперимента *in vitro* использовали суспензию полимерных субмикронных капсул, содержащих наночастицы оксида железа  $Fe_3O_4$ . Капсулы были синтезированы методом «Layer by layer» на сферических ядрах  $CaCO_3$ , которые были покрыты полимерными оболочками, чередующимися со слоями наночастиц магнетита. Суспензия капсул прокачивалась через капилляр с помощью инфузионного насоса, что позволяло точно контролировать скорость потока. После прокачивания всего объема жидкости поток останавливали, капилляр замораживали и затем разрезали на кусочки длиной 5 мм. Содержание железа в каждом кусочке определяли фотоколориметрическим методом. Результаты экспериментального измерения пространственного распределения осажденных капсул в магнитном поле в достаточной степени соответствовали теоретически предсказанным.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-415-130007).

1. A.E. David et al., *J. Controll. Release* **152**, 67 (2011).
2. S. Sharma et al., *J. Magn. Magn. Mater.* **379**, 102 (2015).
3. L. Agiotis et al., *J. Magn. Magn. Mater.* **401**, 956 (2016).

# СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ МАГНЕТИТА, ПОКРЫТЫХ ОЛЕИНОВОЙ КИСЛОТОЙ И АМИНОСИЛАНОМ, ДЛЯ МАГНИТНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ И МРТ-ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Е.В. Громова, Е.И. Егорова, М.Н. Жарков, Н.А. Пятаев, В.И. Шляпкина,  
Д.Э. Якобсон

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

*E-mail: [katha98@mail.ru](mailto:katha98@mail.ru)*

В настоящее время активно развиваются такие методы диагностики и лечения как магнитно-резонансная томография и магнитная гипертермия. Оба этих метода предполагают введение в организм пациента магнитных микро- или наночастиц как контрастных агентов или генераторов тепла [1]. Большинство исследований сосредоточено на частицах оксида железа [2], поскольку они являются оптимальными с точки зрения биосовместимости и обладают необходимыми магнитными свойствами.

В данной работе мы проводили сравнительное исследование некоторых биологических и физико-химических свойств наночастиц магнетита, покрытых олеиновой кислотой/олеатом натрия ( $\text{NPsFe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{OA}$ ) и аминосиланом ( $\text{NPsFe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{SiO}_2\text{-NH}_2$ ). Наночастицы были получены методом соосаждения с последующей гидротермальной, ультразвуковой обработкой и стабилизацией соответствующим веществом. Результаты исследования методом просвечивающей электронной микроскопии продемонстрировали, что частицы  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{OA}$  характеризуются меньшим размером ( $8 \pm 3$  нм) и степенью агломерации по сравнению с частицами  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{SiO}_2\text{-NH}_2$  ( $72 \pm 17$  нм). Исследование магнитных свойств показало, что частицы являются суперпарамагнитными, однако покрытие из аминосилана несколько уменьшает намагниченность насыщения  $\text{NPs Fe}_3\text{O}_4$ . Удельный коэффициент поглощения (SAR) энергии переменного магнитного поля ( $H_0 = 100$  Э,  $f = 100$  кГц) составил 11.23 Вт/г Fe и 10 Вт/г Fe для  $\text{NPsFe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{OA}$  и  $\text{NPsFe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{SiO}_2\text{-NH}_2$  соответственно.  $\text{NPsFe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{OA}$  обладают более высокой стабильностью и сохраняют свои физико-химические свойства более одного года, а  $\text{NPsFe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{SiO}_2\text{-NH}_2$  – несколько месяцев. Результаты биологических исследований *in vivo* позволяют отнести  $\text{NPsFe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{SiO}_2\text{-NH}_2$  ( $\text{LD}_{50} = 544.6$  мг/кг) и  $\text{NPsFe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{OA}$  ( $\text{LD}_{50} = 652.3$  мг/кг) к малотоксичным соединениям при внутрибрюшинном и практически нетоксичным при внутримышечном введении.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-29-10013).

1. Kheireddine El-Boubbou, *Nanomedicine. Rev.* **223**, (2018).

2. A.M. Tishin et al., R. Patents on Anti-Cancer Drug Disc. Rev. **11**, (2016).

# ЦИТОТОКСИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ МАГНИТНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ НА КЛЕТКИ L-929 С ПОЛИМЕРНЫМИ МИКРОКАПСУЛАМИ, СОДЕРЖАЩИМИ НАНОЧАСТИЦЫ МАГНЕТИТА

Е.П. Бродовская<sup>1</sup>, Е.В. Громова<sup>1</sup>, М.Н. Жарков<sup>1</sup>, Н.А. Пятаев<sup>1</sup>,  
Г.Б. Сухоруков<sup>2</sup>, А.М. Тишин<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*Лондонский университет королевы Марии, Лондон, Великобритания*

<sup>3</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*  
*E-mail: [mikhail.zharkov.92@mail.ru](mailto:mikhail.zharkov.92@mail.ru)*

В настоящее время для лечения некоторых типов опухолей методом магнитной гипертермии применяются магнитные наночастицы на основе оксида железа [1], поскольку они обладают необходимыми физико-химическими и биологическими характеристиками. Для достижения требуемой терапевтической температуры (43–45°C) необходимо использовать минимально возможное количество магнитных частиц, чтобы избежать нежелательных токсических эффектов [2].

В настоящей работе мы предлагаем полиэлектролитные микрокапсулы, содержащие наночастицы магнетита, для локальной магнитной терапии. Капсулы были получены по методу «Layerbylayer» путем поочередного нанесения полиэлектролитов (полиаргинин, декстрана сульфат) и наночастиц Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> на сферические ядра CaCO<sub>3</sub>. Мы проводили эксперимент на культуре клеток фибробластов мыши L-929, которые обрабатывали суспензией полученных микрокапсул (из расчета 5 и 10 капсул на клетку). После 24-часовой инкубации клетки отмывали от неинтернализированных капсул и подвергали воздействию переменного магнитного поля с амплитудой напряженности 200 Э и частотой 100 кГц с экспозицией 0.5, 1, 2, 5, 10 и 15 минут. Также проводился эксперимент на клетках с коллоидными частицами Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> в концентрациях, соответствующих содержанию магнетита в эксперименте с капсулами. Через 24 часа после обработки полем оценивали жизнеспособность клеток с помощью МТТ-теста. Результаты исследования показали, что микрокапсулы при воздействии переменным магнитным полем угнетают жизнеспособность клеток до 76 и 30% для концентраций 5 и 10 капсул на клетку соответственно. Время экспозиции, при котором не наблюдается дальнейшего уменьшения жизнеспособных клеток, составило 5 мин. Коллоидные частицы Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, как и магнитное поле в контрольном эксперименте, не влияли на жизнеспособность клеток на всех временных интервалах воздействия магнитным полем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-29-10013).

1. Keon Mahmoudi et al., In. J. of Hyperthermia. Rev. **34**, (2018).
2. Kheireddine El-Boubbou, Nanomedicine. Rev. **223**, (2018).

# NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGY

## PHASE TRANSITIONS IN TWO-DIMENSIONAL SYSTEMS

B.V. Andryushechkin

*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

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

The lecture is devoted to structural phase transitions in two-dimensional systems, namely, in monolayer films adsorbed on single-crystal surfaces of metals.

The importance of studying structural phase transitions in adsorbed layers is due to the fact that for many processes leading to the appearance of nanostructures on the surface (self-organization, epitaxial growth), the atomic structure of the first adsorbate layer (monolayer) is a determining factor. In this regard, the methodology for creating monolayers with a given structure and the ability to control transformations between different surface phases at the level of atomic displacements become extremely urgent.

In the general case, the structure of a monolayer is determined by competition between the lateral interaction of atoms on the surface and the substrate potential, as well as temperature [1]. Depending on the surface temperature and/or degree of coverage, two-dimensional (2D) gas, liquid, and also ordered phases can be observed on the same surface. With respect to the substrate lattice, the observed phases can be divided into proportional, disproportionate or partially proportional. A change in temperature or degree of coating can lead to structural transitions between these phases. The main factors determining the nature of such transitions are the ratio of the potential relief of the substrate and the lateral interaction between the adsorbed atoms, the mismatch of the lattice parameters of the two-dimensional layer and the substrate, as well as the temperature.

Traditionally, studies of phase transitions on the surface were carried out in gas films adsorbed on metals or graphite using various diffraction methods. This approach was due to the fact that for these systems the interaction of the adsorbate with the substrate could be described quite simply (for example, using the Lennard-Jones potential), which allowed us to build theoretical models of phase transitions.

One of the most active phase transitions under study was the so-called transition from a commensurate to a disproportionate phase [2–4]. In this case, regions with a commensurate phase turn out to be separated by striped or a hexagonal network of an incommensurate phase («domain walls») with an atomic density higher or lower than in the commensurate region. This effect was discovered in the work of Frenkel and Kontorova at the end of the thirties, in which it was shown that if you compress a commensurate lattice located at some potential, it turns out that uniform compression of the lattice does not occur, but domain walls (or solitons) appear that share areas with a commensurate

structure. Figure 1 shows a model drawing of domain walls that can be realized on a hexagonal substrate.

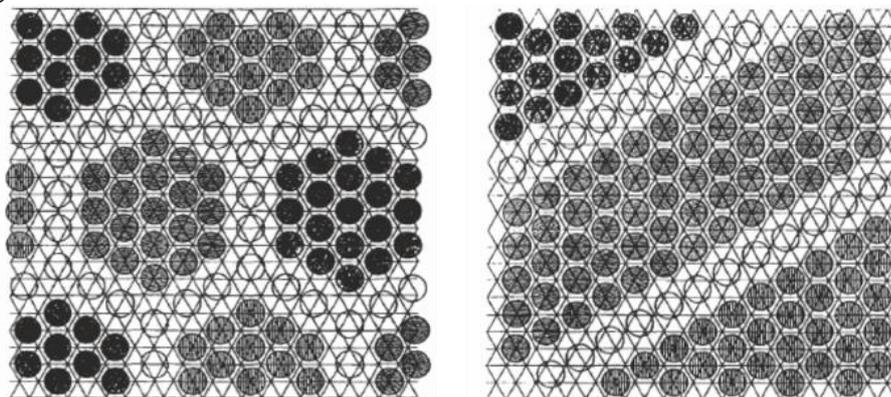


Fig. 1. Hexagonal and linear domain walls on a hexagonal substrate for structures  $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$ .

It turns out that domain walls can either repeat the symmetry of the substrate, that is, be hexagonal and linear. The first experimental evidence for the existence of domain walls was obtained for the following systems: Kr/Graphite, Xe/Pt (111), H<sub>2</sub>/Graphite. But it turned out that diffraction methods are not enough for a complete description of phase transitions at the atomic level, and, of course, scanning tunneling microscopy is needed. However, for the cases of physically adsorbed gases, even the use of STMs did not give very bright results, since even at helium temperatures the gas molecules remained rather weakly bound to the surface. In this regard, we can consider another system, such as a system of halogens on metals, which can be an alternative model system for studying phase transitions.

By the end of the eighties of the last century, a rather large number of various works were published in which the adsorption of halogens on metal surfaces was studied. Basically, all of this work was stimulated by possible catalytic applications. In a review by Robert Jones published in 1988 [5], it was noted that halogens form a large number of ordered adsorbed phases depending on the degree of coverage and temperature. Thus, it was shown that they are potential convenient model systems for studying phase transitions.

In addition, it turned out that many diffraction patterns observed for many halogen-metal pairs turn out to be in many respects similar to the diffraction patterns observed in films of adsorbed gases on the surfaces of metals and graphite. This indicates the possible proximity of phase transitions in these systems.

An advantage of halogen systems on metals is the ability to observe many phase transitions at room temperature. Although at the time of the start of research, most halogen/metal systems were already studied by integral methods, and structural models were proposed for each of them, understanding of structural transformations on the surface of metals under the influence of halogens was not achieved, due to the almost complete absence of work performed in real space with using scanning tunneling microscopy.

The aim of the work was to study the mechanism of structural phase transitions in adsorbed halogen layers on the surface of the city center metals during their lateral compression under ultrahigh vacuum.

The objects of study were single-crystal faces of copper, silver and gold. All faces (111), (100) and (110) were considered, which, respectively, represented a hexagonal surface of symmetry, 4-order symmetry and a rectangular lattice. Halogens: chlorine and iodine were considered as adsorbates. Such a choice of objects made it possible to vary the mismatch of the parameters of the halogen and substrate lattices to the widest possible extent, since the silver lattice constant (2.89 Å) is maximum, and copper (2.56 Å) is minimal among a number of fcc metals. On the other hand, chlorine and iodine (excluding fluorine) represent the minimum and maximum sizes of the halogen atom: the van der Waals diameters are 3.6 Å and 4.0–4.3 Å, respectively.

The main research method was scanning tunneling microscopy. All studies were carried out under ultrahigh vacuum at a pressure better than  $10^{-10}$  Torr. In addition, of course, electron spectroscopy, diffraction of slow electrons, and thermal desorption mass spectrometry were used. All experimental methods were supplemented by calculations within the framework of the density functional theory using the VASP package based on computing clusters of the Russian Academy of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow State University, and GPI RAS.

The lecture presents the results of studies conducted in the Department of Technology and Measurement of Atomic Scale GPI [6]. All results can be divided into four groups, reflecting various types of structural phase transitions on the surface:

1. The disorder-order transition, i.e. ordering at submonolayer coverages;
2. The transition from proportional to disproportionate phase;
3. Reconstructive phase transitions;
4. The formation of surface halide phases.

At the first stage of the study, we examined the submonolayer stage of halogen adsorption on the surface of the city center metals. It was found that at the initial stage of chlorine adsorption on the (111) faces of fcc of metals (Ag, Cu, Au), quasi-one-dimensional chain and nanoporous structures are formed with distances between chlorine atoms less than in a two-dimensional structure  $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$  having a higher density (Fig. 2). Atomic structures formed by halogen atoms on the surface of the city center metals at the submonolayer adsorption stage are due to indirect electronic and/or elastic interactions between halogen atoms through the substrate. Subsequently, with an increase in the degree of coverage, these nanoporous structures gradually turn to 1/3 of the monolayer into a simple structure  $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$ .

In the study of the phase transition from a commensurate to a disproportionate phase, answers to the questions will be received: How does the commensurate lattice compress? Is compression isotropic and uniform? How does the nature of the transition depend on the symmetry of the substrate lattice?

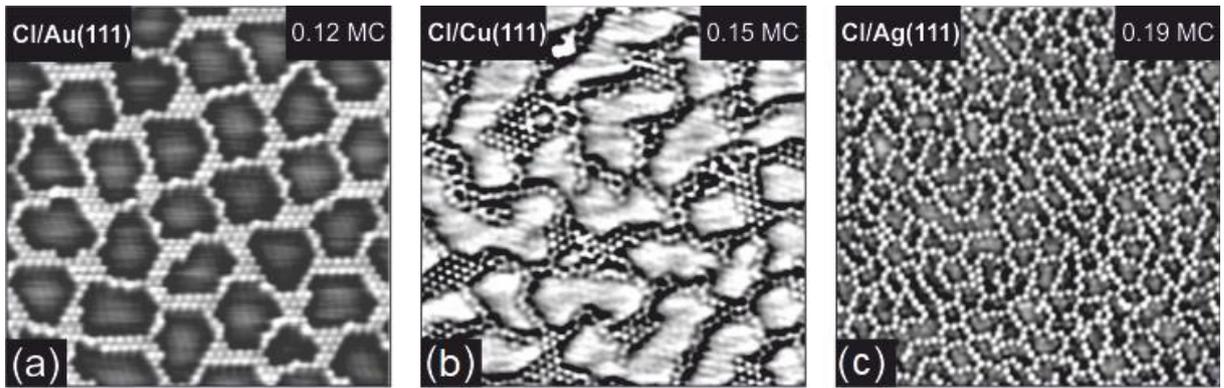


Fig. 2. STM images ( $200 \times 200 \text{ \AA}^2$ , 5 K) of nanoporous structures of chlorine atoms formed on the (a) Cu (111), (b) Cu (111) and (c) Cu (111) faces at submonolayer coverages.

In particular, using chlorine adsorption on an Ag (111) surface as an example, it was established that the compression mechanism of a commensurate lattice ( $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ )R30° (the transition is commensurate – disproportionate phase) includes the formation of crowdions (Fig. 3) and their condensation into superdense linear domain walls. It is shown that a similar mechanism can be general and determine phase transitions in the halogen layer on the (111) faces of the fcc metals.

The linear domain wall model describes the process of compression of a halogen lattice on the (110) face of an fcc metals in the case where the preferred site of halogen adsorption is the position between the four atoms of the substrate (I/Cu (110), I/Ag (110)). If the most advantageous adsorption site is a short bridging position, then the compression of the halogen lattice occurs as a result of reconstruction transitions (Cl/Cu (110)).

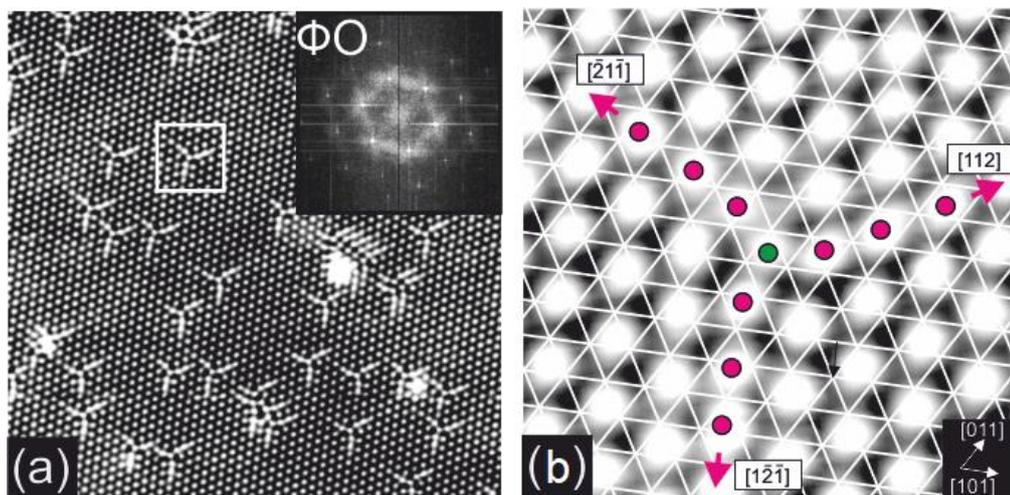


Fig. 3. (a) – STM image ( $330 \times 330 \text{ \AA}^2$ , 5 K) obtained for a degree of chlorine coverage of 0.34 ML. The inset shows the Fourier image; (b) - high resolution STM image of a chlorine lattice with an overlay grid, the nodes of which correspond to the Ag (111) lattice. The defect of incorporation into the lattice ( $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ )R30°-Cl (an additional chlorine atom) is shown by a green circle, and the atoms forming the crowdion are shown by purple circles.

On the (100) face of fcc metals, compression of a commensurate halogen lattice is realized only when the halogen-halogen distance in the initial commensurate structure significantly exceeds the Van der Waals halogen diameter (case I/Cu (100)). It was found that in this case the compression occurs

due to a series of phase transitions of the first and second kind, including 2D melting.

The third stage of the research was reconstruction phase transitions, which are induced by halogen adsorption. In this case, an attempt was made to decipher the detailed atomic structure of the reconstruction phases and establish the conditions for the formation of reconstructions.

An example is shown in Fig. 4, this is again chlorine on silver (111), in which, after the formation of the domain walls, a really complex picture of the diffraction of slow electrons arises, which also belongs to the “ $n \times n$ ” family and contains groups of spots around the  $3 \times 3$  positions. The detailed STM image shows that very interesting objects with such holes have formed - these are islands of size 15–30 Å, the local periodicity of which is  $3 \times 3$ . That is, the distance between the holes is the triple distance between the atoms of the substrate. The islands are antiphase to each other, and therefore, this system can be considered as a system of antiphase domains with a local  $3 \times 3$  structure, which, according to the diffraction theory, leads to splitting of spots in reciprocal space. And we, indeed, see splitting around the positions of  $3 \times 3$  spots in the diffraction patterns. Since the domains are randomly located, the magnitude of the splitting cannot be accurately estimated. Therefore, in the general case, the structure can only be described as «split»  $3 \times 3$ .

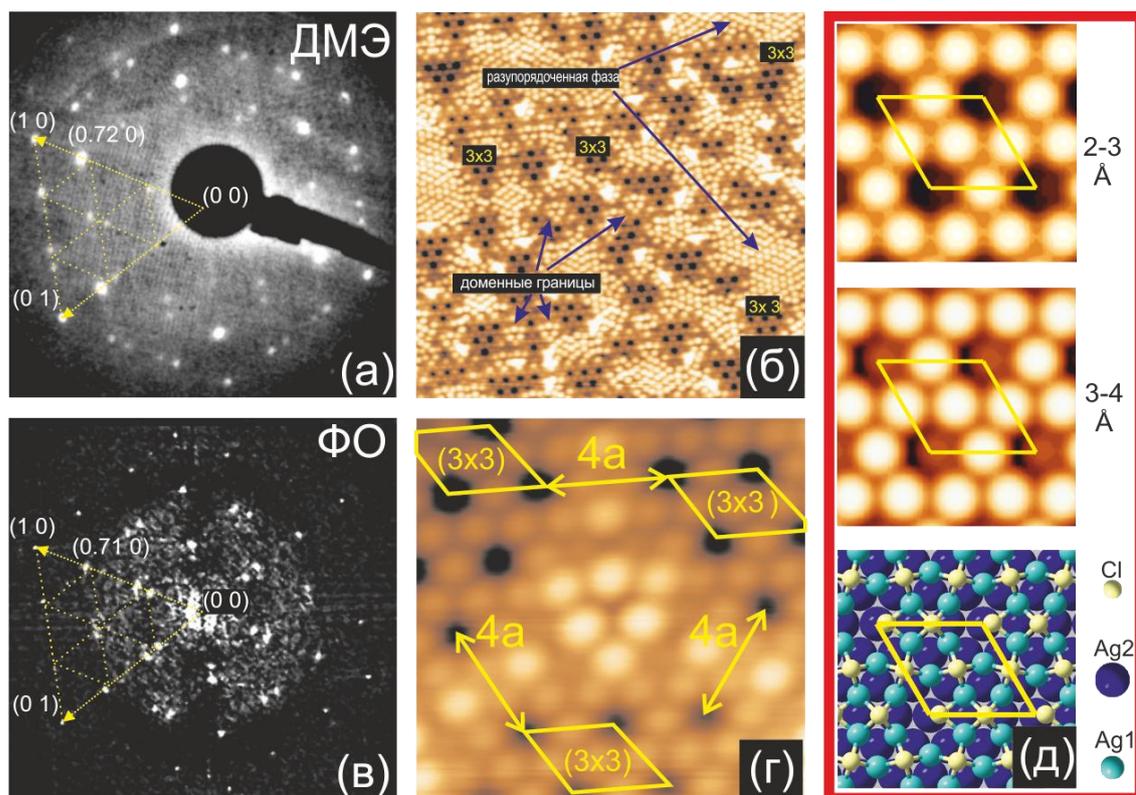


Fig. 4. (a) – STM image ( $330 \times 330 \text{ \AA}^2$ , 5 K) obtained for a degree of chlorine coverage of 0.34 ML. The inset shows the Fourier image; (b) - high resolution STM image of a chlorine lattice with an overlay grid, the nodes of which correspond to the Ag (111) lattice. The defect of incorporation into the lattice ( $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ ) of  $R30^\circ\text{-Cl}$  (an additional chlorine atom) is shown by a green circle, and the atoms forming the crowdion are shown by purple circles.

We also managed to establish how this reconstruction itself is arranged. It turned out that here the configuration of atoms is completely changing. In a  $3 \times 3$  cell, extra atoms are ejected from the substrate. Only six atoms remain three – in the positions of the city center and three in the provisions of They form triangles. Between adjacent such cells, sites are formed for adsorption of chlorine atoms, but with symmetry of about 4 orders of magnitude. Chlorine atoms fill these places and form such a  $(3 \times 3)$  structure. The chlorine atoms in this case are located slightly lower than in other structures. Therefore, it can be seen that these domains are, as it were, slightly recessed with respect to the unreconstructed part of the substrate. This model was calculated in detail using the density functional theory, and the existence of just such a reconstruction can be considered highly probable. In this regard, we believe that most of the other  $n \times n$  structures observed on the (111) faces of the city center metals are also due to surface reconstruction, rather than uniform compression of the halogen layer.

A very interesting series of reconstruction phase transitions is observed in the chlorine system on copper (110), because it is for this case that the position of the short bridge is the preferred site for the adsorption of chlorine. In this case, a simple compression of the lattice, as we said, is impossible, and therefore a series of phase transitions immediately begins here. At the initial stage of adsorption, specific bands begin to form, which look like domain walls. However, with an increase in the degree of coverage, they are not collected as in the case of a simple transition from a proportional to a disproportionate phase, but, on the contrary, scatter. It turned out that in the center of each domain wall there is an additional row of copper atoms. As the degree of coverage increases, the rows disappear, and finally, with a degree of coverage of 0.5 ML, a simple lattice with  $(2 \times 2)$  is formed, but the atoms are also in the position of the short bridge.

Interestingly, the compression of such a lattice does not occur according to the mechanism of domain walls, but also occurs according to the reconstruction mechanism. Instead of just compressing the layer, the system, on the contrary, builds up additional pedestals from copper atoms (shown in orange circles) and places additional chlorine atoms on these pedestals. As a result, chlorine, as it were, remains spaced into two floors: on the lower floor there is a structure  $c(2 \times 2)$ , and on the upper floor the chlorine atoms are on these pedestals. As the degree of coverage increases, the number of such objects grows, grows, grows, and, in the end, they come together, and an already disproportionate lattice of chlorine forms on an already continuous copper surface (110). But this does not end there - in the end – the whole system begins to be faceted. Instead of the (110) plane, planes with the (210) orientation appear, on which chlorine is also located. The capacity of such a ladder lying on the surface is greater than that of a simple flat surface. This is probably the reason why such a facet becomes profitable. And, in the end, the whole surface is overgrown with such facets.

Thus, if the short bridging position is the most advantageous place for halogen adsorption, then the nature of the phase transitions is very complex, and it should always include reconstruction.

And the fourth area of the research is surface halide phases, the structure and properties of which differ from those of bulk crystals. Indeed, it was found that under certain conditions, objects are obtained which, by their properties, are no longer chemisorbed phases, at the same time; they are not yet other complete halide phases. The existence of this type of structure is proved for a number of systems: Cl/Au(111), Cl/Ag(111), I/Cu(111), I/Ag(111), I/Ag(100).

Figure 5 shows such an example for a gold (111) surface after interaction with molecular chlorine. After the formation of the lattice  $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$ , unlike silver, there is no compression of the lattice; instead, new elongated objects appear. As a result of calculations by the density functional method, we were able to interpret them as molecules, as  $\text{AuCl}_2$  quasimolecules. As the degree of coverage increases, the entire surface is filled with such molecules, and, in the end, they form an ordered lattice similar to a honeycomb lattice, determined by a rather complex unit cell. And within this unit cell there are molecules in a circle, and in the center there are two adsorbed chlorine atoms in the positions of fcc and hcp.

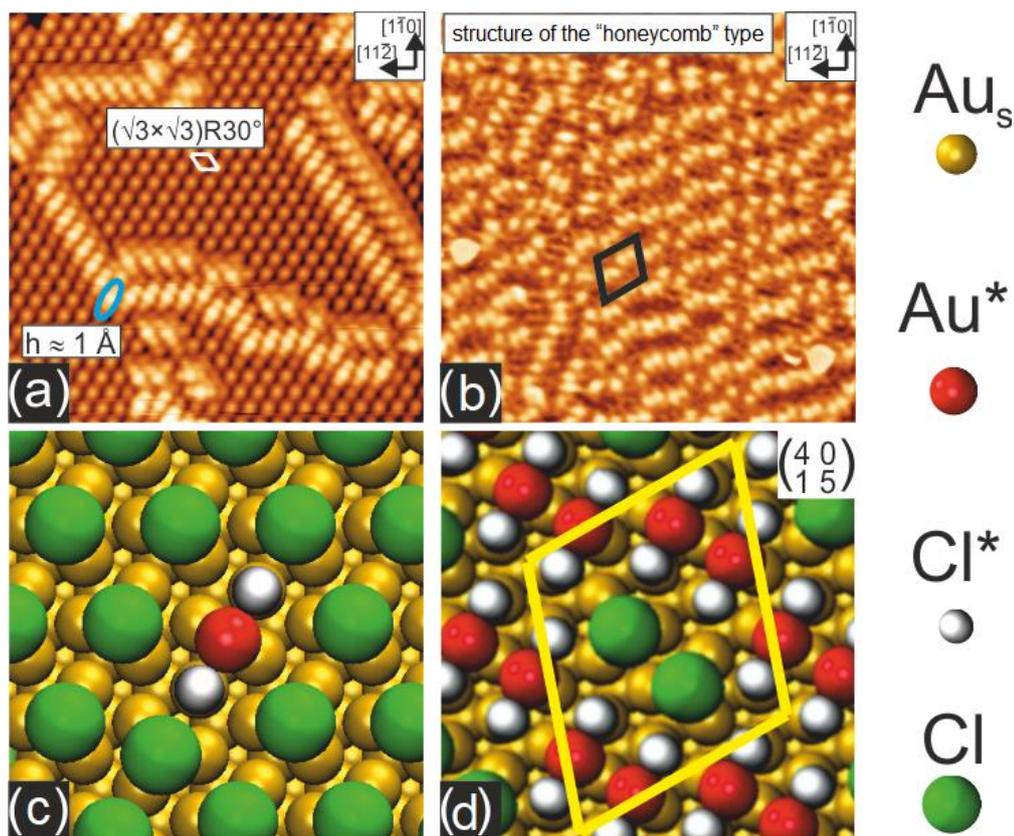


Fig. 5. (a, b) – STM images ( $120\times 120 \text{ \AA}^2$ ;  $T = 5 \text{ K}$ ) of Au (111) surface chlorinated at 130 K, showing the compression of the chlorine layer into a “honeycomb” type structure; (c) – coexistence of the  $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$  phase and chain structure; (d) – the disappearance of the phase  $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$  and the formation of a structure of the “honeycomb” type.

Thus, the lecture presented a review of works devoted to structural phase transitions in monolayers of halogens on the surface of metals. According to our

analysis, for a number of systems the picture of the interaction of halogens with metal surfaces is far from complete. Indeed, for most systems recently revised using STM in combination with DFT calculations, new data were obtained. Therefore, there is reason to expect that a further revision of the systems studied in the 1970–80s can provide a lot of new interesting information on phase transitions in two-dimensional films. In further work, emphasis should be placed on low-temperature STM studies, which make it possible to study the structure and interactions on the surface at the atomic level.

Knowledge of the structures formed by halogens on the surface of metals is important for understanding the co-adsorption halogen-oxygen structures that arise on the surface of a metal catalyst during the oxidation of olefins. In particular, this situation is realized in the reaction of partial oxidation of ethylene on a silver catalyst with the participation of chlorine as a promoter.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research in the framework of grants No. 08-02-01456-a, No. 08-02-01396-a, No. 10-02-90476-Ukr\_a, No. 15-02-99542-a and No. 20-02-00767-a.

1. G.A. Samorjai, M.A. Van Hove, *Adsorbed Monolayers on Solid Surfaces*, Berlin: Springer, 1979.
2. I.F. Lyuksyutov, A.G. Naumovets, V.L. Pokrovsky, *Two-dimensional crystals*, Kiev: Naukova Dumka, 1988.
3. P. Bak, Rep. Prog. Phys. **45**, 587 (1982).
4. B.N.J. Persson, Surf. Sci. Rep. **15**, 1 (1992).
5. R.G. Jones, Prog. Surf. Sci. **27**, 25 (1988).
6. B.V. Andryushechkin et al., Surf. Sci. Rep. **73**, 83 (2018).

## SINGLE PHOTON SOURCES BASED ON QUANTUM DOTS

G.V. Klimko, M.V. Rakhlin, I.S. Sedova, S.V. Sorokin, A.A. Toropov  
*Ioffe Institute of RAS, Saint-Petersburg, Russia*  
*E-mail: maximrakhlin@mail.ru*

The sources of single-photon emission and entangled photon pairs, based on epitaxial semiconductor quantum dots (QDs) emitting in the visible spectral range, which corresponds both to the region of the highest sensitivity of modern single-photon avalanche diodes and the region of air transparency, are most suitable for the development of protected lines of atmospheric and space optical communication [1]. Devices of this type are currently absent due to both technological complexity of reproducible fabrication of the samples with the isolated single QDs and material constraints limiting possibility to distinguish single excitonic lines at elevated device operation temperatures. In this work, we present comparative optical studies of the single photon sources based on different QD heterostructures: InAs/AlGaAs and CdSe/ZnSe, which emission spectrum jointly covers extremely wide spectral range between 500 and 1000 nm.

Single QDs based on a wide band gap II–VI compound CdSe are of particular interest due to the possibility to obtain single photon emission in green spectral ranges up to room temperature [2]. Yet unsolved problem has been the reproducible growth of the structures with small enough QD surface density. We have developed molecular beam epitaxial growth regimes resulting in the formation of a single sheet of QDs with the QD surface density less than  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$ . Advantages of the InAs/AlGaAs QDs consist in possibility to achieve single photon emission in the red spectral range using well-developed epitaxial techniques for the growth of the required QD heterostructures [3]. A potential disadvantage of previously studied single InAs/AlGaAs QDs is the enlarged content of Al resulting in a significant (up to 1 meV) enhancement of the anisotropic exchange splitting of a single-QD exciton that hampers generation of polarization entangled photons during a cascade recombination of biexcitons [4]. We have investigated the impact of inserting an ultrathin GaAs interlayer between the bottom AlGaAs barrier and InAs QDs that allowed us to reduce essentially the exciton fine structure splitting. Realization of intensive fluxes of pure single-photon emission is demonstrated for cylindrical nanoantennas containing QDs of both types.

We acknowledge financial support by the Russian Foundation for Basic Research (project № 18-02-01212).

1. N. Gisin et al., *Hum. Nat.* **20**, 317 (2009).
2. O. Fedorych et al., *Appl. Phys. Lett.* **100**, 61114 (2012).
3. A. Polimeni et al., *Phys. Rev. B* **59**, 5064 (1999).
4. J.J. Finley et al., *Phys. Rev. B* **66**, 153316 (2002).

## PROBE METHODS OF SURFACE DIAGNOSTICS

P.A. Alekseev

*Ioffe Institute of RAS, Saint-Petersburg, Russia*

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

Scanning probe microscopy (SPM) is a family of methods based on the interaction of the sharp nanosized probe mounted on the cantilever with studied surface. Functionalization of the probe allows to map a topography [1], electric [2] and magnetic fields [3], conductivity [4], mechanical properties [5] and intensity of the light radiation [6]. Besides of the multimode diagnostics SPM is a convenient tool for nanolithography [7] by local anodic oxidation or nanoscratching technique.

Report will contain a brief review of SPM methods and recent examples of SPM diagnostics of III–V semiconductor nanowires and van-der-Waals (vdW) heterostructures (graphene, MoSe<sub>2</sub>). GaAs nanowires were studied by conductive atomic force microscopy which reveal the impact of the surface passivation on the electronic surface state density and conductivity [8]. Moreover, influence of a mechanical deformation on the electronic properties of the III-As nanowires also was studied [9,10]. To quantitatively analyze electromechanical effects, mechanical properties of the nanowires were determined by SPM [11]. Then contributions from piezopotential and piezoresistance on the electronic properties were obtained.

For the vdW heterostructures it was shown a formation of the 20 nm wide graphene and MoSe<sub>2</sub> nanoribbon and 10 nm nanoconstriction by local anodic oxidation [12]. Electronic properties of the MoSe<sub>2</sub> on graphene in dependence of the number of monolayers also were studied [13].

The work is supported by Presidential grant MK-1543.2020.2

1. F.J. Giessibl, *Science* **267**, 68 (1995).
2. W. Melitz et al., *Surf. Sci. Reports* **66**, 1 (2011).
3. D. Rugar et al., *Nature* **430**, 329 (2004).
4. D. Mikulik et al., *Nano Energy* **41**, 566 (2017).
5. C.A. Amo et al., *ACS Nano* **11**, 8650 (2017).
6. M. Dunaevskiy et al., *Appl. Phys. Lett.* **103**, 053120 (2013).
7. R. Garcia, A.W. Knoll, E. Riedo, *Nature Nanotechnol.* **9**, 577 (2015).
8. P.A. Alekseev et al., *Nano Letters* **15**, 63 (2015).
9. P.A. Alekseev et al., *Phys. Stat. Sol. (RRL)* **12**, 1700358 (2018).
10. P.A. Alekseev et al. *Nano Letters* **19**, 4463 (2019).
11. M. Dunaevskiy et al. *Nano Letters* **17**, 3441 (2017).
12. P. Alekseev et al., *Tech. Phys. Lett.* **44**, 381 (2018).
13. B. Borodin et al., *Semicond. Sci. and Technol.* **34**, 125007 (2019).

# SYNTHESIS OF COLLOIDAL SOLUTIONS OF SILICON QUANTUM DOTS WITH ORGANIC LIGANDS

A.V. Knyazev, A.A. Konakov, E.V. Syrov

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

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

In recent decades, the use of semiconductor and metal quantum dots in various fields of biomedicine has attracted considerable interest: medical diagnostics, in particular cancer, drug delivery, optical bioimaging, and theranostics. The optical properties of such particles are mainly used. At the same time, typical colloidal quantum dots of cadmium selenide or metal nanoparticles, including gold, are toxic to the human body. Expanding the capabilities of optical techniques in biomedicine requires the search for new light-emitting nano-objects that are safe for biological organisms. The solution could be the use of solutions of silicon nanocrystals coated with organic ligands.

We are developing a new method for producing colloidal solutions of silicon quantum dots with an organic coating based on ion-synthesized silicon nanocrystals in oxide matrices. The passivated surface of silicon nanocrystals is modified during the photochemical reaction. The reaction of the oxidized surface of silicon nanocrystals with a mixture of acylbenzenes (isomers of xylene, ethylbenzene, isopropylbenzene, etc.) takes place at room temperature and irradiates the reaction mixture in the UV range. The reaction product is a colloidal solution of silicon nanocrystals with a surface modified with hydrocarbon groups.

The work was performed with the financial support of the Russian Foundation of Basic Research (Project Number 19-53-45056 ИИД\_a).

# OBTAINING OF A SOLID SOLUTION $\text{Cd}_{1-x}\text{Pb}_x\text{F}_2$ BY THE MECHANOSYNTHESIS

I.I. Buchinskaya, N.A. Ivanovskaya

*Federal Scientific Research Centre «Crystallography and Photonics»  
of RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: buchinskayaii@gmail.com*

Mechanosynthesis is an effective way to obtain nanosized particles. Nanocrystalline fluorides are one of the promising functional materials for photonics and solid state ionics [1]. In this work, we studied the possibility of obtaining a nanocrystalline  $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{F}_2$  ( $x \sim 0.33$ ) solid solution by grinding a mixture of crystalline components of  $\text{PbF}_2$  and  $\text{CdF}_2$  in a high-energy ball planetary mill Retsch PM-200 ( $m_{\text{ball}}/m_{\text{substance}} = 100\text{g}/5\text{g}$ ) in a protective atmosphere of Ar for 15 hours with intermediate sampling for X-ray diffraction analysis (XRD). XRD showed (fig. 1(a)) that at the initial stage of grinding, a rhombic phase based on  $\text{PbF}_2$  is formed, then, gradually, a new cubic phase with the lattice parameter  $a = 5.76(8)$  Å forms. It is very close to the lattice parameter of the composition  $\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33}\text{F}_2$ . Within 15 hours, the synthesis occurs almost completely (XRD does not detect impurities of the initial components). Scanning electron microscopy (SEM) showed a large inhomogeneity of particles in size: 10-100 nm (fig. 1(b)).

The broadening of the X-ray profile of the resulting product occurs as a result of particle grinding and, possibly, due to partial «mechanical hydrolysis».

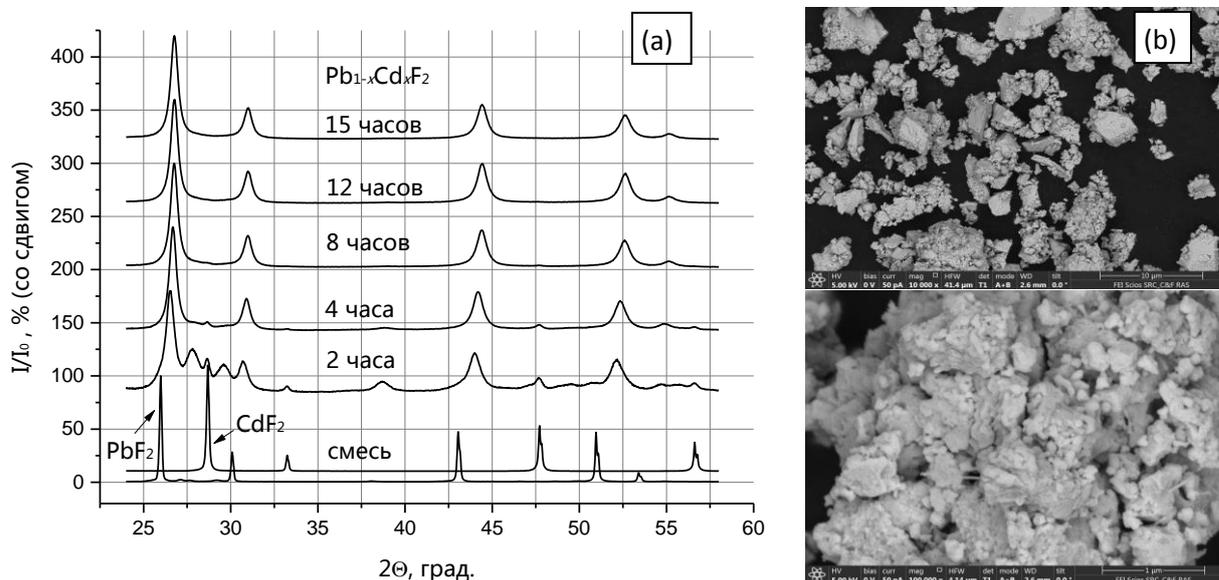


Fig. 1. (a) – The dynamics of changes in the XRD spectra during grinding;

(b) – SEM-images of  $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{F}_2$  ( $x = 0.33$ ) particles (b).

1. S.V. Kuznetsov, V.V. Osiko, E.A. Tkatchenko, P.P. Fedorov, Russ. Chem. Rev. **75**, 1065 (2006).

# NANOCOMPOSITE FIBERS OF POLYVINYL ALCOHOL WITH MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES PRODUCED BY ELECTROSPINNING

A.M. Nizametdinov<sup>1</sup>, V.A. Sergeev<sup>1,2</sup>, S.V. Vasin<sup>1</sup>

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

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

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

Polymer composites with carbon nanotubes (CNT) have a wide range of unique electrophysical and physical-mechanical properties that allow both creating new electronics elements and improving the characteristics of existing ones [1]. It is known that the properties of such nanocomposites are determined both by the properties of CNT and by the nature of their distribution and orientation in the polymer matrix [2].

To control the orientation of CNT in the polymer matrix a number of methods are used: Langmuir-Blodgett, electric or/and magnetic field impact, etc. As one of such methods may be used electrospinning. This method consists of obtaining thin nanocomposite fibers as a result of the action of electrostatic forces on an electrically charged stream of solution or melt. Using this method, it is possible to produce fibers with a diameter from 5 to 800 nm [3]. Such fibers with aligned CNT can be used to create planar and bulk structures in polymer electronics.

We have designed and assembled an installation that implements the electrospinning method. An example of polyvinyl alcohol (PVA) fibers with a 1% fraction of multi-wall carbon nanotubes (MWCNT) obtained using this installation is shown in fig. 1 (a) and (b). It can be seen that using this method it is possible to obtain an array of nanocomposite fibers oriented in the one plane.

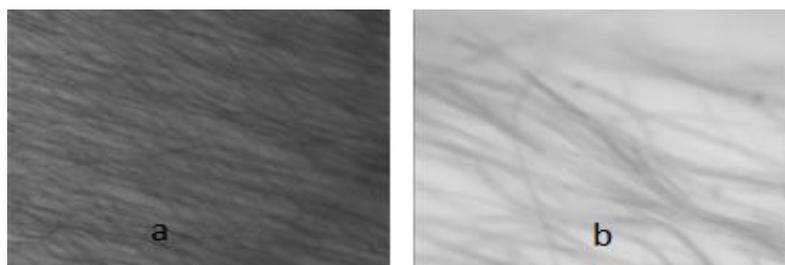


Fig.1. Optical microscope images of PVA fibers (a – PVA with 1% MWCNT, b – 10x zoomed image a).

The present work was performed as part of a state assignment with financial support from the Russian Foundation for Basic Research and the Government of Ulyanovsk Region, Project No. 19-42-730011.

1. S.V. Vasin, M.S. Efimov, V.A. Sergeev, *Tech. Phys. Lett.* **46**, 26 (2020).
2. N.G. Sahoo et al., *Prog. Polym. Sci.* **35**, 837 (2010).
3. N. Bhardwaj, S.C. Kundu, *Biotechnol. Adv.* **28**, 325 (2010).

## SPIN LIGHT-EMITTING DIODES WITH (A<sub>3</sub>,Fe)B<sub>5</sub> INJECTORS

M.V. Dorokhin, V.P. Lesnikov, M.V. Ved, A.V. Zdoroveyshchev  
*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*  
*E-mail: [mikhail28ved@gmail.com](mailto:mikhail28ved@gmail.com)*

Diluted magnetic semiconductors (DMS) are materials, which combine magnetic and semiconductor properties [1]. DMS (A<sub>3</sub>,Fe)B<sub>5</sub> are considered to be the most promising, since the Curie temperature in such materials exceeds 300K [2]. In this work the introduction of (Ga,Fe)Sb, (In,Fe)Sb and (Ga,Fe)As layers as functional elements of a spin light-emitting diode (SLED) were made.

The samples are semiconductor heterostructures with quantum well InGaAs/GaAs on p-GaAs (for SLED with (In,Fe)Sb and (Ga,Fe)As injectors) and n-GaAs (for SLED with (Ga,Fe)Sb injector) substrates.

When structures are introduced into a magnetic field, the electroluminescence becomes partially circularly polarized. The degree of circular polarization of EL is calculated by the formula

$$P_{EL} = (I_1 - I_2)/(I_1 + I_2) \times 100\%, \quad (1)$$

where  $I_1(I_2)$  is the relative EL intensity for left (right) polarized light.

The maximum values of the degree of circular polarization ( $P_{EL}$ ) was found at 10 K. For SLED with (Ga,Fe)As injector  $P_{EL} = 1\%$ , with (In,Fe)Sb  $P_{EL} = 0.7\%$ , and with (Ga,Fe)Sb  $P_{EL} = 0.2\%$ . When studying the magnetic field dependences of  $P_{EL}$  for structure without a ferromagnetic injector (A<sub>3</sub>,Fe)B<sub>5</sub>,  $P_{EL}$  did not exceed the level of measurement error. It indicates that the circular polarization of EL is associated with the spin injection of carriers from a DMS.

The degree of circular polarization is determined by the efficiency of spin injection, as well as spin relaxation during scattering of charge carriers. In the SLED with the (Ga,Fe)Sb, injection of spin-polarized holes is realized, while for the structures with (In,Fe)Sb and (Ga,Fe)As, electron injection is realized. This explains the relatively low value of the degree of circular polarization for SLED with (Ga,Fe)Sb, since the spin diffusion length for holes is shorter than for electrons.

With an increase of the measurement temperature, the EL intensity and  $P_{EL}$  decrease monotonically. For SLED with (Ga,Fe)As at temperatures above 200 K, the EL intensity becomes comparable with the noise level, which does not allow reliable measurements of  $P_{EL}$ . For the structure with (Ga,Fe)Sb, it was not possible to measure  $P_{EL}$  at temperatures above 50 K due to the low degree of polarization. Only in an SLED with an (In,Fe)Sb injector it was possible to achieve circular polarization in the temperature range of 10-300K.

This work was supported by the Russian Science Foundation project № 18-79-10088 (structure's fabrication and polarization measurements) and the Grant of the President of Russian Federation, project № MD-1708.2019.2 (GaAs-based spin light-emitting diode structure development).

1. M. Holub, P. Bhattacharya, J. Phys. D: Appl. Phys. **40**, 179 (2007).
2. A.V. Kudrin et al., J. of Appl. Phys. **122**, 183901 (2017).

# THE RESEARCH OF HYBRID MATERIALS BASED ON MULTI-WALL CARBON NANOTUBES AND NANOSTRUCTURED FORMS OF TITANIUM CARBIDE

S.Yu. Ketkov, A.M. Obyedkov, I.V. Vilkov

*Razuvaev Institute of Metalorganic Chemistry of RAS, Nizhniy Novgorod, Russia*

*E-mail: mr.vilkof@yandex.ru*

Hybrid materials based on multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs), the surface of which is decorated with nanocoatings of titanium carbide of various morphologies, are promising materials for the creation of new composite materials, catalytic systems, and sensors.

Previously, we obtained a hybrid material consisting of MWCNTs whose surface is decorated with a continuous nanodispersed TiC layer by the MOCVD method using titanocene dichloride ( $Cp_2TiCl_2$ ) as a precursor [1]. We continued to study the deposition process of TiC coatings, without changing the deposition temperature, but changing the mass ratio of precursors ( $Cp_2TiCl_2$ : MWCNTs) in the range from 1: 1 to 1:10. The resulting materials were characterized by SEM, TEM, HRTEM and XRD. It is determined that the hybrid material we obtained contains of two crystalline phases: MWCNTs and the stoichiometric phase of titanium carbide.

It was found that the change in the mass ratio of precursors ( $Cp_2TiCl_2$ :MWCNTs) led to a change in the observed morphological forms of TiC. With ratios of precursors less than 3:1, MWCNTs coated with thin films of TiC up to 10 nm thick were observed. An increase in the ratio to 4:1 led to the formation of TiC nanoparticles on the surface of decorated MWNTs. With a ratio of 5:1, the formation of TiC nanodendrites with a branch thickness of about 50 nm and nanowhiskers with a thickness of ~ 200 nm and a length of more than 5  $\mu m$  was observed. With 6:1 or more precursor ratio it was observed that lateral branches are growing from the surface of nanowhiskers that subsequently led to the formation of three-dimensional nanostructured forms – cubic TiC mesocrystals with dimensions about 10  $\mu m$  with cubic habit.

The work was performed using the equipment of Common Research Center «Physics and technology of micro- and nanostructures».

1. K.V. Kremlev et al., Technical Physics Letters **42**, 40 (2016).

InGaAs PHOTODIODES IN THE RANGE 1.02–1.31  $\mu\text{m}$   
WITH A METAMORPHIC BUFFER LAYER GROWN  
ON GaAs SUBSTRATES

S.M. Nekorkin, I.V. Samartsev, B.N. Zvonkov

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

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

Photodiodes for the wavelength range 1.3–1.5  $\mu\text{m}$  grown on GaAs substrates are perspective for replacing the devices used now for this range grown on InP substrates. One of the ways is the using of metamorphic buffer layers [1–3].

This paper presents the results of the study of the p-i-n diode structure for the range 1.02–1.31  $\mu\text{m}$  with a metamorphic InGaAs buffer layer with stepwise composition change. Photodiode structures were grown by the MOCVD method on GaAs substrate with a 2° deviation.

The structures under study were grown by the MOCVD method at atmospheric pressure. The metamorphic buffer layer was grown in two stages. First, the InGaAs layer consisting of fifteen transition layers with stepwise composition change was grown on a GaAs substrate at a temperature of 700 °C (total thickness of 1000 nm). Then, cooling to 560 °C and growing of the InGaAs buffer layer consisting of 14 layers were performed (total thickness of 960 nm). Then, the p-i-n structure of InGaAs was grown with indium content about 50%.

Based on the obtained heterostructure photodiodes are made. On the side of the structure and the substrate Au ohmic contacts were deposited by thermal evaporation in vacuum, and then a mesastructure 0.8 mm in diameter was etched. The spectrum of the photocurrent has the maximum at a wavelength of 1.22  $\mu\text{m}$ , the width of the spectrum is 0.29  $\mu\text{m}$ . Investigation of the reverse current-voltage characteristics of photodiodes at room temperature showed that the values of dark currents are 10  $\mu\text{A}$  with a reverse voltage of 5 V.

Thus, the technology of two-temperature growth of metamorphic InGaAs layers on GaAs substrates has been proposed. Further research will be aimed at studying the nature of dark currents in order to minimize them, and the design of a metamorphic buffer layer will be optimized to improve the crystal quality of heterostructures.

1. H.-L. Wang et al., Chin. Phys. Lett. **26**, 014214 (2009).
2. D. Wu et al., Electronics Letters **44**. (2008).
3. I.V. Samartsev et al., FTP **12**, (2018).

## FORMATION AND STRUCTURAL INVESTIGATIONS OF Ge/Si LAYERS ON Si/SiO<sub>2</sub>/Si (100)

V.Yu. Chalkov<sup>1</sup>, S.A. Denisov<sup>1</sup>, A.G. Gagarin<sup>2</sup>, M.N. Mineyev<sup>2</sup>, D.A. Pavlov<sup>1</sup>,  
V.G. Shengurov<sup>1</sup>, A.A. Sushkov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Interagency center of solid-state microelectronics, Nizhny Novgorod, Russia*

*E-mail: sushkovartem@gmail.com*

Ge/Si buffer layers grown at different temperatures on Si/SiO<sub>2</sub>/Si (100) (SOI) substrates have been fabricated and studied. The Si buffer was grown via molecular beam epitaxy. The Ge layer was produced in a single stage via hot wire chemical vapor deposition process. The cross section of the structure was analyzed by a high-resolution transmission electron microscope (HRTEM) (JEOL JEM-2100F microscope operated at 200 kV). Such structures can be used in the future as a substrate for growth of high qualities laser structures with radiation resistance.

HRTEM investigations demonstrate a close to atomic smooth surface of SOI substrates. Regions with defects weren't found via HRTEM. Studies of the cross section of heterostructures Ge/Si/SOI showed that the annealing of SOI substrates at 900 °C does not completely remove silicon dioxide from the surface of SOI, but at the same time retains a hidden layer of SiO<sub>2</sub> in SOI. The silicon dioxide remaining after annealing on the SOI surface contributes to disruption of continuity of the Si buffer grown on SOI at 800 °C. A decrease in the growth temperature of the Si buffer from 800 °C to 600 °C resulted in the formation of a continuous Si buffer. Relaxation of elastic stresses in the process of epitaxial growth of Ge layer on Si occurred with the formation of mainly such defects as dislocations.

In this paper we have selected such temperatures of annealing of SOI and growth of Si buffer, at which the SiO<sub>2</sub> layer hidden in SOI is preserved and Ge/Si buffer layers with uniform thickness are formed, nevertheless. Further research is required in order to reduce the number of dislocations originating at the Ge/Si heterogeneous boundary.

The work was supported financially by the Russian Science Foundation (Project No. 18-72-10061).

SPECTRAL AND LUMINESCENT CHARACTERISTICS  
OF  $\text{La}_{1-x}\text{Re}_x\text{Ga}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$ ,  $\text{Bi}_{1-x}\text{Re}_x\text{Ge}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  (Re = Pr, Eu, Dy, Tb)  
NANOPOWDERS OF SOLID SOLUTIONS

A.V. Egorysheva<sup>1</sup>, O.M. Gajtko<sup>1</sup>, S.V. Golodukhina<sup>1</sup>, S.A. Khrushchalina<sup>2</sup>,  
P.A. Ryabochkina<sup>2</sup>, A.D. Taratynova<sup>2</sup>, I.A. Yurlov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of RAS, Moscow, Russia*

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

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

This paper presents the results of a study of the spectral and luminescent properties of  $\text{La}_{1-x}\text{Re}_x\text{Ga}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  and  $\text{Bi}_{1-x}\text{Re}_x\text{Ge}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  ( $x = 0.05-0.5$ ) solid solutions with the rosielite structure doped with  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$  ions. Compounds of this type are poorly studied and are characterized by relatively large distances between RE ions, which are caused by the features of their layered structure [1]. This fact will contribute to a decrease in concentration quenching and affect the quantum yield of RE ions luminescence, which makes the selected materials promising for the development of LEDs.

To excite the luminescence of  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$  ions, we used laser radiation with wavelengths  $\lambda = 457$  or  $351$  nm, which corresponds to the absorption bands of these ions. Comparison of the obtained luminescence spectra revealed a number of differences for the lanthanum and bismuth series, and the most striking differences were observed in the spectra of  $\text{Pr}^{3+}$  and  $\text{Eu}^{3+}$  ions

(Fig. 1). For  $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ga}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  and  $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ge}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  solid solutions they are due to the efficiency of the cross-relaxation processes ( $^1\text{D}_2 \rightarrow ^1\text{G}_4$ )  $\rightarrow$  ( $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$ ) and ( $^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{H}_4$ )  $\rightarrow$  ( $^3\text{H}_4 \rightarrow ^1\text{D}_2$ ) and are related with different phonon frequencies. Differences in the luminescence spectra of the  $\text{La}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Ga}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  and  $\text{Bi}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Ge}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  series are caused by a change in the symmetry of the local environment of rare-earth ions and indicate that the  $\text{Eu}^{3+}$  ion in bismuth compounds is in a position with higher symmetry than in lanthanum.

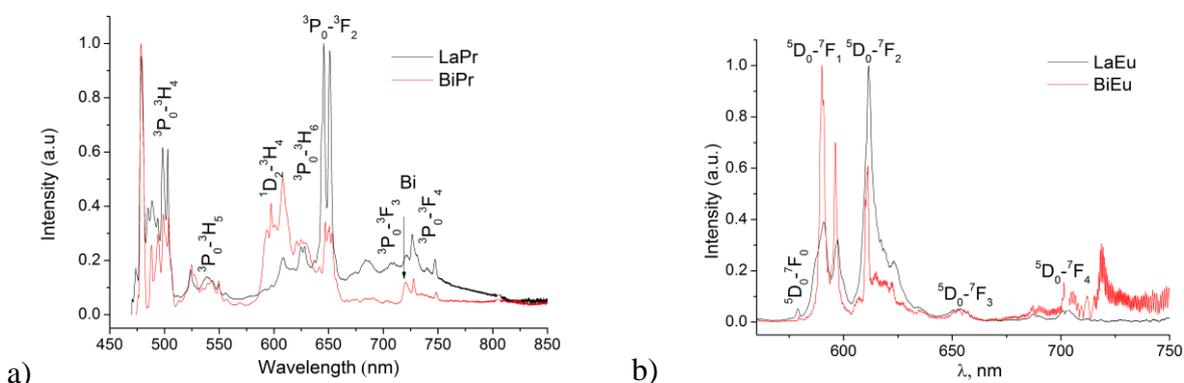


Fig. 1. Luminescence spectra a)  $\text{La}_{0.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Ga}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  and  $\text{Bi}_{0.9}\text{Pr}_{0.1}\text{Ge}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  ( $\lambda_{\text{exc.}} = 457$  nm), b)  $\text{La}_{0.85}\text{Eu}_{0.15}\text{Ga}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  and  $\text{Bi}_{0.85}\text{Eu}_{0.15}\text{Ge}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$  ( $\lambda_{\text{exc.}} = 351$  nm).

This research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 18-29-12009).

1. A.V. Egorysheva et al., *Ceram. Int.* **42**, 13976 (2016).

## SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES OF ZrO<sub>2</sub>-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NANOPARTICLES

A.V. Egorysheva<sup>1</sup>, S.A. Khrushchalina<sup>2</sup>, P.A. Ryabochkina<sup>2</sup>, V.O. Veselova<sup>1</sup>,  
I.A. Yurlov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of RAS, Moscow, Russia*

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

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

In dielectric nanoparticles doped with rare-earth ions (RE) a broadband «white» radiation appears along with luminescence [1–5] under laser excitation with a high power density into the absorption bands of these ions.

To date, the authors of various works have no consensus on the nature of this radiation. In the opinion of a number of authors, the broadband «white» radiation mentioned above is thermal.

In [3, 4], we also observed broadband «white» radiation from YPO<sub>4</sub>:Yb nanoparticles with a concentration of Yb ions above 20 at.% excited by radiation with  $\lambda_{\text{exc.}} = 970$  nm, confirmed its thermal nature and proposed a mechanism for its occurrence.

In [5], we studied the features of the appearance and regularities of broadband «white» radiation in YVO<sub>4</sub>:Er nanoparticles upon excitation by laser radiation with  $\lambda_{\text{exc.}} = 1532$  nm.

In the present work, dielectric nanoparticles of ZrO<sub>2</sub>-Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and YVO<sub>4</sub>-ErVO<sub>4</sub> solid solutions with different average sizes were synthesized by the coprecipitation method. The regularities of the occurrence of upconversion luminescence and broadband «white» radiation in these compositions upon excitation by radiation with  $\lambda_{\text{exc.}} = 1532$  nm were studied.

The work was supported by the RFBR grant No. 19-32-90135.

1. S.M. Redmond, S.C. Rand, S.L. Oliveira, Appl. Phys. Lett. **85**, 5517 (2004).
2. W. Strek et al., Opt. Express **19**, 14083(2011).
3. S.A. Khrushchalina et al., JETP Lett. **103** (5), 302 (2016).
4. P.A. Ryabochkina et al., JETP Lett. **103** (12), 743 (2016).
5. S.A. Khrushchalina et al., J. of Lum. **205**, 560 (2019).

## MODELING OF MAGNETIC TARGETING OF DRUG CARRIERS IN THE BLOOD CIRCULATORY SYSTEM

M.V. Gerasimov, M.A. Pyataev, N.A. Pyataev, D.S. Sokushev, D.E. Yakobson,  
M.N. Zharkov

*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*  
*E-mail: [ykbsn@mail.ru](mailto:ykbsn@mail.ru)*

The methods of targeted drug delivery based on the concentration of magnetic particles in a given location using a constant magnetic field are actively developing currently. An understanding of the mechanism of particle precipitation in capillaries is necessary for the correct choice of the parameters of magnetic carriers, such as particle size, magnetic material content, magnetic field gradient, etc. There are many papers [1–3] devoted to the study of magnetic particle movement and based on the analysis of forces acting on them. We have generalized this approach taking the diffusion process into account and obtained a partial differential equation for calculation of the concentration of magnetic microcapsules in the capillary. Based on our theory, we have also determined the parameters of carriers necessary for their magnetic precipitation.

The results of the theoretical calculation were compared with an in vitro experiment performed on a model of a blood vessel. A polyethylene tube with an inner diameter of 1 mm and a length of 10 cm was used as a model of the capillary. The capillary was located next to a boron-neodymium permanent magnet of a cylindrical shape with a maximum induction of 0.47 T at its base. A suspension of polymer submicron capsules containing iron oxide  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles was used for an in vitro experiment. Capsules were synthesized by the «Layer by layer» method on spherical  $\text{CaCO}_3$  nuclei, which were coated with polymer shells alternating with layers of magnetite nanoparticles. The suspension of the capsules was pumped through the capillary using an infusion pump allowing precise control of the flow rate. After pumping of the whole liquid volume, the flow was stopped; the capillary was frozen and then cut in pieces of 5 mm length. The iron content in each piece was determined by the photocolometric method. The results of experimental measurements for the spatial distribution of precipitated capsules in the magnetic field are in agreement with the theoretical predictions.

The work has been supported by the RFBR (grant № 18-415-130007).

1. A.E. David et al., *J. Controll. Release* **152**, 67 (2011).
2. S. Sharma et al., *J. Magn. Magn. Mater.* **379**, 102 (2015).
3. L. Agiotis et al., *J. Magn. Magn. Mater.* **401**, 956 (2016).

COMPARATIVE STUDY OF PHYSICAL-CHEMICAL AND BIOLOGICAL  
PROPERTIES OF MAGNETITE NANOPARTICLES COATED WITH OLEIC  
ACID AND AMINOSILANE FOR MAGNETIC HYPERTHERMIA  
AND MRI-VISUALISATION

E.I. Egorova, E.V. Gromova, N.A. Pyataev, V.I. Shlyapkina, D.E. Yakobson,  
M.N. Zharkov

*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

*E-mail: [katha98@mail.ru](mailto:katha98@mail.ru)*

Nowadays such diagnostic and treatment methods as magnetic resonance imaging and magnetic hyperthermia are actively developed. Both of these methods realize via the administration into the patient's body of magnetic micro- or nanoparticles as contrast agents or heat generators [1]. Many studies focused on iron oxide particles [2], since they are biocompatible and have the necessary magnetic properties.

In this work we performed a comparative study of some biological and physicochemical properties of magnetite nanoparticles coated with oleic acid / sodium oleate (NPs  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{OA}$ ) and aminosilane (NPs  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{SiO}_2\text{-NH}_2$ ). The nanoparticles were obtained by coprecipitation then got the hydrothermal and ultrasonic treatment and stabilized with an appropriate substance. The transmission electron microscopy demonstrated that the  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{OA}$  particles are characterized by a smaller size ( $8 \pm 3$  nm) and a lower degree of agglomeration compared to the  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{SiO}_2\text{-NH}_2$  particles ( $72 \pm 17$  nm). The study of magnetic properties showed that all particles are superparamagnetic; however, an aminosilane coating partly reduces the saturation magnetization of NPs  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . The specific absorption rate (SAR) of the energy of an alternating magnetic field ( $H_0 = 100$  Oe,  $f = 100$  kHz) was 11.23 W/g Fe and 10 W/g Fe for NPs  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{OA}$  and NPs  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{SiO}_2\text{-NH}_2$ , respectively. NPs  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{OA}$  have higher stability and retain their physicochemical properties for more than one year, whereas NPs  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{SiO}_2\text{-NH}_2$  for several months. The results of in vivo studies allow us to classify NPs  $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SiO}_2\text{-NH}_2$  ( $\text{LD}_{50} = 544.6$  mg/kg) and NPs  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{OA}$  ( $\text{LD}_{50} = 652.3$  mg/kg) as low-toxic substances with intraperitoneal and almost non-toxic with intramuscular administration.

The work has been supported by the RFBR (grant № 19-29-10013).

1. Kheireddine El-Boubbou, Nanomedicine. Rev. **223**, (2018).
2. A.M. Tishin et al., R. Patents on Anti-Cancer Drug Disc. Rev. **11**, (2016).

# CYTOTOXIC EFFECT OF MAGNETIC HYPERTHERMIA ON L-929 CELLS WITH POLYMERIC MICROCAPSULES CONTAINING MAGNETITE NANOPARTICLES

E.P. Brodovskaya<sup>1</sup>, E.V. Gromova<sup>1</sup>, N.A. Pyataev<sup>1</sup>, G.B. Sukhorukov<sup>2</sup>,  
A.M. Tishin<sup>3</sup>, M.N. Zharkov<sup>1</sup>

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

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

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

*E-mail: mikhail.zharkov.92@mail.ru*

Currently, the magnetic nanoparticles based on iron oxide are actively used for the treatment of certain types of tumors by magnetic hyperthermia [1], since these particles have the necessary physicochemical and biological characteristics. It is necessary to use the minimum possible amount of magnetic particles to reach the required therapeutic temperature (43–45 °C) in order to avoid unwanted toxic effects [2].

We offered in present work the polyelectrolyte microcapsules containing magnetite nanoparticles for local magnetic therapy. The capsules were obtained by the «Layer by layer» method by alternate coating of polyelectrolytes (polyarginine, dextran sulfate) and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles on CaCO<sub>3</sub> spherical cores. To investigate the suitability of magnetic capsules for hyperthermia we estimated their cytotoxic effect on L-929 mouse fibroblast cell culture after treatment with alternating magnetic field. Cells were incubated for 24-hour with obtained microcapsules (at concentration of 5 and 10 capsules per cell). After treatment, the cells were washed from non-internalized capsules and exposed to an alternating magnetic field with strength amplitude of 200 Oe and a frequency of 100 kHz. Exposure times were 0.5, 1, 2, 5, 10 and 15 minutes. The similar experiment was performed on cells with colloidal particles of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> with concentrations corresponding to the magnetite content in the experiment with capsules. The cell viability was assessed using an MTT-test the 24 hours after magnetic field treatment.

The results of the study showed that exposure with alternating magnetic field suppress viability cell treated with microcapsules up to 76% and 30% for concentrations of 5 and 10 capsules per cell, respectively. The maximum of cytotoxicity effect was reached to 5 minutes of exposure and after that we do not found the decrease in the cell viability. Treatment with the colloidal particles of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and the magnetic field in the control experiment did not affect cell viability at all exposure time.

The work has been supported by the RFBR (grant № 19-29-10013).

1. Keon Mahmoudi et al., In. J. of Hyperthermia. Rev. **34**, (2018).
2. Kheireddine El-Boubbou, Nanomedicine. Rev. **223**, (2018).

# ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

## МОЩНЫЕ КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

Г.С. Соколовский

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

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

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) с момента первой публикации 1971 года, описывающей принципы их работы [1], и в особенности после их первой практической реализации в 1994 году [2], привлекают огромное внимание научного сообщества: по этой тематике было опубликовано более 8.5 тыс. работ, на которые, по данным WebofScience, сделано около 150 тыс. ссылок. Созданные к настоящему времени ККЛ излучают в среднем инфракрасном и терагерцовом спектральном диапазоне. Основной характеристикой, которая отличает их от «лазерных диодов», является то, что ККЛ униполярны, т.е. используют только один тип носителей – с излучением фотона при переходе электрона в зоне проводимости с одного уровня размерного квантования на другой. К сожалению, структуры ККЛ чрезвычайно сложны для практической реализации, что объясняется как количеством слоев, на два порядка большим, чем в «обычном» полупроводниковом лазере, так и необходимостью поддержания однородности слоев (т.е. идентичности квантовых каскадов) в течение длительного эпитаксиального роста. Объясняемое этим значительное отставание отечественных ученых в создании ККЛ удалось заметно сократить в течение последних лет. Помимо обзора состояния разработки и исследований мощных квантово-каскадных лазеров среднего инфракрасного диапазона иностранными исследователями, в докладе обсуждаются результаты исследования ККЛ, все технологические операции по созданию которых выполнены в нашей стране. Среди полученных результатов следует отметить демонстрацию выходной мощности лазерной генерации более 10 Вт на длине волны в области 4.6 мкм [3], а также рекордную, превышающую 13 Вт мощность, достигнутую в ККЛ спектрального диапазона 8 мкм [4]. Помимо этого, будет обсуждаться демонстрация лазерной генерации при повышенных температурах (до +65°C) [5], а также достижение одночастотной генерации с подавлением боковых мод более 25 дБ в ККЛ с U-образным резонатором [6].

Автор благодарит Минобрнауки за поддержку исследований (уникальный идентификатор проекта: RFMEFI60719X0318)

1. Р. Ф. Казаринов, Р.А. Сурис, ФТП **5**, 797 (1971).
2. J. Faist et al., Science **264**, 553(1994).
3. В.В. Дюделев и др., Квантовая электроника **50**, (2020).

4. V.V.Dudelev et al., Advanced Photonics Congress (2020).
5. В.В. Дюделев и др., ФТТ **60 (11)**, 2251 (2018).
6. А.В. Бабичев и др., Письма в ЖТФ **45 (9)**, (2019).

# ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ЛАЗЕРЫ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

С.П. Никитин

*ООО «ФемтоВижн», Москва*

*Группа компаний «Российского Квантового Центра», Москва*

*E-mail: [s.nikitin@rqc.ru](mailto:s.nikitin@rqc.ru)*

Современную науку и технику невозможно представить без лазеров сверхкоротких лазерных импульсов (СКИ) [1], под которыми обычно понимают импульсы с длительностью менее нескольких пикосекунд. Короткая длительность СКИ позволяет использовать их для изучения быстропротекающих процессов, а высокая пиковая интенсивность – для нелинейно-оптической спектроскопии, генерации электромагнитных импульсов от терагерцового до рентгеновского диапазона и решения технических задач связанных с метрологией и радиофотоникой. СКИ широко применяются в современной офтальмологии, а также для наноструктурирования и микрообработки самых различных материалов и сред.

Применения фемтосекундных лазеров в микрохирургии и микрообработке основаны на том, что уже при энергиях порядка нескольких сотен наноджоулей СКИ, сфокусированные в пятно размером несколько микрометров, приводят к ионизации материала образца в режиме многофотонного поглощения излучения веществом. Процесс ионизации и формирования плазмы в лазерном пятне при этом происходит быстрее, чем перенос тепла в окружающий объем. Отсутствие нагрева материала образца вне лазерного пятна при использовании СКИ обеспечивает субмикронную точность такой лазерной обработки. Интересно, что по этой же причине применение СКИ позволяет осуществлять лазерную микрообработку легко воспламеняющихся и взрывчатых веществ. Многофотонный режим поглощения СКИ приводит к тому, что оптический спектр поглощения образца становится не существенным. Это позволяет эффективно использовать СКИ для поверхностной обработки таких разных по своим оптическим свойствам материалов как прозрачные диэлектрики, стекла, полупроводники, пластмассы, керамики и металлы. Дополнительным преимуществом многофотонного поглощения является его нелинейная зависимость от интенсивности, что позволяет достичь плазменной абляции из области меньшей, чем дифракционный размер лазерного пятна.

В прозрачных средах возможна фокусировка СКИ в объем образца. Фокусируя СКИ в объем прозрачной среды можно прецизионно формировать трехмерные оптические структуры: объемные решетки Брэгга с произвольными пространственными характеристиками, элементы оптических сенсоров и устройства интегральной оптики. Кроме того, таким способом была продемонстрирована возможность сверхплотной объемной оптической записи цифровой информации в стекле.

Другим важным применением лазеров СКИ является генерация «частотных гребенок», позволяющих абсолютную привязку частоты и используемых в современной метрологии [2]. За работы в этой области Т. Хенш был удостоен в 2005 году Нобелевской премии по физике.

Изобретение метода усиления чирпированных импульсов [3] Ж. Муру и Д. Стирклэнд, ставшими лауреатами Нобелевской премии по физике 2018 г., открыло возможность изучения физики взаимодействия электромагнитного излучения с веществом при «астрофизических» плотностях энергии, не достижимыми на сегодняшний день никакими другим техническими средствами.

Основным на сегодня способом генерации СКИ является использование режима синхронизации мод (СМ), изобретенного еще в 1960-х годах на заре лазерной эпохи [4, 5]. С тех пор лазерные технологии ушли далеко вперед по пути уменьшения длительности СКИ, уменьшения размеров, повышения надежности и улучшения КПД генерирующих их лазеров. Иногда можно встретить следующее деление лазеров СКИ на четыре поколения, отражающее исторические этапы развития технологии.

1. Твердотельные лазеры с ламповой накачкой (с активной или с пассивной СМ).
2. Лазеры на красителях с лазерной накачкой (обычно с пассивной СМ);
3. Лазеры на вибронных кристаллах с лазерной накачкой и керровской СМ.
4. Лазеры с прямой диодной накачкой (волоконные).

Большая часть современных практических задач решается лазерами третьего и четвертого поколений.

Фемтосекундные лазеры с прямой диодной накачкой, относящиеся к четвертому поколению, в настоящее время наиболее широко распространены в медицине и промышленности, поскольку такие лазеры характеризуются надежностью, компактностью и высоким КПД, достигнутым благодаря применению диодной накачки. Однако длительность СКИ на выходе таких лазеров ограничена свойствами оптического волокна и обычно по порядку величины составляет 100 фемтосекунд. По этой причине лазеры третьего поколения, к которым относятся в частности хром-форстеритовые и титан-сапфировые лазеры на керровской синхронизации мод, остаются незаменимыми там, где востребованы более короткие длительности.

Рекордным по длительности получаемых СКИ до сих пор остаются титан-сапфировые лазеры, активной средой в которых является сапфир ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) с примесью ионов титана ( $\text{Ti}^{3+}$ ). Спектры испускания и поглощения этой лазерной среды показаны на рис. 1.

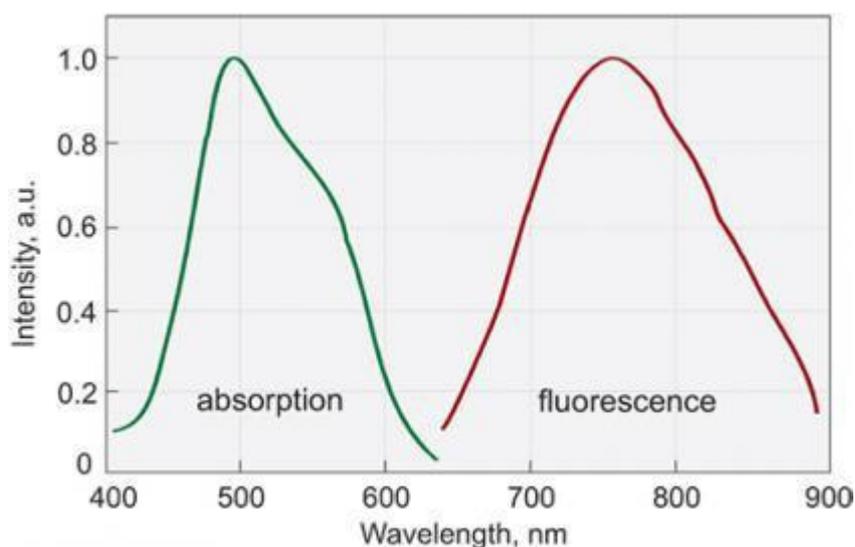


Рис. 1. Спектр генерации и поглощения титан-сапфира.

Как видно, ширина спектра испускания позволяет лазерам на основе этой среды не только генерировать импульсы длительностью менее 10 фемтосекунд, но и осуществлять перестройку спектра СКИ в диапазоне нескольких сотен нанометров в ближнем ИК диапазоне. Все это делает их крайне привлекательными для самых различных применений. К сожалению, вне научных лабораторий использование таких лазеров сдерживается необходимостью оптической накачки с помощью внешнего лазера. Пик полосы поглощения накачки у ионов  $Ti^{3+}$  в сапфире находится вблизи

500 нм, поэтому для оптической накачки в настоящее время обычно используются твердотельные лазеры с внутрирезонаторной генерацией второй гармоники либо (на более раннем этапе) еще более громоздкие и менее удобные в эксплуатации ионные аргоновые лазеры.

Эту ситуацию изменило появление мощных лазерных диодов с длиной волны излучения лежащей в сине-зеленой области оптического спектра [6], за разработку которых ИсамаАкасаки, Хироси Аmano и СюдзиНакамура были удостоены Нобелевской премии по физике в 2014 году. Использование таких лазерных диодов позволяет, по крайней мере, в принципе реализовать прямую диодную накачку титан-сапфирового лазера. Такой твердотельный лазер на вибронном кристалле с прямой диодной накачкой не будет уступать волоконным лазерам четвертого поколения по энергоэффективности, а по надежности и компактности будет вполне с ними сопоставим. При этом такой лазер позволил реализовать преимущества титан-сапфира как широкополосной лазерной среды, что создаст условия для широкого применения титан-сапфировых лазеров не только в научных лабораториях, но и в медицине и промышленности.

Механизм пассивной синхронизации мод в таких лазерах основан на формировании в активном элементе лазера нелинейно-оптической линзы Керра, обусловленной нелинейным изменением показателя преломления, и возникающей когда через среду распространяется СКИ с высокой пиковой интенсивностью. Параметры лазерного резонатора при этом подбираются

так, чтобы возникновение керровской линзы уменьшало дифракционные потери, что и приводит к пассивной синхронизации мод в лазере. Такой механизм эффективен только при высокой интенсивности СКИ в активном элементе, для чего мода резонатора жестко фокусируется в активный элемент. Характерный размер моды в активном элементе при этом составляет несколько десятков микрон. Эффективная накачка в этом случае также возможна только при жесткой фокусировке в пятно, сопоставимое по размерам с размером моды.

Обычно, запуск режима синхронизации мод в таком лазере требует механической встряски одного из зеркал, что переводит лазер из обычного непрерывного режима в режим генерции фемтосекундного СКИ. Однако, первые титан-сапфировые лазеры с диодной накачкой для достижения синхронизации мод дополнительно требовали размещения вспомогательного насыщающегося поглотителя в резонаторе, а увеличение мощности накачки за счет использования нескольких диодов не улучшало ситуацию, поскольку поляризационное некогерентное сложение пучков в случае титан-сапфира не эффективно, а геометрическое мультиплексирование пучков от нескольких диодов еще больше ухудшает параметр фокусируемости накачки [6–9].

Тем не менее в работе [10] керровская синхронизация мод была достигнута при выходной мощности всего 30 мВт и использовании двухсторонней накачки диодами мощностью 1.2 Вт каждый, а в [11] был продемонстрирован уровень мощности 450 мВт при накачке двумя диодами, излучающими 1.5 Вт каждый, что однако потребовало повышения тока накачки до 2.5 А по сравнению с номинальным значением 1.5 А.

Достигнутая в настоящее время мощность синие-зеленых лазерных диодов приблизилась к уровню 3 Вт, что позволяет получить стабильный режим синхронизации мод на керровской нелинейности в титан-сапфировых лазерах [12, 13], тем не менее проблема увеличения мощности диодной накачки остается актуальной для дальнейшего улучшения параметров таких лазеров.

Для решения этой проблемы нами разработан метод сведения лазерных пучков на основе спектрально-селективного изменения поляризации [14]. Для этой цели используются наборы двулучепреломляющих пластины с низкими потерями. Поляризация излучения на выходе такого мультиплексора остается практически линейной, а потери энергии не превышают 10%. Важным достоинством предложенной оптической схемы является сохранение яркости пучков отдельных диодов. Высокая энергетическая эффективность такого модуля связана с тем, что КПД используемых в нем диодов превышает 20%. Высокие яркостные и мощностные параметры таких устройств делают их привлекательными и для создания систем накачки других лазерных сред с широким спектром поглощения. На рис. 2 приведена фотография устройства диодной накачки, использующего данный метод. Такие модули

в зависимости от конфигурации типа и числа используемых в них лазерных диодов могут обеспечивать выходную мощность, превышающую 10 Ватт с длиной волны в диапазоне 440–470 нм. Также возможно использование лазерных диодов излучающих в других диапазонах.

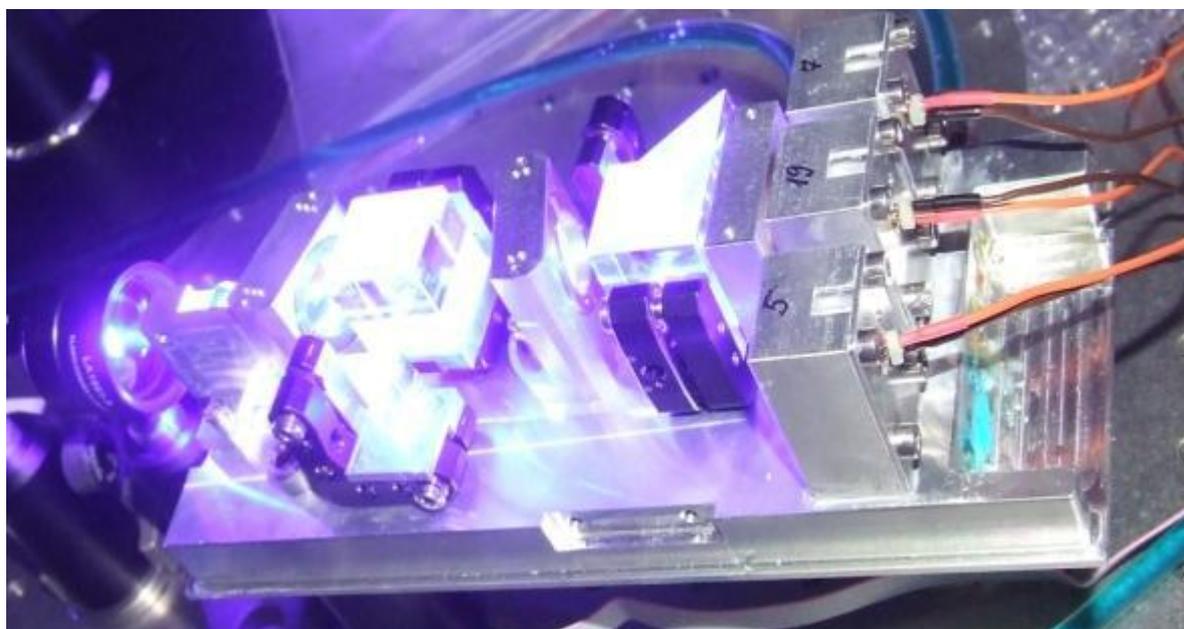


Рис. 2. Модуль диодной накачки, состоящий из трех диодных лазеров.

Экспериментальная демонстрация стабильной синхронизации мод в титан-сапфировом лазере с использованием разработанной схемы продольной мультидиодной накачки была успешно проведена с помощью комплекта «TiF-Kit-20», производимого ООО «Авеста-Проект» [15]. Оптическая схема этого комплекта была незначительно модифицирована для реализации двухсторонней накачки и компенсации астигматизма диодной накачки с помощью цилиндрических телескопов. Полученные нами при синхронизации мод в таком лазере значения длительностей СКИ (~30 фс) при использовании диодной накачки практически не отличались от значений при накачке неодимовым лазером с внутррезонаторной генерацией второй гармоники. При мощности диодной накачки порядка 7 Вт средняя выходная мощность фемтосекундного лазера находилась в пределах 100–300 мВт (в зависимости от юстировки).

Для оптимизации оптической схемы накачки нами была создана численная модель лазера СКИ с продольной накачкой, с помощью которой была рассчитана зависимость размера моды лазерного резонатора от длительности СКИ. На основе этой модели была проведена оценка влияния эффектов астигматизма и расходимости продольной накачки на ее энергетическую эффективность. Показано, что уменьшение энергетической эффективности диодной накачки не приводит к подавлению керровского механизма пассивной синхронизации мод.

В заключение в данном докладе изложены результаты разработки титан-сапфирового лазера с мощной мультидиодной накачкой. Экспериментально показано, что повышенная расходимость пучка диодной накачки не препятствует стабильному режиму керровской

синхронизации мод в таких лазерах. Предложена численная модель, находящаяся в согласии с экспериментальными результатами и пригодная для оптимизации энергетической эффективности продольной диодной накачки. Полученные результаты демонстрирует возможность создания компактных и энергоэффективных твердотельных фемтосекундных лазеров нового поколения. Обсуждены применения таких лазеров в науке, промышленности и медицине.

1. П.Г. Крюков, Квантовая электроника **31 (2)**, 95 (2001).
2. Т.В. Хэнш, Успехи физических наук **176 (12)**, 1368 (2006).
3. D. Strickland, G. Mourou, Optics communications **56 (3)**, 219 (1985).
4. L.E. Hargrove, R.L. Fork, M.A. Pollack, Appl. Phys. Lett. **5(1)**, 4 (1964).
5. A.W. Penney, Jr., and H.A. Heynau, Appl. Phys. Lett. **9(7)**, 257 (1966).
6. S. Nakamura et al., Applied Physics Letters **76.1**, 22 (2000).
7. P.W. Roth et al., Optics letters **34 (21)**, 3334 (2009).
8. P.W. Roth et al., Optics Letters **36 (2)**, 304 (2011).
9. P.W. Roth, D. Burns, A.J. Kemp, Optics Express **20 (18)**, 20629 (2012).
10. S. Sawai et al., Applied Physics Express **7 (2)**, 022702 (2014).
11. C.G. Durfee et al., Optics Express **20 (13)**, 13677 (2012).
12. K. Gürel et al., Optics express **23 (23)**, 30043 (2015).
13. S. Backus et al., Optics express **25 (11)**, 12469 (2017).
14. D.A. Kopylov et al., Laser Physics Letters **15 (4)**, 045001 (2018).
15. M. S. Pochechuev et al., JOSA B **35 (11)**, 2842 (2018).
16. С.П. Никитин и др., Фотоника **13 (6)**, 558 (2019).

# ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ВКР ЛАЗЕРЫ В ВИДИМОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

П.Г. Зверев

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

*E-mail: [zverev@lst.gpi.ru](mailto:zverev@lst.gpi.ru)*

Непрерывные, импульсные и квазинепрерывные твердотельные лазеры, работающие в видимом спектральном диапазоне, представляют большой интерес для практического использования в науке, технике, медицине, так как они могут быть компактными, эффективными и надежными. В зависимости от приложений диапазон требуемых мощностей таких лазерных систем простирается от десятков ватт до нескольких милливатт. В частности, для создания искусственной натриевой звезды для решения задач адаптивной астрономии требуется узкополосный источник излучения на длине волны 589 нм со средней мощностью 10–20 Вт. Для улучшения цветопередачи лазерных проекционных дисплеев большого размера предлагается увеличить число основных цветов с трех (RGB система) до пяти-семи, для чего требуются твердотельные лазеры мощностью до 10 Вт, работающие на определенных длинах волн от синего до красного.

Видимые твердотельные лазеры с выходной мощностью от нескольких милливатт до нескольких ватт используются в биомедицине, включая флуоресцентную визуализацию и конфокальную микроскопию, офтальмологию, анализ ДНК. Интересные применения связаны с дерматологией, так как, выбирая лазер с определенной длиной волны излучения, можно селективно воздействовать на тот или иной компонент кожи. В частности, желто-зеленое лазерное излучение может селективно воздействовать на дезоксигемоглобин, поскольку его поглощение в области 560 нм выше, и, таким образом, лечить аномальное расширение сосудов без повреждения верхних слоев кожи.

В видимом спектральном диапазоне доступно большое количество стандартных коммерческих твердотельных лазеров, использующих вторую и третью гармоники неодимовых лазеров, работающих на длинах волн в области 0.94 мкм, 1.04 ÷ 1.12 мкм, 1.3 ÷ 1.35 мкм, генерацию их суммарных частот. Высокая эффективность и компактность таких лазеров обеспечивается использованием современных диодных систем накачки. Существуют ап-конверсионные лазеры, работающие на верхних энергетических уровнях в редкоземельных ионах Pr<sup>3+</sup>, Er<sup>3+</sup>, Tm<sup>3+</sup>. Однако набор длин волн, получаемых в твердотельных лазерах с редкоземельными ионами и преобразованием частоты, ограничен.

Генерация стоксовых компонент при вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР) в кристаллах позволяет значительно расширить доступные длины волн твердотельных лазерных систем. ВКР-активные кристаллы обладают высокой концентрацией рассеивающих центров, а следовательно, и большим коэффициентом ВКР-усиления, широкой

областью прозрачности, хорошими теплофизическими характеристиками. Они позволяют создавать компактные эффективные, стабильные источники лазерного излучения [1]. В последнее время для ВКР были предложены десятки новых кристаллов: нитратов, вольфраматов, молибдатов, ванадатов, искусственный алмаз, обладающих высокими сечениями комбинационного рассеяния для ВКР-активных мод [2]. Широкий набор кристаллов позволяет получать различные стоксовы сдвиги от сотен до тысяч  $\text{см}^{-1}$ . Предложены сотни схем ВКР лазеров, работающих от ближнего УФ до среднего ИК спектральных диапазонов. Наиболее эффективными являются лазеры с внутривибраторным ВКР-преобразованием и ВКР-самопреобразованием, так как в этом случае все основное излучение преобразуется в стоксово.

При использовании в качестве основного излучения стандартного неодимового лазера с длиной волны 1.06 мкм возможны два подхода по ВКР преобразованию для получения излучения в видимой спектральной области. В первом случае сначала получают ВКР преобразование в требуемую стоксову компоненту, а потом используют удвоение частоты или генерацию суммарной частоты основного и стоксова излучения. Другая возможность – ВКР преобразование излучения второй или третьей гармоник стандартных неодимовых лазеров. В последнем случае система получается более простая и предсказуемая.

Известно, что коэффициент ВКР усиления растет с увеличением частоты лазерного излучения [3]. Переход в видимый спектральный диапазон может значительно повысить эффективность и надежность ВКР преобразователей. Вместе с тем пропускание в ближней УФ области в кристаллах ограничено фундаментальным поглощением. При возбуждении ВКР в видимом спектральном диапазоне возникают сопутствующие нелинейные явления: двухфотонного поглощения, нелинейной рефракции, самофокусировки, наведенного поглощения.

В докладе обсуждаются схемные решения и представлены параметры созданных твердотельных ВКР лазеров в видимом спектральном диапазоне. Проведен анализ ВКР-активных кристаллов с точки зрения ширины запрещенной зоны и коэффициента двухфотонного поглощения. Установлено, что кальцит и  $\text{BaWO}_4$  обладают максимальной среди ВКР-активных кристаллов шириной запрещенной зоны 5.9 и 5.8 Эв, соответственно, что приводит к минимальным значениям двухфотонного поглощения в этих кристаллах и свидетельствует об их перспективности для ВКР лазеров в видимом спектральном диапазоне.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-02-00723.

1. Т.Т. Басиев, В.В. Осико, Успехи химии **75** (10), 939 (2006).
2. Т.Т. Basiev et al., Optical Materials **11**, 307 (1999).
3. V.A. Lisinetskii et al., Laser Phys. Lett. **2**, 396 (2005).

# ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ В НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛАХ – КРИТИЧНЫЕ И НЕКРИТИЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ

С.Г. Гречин<sup>1</sup>, П.П. Николаев<sup>2</sup>, В.В. Туморин<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>ООО «Неофотоника», Санкт-Петербург

E-mail: [S.G.Grechin@mail.ru](mailto:S.G.Grechin@mail.ru)

В работе представлены результаты анализа реализации некритичных процессов по углам, длине волны, и температуре в диапазоне прозрачности кристаллов. Рассматривается формирование излучения при генерации гармоник, суммарных частот и генерации разностных частот, параметрической генерации и усиления от видимого до ТГц диапазона длин волн. Анализ основан на предложенном в [1, 2] методе описания дисперсионной зависимости основного параметра кристалла  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2) = (d_{\text{eff}})^2/n_1n_2n_3$ .

Показано, что особенностью некоторых двухосных кристаллов является то, что максимальная величина коэффициента эффективной нелинейности имеет место не в главных плоскостях кристалла (рис.1). Это необходимо учитывать при решении задач оптимизации преобразователей.

На примере распределений  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2)$  показано, что изолинии распределения характеризуют заданное значение  $FOM_2$ , которому точно соответствует угол синхронизма. В большинстве кристаллов на дальней границе диапазона прозрачности изолинии могут быть касательными к линиям  $(\lambda_3)^{-1} = (\lambda_1)^{-1} + (\lambda_2)^{-1}$ . Это показывает, что возможно параметрическое усиление и генерация широкополосного излучения

Приведены результаты распределений  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2)$  для формирования ТГц излучения (рис.2), из которых следует, что существуют оптимальные комбинации длин волн входного излучения, с которыми возможно получение максимальной величины коэффициента эффективной нелинейности.

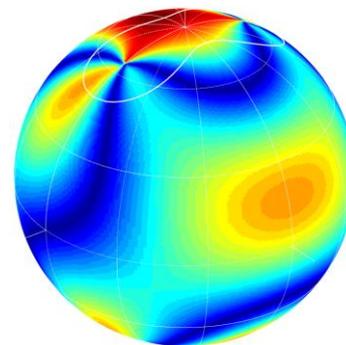


Рис.1. ГВГ на 1.064 мкм в BiVO.

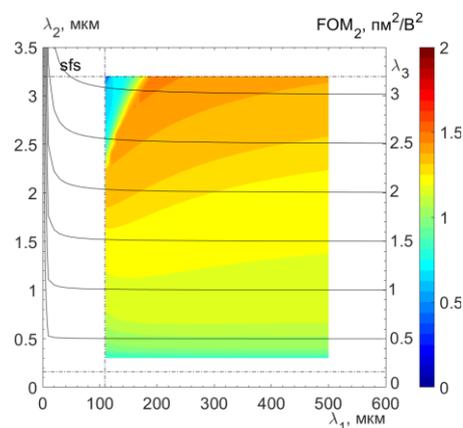


Рис.2. Распределение  $FOM_2$  для sfs типа в кристалле BiVO при формировании ТГц излучения.

Работа поддержана грантом РФФИ №19-02-00294.

1. Ю.М. Андреев и др., Квантовая электроника **46**, 33 (2016).
2. Ю.М. Андреев и др., Квантовая электроника **46**, 995 (2016).

## ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ ОПТИЧЕСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ

А.М. Калашникова

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

В 1996 году в работе [1] было экспериментально показано, что воздействие фемтосекундных лазерных импульсов на ферромагнитный металл Ni приводит к сверхбыстрому размагничиванию, т.е. разрушению намагниченности за время менее 1 пикосекунды. Это наблюдение дало толчок к зарождению и бурному развитию новой области в физике конденсированного состояния – фемтомагнетизму [2,3], в рамках которого изучается динамика намагниченности на пико- и субпикосекундных временах и разрабатываются, например, новые пути реализации быстрой и энергоэффективной магнитной записи [4,5].

В рамках лекции мы обсудим сверхбыстрые процессы, происходящие в магнитных металлах и диэлектриках под действием фемтосекундных лазерных импульсов. Мы рассмотрим основные фемтомагнитные явления в металлах и диэлектриках, такие как уже упоминавшееся сверхбыстрое размагничивание [1], обратные магнитооптические эффекты [6], изменение магнитной анизотропии [7,8], и обсудим на базовом уровне основные теоретические представления об этих явлениях.

В заключение мы рассмотрим полностью оптическое переключение намагниченности в ферримагнетике одиночными фемтосекундными лазерными импульсами без приложенного магнитного поля [4].

Ряд результатов, представленных в лекции, получен при поддержке грантов РФФИ № 18-02-00824, № 19-52-12065 и РНФ № 16-12-10485.

1. E. Beaurepaire, J.-C. Merle, A. Daunois, J.-Y. Bigot, Phys. Rev. Lett. **76**, 4250 (1996).
2. A. Kirilyuk, A.V. Kimel, Th. Rasing, Rev. Mod. Phys. **82**, 2731 (2010).
3. A.V. Kimel et al., Phys. Rep. **852**, 1 (2020).
4. K. Vahaplar et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 117201 (2009).
5. A. Stupakiewicz et al., Nature **542**, 71 (2017).
6. А.М. Калашникова, А.В. Кимель, Р.В. Писарев, УФН **58**, 969 (2015).
7. L.A. Shelukhin et al., Phys. Rev. B. **97**, 014422 (2018).
8. N.E. Khokhlov et al., Phys. Rev. Appl. **12**, 044044 (2019).

## КРИСТАЛЛЫ BGS И BGSE ДЛЯ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ

С.Г. Гречин<sup>1</sup>, Д.Г. Кочиев<sup>1</sup>, П.П. Николаев<sup>2</sup>, В.В. Туморин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*  
<sup>2</sup>*ООО «Неофотоника», Санкт-Петербург*  
*E-mail: [S.G.Grechin@mail.ru](mailto:S.G.Grechin@mail.ru)*

Представлены результаты анализа функциональных возможностей новых перспективных двухосных полупроводниковых кристаллов BGS ( $\text{BaGa}_4\text{S}_7$ ) и BGSe ( $\text{BaGa}_4\text{Se}_7$ ) для различных задач нелинейно-оптического преобразования частоты.

Кристаллы имеют диапазон прозрачности от видимого до среднего ИК диапазонов, и первые проведенные исследования оптических и нелинейных свойств кристаллов показали большие потенциальные возможности их для решения задач преобразования частоты. Первые проведенные экспериментальные исследования параметрических генераторов при накачке в ближнем ИК диапазоне принципиально подтвердили эту возможность. Но эти результаты получены для некоторых частных случаев. Необходим полный анализ возможностей кристаллов.

В этой работе представлены результаты комплексного анализа функциональных возможностей кристаллов BGS ( $\text{BaGa}_4\text{S}_7$ ) и BGSe ( $\text{BaGa}_4\text{Se}_7$ ) для всех задач преобразования частоты – генерации гармоник и суммарных частот, разностных частот, параметрической генерации и усиления. Анализ базируется на методе, предложенном в [1, 2]. Определены комбинации длин волн, с которыми могут быть получены максимальные эффективности преобразования; нечувствительные по углам и длине волны синхронизмы; оптимальные углы среза кристаллов для получения максимального диапазона перестройки параметрических генераторов; длины волн, с которыми может быть получено усиление широкополосного лазерного излучения.

Показана возможность генерации суммарных и разностных частот с кристаллом BGSe излучения лазера на  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$  с перестройкой по длине волны. Показано, что при различных углах среза может быть получено как узкополосное, так и широкополосное излучение сигнальной волны. Максимальная ширина спектра может быть получена в длинноволновой области спектра. Определен диапазон перестройки по длине волны с минимальной угловой перестройкой при использовании этого лазерного источника.

Работа поддержана грантом РФФИ №19-02-00294.

1. Ю.М. Андреев и др., Квантовая электроника **46**, 33 (2016).
2. Ю.М. Андреев и др., Квантовая электроника **46**, 995 (2016).

## ВЛИЯНИЯ ВИННОЙ КИСЛОТЫ НА РОСТ КРИСТАЛЛОВ KDP

В.В. Грибко, А.П. Прохоров

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

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

Кристаллы группы KDP (DKDP, ADP) широко используются в лазерной технике в качестве электрооптических элементов. Существует много работ о влиянии примесей на рост кристаллов. Известно, что органические примеси в кристаллах группы KDP приводят к уменьшению их лазерного пробоа. Однако в работе [1] приведены результаты положительного влияния примесей карбоновых кислот (например, муравьиной кислоты) на нелинейно-оптические и диэлектрические свойства кристаллов KDP.

В связи с этим нами были проведены исследования влияния винной кислоты на нормальную скорость роста ( $R$ ) граней призмы (100) в растворах KDP.

Измерение нормальной скорости роста грани (100) кристаллов KDP проводилось на поляризационно-интерференционной установке [2]. Данная установка позволяет измерять скорость роста кристаллов с двулучепреломлением, определять температуру насыщения и «мертвую зону» ( $T_d$ ) растворов. Погрешность измерения отклонения скорости роста граней кристалла KDP составляет  $\sim 0.02$  мкм.

Исследуемые растворы готовили из деионизированной воды с сопротивлением 21.2 МОм, стехиометрической соли KDP фирмы ProChem и винной кислоты (Реахим). После приготовления стехиометрического раствора KDP с температурой насыщения  $T = 50$  °С его фильтровали. Далее раствор делился на порции. В первую порцию винная кислота не добавлялась, вторая и третья содержали 0.25 и 0.5 мас. % винной кислоты. Для гомогенизации растворов их перемешивались при 60 °С в течение 8 часов.

По экспериментальным зависимостям скорости роста можно говорить о степени влияния винной кислоты на растворы KDP. Полученные данные показывают, что добавление винной кислоты в раствор приводит к увеличению мертвой зоны, что является негативным фактором для роста кристаллов KDP. Установлено, что добавление винной кислоты в растворах KDP более 0.5 мас.% приводит к непригодности раствора для выращивания в нем кристаллов.

1. M. Anis et al., Phys. B. **449**, 61 (2014).
2. V.I. Bespalov et al., Int. Col. of crystal Growth **17**, 150 (1988).

# ИК ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ИОНОВ $\text{Er}^{3+}$ и $\text{Tm}^{3+}$ ВО ФТОР- И ФТОРХЛОРГАФНАТНЫХ СТЕКЛАХ

С.Х. Батыгов<sup>1</sup>, М.Н. Бреховских<sup>2</sup>, Л.В. Моисеева<sup>1</sup>, А.В. Попов<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва

E-mail: [lmois@lst.gpi.ru](mailto:lmois@lst.gpi.ru)

Известно, что многофононные потери в ИК диапазоне во фторидных стеклах примерно на порядок меньше, чем в кварцевом стекле, некоторые излучательные переходы РЗ ионов, не проявляющиеся в оксидных матрицах, реализуются во фторидных стеклах. С целью создания активных оптических сред для лазеров среднего ИК диапазона синтезированы и исследованы фторгафнатные стекла в системе  $\text{HfF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$  (НВЛАН) с частичным замещением анионов фтора хлором, легированных  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Tm}^{3+}$ .

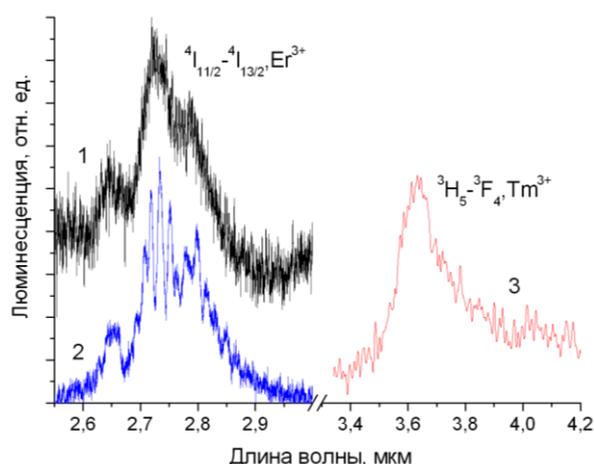


Рис. 1. Спектры люминесценции  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Tm}^{3+}$  в  $59\text{HfF}_4\cdot 20\text{BaF}_2\cdot 2\text{LaF}_3\cdot 2\text{AlF}_3\cdot 17\text{NaF}$  (1) и  $59\text{HfF}_4\cdot 15\text{BaCl}_2\cdot 5\text{BaF}_2\cdot 2\text{LaF}_3\cdot 2\text{AlF}_3\cdot 17\text{NaF}$  (2, 3).

Спектры люминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  в области 2.6–2.9 мкм (рис. 1, спектры 1 и 2) получены как для фторидного стекла, так и для фторидхлоридного стекла при возбуждении на уровень  $^4\text{I}_{9/2}$ . Для фторидхлоридного стекла удалось зарегистрировать спектр люминесценции ионов  $\text{Tm}^{3+}$  на переходе  $^3\text{H}_5 \rightarrow ^3\text{F}_4$  в спектральной области 3.5–4.0 мкм при возбуждении в уровень  $^3\text{H}_4$  (рис. 1, спектр 3). Люминесценция на этом переходе для аналогичного фторидного стекла не наблюдалась. В лучших образцах фторидхлоридных стекол, легированных 0.5 и 1.0 ат. %  $\text{Er}^{3+}$ , концентрационное тушение с уровня  $^4\text{I}_{11/2}$  практически незаметно, а время жизни этого уровня во фторидхлоридном стекле на 30% выше, чем в аналогичном фторидном стекле. Однако следует заметить, что воспроизводимость спектроскопических параметров во фторидхлоридных стеклах хуже, чем во фторидных стеклах, что, скорее всего, связано с недостаточно совершенной методикой их синтеза.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОФ РАН и ИОНХ РАН в области фундаментальных научных исследований и гранта РФФИ № 18-03-00149.

## ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ $Y^{3+}$ НА СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ $Ho^{3+}$ В КРИСТАЛЛЕ $CaF_2$

О.К. Алимов, М.Е. Дорошенко, А.В. Нехороших, А.Г. Папашвили,

К.А. Пирпоинт

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

*E-mail: [kmartynova19@gmail.com](mailto:kmartynova19@gmail.com)*

Кристаллы фторидов, легированных гольмием, являются перспективными для использования их в качестве лазерной активной среды в области 2 мкм [1–3]. Одной из ключевых особенностей фторидов, легированных редкоземельными ионами, является формирование в них оптических центров с различной симметрией локального окружения. Центровой состав кристалла определяет его спектроскопические и генерационные свойства. Поэтому исследование спектральных свойств отдельных центров гольмия, особенно на лазерном двухмикронном переходе  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ , является важной научной задачей. Недавние исследования кристаллов  $CaF_2:Ho^{3+}(0.1\%)$  позволили выделить на переходе  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  три типа оптических центров с временами жизни 10.7 мс, 18 мс и 26 мс.

Другой задачей является исследование возможности управления центровым составом, для чего в ряде случаев используют примеси оптически неактивных редкоземельных ионов, например  $Y^{3+}$ . Такое легирование в случае с  $CaF_2:Y, Nd$  [4] и  $CaF_2:Y, Tm$  [5] может играть положительную роль, уменьшая вероятность тушащих процессов, таких как кросс-релаксация. Поэтому целью данной работы являлось исследование влияния соактивации ионами  $Y^{3+}$  на процессы образования и спектроскопические свойства различных оптических центров ионов  $Ho^{3+}$  в кристаллах  $CaF_2$  на переходе  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  и сравнение их с кристаллами, не содержащими иттрия. Методами низкотемпературной время разрешенной селективной лазерной спектроскопии были исследованы кристаллы  $CaF_2-YF_3$  (0.1 и 1%), легированные ионами  $Ho^{3+}$  (0.1%). Было выделено как минимум два типа оптических центров. Было показано, что кластеризованный центр ионов гольмия с временем жизни 10.7 мс формируется во всех образцах, тетрагональный центр не наблюдается даже при малых концентрациях иттрия (0.1 мол.%), а время жизни самого долгоживущего центра (26 мс) с увеличением концентрации иттрия до 1% увеличивается до 32 мс.

1. X. Duan et al., *Infrared Phys. Technol.* **103**, 103071 (2019).
2. X.M. Duan et al., *Laser Phys. Lett.* **15**, 09582 (2018).
3. M. Nemes et al., *Opt. Lett.* **42** (9), 1852 (2017).
4. S. Pang et al., *Laser Phys. Lett.* **15**, 055802 (2018).
5. J. Ding et al., *Int. J. Opt.* **2018**, 8592359 (2018).

# ДВУХВОЛНОВОЙ ПГС НА КРИСТАЛЛЕ КТР ДЛЯ СРЕДНЕГО ИК СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА

П.Г. Зверев<sup>1,2</sup>, А.А. Сироткин<sup>2</sup>, И.В. Смирнов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский энергетический институт, Москва

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

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

Двухволновые лазеры с последующей генерацией разностной частоты в нелинейном кристалле представляют большой интерес с целью создания эффективных, надежных и компактных источников терагерцового и дальнего ИК спектрального диапазона [1]. В настоящей работе исследован перестраиваемый двухволновой лазер на основе коллинеарной параметрической генерации света (ПГС) в кристалле КТР, тип II (eoe), генерирующий излучение в среднем ИК спектральном диапазоне с взаимно ортогональной поляризацией.

В качестве источника накачки рассматривались лазеры на кристалле  $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$  с диодной накачкой, работающие в режиме модулированной добротности на длинах волн 1064 и 1342 нм. В этом случае получается двухволновая генерация в области 1.9–2.4 мкм и 2.3–3.0 мкм соответственно (рис. 1). Видно, что во втором случае генерация даже в случае вырожденного ПГС получается в области 2.69 мкм, что позволяет повысить энергетическую эффективность получения терагерцового излучения путем генерации разностной частоты. В экспериментах использовался кристалл КТР размером  $6 \times 6 \times 15$  мм, вырезанный под углом  $51.5^\circ$  к оси Z в плоскости XZ. Использовалась внутривибраторная схема накачки ПГС генератора. Перестройка длины генерации и разности частот между генерируемыми компонентами осуществлялись поворотом кристалла КТР. Спектральная ширина отдельных спектральных компонент составляла 0.7 нм. Суммарная максимальная энергия в сигнальной и холостой волне достигала 1.2 мДж при накачке 1064 нм. Обсуждаются пути повышения эффективности данного лазера.

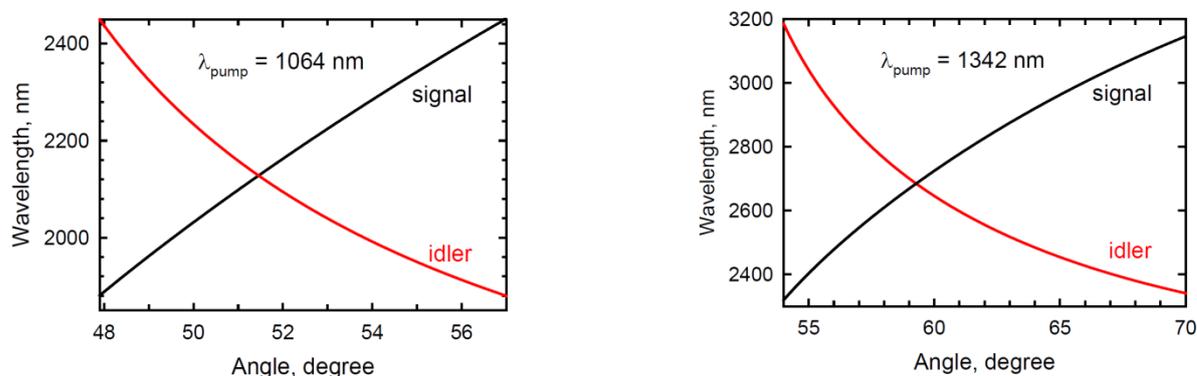


Рис. 1. Перестроечные кривые ПГС на кристалле КТР при коллинеарном взаимодействии при накачке излучением с длиной волны 1064 нм (1) и 1342 нм (2).

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект №17-02-00518.

1. V. Petrov, Progr. Quantum Electron **42**, 1 (2015).

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ГАЛОГЕНИДОВ СЕРЕБРА И ТАЛЛИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ

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

Среди известных оптических материалов для среднего и дальнего инфракрасного диапазона галогениды серебра и одновалентного таллия выделяются своим широким диапазоном пропускания 0.4–60.0 мкм и более (для кристаллов), 2.0–25.0 мкм (для световодов) без окон поглощения, малыми оптическими потерями, пластичностью, негигроскопичностью, фото- и радиационной стойкостью, высокой оптической и механической прочностью [1]. В связи с этим применение оптических изделий на основе галогенидов серебра и таллия перспективно для лазерных технологий.

В данной работе впервые было выполнено моделирование линзы на основе кристалла состава 6 мол. %  $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$  в  $\text{AgBr}$ , установленной внутри лазерного резонатора, для работы на длине волны 10.6 мкм. Моделирование было направлено на исследование стабильности работы резонатора при различных расстояниях линзы от зеркал. Результаты моделирования сравнивались с математическим методом матриц переноса излучения (ABCD-метод), как показано на рис. 1. Рассогласование решений связано с ограниченным числом отражений излучения в модели, в то время как ABCD-метод решает задачу для бесконечно большого количества отражений. Тем не менее оптимальные расстояния между зеркалами и линзой были получены и составили 0.3–0.4 м, что является достаточным для лазерной техники.

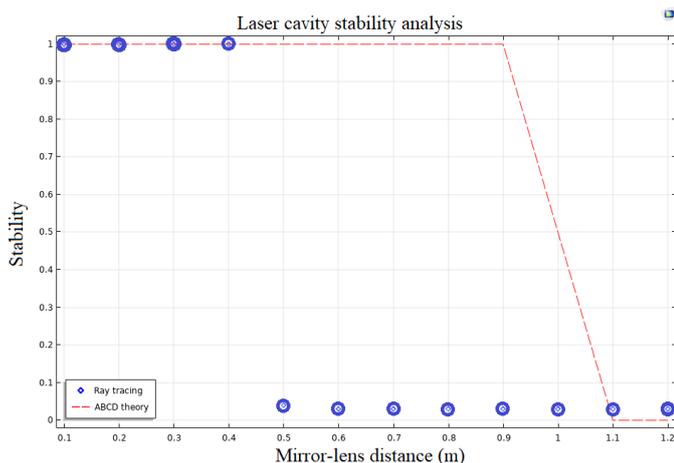


Рис. 1. Сравнение результатов моделирования и расчета стабильности резонатора.

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

1. A.S. Korsakov et al., J. of Opt. Tech. **84**, 12 (2017).

# ВЛАГОСТОЙКИЕ ВИЗУАЛИЗАТОРЫ ДЛЯ НАСТРОЙКИ ИНФРАКРАСНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ С БОЛЬШОЙ АПЕРТУРОЙ ПУЧКА

С.В. Гущин<sup>1,2</sup>, А.М. Кузьмин<sup>1</sup>, А.А. Ляпин<sup>1,2</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, М.В. Чернов<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>ООО «Фотонные Технологические Системы», Саранск

E-mail: [chernov\\_maxim@inbox.ru](mailto:chernov_maxim@inbox.ru)

В настоящее время лазеры инфракрасного (ИК) спектрального диапазона длин волн нашли широкое применение в лидарах, дальномерах и специальной технике. Для юстировки и настройки этих приборов в полевых условиях можно использовать визуализаторы лазерного излучения способные преобразовывать невидимое для человеческого глаза инфракрасное излучение в люминесценцию видимого диапазона длин волн (рис. 1). Существующие коммерческие образцы визуализаторы имеют активную зону детектирования небольших размеров (максимальная площадь 500 см<sup>2</sup>) и в основном работают только в лабораторных условиях.



Рис. 1. Визуализаторы для настройки лазерных лидаров, дальномеров и специальной технике в полевых условиях.

В настоящей работе получены влагостойкие люминесцентные полимерные материалы, из которых изготовлены визуализаторы ИК излучения площадью 1 м<sup>2</sup>, обеспечивающие визуализацию этого излучения в различных погодных условиях. Изучены структурные, физические, механические и спектрально-люминесцентные свойства данных материалов. Также определены следующие характеристики визуализаторов: спектральный диапазон работы, кривая спектральной чувствительности в данном диапазоне, порог разрушения.

Проведены испытания разработанных визуализаторов в полевых условиях при различных погодных условиях. Проведенное исследование показало, что разработанные влагостойкие визуализаторы могут быть использованы для настройки и юстировки лазерных приборов с большой апертурой пучка в полевых условиях.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВЛК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХМИКРОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С.А. Артемов, А.Н. Беляев, О.С. Бушукина, С.В. Костин, А.А. Ляпин,  
П.А. Рябочкина, А.Д. Таратынова, С.А. Хрущалина

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

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

Варикозное расширение вен входит в число 10 самых распространенных заболеваний в мире. В настоящее время появились малоинвазивные методы лечения, одним из которых является эндовазальная лазерная коагуляция. Данный метод основан на тепловом эффекте, возникающем вследствие избирательного поглощения излучения различных длин волн биологической тканью. Известные на данный момент аппараты работают с использованием длин волн 0.81; 0.98 мкм, что соответствует полосе поглощения гемоглобина. Также используется длина волны 1.55 мкм, соответствующая спектру поглощения воды. Высокие значения мощности лазерного излучения установок – 15–20 и 10–12 Вт соответственно, приводят к осложнениям, связанным с повреждением околососудистых тканей. Однако в настоящее время выполнены работы, посвященные реализации ЭВЛК с применением лазеров, генерирующих излучение в двухмикронной области спектра, которые свидетельствуют о факте снижения мощности, требуемой для осуществления коагуляции вен.

В данный момент актуальной задачей является разработка комплексного подхода, позволяющего снизить мощность лазерного излучения, используемого для проведения ЭВЛК и, как следствие, минимизировать повреждение перивенозных тканей. Такой способ может заключать в себе методы компьютерного моделирования процесса ЭВЛК и сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными.

В соответствии с этим в настоящей работе выполнено моделирование нагревания стенок вены и перивенозных тканей в процессе ЭВЛК с использованием двухмикронного излучения и сравнение полученных данных с результатами экспериментов *in-vivo* на овцах эдильбаевской породы, осуществленных ранее посредством излучения  $\text{LiYF}_4:\text{Tm}$  лазера с длиной волны 1.910 мкм и мощностями 1.5 Вт, 3 Вт и 4 Вт [1].

Моделирование процесса ЭВЛК осуществлялось в программном пакете COMSOL Multiphysics 5.5 с использованием модуля «Теплопередача». Полученные результаты коррелируют с данными экспериментов *in-vivo* по ЭВЛК.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ\_МК №18-29-20039.

1. S.A. Artemov et al., *Lasers Med Sci.* **35**, 867 (2020).

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ  
ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ho<sub>2</sub>O<sub>3</sub> НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХМИКРОННОЙ  
ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

С.А. Артемов<sup>1</sup>, Е.А. Артемов<sup>2</sup>, В.П. Войцицкий<sup>2</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>2</sup>,  
П.А. Рябочкина<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия  
E-mail: [sergey560113@gmail.com](mailto:sergey560113@gmail.com)*

В работах [1–4] мы сообщали о двухмикронной лазерной генерации на переходе  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  ионов Ho<sup>3+</sup> кристаллов ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ho<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при резонансной накачке на уровень  $^5I_7$  этих ионов непрерывным [1,2], импульсным [3] излучением лазера на кристалле LiYF<sub>4</sub>:Tm и туллиевым волоконным лазером [4].

Однако при проведении генерационных экспериментов выявлено, что при увеличении плотности мощности накачки и соответственно лазерной генерации как в непрерывном, так и импульсном режимах, наблюдается прогорание активных элементов из кристаллов ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ho<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

В ходе исследований, выполненных в настоящей работе, показано, что торцы активных элементов из кристаллов ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ho<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, которые подвергались механохимическому травлению (МХТ), прогорали при более высоких значениях плотности мощности накачки и более высоких значениях мощности непрерывной и импульсной генерации по сравнению с аналогичными значениями для активных элементов из этих кристаллов, торцы которых не подвергались МХТ.

Также в докладе обсуждается природа дефектов, являющихся причиной прогорания торцов активных элементов из кристаллов ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ho<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при увеличении плотности мощности накачки и лазерной генерации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №18-29-20039.

1. М.А. Borik et al., Quantum Electronics **43**, 838 (2013).
2. Р.А. Ryabochkina et al., Laser Phys. Lett. **14**, 055807 (2017).
3. П.А. Рябочкина и др., Квантовая электроника **50**, 8 (2020).
4. А.Н. Chabushkin et al., Laser Physics **28**, 3 (2018).

# LASER MATERIALS AND TECHNOLOGY

## HIGH-POWER MID-INFRARED QUANTUM-CASCADE LASERS

G.S. Sokolovskii

*Ioffe Institute of RAS, Saint-Petersburg, Russia*

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

Quantum-cascade lasers (QCL) attract great attention of the research community since the first publication proposing the principle in 1971 [1], and especially since the first realization in 1994 [2]. This attention results in more than 8.5 thousand publications with about 150 thousand citations according to Web of Science. To date, the spectral coverage of QCLs is extremely wide ranging from mid-infrared to terahertz. The main QCL feature distinguishing them from the conventional semiconductor lasers is their unipolarity resulting in the photon emission in the transition of an electron in the conduction band from one quantum level to another instead of recombination of an electron-hole pair. Unfortunately, QCL structures are extremely complicated for practical implementation. The complication comes both from the number of layers that is two orders of magnitude larger than that in a «conventional» semiconductor laser and from the need to maintain the layer homogeneity (i.e., identity of quantum cascades) during long-time epitaxial growth. This complication was the reason for significant lag of Russian science in research and development of QCLs, which has been significantly reduced in recent years. In addition to a review of the state of the art in high-power mid-infrared quantum cascade lasers, this report will discuss the results of studies of QCL, all the technological operations for the creation of which were performed in our country. Among these results, one should note demonstration of the output laser power in excess of 10 W at a wavelength in 4.6  $\mu\text{m}$  region [3], as well as a record-high output power exceeding 13 W achieved in the QCL of the spectral range of 8  $\mu\text{m}$  [4]. In addition, we will discuss the demonstration of laser generation at elevated temperatures (up to +65°C) [5], as well as single-frequency generation with side modes suppression of more than 25 dB in a QCL with U-shaped resonator [6].

This research is supported by the Russian Ministry of science and education (project ID: RFMEFI60719X0318).

1. R. F. Kazarinov, R.A. Suris, Semiconductors **5**, 797 (1971).
2. J. Faist et al., Science **264**, 553(1994).
3. V.V. Dudelev et al., Quantum Electronics **50**, (2020).
4. V.V. Dudelev et al., Advanced Photonics Congress (2020).
5. V.V. Dudelev et al., Physics of the Solid State **60(11)**, 2291 (2018).
6. A.V. Babichev et al., Tech. Phys. Lett. **45(4)**, 398 (2019).

# SOLIS STATE RAMAN LASERS IN VISIBLE SPECTRAL REGION. PROBLEMS AND PERSPECTIVES

P.G. Zverev

*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: [zverev@lst.gpi.ru](mailto:zverev@lst.gpi.ru)*

Continuous-wave, pulsed, and quasi-continuous solid-state lasers operating in the visible spectral range are of great interest for practical use in science, technology, and medicine, as they can be compact, efficient, and reliable. Depending on the application, the range of required power of such laser systems ranges from tens of watts to several milliwatts. In particular, creating an artificial sodium star for adaptive astronomy requires a narrow-band radiation source at a wavelength of 589 nm with an average power of 10-20 W. To improve the color rendering of large-size laser projection displays, it is proposed to increase the number of primary colors from three (RGB system) to five or seven, which requires solid-state lasers with a power of up to 10 W, operating at certain wavelengths from blue to red.

Visible solid-state lasers with output power from several milliwatts to several watts are used in biomedicine, including fluorescent imaging and confocal microscopy, ophthalmology, and DNA analysis. Interesting applications are related to dermatology, since choosing a laser with a certain wavelength of radiation, you can selectively affect a particular component of the skin. In particular, yellow-green laser radiation can selectively affect deoxyhemoglobin, since its absorption in the region of 560 nm is higher, and thus treat abnormal vasodilation without damaging the upper layers of the skin.

In the visible spectral range, a large number of standard commercial solid-state lasers are available, which use the second and third harmonics of neodymium lasers operating at wavelengths in the range of 0.94  $\mu\text{m}$ , 1.04  $\div$  1.12  $\mu\text{m}$ , 1.3  $\div$  1.35  $\mu\text{m}$ , as well as their sum frequency generation. High efficiency and compactness of such lasers is provided by the use of modern diode pumping systems. There are up-conversion lasers operating at the upper energy levels in the rare earth ions  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ , and  $\text{Tm}^{3+}$ . However, the set of wavelengths obtained in solid-state lasers with rare-earth ions and their frequency conversion is limited.

The generation of Stokes components under stimulated Raman scattering (SRS) in crystals allows us to significantly expand the available wavelengths of solid-state laser systems. SRS-active crystals have a high concentration of scattering centers, and, consequently, large values of the Raman-gain coefficient, wide areas of transparency, and good thermal characteristics. They make it possible to create compact, efficient, stable sources of laser radiation [1]. Recently, dozens of new crystals have been proposed for SRS: nitrates, tungstates, molybdates, vanadates, and artificial diamond with high Raman cross-sections for SRS-active modes [2]. A wide set of crystals allows you to obtain various Stokes shifts from hundreds to thousands of  $\text{cm}^{-1}$ . Hundreds of schemes of Raman lasers operating from near-UV to mid-IR spectral ranges

were proposed. The most efficient are lasers with intra-cavity Raman and self-Raman conversion, since in this case all the fundamental radiation is converted to Stokes radiation.

When using the radiation of a standard neodymium laser with a wavelength of 1.06  $\mu\text{m}$  as a fundamental, two approaches for Raman conversion are possible to obtain radiation in the visible spectral region. In the first case, one obtains the Raman conversion to the required Stokes component, and then use frequency doubling or generating sum frequency of the fundamental and Stokes radiation. Another possibility is Raman conversion of the second or third harmonics of standard neodymium lasers. In the latter case, the system is simpler and more predictable.

It is known that the value of the Raman gain increases with increasing frequency of laser radiation [3]. Switching to the visible spectral range can significantly improve the efficiency and reliability of Raman converters. However, optical transmission in the near-UV spectral region in crystals is limited by fundamental absorption. When the SRS is excited in the visible spectral range, accompanying nonlinear phenomena occur: two-photon absorption, nonlinear refraction, self-focusing, and photo-induced absorption.

The report discusses optical scheme solutions and presents the parameters of the developed solid-state Raman lasers in the visible spectral range. The analysis of SRS-active crystals in terms of the band gap and the two-photon absorption coefficient was performed. It was found that calcite and  $\text{BaWO}_4$  have the maximum value of the band gap of 5.9 and 5.8 eV among SRS-active crystals, respectively, which leads to minimal values of two-photon absorption in these crystals and indicates their prospects for Raman lasers in the visible spectral range.

This work was performed with partial financial support from the RFBR, project number 19-02-00723.

1. T.T. Basiev, V.V. Osiko, *Russ. Chem. Rev.* **75(10)**, 847 (2006).
2. T.T. Basiev et al., *Optical Materials* **11**, 307 (1999).
3. V.A. Lisinetskii et al., *Laser Phys. Lett.* **2**, 396 (2005).

# FUNCTIONAL CAPABILITIES OF FREQUENCY CONVERSION IN NONLINEAR CRYSTALS – CRITICAL AND NON-CRITICAL PROCESSES.

S.G. Grechin<sup>1</sup>, P.P. Nikolaev<sup>2</sup>, V.V. Tumorin<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*LLC Neophotonics, Saint-Petersburg, Russia*

*E-mail: S.G.Grechin@mail.ru*

The paper presents the results of an analysis of the realization of angular, wavelength, and temperature non-critical processes in the transparency range of crystals. The formation of radiation is considered for the generation of harmonics, sum and difference frequencies, parametric generation and amplification from the visible to THz wavelength range. The analysis is based on the method proposed in [1, 2] for describing the dispersion dependence of the main crystal parameter  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2) = (d_{\text{eff}})^2/n_1n_2n_3$ .

It has been shown that a feature of some biaxial crystals is that the maximum effective nonlinearity coefficient does not occur in the principal planes of the crystal (fig. 1). This must be taken into account when solving frequency conversion optimization.

On the example of distributions  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2)$  it is shown that the isolines of the distribution characterize a fixed value  $FOM_2$ , which exactly corresponds to the angle of phase matching. In most crystals, at the far boundary of the transparency range, the contours can be tangent to the lines  $(\lambda_3)^{-1} = (\lambda_1)^{-1} + (\lambda_2)^{-1}$ . This shows that parametric amplification and generation of broadband radiation is possible in this area.

From the presented results for the  $FOM_2$  distributions  $(\lambda_1, \lambda_2)$  for the generation of THz radiation (fig. 2) shows that there are not large area of optimal combinations of input radiation wavelengths with which the maximum value of the effective nonlinearity coefficient can be obtained.

This work was supported by RFBR grant No. 19-02-00294.

1. Yu.M. Andreev et al., *Quantum Electronics***46**, 33 (2016).
2. Yu.M. Andreev et al., *Quantum Electronics***46**, 995 (2016).

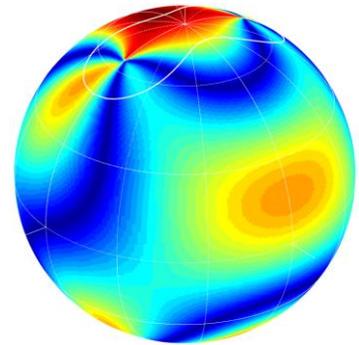


Fig. 1. SHG at 1.064 μm in BiBO.

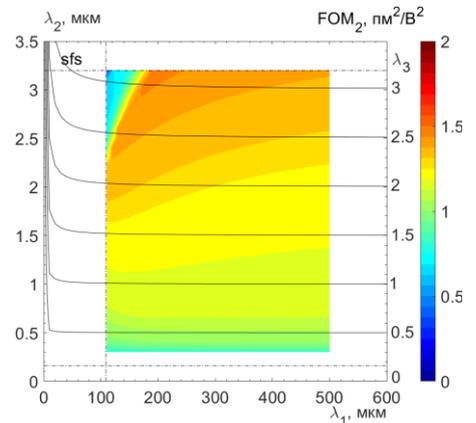


Fig. 2.  $FOM_2$  distribution for *sfs* type in a BiBO crystal for the THz radiation formation.

# BGS AND BGSE CRYSTALS FOR NONLINEAR OPTICAL FREQUENCY CONVERSION

S.G. Grechin<sup>1</sup>, D.G. Kochiev<sup>1</sup>, P.P. Nikolaev<sup>2</sup>, V.V. Tumorin<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*LLC Neophotonics, Saint-Petersburg, Russia*

*E-mail: S.G.Grechin@mail.ru*

The results of the analysis of the functional capabilities for new mid-IR biaxial semiconductor crystals BGS (BaGa<sub>4</sub>S<sub>7</sub>) and BGSe (BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub>) for different nonlinear optical frequency conversion processes are presented.

The crystals have a transparency range from visible up to 18 microns, and the first studies of the optical and nonlinear properties of crystals showed great potential for solution of frequency conversion tasks. The first experimental studies of parametric oscillators pumped in the near-IR range principally confirmed this possibility. But these results were obtained for some special cases. A complete analysis of the capabilities of crystals is needed.

This paper presents the results of a complex analysis of the functional capabilities for BGS (BaGa<sub>4</sub>S<sub>7</sub>) and BGSe (BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub>) crystals for all frequency conversion tasks – generation of harmonics and sum frequencies, difference frequencies, parametric generation and amplification. The analysis is based on the method proposed in [1, 2]. The obtained results determine the combinations of wavelengths at which: the maximum conversion efficiency and maximal gain for parametric amplification can be obtained; angular and wavelength noncritical phase matching is possible; optimal cut angles of crystals for obtaining the maximum tuning range of parametric generators; wavelengths with which amplification of broadband laser radiation can be obtained.

The possibility of generating the sum and difference frequencies with a BGSe crystal from a ZnSe:Fe<sup>2+</sup> laser with wavelength tuning is shown. It is shown that at different cutting both narrow-band and broad-band radiation of the signal wave can be obtained. The maximum spectral width can be obtained in the long wavelength region of the spectrum. The tuning range of wavelength with minimal angular tuning using this laser source is determined.

This work was supported by RFBR grant No. 19-02-00294.

1. Yu.M. Andreev et al., *Quantum Electronics* **46**, 33 (2016).
2. Yu.M. Andreev et al., *Quantum Electronics* **46**, 995 (2016).

# THE EFFECTS OF TARTARIC ACID ON KDP CRYSTAL GROWTH

V.V. Gribko, A.P. Prokhorov

*Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod, Russia*

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

Crystals of group KDP (DKDP, ADP) are widely used in laser technology as electro-optical elements: gates, modulators. Currently, there are many works on the effect of impurities on crystal growth. Usually, organic impurities in crystals lead to a decrease in their laser breakdown. However, in papers [1] shows the results of the positive effects of impurities of carboxylic acids on the nonlinear optical properties and dielectric crystals KDP.

In this connection, we performed studies of the effect of tartaric acid on the normal growth rate ( $R$ ) of the prism faces in KDP solutions.

The measurement of the normal growth rate of the (100) face of KDP crystals was carried out on a polarization-interference setup [2]. This installation allows to measure the growth rate of birefringent crystals, determine the saturation temperature and the «dead zone» ( $T_d$ ) of solutions. The measurement error of the growth deviation of KDP crystal faces is  $\sim 0.02 \mu\text{m}$ .

The studied solutions were prepared from deionized water with a resistance of 21.2 M $\Omega$ , stoichiometric salt of KDP firm ProChem, and tartaric acid (REACHIM).

After preparation of a stoichiometric KDP solution with a saturation temperature of  $T_s = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , it was filtered using two polymer filters with a PTFE membrane, and a pore size of  $0.1 \mu\text{m}$ . Next, the solution was divided into portions. In the first portion, tartaric acid was not added, the second and third contained 0.25 and 0.5 wt. % of tartaric acid. For homogenize the solutions, they were stirred at  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  for 8 hours.

According to the experimental dependences of the growth rate, we can speak about the degree of influence of tartaric acid on KDP solutions. It is shown that the addition of tartaric acid to the solution leads to an increase in the dead zone, which is a negative factor for the growth of KDP crystals. It is established that the addition of tartaric acid in KDP solutions of more than 0.5 wt. % leads to the unsuitability of the solution for growing crystals in it.

1. M. Anis et al., Phys. B. **449**, 61 (2014).
2. V.I. Bespalov et al., Int. Col. of crystal Growth **17**, 150 (1988).

# INFLUENCE OF $Y^{3+}$ IMPURITY ON SPECTROSCOPIC PROPERTIES OF $Ho^{3+}$ OPTICAL CENTERS IN $CaF_2$ CRYSTALS

O.K. Alimov, M.E. Doroshenko, A.V. Nekhoroshikh, A.G. Papashvili,

K.A. Pierpoint

*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: [kmartynova19@gmail.com](mailto:kmartynova19@gmail.com)*

Holmium doped fluoride crystals are promising laser active media for 2  $\mu\text{m}$  lasers [1–3]. One of the key features of rare-earth doped fluorides is the formation a number of optical centers with different local environment symmetries. The centers composition of a crystal determines its spectroscopic and lasing properties. Therefore, the study of the individual holmium centers spectral properties, especially at the  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  laser two-micron transition, is an important scientific problem. In recent studies of  $CaF_2:Ho^{3+}$  (0.1%) crystals three types of optical centers with lifetimes of 10.7 ms, 18 ms, and 26 ms were separated at the  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  transition.

Another task is to study the possibility of the centers composition controlling, for which, in some cases, optically inactive rare earth ions such as  $Y^{3+}$  are used. Such doping in the case of  $CaF_2:Y$ , Nd [4] and  $CaF_2:Y$ , Tm [5] can play a positive role, reducing the probability of quenching processes, such as cross-relaxation. Therefore, the aim of this work was to study the effect of  $Y^{3+}$  co-activation on the various  $Ho^{3+}$  optical centers formation processes and their spectroscopic properties in  $CaF_2$  crystals at the  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  transition by comparing the results with yttrium-free crystals. Using low-temperature time-resolved selective laser spectroscopy,  $CaF_2-YF_3$  (0.1 and 1%) crystals doped with  $Ho^{3+}$  (0.1%) were studied. At least two types of optical centers were identified. It was shown that the holmium ions clustered center with 10.7 ms lifetime is formed in all the samples, the tetragonal center is not observed even at low yttrium concentrations (0.1 mol.%), and the lifetime of the long-living center (26 ms) increases to 32 ms with an increase in yttrium concentration to 1%.

1. X. Duan et al., *Infrared Phys. Technol.* **103**, 103071 (2019).
2. X.M. Duan et al., *Laser Phys. Lett.* **15**, 09582 (2018).
3. M. Nemeč et al., *Opt. Lett.* **42** (9), 1852 (2017).
4. S. Pang et al., *Laser Phys. Lett.* **15**, 055802 (2018).
5. J. Ding et al., *Int. J. Opt.* **2018**, 8592359 (2018).

# TWO-WAVELENGTH OPO BASED ON KTP CRYSTAL FOR MID-IR SPECTRAL REGION

A.A. Sirotkin<sup>1</sup>, I.V. Smirnov<sup>1,2</sup>, P.G. Zverev<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>*Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia*

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

Two-wavelength laser with subsequent generation of the difference frequency in a nonlinear crystal are of great interest in order to create efficient, reliable and compact sources of terahertz and far-IR spectral regions [1]. In this report, a tunable two-wavelength laser based on collinear optical parametric oscillator (OPO) in a KTP crystal, type II (eoe), generating radiation in the mid-IR spectral region with mutually orthogonal polarization, is studied.

The diode-pumped YVO<sub>4</sub>:Nd<sup>3+</sup> lasers operating in the Q-switched mode at the wavelengths of 1064 nm and 1342 nm was considered as the pumping source. In this case, two-wavelength generation was obtained in the spectral range of 1.9–2.4 microns and 2.3–3.0 microns, respectively (fig. 1). It can be seen that in the second case, even in the case of a degenerate OPO, the oscillation is obtained in the region of 2.69 microns, which allows increasing the energy efficiency of obtaining terahertz radiation by a difference frequency generation.

The experiments used a 6×6×15 mm KTP crystal sample cut at an angle of 51.5° to the Z axis in the XZ plane. The intra-cavity pumping scheme of the OPO was used. The tuning of oscillation wavelengths and the frequency difference between them was performed by turning the KTP crystal. The spectral width of individual wavelength components was 0.7 nm. The total maximum energy in the signal and idler waves reached 1.2 mJ when pumping with 1064 nm. Possible ways to improve the efficiency of this laser are discussed in report.

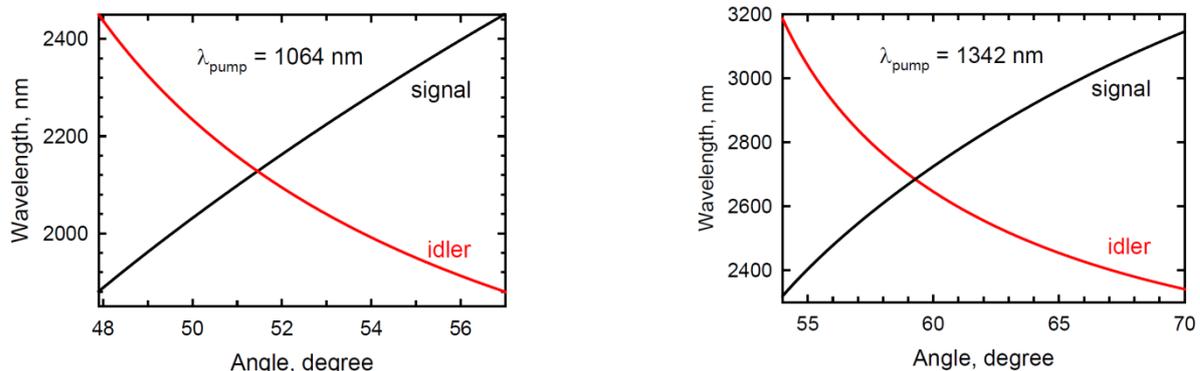


Fig.1. Tunable curves of OPO based on KTP crystal with collinear interaction under pumping with the radiation with the wavelength of 1064 nm (1) and 1342 nm (2).

This work was partly financially supported by Russian Foundation for Basic Research, project №17-02-00518.

1. V. Petrov, Progr. Quantum Electron **42**, 1 (2015).

## MODELING OF OPTICAL PRODUCTS BASED ON SILVER AND THALLIUM HALOGENIDES FOR LASER EQUIPMENT

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

Among the known optical materials for the mid- and far infrared ranges, silver and monovalent thallium halides are highlighted for their wide transmission range of 0.4–60.0  $\mu\text{m}$  and more (for crystals), 2.0–25.0  $\mu\text{m}$  (for optical fibers) without absorption windows, low optical losses, flexibility, non-hygroscopicity, photo and radiation resistance, high optical and mechanical strength [1]. In this regard, the use of optical products based on silver and thallium halides is promising for laser technologies.

In this work, for the first time, a lens based on a crystal with a composition of 6 mol.%  $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$  in  $\text{AgBr}$  mounted inside a laser cavity was simulated for operation at a wavelength of 10.6  $\mu\text{m}$ . The simulation was aimed at studying the resonator stability at various distances between the lens and the mirrors. The simulation results were compared with the mathematical method - Ray transfer matrix analysis (ABCD method), as shown in figure 1. The mismatch of solutions is associated with a limited number of radiation reflections in the model, while the ABCD method solves the problem for an infinitely large reflections number. Nevertheless, the optimal distances between the mirrors and the lens were obtained and amounted to 0.3–0.4 m, which is sufficient for laser technology.

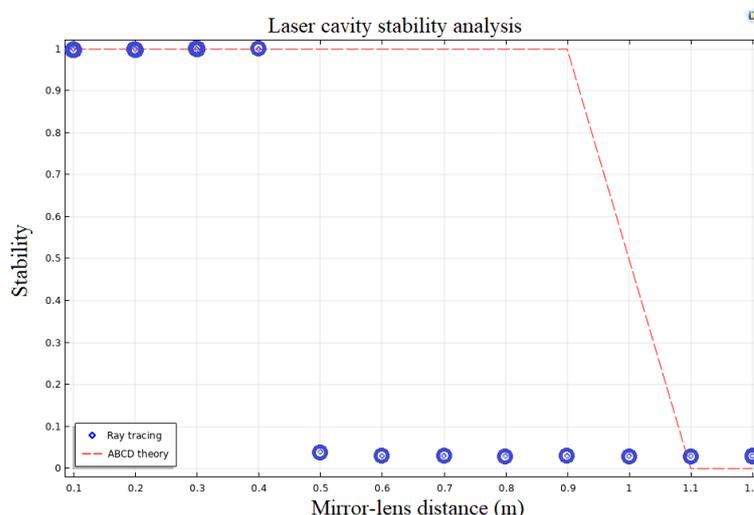


Fig. 1. Comparison of the simulation results and the resonator stability calculation.

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

1. A.S. Korsakov et al., *J. of Opt. Tech.* **84**, 12 (2017).

# MOISTURE-RESISTANT VISUALIZERS FOR SETTINGS IN INFRARED LASER SYSTEMS WITH A LARGE BEAM APERTURE

M.V. Chernov<sup>1,2</sup>, S.V. Gushchin<sup>1,2</sup>, A.M. Kuzmin<sup>1</sup>, A.A. Lyapin<sup>1,2</sup>,  
P.A. Ryabochkina<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*OOO «Photonic Technology Systems», Saransk, Russia*

*E-mail: [chernov\\_maxim@inbox.ru](mailto:chernov_maxim@inbox.ru)*

Currently, infrared (IR) lasers are widely used in lidars, rangefinders and special equipment. Laser beam visualizers can be used to settings these devices in the field. They are used to convert invisible for the human eye infrared radiation to the luminescence of the visible spectral range (fig. 1). Existing commercial samples of visualizers have a small active region (maximum area 500 cm<sup>2</sup>) and can work only in laboratory conditions.

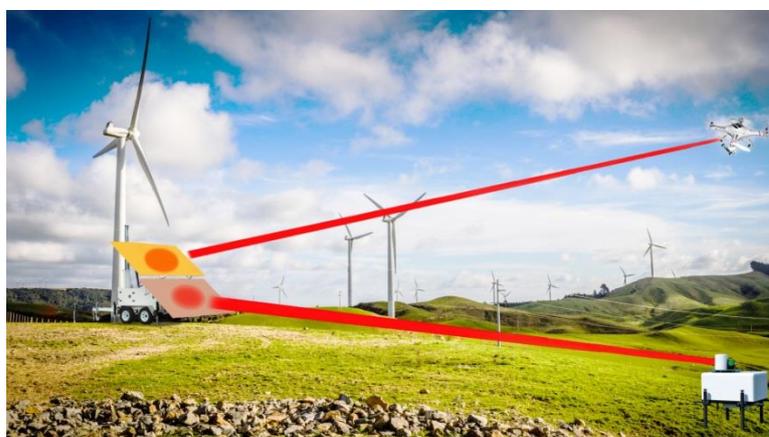


Fig. 1. Visualizers for settings laser lidars, rangefinders and special equipment in the field.

In present paper moisture-resistant polymer visualizers an area of 1 m<sup>2</sup> were obtained. Infrared visualizers can work in various weather conditions. Their structural, physical, mechanical and spectral-luminescence properties were studied.

Spectral range, sensitivity and fracture threshold of visualizers were determined.

Tests of the developed visualizers were also carried out at various ambient temperatures and various precipitations in the field.

The investigation showed that the developed moisture-resistant visualizers can be used to settings laser systems with a large beam aperture in the field.

## MODELING OF THE EVLC PROCESS USING LASER RADIATION OF THE TWO-MICRON SPECTRAL REGION

S.A. Artemov, A.N. Belyaev, O.S. Bushukina, S.A. Khrushchalina, S.V. Kostin,  
A.A. Lyapin, P.A. Ryabochkina, A.D. Taratynova  
*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*  
*E-mail: [alina.taratynova@mail.ru](mailto:alina.taratynova@mail.ru)*

Varicose veins are included at the list of the 10 most common diseases in the world. At present there are minimally invasive methods in treatment, one of which is endovenous laser coagulation. Choosing of radiation wavelength was based on selective absorption by chromophores of biological tissue. Currently known lasers operate at wavelengths of 810, 980 nm and target hemoglobin. Lasers with emission wavelengths of 1550 nm corresponding to water absorption are also used. High values of laser radiation power are 15-20 W and 10-12 W, correspondingly that lead to postoperative complications caused by injury to perivenous tissue. However, recently, scientific papers have appeared that indicate the implementation of EVLC using laser emitting in the two-micron spectral region and due to this fact the radiation power required for vein coagulation can be reduced.

At the moment the actual task is to develop complex approach to reduce the power of laser radiation used for EVLC and to minimize damage to the perivenous tissues. This method may include computer simulation of the EVLC and comparison of obtained results with experiments findings.

In the course of present work, we carried out modeling of heating vein wall and perivenous tissues during the EVLC process using laser radiation of the two-micron spectral region and comparison obtained results with ones of in-vivo experiments on sheep of Edilbay breed using radiation from a solid-state LiYF<sub>4</sub>:Tm crystal laser with a wavelength of 1910 nm and power of 1.5 W, 3 W и 4 W.

Simulation of the EVLC process was carried out in the COMSOL Multiphysics 5.5 software package using the «Heat Transfer» module. The obtained results correlate with findings of in-vivo experiments of the EVLC.

This research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 18-29-20039).

1. S.A. Artemov et al., *Lasers Med Sci.* **35**, 867 (2020).

# НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

## ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ГИБРИДНОГО ПЕРОВСКИТА CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> – ПЕРСПЕКТИВНОГО МАТЕРИАЛА ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

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

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

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

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

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

Гибридные органо-неорганические соединения со структурой перовскита интенсивно исследуются в последнее время в связи с их функциональными свойствами. В частности, метиламмоний-йодид свинца CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> (MAPbI<sub>3</sub>) рассматривается как наиболее перспективный базовый материал для солнечных элементов нового поколения. Это соединение используется также в детекторах рентгеновских и гамма лучей, в лазерах и светодиодах. В литературе можно найти большое количество работ, посвященных исследованию MAPbI<sub>3</sub> различными методами, в том числе оптическими. Однако большинство этих работ выполнено для тонких пленок. В Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН в Новосибирске были выращены монокристаллы MAPbI<sub>3</sub> хорошего качества с размерами около сантиметра [1,2]. Там же была выполнена характеристика образцов рентгеновскими методами, проведены измерения фотопроводимости. В Институте спектроскопии РАН был выполнен комплекс оптических исследований монокристаллов MAPbI<sub>3</sub> в широких диапазонах частот (от терагерцового до видимого) и температур (5–350 К).

В лекции будет дан краткий обзор свойств гибридного перовскита MAPbI<sub>3</sub>, в основном оптических, и будут представлены результаты наших недавних исследований монокристаллов этого соединения. Терагерцовые спектры отражения дали новую информацию о низкочастотных фонах, существенную для понимания тепловых свойств соединения и особенностей электрон-фононного взаимодействия. Температурное поведение спектров пропускания в средней и ближней ИК областях, соответствующих многофононному поглощению, отражает изменение динамики органического катиона. Оптические спектры пропускания показывают изменение ширины запрещенной зоны с температурой. Во всех спектрах наблюдались выраженные особенности при температурах фазовых переходов из кубической в тетрагональную фазу (~ 320 К) и далее в ромбическую (~ 160 К).

Рост кристаллов выполнен в рамках государственного задания № АААА-А18-118020190098-5. Спектроскопические измерения проведены при финансовой поддержке РФФИ, грант №18-32-20142.

1. O.I. Semenova et al., J. Cryst. Growth **462**, 45 (2017).
2. E.S. Yudanov et al., J. Struct. Chem. **58**, 1567 (2017).

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ

М.С. Болдин, П.Б. Дёмина, М.В. Дорохин, И.В. Ерофеева,  
А.В. Здоровейщев, Ю.М. Кузнецов, Е.А. Ланцев, А.А. Попов, В.Н. Трушин  
*Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*  
*E-mail: [dorokhin@nifti.unn.ru](mailto:dorokhin@nifti.unn.ru)*

Термоэлектрические преобразователи энергии (или термоэлектрики) – это общее название материалов, преобразующих тепловую энергию в электрическую. В основе работы большинства современных термоэлектриков лежит эффект Зеебека – генерация термоэдс под действием градиента температур, сформированного в образце. Подобный принцип позволяет использовать «бросовое» тепло, которое выделяется в многочисленных современных технологических, химических, биологических и бытовых процессах для генерации электрической энергии. Это позволит существенно повысить КПД всех указанных процессов, а следовательно, снизить их себестоимость.

Активные разработки и исследования термоэлектрических материалов начались с середины XX столетия и продолжают в настоящее время [1, 2]. Основной задачей технологии является разработка преобразователей, для которых КПД был бы достаточно высок для того, чтобы конкурировать с другими альтернативными источниками энергии. Традиционно такая задача решалась методами подбора особого состава материалов и управления их свойствами (создание поликристаллических и аморфных материалов, управление концентрацией носителей заряда и сопротивлением). К настоящему времени уже известен набор термоэлектрических преобразователей с природно-высокими значениями эффективности, а использование того или иного материала из набора определяется условиями эксплуатации, в первую очередь, температурой. Тенденцией последних лет является создание наноструктурированных материалов и гетероструктур, для которых прогнозируется возможность повышения эффективности в несколько раз по сравнению с однородными объемными термоэлектриками. Сейчас с развитием экспериментальной базы и технологии, позволяющей создавать уникальные наноструктуры, отмечается повышение научного интереса к проблематике термоэлектрических преобразователей энергии [1, 2].

В настоящем обзоре рассматривается один из базовых принципов получения термоэлектрических материалов повышенной эффективности – наноструктурирование – на примере применения технологии электроимпульсного плазменного спекания. Рассматриваются основные особенности формирования структур при использовании данного метода, а также результаты экспериментального исследования термоэлектрических материалов на основе твёрдого раствора германий-кремний.

К настоящему моменту показано, что эффект генерации напряжения может возникать в однородном материале в том случае, если его концы

находятся при разных температурах. Рассмотрим вкратце механизм генерации термоэдс.

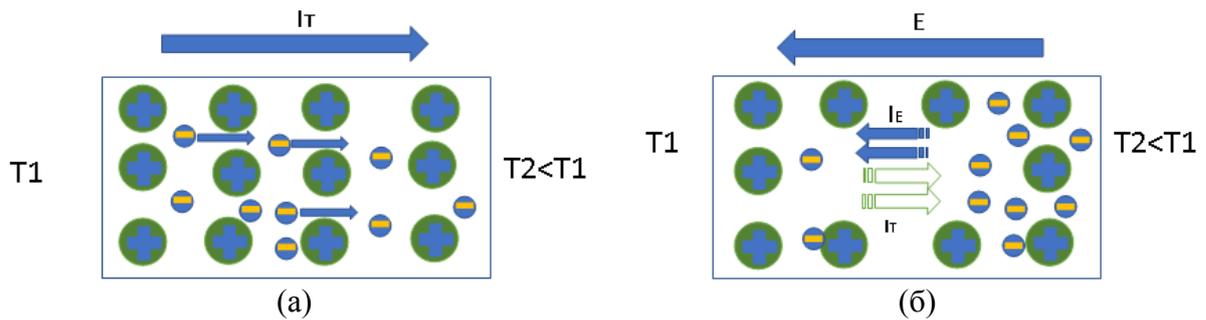


Рис. 1. Схематическое изображение физического механизма эффекта Зеебека: (а) – этап 1 – формирование потока свободных носителей заряда при создании градиента температур; (б) – этап 2 – формирование электрического поля, препятствующего потоку свободных носителей заряда.

Полупроводниковые материалы содержат подвижные носители заряда, которые способны перемещаться по объему материала (как правило, это электроны). При увеличении температуры одного из концов материала увеличивается количество подвижных носителей, а также их кинетическая энергия. Носители начинают двигаться быстрее в направлении от горячего конца к холодному (рис. 1 (а)). В результате на «холодном» конце формируется избыточный отрицательный заряд, а на «горячем» – избыточный положительный (для схемы, показанной на рис. 1). Создается электрическое поле, в котором на носители действует сила, заставляющая их перемещаться обратно – от горячего конца к холодному. Достаточно быстро между тепловым потоком носителей и электрическим током, индуцированным полем  $E$ , установится равновесие (рис.1 (б)), при этом между концами материала возникает ЭДС, которая компенсирует тепловой поток – термоэдс.

Величина ЭДС зависит от градиента температур, а также величины, которую называют коэффициентом Зеебека. Зависимость термоэдс от коэффициента Зеебека и градиента температур выражается формулой

$$U = \alpha * \Delta T, \quad (1)$$

где  $U$ – величина термоэдс,  $\Delta T$  – градиент температур,  $\alpha$  – коэффициент Зеебека, определяемый как величина термоэдс при разности температур между концами материала в 1 К. Величина коэффициента Зеебека является характеристическим свойством материала и зависит от количества подвижных зарядов, электрического сопротивления, свойств кристаллической решетки, степени ее совершенства [1–3].

На рисунке 2 показана эквивалентная электрическая схема включения термоэлемента в электрическую цепь в качестве источника питания. Здесь питаемая источником электрическая цепь заменена на эквивалентное сопротивление  $R_H$ .

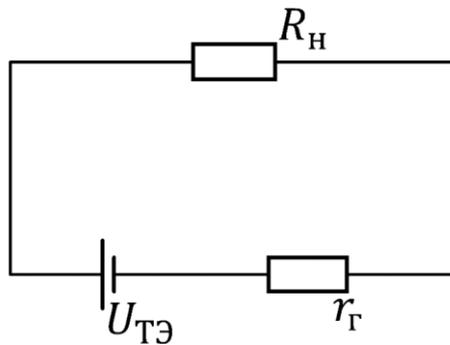


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема термоэлектрического генератора, подключенного к внешней электрической цепи.

Простейший анализ схемы, представленной на рис. 2, методами теории электрических цепей показывает, что падение напряжения на нагрузочном сопротивлении  $R_H$  связано с напряжением термоэдс и внутренним сопротивлением источника соотношением

$$U(R_H) = U_{TЭ} * R_H / (R_H + r_Г) \quad (2)$$

где  $U_{TЭ}$  – напряжение источника,  $r_Г$  – сопротивление источника, т.е. сопротивление термоэлектрического материала.

Чем меньше сопротивление термоэлектрика, тем выше напряжение, которое может быть выделено в цепь от источника. С другой стороны, известно, что в низкоомных материалах (в металлах) величина термоэдс очень мала [1–3]. Простейшее объяснение подобной закономерности можно сформулировать исходя из рис. 2: чем ниже сопротивление материала, тем меньше требуется электрическое поле для того, чтобы компенсировать тепловой поток носителей заряда.

Таким образом, существует оптимум сопротивления, для которого характерны высокое напряжение термоэдс и одновременно возможность отведения этого сопротивления во внешнюю цепь. Физическими величинами, характеризующими мощность, отводимую от термоэлектрического источника, и КПД этого источника, являются фактор мощности  $w$  и коэффициент термоэлектрической добротности  $ZT$ , соответственно. Фактор мощности по определению записывается как

$$w = \alpha^2 / \rho, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент Зеебека,  $\rho$  – удельное сопротивление.

Коэффициент термоэлектрической добротности определяется как

$$ZT = (\alpha^2 / \rho\kappa) * T, \quad (4)$$

где  $\kappa$  – коэффициент теплопроводности,  $T$  – средняя температура между «горячим» и «холодным» концами образца.

Отметим, что коэффициент  $ZT$  является безразмерным, иногда вместо него используют коэффициент  $Z$ . Размерность  $Z$  – обратная температура. Формула (4) показывает, что наибольший КПД может быть получен в материале с наибольшим значением фактора мощности и низким коэффициентом теплопроводности, последнее позволяет легко поддерживать разность температур в материале.

Считается общепринятым, что коэффициенты, входящие в формулу (4), функционально взаимосвязаны между собой. Снижение сопротивления материала приведет к снижению коэффициента Зеебека и повышению коэффициента теплопроводности [4].

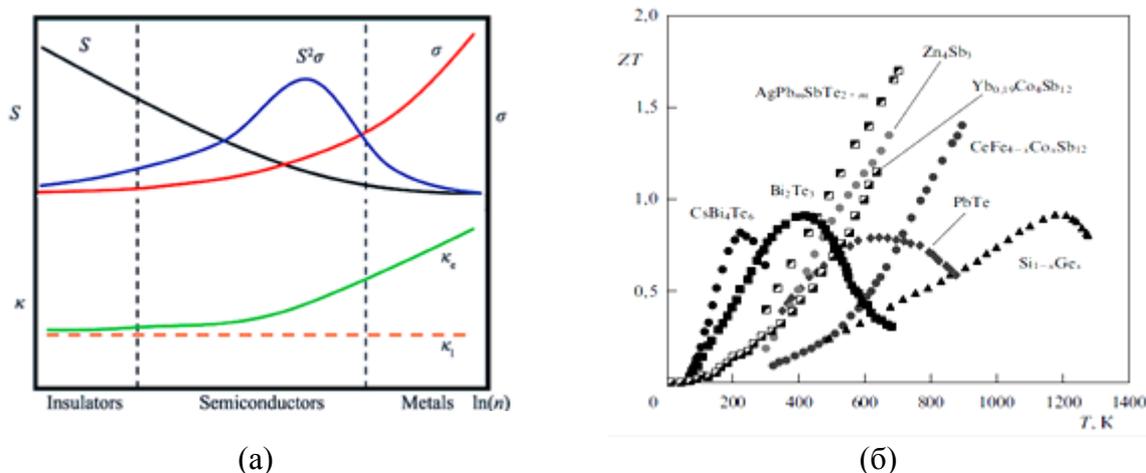


Рис. 3. (а) – зависимость коэффициента  $\alpha$ , фактора мощности, коэффициента теплопроводности, электропроводности от концентрации носителей заряда в материале [4]. Максимум коэффициента  $ZT$  соответствует концентрации носителей сильнолегированного полупроводника; (б) – температурная зависимость коэффициента  $ZT$  для различных материалов, приведённая в [5].

Если для одного и того же материала варьировать концентрацию носителей (например, за счет легирования), можно достигнуть оптимального значения коэффициента  $ZT$ , но повысить его сверх оптимального значения без применения специальных методов невозможно. На рис. 3 (б) показаны максимальные возможные значения коэффициента термоэлектрической добротности в зависимости от температуры для различных материалов.

### Наноструктурирование как метод повышения коэффициента термоэлектрической добротности.

Обзор [2] описывает несколько методов повышения коэффициента  $ZT$  в пределах одного и того же материала. В основе этих методов лежат попытки оптимизировать один из параметров, входящих в формулу (4), без существенного изменения остальных. Например, введение специальной примеси в полупроводниковые материалы позволяет повысить плотность состояний на уровне Ферми, что ведет к повышению коэффициента  $\alpha$  [6,7].

В рамках краткого обзора рассмотрим стратегию, связанную с созданием наноструктурированных материалов. Существует два варианта стратегии наноструктурирования. Первый был рассмотрен в теоретической работе [8] на примере сверхрешеток на основе теллурида висмута. В указанной работе рассмотрена сверхрешетка из двух чередующихся материалов, различающихся шириной запрещенной зоны. При уменьшении толщин материалов ниже квантового предела электрические характеристика начинают зависеть не только от свойств материала, но и от периодов сверхрешетки. Таким образом, период сверхрешетки выступает в качестве дополнительной степени свободы для оптимизации параметра  $ZT$ .

Варьируя период сверхрешетки можно изменять сопротивление без существенного влияния на остальные параметры. Меняя концентрацию – можно изменить коэффициент Зеебека. Таким образом, в работе показано, что при оптимизированном выборе указанных выше двух параметров возможно повышение коэффициента  $ZT$  в 10 раз по сравнению с однородными материалами.

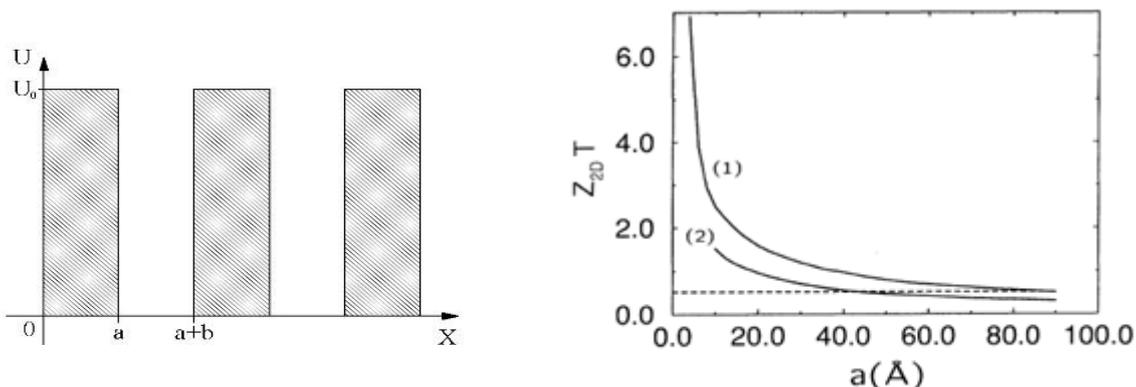


Рис. 4. Схема зонной диаграммы термоэлектрической сверхрешётки (слева) и рассчитанные значения коэффициента  $ZT$  в зависимости от периода сверхрешетки (справа), по данным работы [8].

Второй вариант стратегии наноструктурирования связан с нарушением кристаллической решётки материала. Как известно, коэффициент теплопроводности может быть представлен в виде суммы двух составляющих: связанной с переносом тепла электронами ( $\kappa_e$ ) и фононами ( $\kappa_\phi$ ).

$$\kappa = \kappa_e + \kappa_\phi \quad (5)$$

Фононная компонента существенно зависит от кристаллического состояния материала. В поликристаллическом материале  $\kappa_\phi$  ниже, чем в монокристаллическом за счет рассеяния фононов на границах зерен. В случае поликристаллического материала с нанометровым размером зерна фононы претерпевают многочисленные акты рассеяния на границах зерен, что существенным образом понижает фононную составляющую коэффициента теплопроводности. Таким образом, наноструктурирование является эффективным методом повышения коэффициента  $ZT$ . Подобная стратегия была успешно реализована на целом ряде материалов [9–12].

Одним из наиболее актуальных технологических методов получения материалов с наноразмерной поликристаллической структурой является метод электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС) [13, 14]. Указанный метод заключается в синтезе объемных материалов из порошков, которые могут быть получены различными методами [9–14], причем параметры технологии получения могут обеспечить средний размер частиц порошка порядка нескольких нанометров. При спекании порошки размещаются в специальные пресс-формы и подвергаются одновременному воздействию высокой температуры (близкой к температуре плавления материала) и давлению, которое может изменяться в широком диапазоне – от порядка 300 МПа и выше (рис. 5). В результате

происходит соединение частиц и формирование однородного поликристаллического материала, размер зерна в котором задается размером частиц исходного порошка.

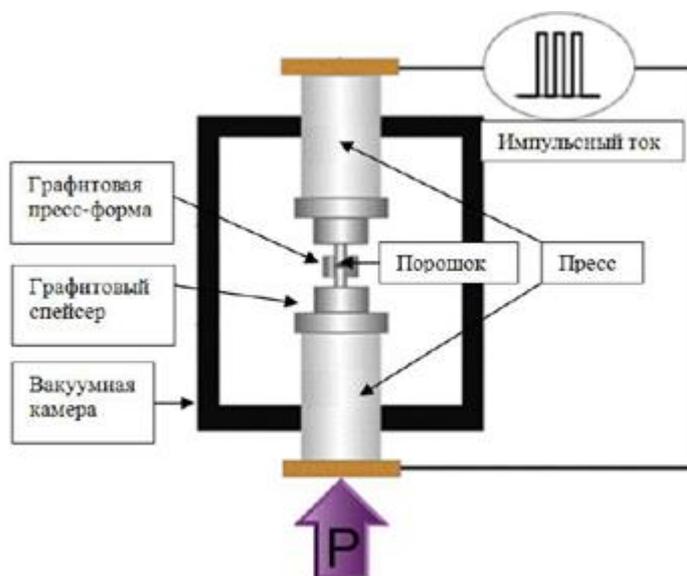


Рис. 5. Схематическое изображение процесса электроимпульсного плазменного спекания [15].

Таким образом, метод электроимпульсного плазменного спекания является уникальной технологией для синтеза поликристаллических материалов. Контролируемое управление большим количеством параметров процесса спекания дает широкие возможности для модификации структуры материала, в частности зеренной структуры, а также для изменения структуры и объема пор в материале. Помимо этого, можно отметить возможности для введения в материалы примесей различного рода, в том числе, легирующих добавок [16]. В силу вышеизложенного метод ЭИПС становится одним из основных для получения наноструктурированных термоэлектрических материалов с улучшенными характеристиками добротности.

**Система Ge-Si как термоэлектрик в среднем диапазоне температур. Получение методом электроимпульсного плазменного спекания.**

Рассмотрим пример применения метода электроимпульсного плазменного спекания для получения твердых растворов замещения германий-кремний ( $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ). Указанный вид твердых растворов занимает особое место среди термоэлектриков [1–3]. Его высокая химическая и механическая стабильность при повышенных температурах является важным преимуществом при создании приборов для использования, как в вакууме, так и на воздухе без изменений КПД. К другим важным преимуществам  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  можно отнести низкую токсичность, а также высокую степень отработки технологических процессов для Ge и Si.

Особенностью настоящих экспериментальных исследований является использование примеси Sb для получения  $n\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , в отличие от большинства работ, где используется примесь фосфора. Преимуществами

сурьмы, по сравнению с Р или As, являются низкая токсичность, а также возможность новой технологической опции для создания материала n-типа. Для исследования была изготовлена серия из 5 образцов наноструктурированного  $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}\text{Sb}_\delta$ . Размер частиц исходного порошка (50–500 нм) определялся режимом его размолла и перемешивания. Состав материала задавался путем взвешивания исходных компонентов и последующего пересчета весовых процентов в атомные. Варьируемыми параметрами являлись содержание Sb (0.5–0.9 ат.%) и максимальная температура спекания ( $T_s = 1080\text{--}1180$  °С). Остальные параметры (давление пресса 70 МПа, скорость нагрева 50 °С/мин) поддерживались постоянными. Температура спекания определялась пирометром на внешней стенке пресс-формы с порошком с дальнейшим пересчётом на температуру внутри пресс-формы [17]. Сформированные слитки  $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}\text{Sb}_\delta$  разрезались на пластинки, на которых выполнялись исследования фазового состава с помощью рентгеноструктурного анализа, а также измерения термоэлектрических коэффициентов. Коэффициент Зеебека рассчитывался по результатам измерений температуры и термоэдс с применением термопар хромель-алюмель. Электропроводность измерялась стандартным четырёхзондовым методом. Коэффициент теплопроводности измерялся методом стационарного теплового потока [18]. Измерения проводились в интервале  $T_m = 50\text{--}450$  °С.

Таблица 1. Термоэлектрические параметры наноструктурированного  $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}$ . Значения параметров приведены для температуры измерения 450 °С.

| № образца | Технологические значения концентрации Sb, $\delta$ | $T_s$ , °С | $\rho \cdot 10^4$ , Ом·м | $\alpha$ , $\mu\text{В/К}$ | $\kappa$ , Вт/м·К | ZT   |
|-----------|--|------------|--------------------------|----------------------------|-------------------|------|
| 1         | 0.005  | 1080       | 40                       | 410                        | 2.5               | 0.03 |
| 2         | 0.005  | 1180       | 7                        | 690                        | 3.5               | 0.14 |
| 3         | 0.007  | 1150       | 11                       | 644                        | 3.2               | 0.09 |
| 4         | 0.007  | 1180       | 2.0                      | 490                        | 3.75              | 0.30 |
| 5         | 0.009  | 1180       | 1,2                      | 490                        | 2.73              | 0.54 |

На рис. 6 представлены рентгенодифракционные спектры исходного порошка (1) и образцов (1, 3, 5), сформированных при различных температурах. На дифрактограмме исходного порошка (1) видны линии, соответствующие неперемешанному Ge и Si. Спекание при  $T_s = 1080\text{--}1180$  °С приводит к взаимодействию компонентов и появлению на спектрах линий, соответствующих твердому раствору  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  (рис. 6, спектры 1,3,5). При этом линии, относящиеся к Ge, пропадают, а интенсивности линий кремния при повышении  $T_s$  монотонно уменьшаются вследствие увеличения степени перемешивания материала.

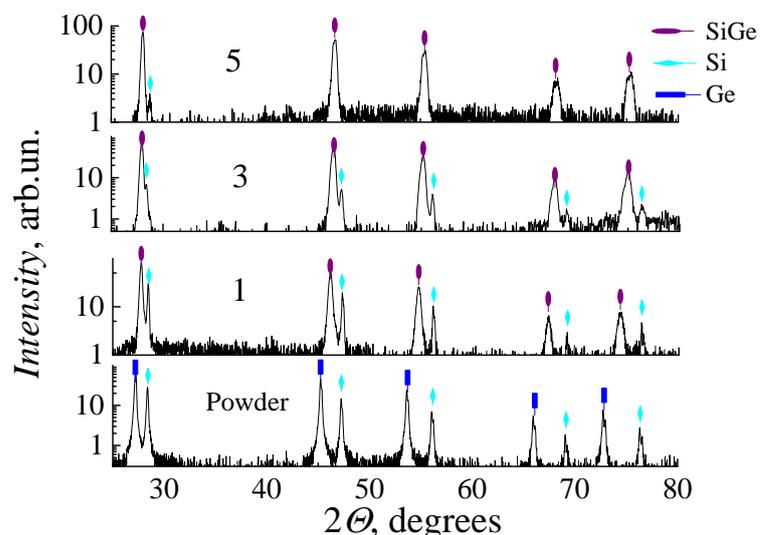


Рис. 6. Рентгенодифракционные спектры, измеренные для образцов 1, 3 и 5, а также для исходного порошка (Powder). Значками отмечены положения пиков для Si, Ge и твердого раствора GeSi некоторого состава.

На рис. 7 изображены температурные зависимости удельного сопротивления. Все образцы имеют *n*-тип проводимости.

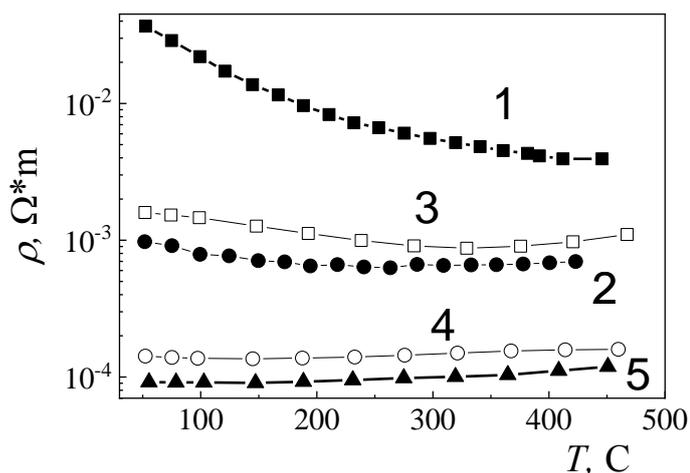


Рис. 7. Температурные зависимости удельного сопротивления, измеренные для образцов, представленных в таблице 1. Номер кривой соответствует номеру образца.

Для образца 1, полученного при наименьшей  $T_s = 1080$  °С, зависимость носит полупроводниковый характер, а величина удельного сопротивления принимает наибольшее значение среди исследованных структур. Зависимости  $\rho(T_m)$  структур 2–5, сформированных при повышенных температурах, ведут себя одинаковым образом: величина удельного сопротивления слабо меняется в диапазоне 30–450 °С, а при повышении температуры значение  $\rho$  проходит через минимум вблизи 200–300 °С. При равной концентрации примеси меньшее значение  $\rho$  характерно для более высокотемпературных образцов. При этом, как и следовало ожидать, с увеличением концентрации донорной примеси значение  $\rho$  уменьшается. Величина коэффициента теплопроводности (таблица 1), примерно одинаковая для всех наноструктур, и составляет 2.5–3.75 Вт/м·К. Коэффициент Зеебека немонотонно меняется при варьировании

параметров структур (таблица 1), что обусловлено взаимосвязью  $\alpha$  и удельного сопротивления. Последнее зависит не только от концентрации, но и от однородности образца по фазовому составу.

Приведенные результаты можно объяснить с точки зрения фазового состава образцов и степени встраивания примеси в положение замещения Ge и Si. Недостаточно высокая температура формирования приводит к малоэффективному перемешиванию Ge и Si, что сопровождается сохранением фазы кремния (это видно из рентгеновских дифрактограмм на рис. 6). Возникающая при этом неоднородность состава  $Si_{1-x}Ge_x$  приводит к модуляции ширины запрещенной зоны, вызывая тем самым некоторое повышение сопротивления (табл. 1 образцы 2 и 3 с одинаковой концентрацией Sb, но разной температурой спекания). Увеличение сопротивления и обуславливает снижение величины  $ZT$ . Помимо этого, от температуры спекания существенным образом зависит встраивание примеси замещения в твердый раствор. Мы полагаем, что высокие значения сопротивления низкотемпературного образца 1 обусловлены действием обоих указанных выше факторов. При спекании образца с наибольшей

(0.9 ат. %) концентрацией Sb и при более высокой температуре формируется материал с наибольшим значением  $ZT$  (образец 5, табл. 1).

Современное развитие термоэлектрических материалов связано с применением новых технологических подходов, дающих уникальные возможности для управления структурой и фазовым составом. Модификация кристаллической структуры позволяет повысить коэффициент термоэлектрической добротности по сравнению с однородно-легированными монокристаллическими материалами. Метод электроимпульсного плазменного спекания, безусловно, входит в число перспективных технологических методик. Его возможности позволяют формировать материалы с уникальной структурой и «настраивать» их свойства таким образом, чтобы получить улучшенные значения коэффициента термоэлектрической добротности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №17-79-20173.

1. A. Zevalkink et al., *Appl. Phys. Rev.* **5**, 021303 (2018).
2. C. Gayner, K.K. Kar, *Progress Mater. Sci.* **83**, 330 (2016).
3. D.M. Rowe, *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*, London, New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2006.
4. W. Dong et al., *Metals* **8** (10), 781 (2018).
5. А.В. Дмитриев, И.П. Звягин, *УФН***180** (8), 821 (2010).
6. F. Sui, S.M. Kauzlarich, *Chem. Mater.* **28** (9), 3099 (2016).
7. X.W. Wang et al., *Appl. Phys. Lett.* **93**, 193121 (2008).
8. L. Hicks, M. Dresselhaus, *Phys. Rev. B* **47**, 16631 (1993).
9. A.J. Minnich, M.S. Dresselhaus, Z.F. Ren, G. Chen, *Energy Environ. Sci.* **2**, 466 (2009).

- 10.R. Murugasami et al., Scripta Materialia**143**, 35 (2018).
- 11.R. Murugasami et al., Advanced Powder Technology **28**, 506 (2017).
- 12.D. Thompson, D. Hitchcock, A. Lahwal, T.M. Tritt, Emerging Mater. Res. **1**, 299 (2012).
- 13.A. Usenko et al., Scripta Materialia. **146**, 295 (2018).
- 14.W.-T. Chiu, C.-L. Chen, Y.-Y. Chen, Scientific Reports **6**, 23143 (2016).
- 15.М.С. Болдин, *Кинетика электроимпульсного плазменного спекания керамик на основе оксида алюминия*, Дисс. к.ф.-м.н., Н. Новгород, 2019.
- 16.М.В. Дорохин и др., Физика и техника полупроводников **53 (9)**, 1182 (2019).
- 17.В.Н. Чувильдеев и др., Журнал неорганической химии **60 (8)**, 1088 (2015).
- 18.Е.Д. Девяткова, А.В Петров, И.А. Смирнов, ФТТ **2 (4)**, 738 (1960).

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННОГО  
ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ  $ZrO_2$ -2.5мол.%Y-(0.5, 0.7, 1.2)мол.%RSZ  
(R – Ce, Nd, Er, Yb)

М.А. Борик<sup>1</sup>, Е.Е. Ломонова<sup>1</sup>, Ф.О. Милович<sup>2</sup>, В.А. Мызина<sup>1</sup>,  
П.А. Рябочкина<sup>3</sup>, Н.В. Сидорова<sup>3</sup>, Н.Ю. Табачкова<sup>1,2</sup>, А.В. Щучкина<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>*Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

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

Одним из актуальных направлений современного материаловедения является поиск и совершенствование высокопрочных материалов, устойчивых к агрессивным средам и воздействию высоких температур. К таким материалам относятся кристаллы и керамика на основе диоксида циркония. Кристаллы частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦ) благодаря сочетанию особых физико-механических свойств широко применяются в качестве конструкционных материалов, теплозащитных покрытий, медицинского режущего инструмента, протезов и имплантов.

Многочисленные исследования твердых растворов на основе диоксида циркония, стабилизированных оксидом иттрия, позволили определить составы с оптимальными прочностными характеристиками [1–3].

В то же время, наряду с оксидом иттрия в образовании твердых растворов на основе  $ZrO_2$ , могут быть использованы оксиды РЗ элементов. Модифицируя вид и концентрацию солегирующих оксидов в трехкомпонентном твердом растворе, можно получить материалы с улучшенными механическими свойствами.

В соответствие с этим целью настоящей работы являлось изучить влияние соотношения солегирующих оксидов на особенности структуры, фазового состава и механических свойств (микротвердости, трещиностойкости) твердых растворов 2.5Y-0.5RSZ, 2.5Y-0.7RSZ, 2Y-1.2RSZ (R- Ce, Nd, Tb, Er, Yb). Проведенный сравнительный анализ прочностных характеристик кристаллов ЧСЦ позволил определить взаимосвязь между химическим составом, структурой и свойствами исследуемых кристаллов и выявить составы с наиболее высокими значениями трещиностойкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-00-397.

1. M. Rühle, N. Claussen, A.H. Heuer, J. Am. Ceram. Soc. **12**, 352 (1984).
2. N. Gupta, P. Mallik, B. Basu, J. Alloys Compd. **379**, 228 (2004).
3. M.A. Borik et al., J. Alloys Compd. **586**, 231 (2014).

## ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В КРИСТАЛЛАХ $ZrO_2$ - $Yb_2O_3$ ПОСЛЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ВОЗДУХЕ

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

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

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

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

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

Кристаллические материалы на основе  $ZrO_2$  характеризуются наличием двух полиморфных переходов, в результате которых при комнатной температуре стабильной является моноклинная модификация. Однако введение в процессе синтеза оксидов редкоземельных или щелочноземельных элементов позволяет существенно снизить температуру тетрагонально-моноклинного фазового перехода и стабилизировать высокотемпературные модификации  $ZrO_2$  [1].

Вследствие наличия свободных кислородных вакансий кристаллы стабилизированного диоксида циркония обладают кислород-ионной проводимостью при повышенной температуре, что позволяет применять данные материалы в качестве твердых электролитов в различных электрохимических устройствах. В настоящее время перспективным направлением является разработка кислород-проводящих мембран для твердооксидных топливных элементов на основе кристаллов стабилизированного диоксида циркония.

В работах [2, 3] показано, что расположение вакансий кислорода в кристаллической структуре стабилизированного оксидом иттрия диоксида циркония, а также фазовый состав существенно влияют на транспортные свойства данных материалов. Однако актуальным остается вопрос оптимизации химического состава путем подбора вида и концентрации оксида-стабилизатора, а также исследование изменений фазового состава, происходящих в кислородной подрешетке данных материалов при повышении температуры (в диапазоне рабочих температур твердого электролита – от 500 до 1000 °С).

В настоящей работе с использованием методов КРС и оптической спектроскопии выявлены особенности фазовых переходов в кубических твердых растворах  $ZrO_2$ -(8–12 мол.%)  $Yb_2O_3$ -0.1 мол.%  $Eu_2O_3$ , полученных методом направленной кристаллизации расплава с использованием прямого высокочастотного нагрева в холодном контейнере, до и после термической обработки на воздухе ( $T = 1000$  °С,  $t = 400$  ч).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант №16-13-00056.

1. Ю.С. Кузьминов, Е.Е. Ломонова, В.В. Осико, *Тугоплавкие материалы из холодного тигля*, М.: Наука, 2004.
2. Н. Yugami, А. Koike, М. Ishigame, *Phys. Rev.* **44**, 9214 (1991).
3. М.А. Borik et al., *J. Alloys and Compounds* **770**, 320 (2019).

# СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КЕРАМИК И ПОРОШКОВ НИТРИДА КРЕМНИЯ, ПЛАКИРОВАННОГО ИТТРИЙ- АЛЮМИНИЕВЫМ ГРАНАТОМ

Л.С. Алексеева<sup>1</sup>, П.В. Андреев<sup>1,2</sup>, С.С. Балабанов<sup>2</sup>, М.С. Болдин<sup>1</sup>,  
П.Д. Дрожилкин<sup>1</sup>, К.О. Каразанов<sup>1</sup>, К.Е. Сметанина<sup>1</sup>

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

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

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

Один из современных методов создания тугоплавких керамических нанокompозитов на основе Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> заключается в нанесении ультратонких покрытий оксидов на частицы порошка нитрида кремния различной дисперсности и последующем их компактировании методом электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС).

Разработка технологии плакирования нанопорошков ультратонкими слоями оксидов требует оптимизации режимов осаждения, в том числе и решения проблемы предварительной де-агломерации Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Порошковые композиции были получены тремя способами: (1) методом Печини (с добавлением лимонной кислоты) и (2) осаждением в желатиновой матрице, а также (3) методом распыления в вакууме. Полученные в результате синтезов промежуточные продукты были отожжены постадийно в течение 2–8 ч при температурах 300, 500, 800, 1000 °С с диспергированием в агатовой ступке между стадиями.

Отожженные до 1000 °С образцы порошков, а также их промежуточные продукты, отожженные в течение трех часов при температуре 300 °С, компактировались методом электроимпульсного плазменного спекания.

Спекание осуществлялось на установке «Dr. Sintermodel SPS-625» (SPS Syntex, Япония) в вакууме в графитовой пресс-форме с внутренним диаметром 12 мм. Скорость нагрева 50 °С/мин, давление 70 МПа, температура спекания варьировалась в пределах 1200–1680 °С.

Контроль фазового состава полученных порошков и керамик проводился на порошковом дифрактометре «ShimadzuXRD-7000» (CuKα, λ = 1.54 Å). Изучение микроструктуры полученных порошков и керамик проводилось методом растровой электронной микроскопии на растровом электронном микроскопе JEOLJSM-6490.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта №19-33-60084.

## ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ



М.А. Борик<sup>1</sup>, М.В. Герасимов<sup>2</sup>, А.В. Кулебякин<sup>1</sup>, Н.А. Ларина<sup>2</sup>,  
Е.Е. Ломонова<sup>1</sup>, В.А. Мызина<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>2</sup>, Н.В. Сидорова<sup>2</sup>,  
Н.Ю. Табачкова<sup>1</sup>

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

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

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

Твердые растворы на основе диоксида циркония, стабилизированные оксидом скандия, представляют значительный интерес в качестве материалов электролитических мембран для твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) из-за их высокой ионной проводимости по сравнению с другими электролитами на основе диоксида циркония [1].

Как известно, фазовый состав и локальная кристаллическая структура, которые определяются видом и концентрацией стабилизирующих оксидов [2–3], являются основными факторами, от которых зависит величина ионной проводимости данных материалов. Поэтому для выявления эффективного состава материала электролита на основе  $\text{ZrO}_2\text{-Sc}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}_3$ , который будет обладать высокой ионной проводимостью и повышенной стабильностью, необходимо проведение детальных исследований структуры и фазовых превращений в этих соединениях.

В настоящей работе с использованием метода рентгеновской дифракции исследован фазовый состав твердых растворов  $(\text{ZrO}_2)_{1-x}\text{-}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_x(\text{R}_2\text{O}_3)_y(\text{Eu}_2\text{O}_3)_{0.001}$ , где R = Y, Yb, Ce и  $x = 0.10$ ,  $y = 0.01$ , полученных методом холодного контейнера при направленной кристаллизации из расплава.

Методом оптической микроскопии выполнены исследования микроструктуры данных твердых растворов и при использовании спектроскопии комбинационного рассеяния света выявлено локальное распределение фаз для областей кристалла с определенной микроструктурой. С помощью метода оптической спектроскопии с использованием ионов  $\text{Eu}^{3+}$  в качестве спектроскопического зонда выявлены изменения локального окружения, связанные с фазовыми превращениями в твердых растворах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ №16-13-00056.

1. S.P.S. Badwalet al., Solid State Ionics **136-137**, 91 (2000).
2. C.R.A. Catlow, Solid State Ionics **12**, 67 (1984).
3. В.Г. Заводинский, ФТТ **46**, 441 (2004).

## ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОЧИСТОГО ИЗОТОПНО-ОБОГАЩЕННОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ-28 ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ

К.Ф. Игнатова<sup>1,2</sup>, М.Е. Комшина<sup>1</sup>, И.А. Кужелев<sup>2</sup>, О.Ю. Трошин<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

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

Изотопно-модифицированное кварцевое стекло является перспективным материалом для изготовления световодов с различным изотопным составом оболочки ( $^{28}\text{Si}^{16}\text{O}_2$ ) и сердцевины ( $^{30}\text{Si}^{18}\text{O}_2$ ), что обеспечивает требуемую разность показателей преломления без использования легирующих добавок [1–2]. Однако сведения о получении и свойствах таких стекол в литературе весьма ограничены.

Одним из перспективных способов получения кварцевого стекла является золь-гель метод, достоинствами которого являются однородность получаемых образцов, относительно невысокая температура обжига стекла и применение малых количеств дефицитных и дорогостоящих изотопно-обогащенных веществ.

В качестве исходного соединения кремния использовали изотопно-обогащенный  $^{28}\text{SiF}_4$ . Конверсию тетрафторида кремния в тетрахлорид проводили с использованием хлорида алюминия(III) [3]. Для получения  $^{28}\text{SiO}_2$  проводили синтез  $^{28}\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  из  $^{28}\text{SiCl}_4$  (степень обогащения по  $^{28}\text{Si}$  99.99 ат.%) и осушенного этилового спирта, затем гидролиз  $^{28}\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  водно-спиртовым раствором ( $^{28}\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:4:4$  мол.) [4]. Далее раствор помещали в формы и выдерживали до образования ксерогеля, который затем осушивали и прокаливали. Для ускорения процесса гелеобразования и формирования монолитных образцов было проведено исследование по подбору катализатора ( $\text{HF}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ) и температурного режима осушки. Определение примесного и изотопного состава образцов проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Получены прозрачные образцы кварцевого стекла  $^{28}\text{SiO}_2$  (светопропускание  $> 90\%$  в видимой области) с содержанием  $^{28}\text{Si}$  на уровне 99.99 ат. %. Согласно данным рентгенофазового анализа, образцы являются аморфными и не содержат кристаллические включения.

1. В.Г. Плеханов, Успехи физических наук **108 (11)**, 1245 (2000).
2. D.C. Allan, J.T. Brown, Patent USA № 0022562 (03.02.2005).
3. М.Ф. Чурбанов и др., Патент РФ № 2618265 (03.05.2017).
4. М.Ф. Чурбанов и др., Патент РФ № 2692310 (24.06.2019).

# ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ И ПРОПУСКАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ ГАЛОГЕНИДОВ СЕРЕБРА В ТЕРАГЕРЦОВОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ

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

На сегодняшний день быстро развивается использование ТГц волоконных систем в реальном времени в таких областях, как визуализация [1], спектроскопия [2]. Разработано множество различных материалов и структур, например, проволочные волокна [3], сапфировые волокна [4], металлические/стеклянные волокна с поллой сердцевинной [2, 5], фотонно-кристаллические волокна, в том числе 3D-печатные [6], каждый из которых имеет свой набор преимуществ и недостатков.

Галогениды серебра имеют ряд преимуществ, поскольку их рабочая температура охватывает область от  $-150$  до  $+400$  °С, они устойчивы к ионизирующему излучению, гибкие. Мы провели исследование спектров пропускания и отражения поликристаллов галогенида серебра на терагерцовых частотах. Образцы кристаллов галогенида серебра были изготовлены из монокристаллических заготовок  $\text{AgBr}_{0,95}\text{Cl}_{0,05}$  по технологии горячего прессования. Полученные образцы были поликристаллическими, толщиной  $0.4\text{--}0.5$  мм и диаметром около 15 мм. Пластины обладали высокой степенью параллелизма. Спектральные измерения проводились с использованием субмиллиметрового спектрометра «Эпсилон». Были полученные следующие данные: частота фононов составляла  $77.5\text{ см}^{-1}$ , вклад фонон-диэлектрика составлял 6.2, коэффициент экстинкции составлял  $18\text{ см}^{-1}$ , а колебания были ангармоническими.

Диапазон передачи в среднем инфракрасном диапазоне имеет платообразный профиль, а край передачи в длинноволновом диапазоне составляет около  $260\text{ см}^{-1}$  (что согласуется с полученными ранее [7]). В терагерцовом диапазоне можно наблюдать пикообразные полосы пропускания.

1. H. Guerboukha, K. Nallappan, M. Skorobogatiy, *Adv. in Opt. and Photonic* **10** (4), 843 (2018).
2. T. Katagiri, T. Suzuki, Y. Matsuura, *Opt. Eng.* **57** (5), 054104 (2018).
3. K. Wang, D.M. Mittleman, *Nature* **432** (7015), 376 (2004).
4. G.M. Katyba et al., *Proc. SPIE Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology XII*, 111640G (2019).
5. R. Wallis et al., *Opt. Express* **24** (26), 30002 (2016).
6. J. Yang et al., *Opt. Express* **24**(20), 22454 (2016).
7. A.S. Korsakov et al., *App. Opt.* **54** (26), 8004 (2015).

# ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ ЛЮМИНОФОРОВ В ОКСИФТОРИДНЫХ СТЕКЛАХ И ОКСИДНЫХ И ФТОРИДНЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛАХ

И.Х. Аветисов<sup>1</sup>, Р.И. Аветисов<sup>1</sup>, М.Н. Маякова<sup>2</sup>, О.Б. Петрова<sup>1</sup>,  
К.И. Рунина<sup>1</sup>, П.В. Стрекалов<sup>1</sup>

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

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

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

Гибридные материалы (ГМ) широко используются в новых устройствах оптики и фотоники [1–3]. Люминесцентные ГМ на основе органических люминофоров 8-оксихинолятов металлов I, II и III группы Таблицы Менделеева [2] и  $\beta$ -дикетонатов редкоземельных элементов [3], полученные в результате обменных реакций в  $\text{PbF}_2$ -содержащих матрицах, имеют широкий гладкий спектр фотолюминесценции (ФЛ), охватывающий практически весь видимый диапазон с координатами цветности, близкими к белому, что позволяет рассматривать их как перспективный материал для источников света с высокой цветопередачей.

Новые ГМ были синтезированы как высокотемпературными методами: расплавным методом с легкоплавкими стеклянными матрицами в системах  $\text{PbF}_2\text{-B}_2\text{O}_3$  и  $\text{PbF}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-ZnO}$  [2] и твердофазным синтезом с  $\text{PbF}_2$ ,  $\text{CaF}_2$  и  $\text{ZnO}$ ; так и низкотемпературными методами: совместное осаждение  $\text{PbF}_2$ ,  $\text{CaF}_2$  из водных растворов фтороводородной кислотой [3] и фторидом аммония. В качестве органических компонентов мы использовали высокоэффективные люминофоры: 8-оксихинолиновые комплексы Li, Zn, Al ( $\text{Liq}$ ,  $\text{Znq}_2$ ,  $\text{Alq}_3$ ).

Спектры ФЛ показывают, что при высокотемпературном синтезе образуются те же излучающие центры, что и при низкотемпературном. Образование центров связано с обменной реакцией, приводящей к созданию новых комплексов. При соосаждении HF происходит частичный захват молекул оксихинолятов, и окончательно обменная реакция происходит при небольшом нагреве, а при соосаждении  $\text{NH}_4\text{F}$  обменная реакция протекает сразу полностью. Обменная реакция при твердофазном синтезе начинается до 100 °С, а при 300 °С проходит практически полностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант №19-79-10003.

1. V. Lebeaue, P. Innocenzi, Chem. Soc. Rev. **40**, 886 (2011).
2. M.O. Anurova et al., Phys. Chem. Glasses: Eur. J. Glass Sci. Technol. B **60(4)**, 140 (2019).
3. O.V. Petrova et al., Opt. Mat. **88**, 378 (2019).

## СТРУКТУРА И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ В СИСТЕМЕ $\text{PbF}_2 - \text{ErF}_3$

М.Н. Маякова<sup>1</sup>, О.Б. Петрова<sup>2</sup>, К.И. Рунина<sup>2</sup>, В.А. Смирнов<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

E-mail: [vladsmirnort54@mail.ru](mailto:vladsmirnort54@mail.ru)

Фторидные соединения и твердые растворы в системах  $\text{MF}_2\text{-REF}_3$  (RE = редкоземельный элемент) представляют интерес для исследования в качестве фотонных материалов, люминофоров, в том числе антистоксовых. Для этих систем существует широкая область кристаллизации кубической фазы типа флюорита (выше 20 мол.% при 650–700 °С) [1–2], но фазовые диаграммы и области существования фаз при низкой температуре (ниже 650 °С) не исследованы. В данной работе была исследована практически важная люминесцентная система  $\text{PbF}_2\text{-ErF}_3$ . Образцы были получены во всем диапазоне концентраций. Твердые растворы синтезировали как твердофазным методом (из  $\text{PbF}_2$  и  $\text{ErF}_3$ ) при температурах 450–600 °С, так и соосаждением из водных растворов (из растворов нитратов Er и Pb плавиковой кислотой) [3]. Чтобы предотвратить пирогидролит при твердофазном синтезе, создали фторирующую атмосферу с помощью расходных фторопластовых пластин.

При низких концентрациях эрбия образуются две фазы: низкотемпературная модификация  $\text{PbF}_2$  (*Pnma*) и твердый раствор на основе высокотемпературной модификации  $\text{PbF}_2$  (*Fm3m*). Область кристаллизации однофазных порошков составляла ~ 12–42 мол.%  $\text{ErF}_3$ , а параметр ячейки монотонно уменьшается [1], при этом реальный состав в этой области близок к номинальному. При увеличении относительного содержания эрбия в исходном растворе свыше 50 мол.% появляется вторая фаза – твердый раствор на основе фторида эрбия со структурой тисонита  $\text{Er}_{1-y}\text{Pb}_y\text{F}_{3-y}$  (*P3c1*). Наиболее интенсивными полосами на спектрах люминесценции  $\text{Er}^{3+}$  являются полосы в синей и зеленой частях спектра, соответствующие переходам  ${}^2\text{H}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  и  ${}^4\text{S}_{3/2} + {}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ . В образцах, полученных твердофазным синтезом, наблюдается эффективная антистоксовая люминесценция (в области 650 нм,  ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ ). Образцы, полученные соосаждением, антистоксовой люминесценции не проявляли.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, грант №19-79-10003.

1. I.I. Buchinskaya, P.P. Fedorov, Rus. Chemical Rev. **73** (4), 371 (2004).
2. A.K. Tyagi et al., J. Solid State Chem. **177**, 1746 (2004).
3. M.N. Mayakova et al., J. Fluorine Chem. **187**, 33 (2016).

# ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА Eu/Gd-СОАКТИВИРОВАННЫХ СВИНЦОВЫХ ФТОРОБОРАТНЫХ СТЕЛЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Д.А. Величкина, О.Б. Петрова, К.И. Рунина

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

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

Оксифторидные стеклокристаллические материалы (СКМ) сочетает в себе лучшие свойства кристаллических фторидов и оксидных стекол, что делает их перспективными для легирования редкоземельными (РЗ) ионами и создания новых лазерных материалов [1]. Высокая эффективность люминесценции оксифторидных СКМ связана с тем, что РЗ-активатор находится во фторидном окружении с низкой энергией фононов кристаллической решетки, что подавляет безызлучательную релаксацию [2]. Возможна гетеровалентная стабилизация высокотемпературной кубической фазы  $\beta$ -PbF<sub>2</sub> трехвалентными редкоземельными ионами [1, 3], которые также вводятся в качестве активаторов в лазерные материалы. Успешное применение этого подхода для соактивирования Nd/La и Nd/Lu, было показано в [1], в настоящей работе исследованы кристаллизация и люминесцентные свойства СКМ, соактивированных Eu/Gd.

Образцы стекол и поликристаллических сложных фторидов были синтезированы из V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbF<sub>2</sub>, GdF<sub>3</sub> и EuF<sub>3</sub>. Синтезированы стекла в системе (70-x-y)PbF<sub>2</sub>-30V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-xEuF<sub>3</sub>-yGdF<sub>3</sub> (x = 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 3.0; y = 0, 1.5, 2.5, 2.9). СКМ получали путем контролируемой кристаллизации стекол в различных температурно-временных условиях. Общая концентрация RE в кубической кристаллической фазе варьировалась от 11 до 12 ат.% (Pb<sub>1-x</sub>Gd/Eu<sub>x</sub>F<sub>2+x</sub>). Объемная доля кубической кристаллической фазы в СКМ составляла более 25%, что было намного больше, чем в СКМ на основе исходных стекол, активированных 1 мол.% EuF<sub>3</sub> (8–10 об.%). После частичной кристаллизации стекла наблюдалось увеличение относительной интенсивности перехода <sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>1</sub> (~ 580 нм) в спектре люминесценции, причем в соактивированных Eu/Gd СКМ это соотношение увеличивается на 20–50% больше, чем в СКМ активированных 1 мол.% EuF<sub>3</sub>. Таким образом, активные центры в соактивированных СКМ обладают большей симметрией.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, грант №19-79-10003.

1. O.V. Petrova et al., J. Non-Cryst. Sol. **531**, 119858 (2020).
2. P.A. Loiko et al., Opt. and Spectr. **118(2)**, 235 (2015).
3. T.S. Sevostjanova et al., Opt. and Spectr. **123(5)**, 733 (2017).

# АПКОНВЕРСИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

М.К. Бубнов<sup>1</sup>, С.В. Гушин<sup>1</sup>, А.С. Ермаков<sup>1</sup>, С.В. Кузнецов<sup>2</sup>, А.М. Кузьмин<sup>1</sup>,  
А.А. Ляпин<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, М.В. Чернов<sup>1</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  
E-mail: [sasha41450@gmail.com](mailto:sasha41450@gmail.com)

В настоящее время множество научных групп проводят активные исследования апконверсионных материалов для их применения в фотовольтаике [1–2]. Солнечные элементы обеспечивают фотоэлектрическое преобразование только под действием излучения ограниченного спектрального диапазона. Например, для ячейки из кристаллического кремния он составляет 380–1100 нм. Расширить спектральный диапазон излучения для фотоэлектрического преобразования можно при использовании комбинированной ячейки, включающей слой апконверсионного материала (рис. 1). При использовании такого материала КПД фотоэлектрического преобразования увеличивается за счет преобразования им инфракрасного излучения, превышающего спектральный рабочий диапазон батареи.

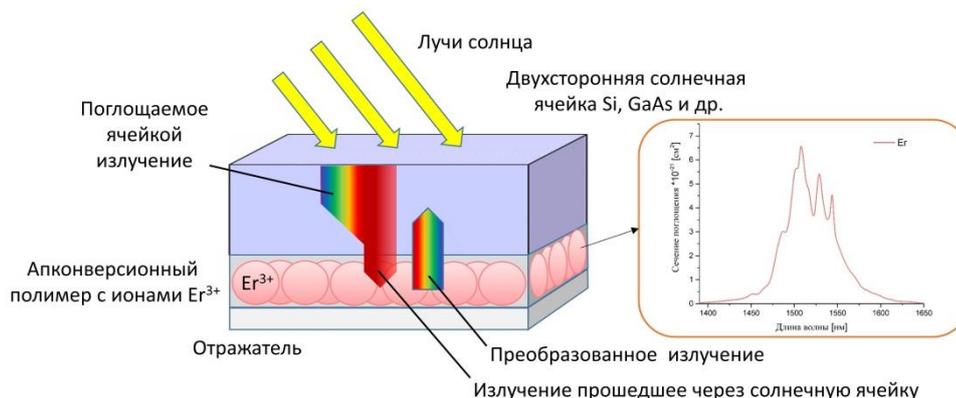


Рис. 1. Модель двухсторонней солнечной ячейки с апконверсионным полимером, легированным ионами Er<sup>3+</sup> на задней стороне ячейки.

В настоящей работе исследованы характеристики процесса фотоэлектрического преобразования лазерного и широкополосного ИК излучения в комбинированной ячейке, состоящей из кремниевой гетероструктуры и полимерной пленки, полученной из оксисульфидных и фторидных порошков, легированных редкоземельными ионами. Данные пленки были изготовлены методами экструзии и горячего прессования. Полученные результаты свидетельствуют о перспективном применении апконверсионных материалов в фотовольтаике.

Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект №18-42-130011).

1. T. Trupke et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells **90**, 3327 (2006).
2. J.C. Goldschmidt, S. Fischer, Adv. Optical Materials **3**, 510 (2015).

# ЛОКАЛЬНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ ДИФРАКЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ПСЕВДО $\alpha$ -ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПТЗВ, ДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТОДОМ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ

П.В. Андреев<sup>1,2</sup>, Д.А. Гудзь<sup>2</sup>, К.Е. Сметанина<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

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

Ротационная ковка является одним из видов интенсивной пластической деформации, применяемой для формирования УМЗ структуры [1]. Как показывают некоторые исследования, данная обработка материала наносит свои особенности в микроструктуру и фазовый состав. К числу таких относятся, например, неоднородность микроструктуры в поперечном сечении образца и формирование метастабильных фаз [1, 2].

В связи с неоднородностью микроструктуры (градиент размера зерна в поперечном сечении ковального прутка после отжига) исследование на фазовый состав требует локальности. Традиционные методики исследования поликристаллов – метод рентгеновской дифракции в геометрии Брэгга-Брентано не могут удовлетворить этому требованию.

Очевидно, что участки с различным характерным размером зерна могут отличаться по фазовому составу – как качественно, так и количественно, а значит и иметь различные эксплуатационные и коррозионные свойства.

Решить проблему локального анализа предполагается с использованием рентгеновской техники с узким первичным пучком. Одним из вариантов является применение монокристалльного дифрактометра Oxford Diffraction, оснащенного рентгеновской трубкой с медным анодом, графитовым монохроматором и коллиматором, генерирующим первичный пучок диаметром 0.3 мм и ССD детектором.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант №19-73-00295).

1. V.N. Chuvildeev et al, J. of Alloys and Compounds **790**, 347 (2019).
2. Y. Cao et al, Materials Science and Engineering **133**, 1 (2018).

# ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ МЕЛКИХ ДОНОРОВ В КРЕМНИИ И ГЕРМАНИИ: УЧЕТ КОРОТКОДЕЙСТВУЮЩЕГО ПОТЕНЦИАЛА

А.А. Конаков, А.М. Михайлова, А.А. Ревин

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

*E-mail: revinalexandre@yandex.ru*

Теоретическое и экспериментальное исследование электронных свойств примесных центров в непрямозонных полупроводниках (в первую очередь кремнии и германии) ведется с 50-х гг. прошлого века. Эти объекты вызывают значительный интерес и сейчас в связи с возможным их применением в области построения источников когерентного ТГц излучения [1] и квантовых компьютеров [2]. На этапе анализа экспериментальных данных или планирования экспериментальных исследований нестационарных процессов, связанных с электронными переходами между состояниями мелких примесных центров, существенной является информация о спектрах и волновых функциях локализованных носителей, в т.ч. их возбужденных состояний.

В нашей работе в рамках метода эффективной массы решалось уравнение для огибающей функции электрона, локализованного на мелком доноре замещения в кремнии и германии. Возбужденные состояния  $p$ -типа описывались пробными функциями, предложенными в работе [4]. В основном состоянии решалось многодолинное уравнение [5] с учетом короткодействующего потенциала. Основное и возбужденные  $s$ -состояния моделировались волновыми функциями с двумя эффективными боровскими радиусами, учитывающими как дальнедействующий водородоподобный, так и короткодействующий потенциал донора. Модификация функции основного состояния, по сравнению с водородоподобной, необходима для учета эффектов расщепления и химического сдвига, обусловленных короткодействующим потенциалом примеси. Энергии возбужденных  $s$ -состояний мало меняются в сравнении с водородоподобной моделью в силу того, что электронная плотность на ядре в этих состояниях мала, однако свойство полноты базисы требует сохранения ортогональности огибающих функций различных состояний.

Результаты теоретических расчетов сопоставляются с имеющимися в литературе экспериментальными данными [3, 6].

Работа поддержана грантом РФФИ 19-72-20163.

1. S.G. Pavlov et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 5220 (2000).
2. J.J. Plaet et al., Nature **489**, 541 (2012).
3. A.K. Ramdas, S. Rodriguez, Rep. Prog. Phys. **44**, 1297 (1981).
4. R.A. Faulkner, Phys. Rev. **184**, 713 (1969).
5. S.T. Pantelides, C.T. Sah, Phys. Rev. **10**, 621 (1974).
6. В.В. Цыпленков, В.Н. Шагин, ФТП **52**, 1469 (2018).

## ВЫРАЩИВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ AgBr–AgI И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ

Л.В. Жукова, А.С. Корсаков, М.С. Корсаков, А.Е. Львов, Д.Д. Салимгареев,  
Ю.В. Шохина, А.А. Южакова

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России*

*Б.Н. Ельцина, Екатеринбург*

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

Для развития волоконно-оптических элементов для средней ИК области необходимы фотостойкие, гибкие материалы, прозрачные в широком спектральном диапазоне. Твердые растворы галогенидов серебра являются наиболее подходящей кристаллической средой для этих целей. Твердые растворы системы AgCl–AgBr, прозрачные от 0.4 до 30.0 мкм, на текущий момент были единственными нетоксичными, негигроскопичными и пластичными кристаллами, предназначенными в основном для получения поликристаллических ИК волокон.

На основании литературных данных и результатах исследований фазовой диаграммы AgBr–AgI были получены новые оптические монокристаллы твердых растворов в диапазоне составов от 0 до 33 мас.% AgI в AgBr, из которых методом горячего прессования можно получать различные оптические изделия, в том числе поликристаллические ИК волокна.

Монокристаллы системы AgBr–AgI были выращены при помощи вертикального метод Бриджмена из шихты, полученной гидрохимическим методом ТЗКС. Метод ТЗКС является базовым и позволяет стабильно получать сырье высокой степени чистоты (до 99.99999 мас.%) в виде поликристаллических твердых растворов задаваемого состава, предназначенных для выращивания кристаллов.

Основной характеристикой новых кристаллов является диапазон оптической прозрачности. Исследования проводились на поликристаллических и монокристаллических пластинках толщиной 0.35 – 3.00 мм в диапазонах длин волн 0.19–1.10 мкм (УФ спектрофотометр Shimadzu UV-1800), 1.28–41.60 мкм (ИК Фурье спектрометр IRPrestige-21 Shimadzu), 14.7–60.6 мкм (Vertex 80, Bruker с расширенным ИК диапазоном). Было установлено, что в зависимости от содержания в кристаллах тяжелого по молекулярной массе йода в системе AgBr–AgI диапазон пропускания для коротковолнового и длинноволнового края поглощения смещается в сторону увеличения длины волны (от 0.465 до 0.480 мкм и от 46.0 до 50.0 мкм, соответственно). При этом наблюдается сильное увеличение фотостойкости материала, которое, по предварительным данным, превышает даже фотостойкость твердых растворов системы AgBr–TlBr<sub>0.46</sub>I<sub>0.54</sub> [1].

1. A.S. Korsakov et al., Chinese Opt. Latt. **14** (2), 020603 (2016).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОЙ ДИАГРАММЫ AgBr–AgI

К.А. Егорова, Л.В. Жукова, А.С. Корсаков, А.Е. Львов, П.В. Пестерева,  
Д.Д. Салимгареев, А.А. Южакова

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России  
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург  
E-mail: [l.v.zhukova@urfu.ru](mailto:l.v.zhukova@urfu.ru)*

В настоящее время волоконно-оптическая продукция на основе галогенидсеребряных световодов системы AgCl–AgBr для различных областей науки и техники, в том числе для биотехнологий и лазерной медицины, активно реализуется различными фирмами. Недостатком этой системы твёрдых растворов является эффект старения, связанный с высокой фоточувствительностью. Тем не менее, твердые растворы системы AgCl – AgBr, прозрачные от 0.4 до 30.0 мкм, являются единственными нетоксичными, негигроскопичными и пластичными кристаллами, предназначенными в основном для получения поликристаллических ИК волокон [1]. Необходимость расширения рабочего спектрального диапазона световодов от ближней ИК области (0.8–2.0 мкм), где применяются кварцевые волокна, до средней и даже дальней ИК области (до 100.0 мкм), обосновывает поиск новых оптических материалов, разработку технологий их синтеза, исследование структуры, свойств и областей применения. Поэтому актуальной задачей является разработка радиационно-стойких, негигроскопичных и пластичных кристаллов для изготовления оптических деталей.

В связи с этим представляло интерес исследовать квазибинарную систему AgBr–AgI. Данный выбор был обоснован, во-первых, схожими физико-химическими свойствами материалов, которые хорошо образуют твердые растворы замещения, плавящихся при более низкой температуре, чем исходные компоненты. Во-вторых, более тяжелым ионом йода, введение которого должно повышать диапазон пропускания в дальнем ИК и уменьшать фоточувствительность материала.

Изучение фазовой диаграммы AgBr–AgI проводилось методами дифференциально-термического и рентгеноструктурного анализов (ДТА, РФА). Эксперименты проводили в запаянных ампулах из стекла «пирекс» специальной формы, при гомогенизации образцов в течение 20 часов при температуре 550 °С. Скорость нагрева и охлаждения составляла 2 и 5 °С в минуту. Изучение фазовой диаграммы показало возможность получения однофазного гомогенного материала в диапазоне составов от 0 до 33 мас.% AgI в AgBr и возможность выращивания из него оптических монокристаллов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта №18-73-10063.

1. A.S. Korsakov et al., *App. Opt.* **54** (26), 8004 (2015).

# СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ ОКСИДОМ ЦЕРИЯ

О.Б. Петрова, Л.М. Савенко, К.С. Серкина, И.В. Степанова

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

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

Висмутгерманатные стекла являются перспективной активной средой для лазеров с перестраиваемой частотой излучения в ИК диапазоне, благодаря наличию у них широкополосной люминесценции в области 1100–1500 нм, связанной с висмутовыми активными центрами (ВАЦ) [1]. Количество ВАЦ можно регулировать, изменяя условия синтеза или отжига стекла [2], или вводя в стекло ионы-окислители [3], в том числе ионы  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Ce}^{4+}$ , не имеющие собственных полос поглощения в видимой и ближней ИК области спектра. Данная работа посвящена исследованию влияния ионов церия на концентрацию ВАЦ в стеклах.

Был проведен синтез стекол в системе  $x\text{Vi}_2\text{O}_3 - (100-x)\text{GeO}_2 - y\text{CeO}_2$ , где  $x = 10, 15, 20, 25$  мол.%;  $y = 0; 0.01; 0.05; 0.1; 1$  мол.%. Смесь оксидов плавил при  $t = 1100$  °С в течение 30 минут, затем отливали расплав на металлическую подложку. Спектры поглощения образцов снимали на спектрофотометре UNICO 2800 (UV/VIS) в диапазоне 190–1100 нм.

Синтезированные висмутгерманатные стекла без оксида церия имеют красную окраску. Их спектры поглощения содержат характерную широкую полосу поглощения в области 500 нм, интенсивность которой зависит от количества ВАЦ [2].

Добавление  $\text{CeO}_2$  приводит к уменьшению количества ВАЦ вследствие окисления ионов висмута, входящих в структуру ВАЦ. Степень влияния  $\text{CeO}_2$  на свойства стекол зависит от концентрации в стекле, как оксида церия, так и оксида висмута. В сериях стекол, содержащих 10 и 15 мол.%  $\text{Vi}_2\text{O}_3$ , образцы полностью обесцвечиваются при добавлении 0.05 мол.%  $\text{CeO}_2$ , а при дальнейшем увеличении количества церия приобретают желтый цвет. Обесцвечивание связано с разрушением ВАЦ, а появление желтой окраски обусловлено смещением коротковолнового края поглощения в длинноволновую область вследствие уменьшения энергетической щели стекол под влиянием  $\text{CeO}_2$ . В сериях стекол, содержащих 20 и 25 мол.%  $\text{Vi}_2\text{O}_3$ , при той же концентрации  $\text{CeO}_2$  (0.05 мол.%), интенсивность поглощения в области 500 нм снижается, но ВАЦ не исчезают полностью, из-за окисления только части ионов висмута.

1. Е.М. Дианов, Квантовая электроника **40 (4)**, 283 (2010).
2. И.В. Степанова, К.С. Серкина, О.Б. Петрова, Оптика и спектроскопия конденсированных сред: материалы XXV Междунар. науч. конф. Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 95(2019).
3. A. Winterstein et al., Optical Materials Express **2 (10)**, 1320 (2012).

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ВОЗДУХЕ И В ВАКУУМЕ  
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ЧАСТИЧНО  
СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ  
2Y-0.8RSZ (R- Ce, Nd, Tb, Er, Yb)

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

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

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

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

*E-mail: ya.natalka2112@yandex.ru*

Высокая прочность, износостойкость, вязкость разрушения и низкий коэффициент трения кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦ) обуславливают большие перспективы их использования в качестве конструкционных материалов, элементов триботехники, режущих медицинских инструментов и т.д. Одним из ключевых преимуществ материалов на основе диоксида циркония является их способность сохранять прочностные свойства при воздействии высоких температур. Однако кристаллы ЧСЦ являются метастабильными, поэтому важным аспектом их практического применения, позволяющим установить температурные интервалы эксплуатации, является исследование влияния термического отжига на фазовую стабильность.

Ранее проведенные исследования показали, что вариация солегирующих добавок в твердых растворах на основе диоксида циркония может обеспечить получение материалов с улучшенными механическими характеристиками [1]. Также в работе [1] было продемонстрировано влияние вида солегирующей примеси на трещиностойкость кристаллов 2Y-0.8RSZ (R –Ce, Nd, Y, Er, Yb) и установлен состав с наиболее высокими значениями коэффициента трещиностойкости.

В настоящей работе был проведен анализ эволюции фазового состава и значений коэффициента трещиностойкости кристаллов 2Y-0.8RSZ (R – Ce, Nd, Tb, Er, Yb) при термообработке на воздухе и в вакууме, с целью выявления составов, обладающих оптимальными механическими характеристиками, при работе в широком диапазоне температур.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ №18-00-397.

1. М.А. Borik et al., Materials Chemistry and Physics **232**, 28 (2019).

# ВЛИЯНИЕ НЕСТЕХИОМЕТРИИ ШИХТЫ И УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФАЗЫ $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$

И.Х. Аветисов, М.И. Гуслистов, М.П. Зыкова, О.Б. Петрова, К.И.

Рунина, И.В. Степанова

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

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

Кристаллическая фаза  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$  по некоторым сегнетоэлектрическим характеристикам является аналогом керамики  $\text{BaTiO}_3$  [1]. По мнению большинства авторов, эта фаза является метастабильной, что требует определенных температурных условий для ее синтеза [2]. С нашей точки зрения, данную фазу можно рассматривать как нестехиометрическую, образующуюся в системе  $\text{Bi-Ge-O}$  при дефиците кислорода (избытке висмута). В данной работе исследовано влияние нестехиометрии шихты и температуры расплава на фазообразование в системе  $\text{Bi-Ge-O}$ .

Для синтеза готовили шихту состава  $50[(1-x)\text{Bi}_2\text{O}_3 - 2x\text{Bi}] - 50\text{GeO}_2$  (мол.%), где  $x = 0; 0.05; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5$ . Такое мольное соотношение оксидов висмута и германия (50:50) соответствует формуле соединения  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$ , а замещение части  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  на металлический  $\text{Bi}$  создает необходимую нестехиометрию по кислороду. Синтез кристаллических фаз проводили охлаждением расплава исходной шихты, предварительно выдержанного в течение 15 минут при температурах 1020 или 1100 °С. Структуру фаз анализировали с помощью рентгеновского дифрактометра Inel Equinox-2000 ( $\text{CuK}_\alpha$ ,  $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$ ) в интервале углов  $2\Theta = 10-80^\circ$ .

При охлаждении расплава, полученного из стехиометрической шихты ( $x = 0$ ) при 1020 °С, содержание искомой фазы  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$  в конечном продукте не превышает 33%. Замещение  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  на  $\text{Bi}$  при тех же условиях синтеза увеличивает долю фазы  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$ , вплоть до 100% при  $x = 0.4$ . Надо отметить, что структура и количество вторичных кристаллических фаз изменяются в зависимости от количества введенного  $\text{Bi}$ .

При охлаждении расплава с  $t = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$  содержание фазы  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$  в конечном продукте при  $x = 0$  достигает до 87%, а уже при  $x = 0.1$  она становится единственной кристаллической фазой. Полагаем, повышение температуры расплава приводит к восстановлению ионов висмута, что способствует возникновению недостатка кислорода и, как следствие, приводит к преимущественному образованию фазы  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$ . Таким образом, увеличение нестехиометрии исходной шихты, так же, как и повышение температуры расплава способствуют кристаллизации единственной фазы  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$ .

1. K. Pengpat, D. Holland, J. of the Europ. Ceram. Soc. **23**, 1599 (2003).
2. V.P. Zhereb, V.M. Skorikov, Inorg. Mat. **39**, 2, S121 (2003).

## МЕТОДИКА ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК КАРБОКСИЛИРОВАНИЕМ

М.В. Бузаева<sup>1</sup>, М.С. Ефимов<sup>1</sup>, И.А. Макарова<sup>1</sup>, В.А. Сергеев<sup>1,2</sup>, И.В. Фролов<sup>1,2</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: [m.buzaeva](mailto:m.buzaeva)

При карбоксилровании УНТ в смеси концентрированных серной и азотной кислот при 90 °С [1] количество привитых групп доходит до 4.0 мас. %. Недостаток способа – образование аморфного углерода. В разработанной нами методике карбоксилорования многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) в смеси пероксида водорода, серной и азотной кислот при температуре не выше 70 °С в течение 120 мин снижение температуры позволило избежать образования аморфного углерода и повысить содержание карбоксильных групп до 5.5 мас.% [2] (рис. 1).

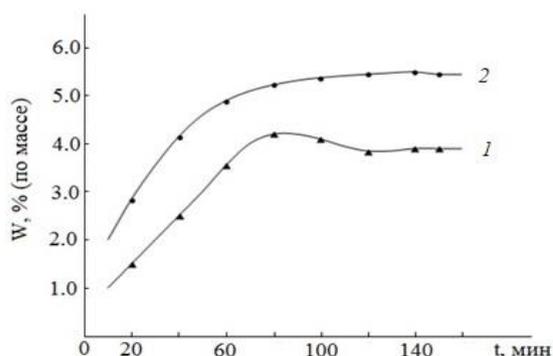


Рис. 1. Содержание карбоксильных групп в МУНТ от времени функционализации:

- 1 – смесью  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$  при 90 °С;
- 2 – смесью  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$  при 70 °С.

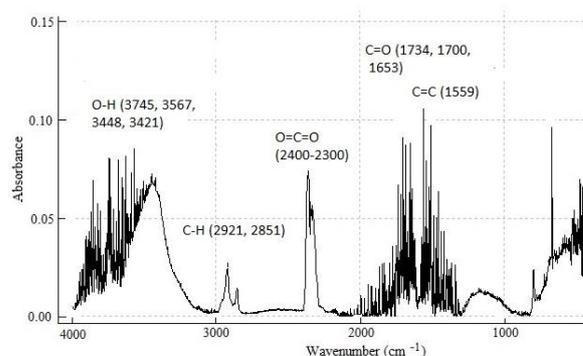


Рис. 2. ИК спектр образца МУНТ-СООН в KBr. Спектрометр IRAffinity-1.

На поверхности функционализированных МУНТ (МУНТ-СООН) кроме карбоксильных находятся карбонильные и гидроксильные группы.

В ИК спектрах МУНТ-СООН (рис. 2) наблюдается широкая полоса поглощения в области 3000–3800  $\text{cm}^{-1}$  (колебания ОН групп). Полосы поглощения 2851 и 2921  $\text{cm}^{-1}$  относятся к колебаниям С–Н групп, полоса 1559  $\text{cm}^{-1}$  характерна для связи С=С углеродного скелета УНТ. Полосы 1653, 1700, 1734  $\text{cm}^{-1}$  соответствуют колебаниям связи С=О. Полученные результаты находятся в соответствии с известными данными, [3]. Линейчатый вид ИК спектра обусловлен адсорбцией на МУНТ молекул газа из воздуха. Полосы 2300–2400  $\text{cm}^{-1}$  относятся к углекислому газу.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Ульяновской области (проект РФФИ № 19-42-730011).

1. М.Н. Кирикова: дисс. канд. хим. наук. Москва, 2009, 150 с.
2. И.А. Макарова: дисс. канд. хим. наук. Ульяновск, 2018, 122 с.
3. В.А. Егоров: дисс. канд. хим. наук. Н. Новгород, 2012, 163 с.

# ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ, ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ОКСИДОМ ГАДОЛИНИЯ

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

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

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

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

Твердые растворы на основе диоксида циркония являются перспективными тугоплавкими материалами, которые способны работать в агрессивных окислительных средах при повышенных температурах. Твердые растворы на основе диоксида циркония с кубической и тетрагональной структурой являются термодинамически метастабильными при комнатной температуре и в условиях эксплуатации при повышенных температурах могут претерпевать структурные превращения, приводящие к существенной деградации их функциональных характеристик.

В данной работе приводятся результаты исследования механических свойств, структуры и фазовой устойчивости твердых растворов  $ZrO_2-Gd_2O_3$  после отжига при температуре 1600 °С на воздухе и в вакууме.

Кристаллы выращивали методом направленной кристаллизации расплава в холодном контейнере. Определение фазового состава кристаллов проводили методом рентгеновской дифрактометрии. Микротвердость и трещиностойкость кристаллов измеряли методом индентирования.

Исследование фазового состава и механических характеристик кристаллов на основе диоксида циркония в зависимости от концентрации стабилизирующего оксида показало, что увеличение концентрации  $Gd_2O_3$  в кристаллах от 2.8 до 4.0 мол.% приводит к уменьшению содержания трансформируемой тетрагональной фазы и уменьшению степени ее тетрагональности. Эти факторы в конечном итоге приводят к уменьшению трещиностойкости кристаллов с увеличением концентрации  $Gd_2O_3$ .

Показано что отжиг тетрагональных твердых растворов  $ZrO_2-Gd_2O_3$  приводит к увеличению значений трещиностойкости для всех исследуемых составов, за счет снятия микронапряжений в кристаллах. Фазовый анализ показал, что после отжига при температуре 1600 °С на воздухе количество нетрансформируемой тетрагональной фазы увеличилось для всех образцов по сравнению с ростовыми кристаллами и кристаллами термообработанными на воздухе. При отжиге на воздухе значения трещиностойкости выше, чем при отжиге в вакууме, так как количество нетрансформируемой фазы при отжиге на воздухе не увеличивается.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №16-13-00397.

# КРИСТАЛЛЫ ГРУППЫ БОРАТОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ

Ю.М. Андреев<sup>1</sup>, С.Г. Гречин<sup>2</sup>, Г.В. Ланский<sup>1</sup>, А.А. Мамрашев<sup>3</sup>,  
Н.А. Николаев<sup>3</sup>, П.П. Николаев<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

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

<sup>3</sup>Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

<sup>4</sup>ООО «Неофотоника», Санкт-Петербург

E-mail: [S.G.Grechin@mail.ru](mailto:S.G.Grechin@mail.ru)

Впервые представлены результаты по генерации субтерагерцового (0.3–0.1 ТГц или 1–3 мм) излучения в нелинейных кристаллах семейства боратов с небольшой величиной нелинейности второго порядка: одноосном кристалле  $\beta$ - $\text{BaB}_2\text{O}_4$  (ВВО) точечной группы симметрии (ТГС)  $3m$  с элементарной ячейкой из 42 атомов, имеющим нелинейный коэффициент  $d_{22} = 2.3$  пм/В; двухосных кристаллах  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  (LBO, ТГС  $-\text{mm}2$ , 36 атомов,  $d_{32} = 0.85$  пм/В) и  $\beta$ - $\text{BiB}_3\text{O}_6$  (ВВВ, ТГС  $-2$ , 20 атомов,  $d_{26} = 3.48$  пм/В). Особенностью этих кристаллов является сложная структура элементарной ячейки, высокий порог оптического разрушения, большой коэффициент поглощения для неполяризованного излучения выше 0.5 ТГц [1–3]. Большие кислородосодержащие комплексы в них позволяют получить небольшой коэффициент поглощения в низкочастотной части спектра.

Кристалл LBO в ближнем ИК диапазоне имеет низкий коэффициент поглощения менее  $10^{-5}$   $\text{см}^{-1}$ . Коэффициент поглощения кристалла ВВВ на длине волны 1064 нм оказался в 2 раза меньше, чем для высококачественного кристалла ВВО.

Оптические свойства кристаллов в терагерцовой области спектра до 2.4 ТГц были исследованы с помощью ТГц спектрометра с разрешением во времени TeraPulse 4000 (TeraView, Англия), снабженным программным обеспечением собственной разработки. На рис.1 видно, что кристалл ВВВ имеет минимальный коэффициент поглощения наряду с максимальным нелинейным коэффициентом в ТГц области. Поэтому он является наиболее перспективным кристаллом для генерации ТГц излучения. С другой стороны, он относится к точечной группе симметрии 2 и имеет очень специфические физические свойства, что делает контроль его выходных параметров сложной задачей. Результаты по процессу преобразования будут доложены на конференции.

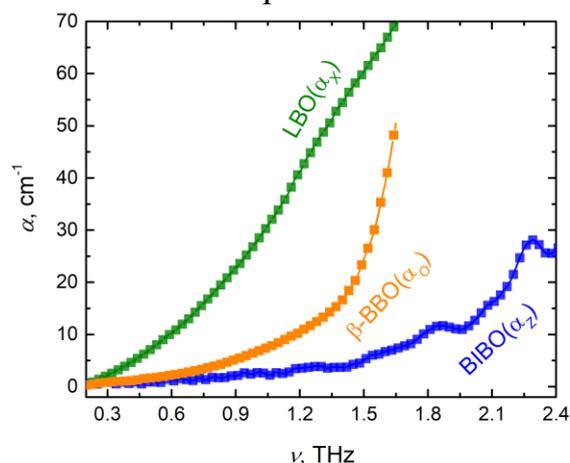


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициентов поглощения кристаллов LBO, ВВО, ВВВ.

1. D.M. Lubenko et al., Proc. SPIE **11322**, 274351 (2019).
2. N.A. Nikolaev et al., J. of Physics: Conference Series **951**, 012005 (2018).

3. Y. Lee et al., *Results in Physics* **19**, 102815 (2019).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ ФАЗОВОГО СОСТАВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА И КОБАЛЬТА

П.В. Андреев, Е.А. Ланцев, К.Е. Сметанина

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

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

Твердые сплавы на основе WC – Co характеризуются высокой прочностью и износостойкостью, что позволяет использовать их в качестве металлорежущего инструмента. Повышение механических свойств данных материалов связано с задачей об однородности их фазового состава.

Перспективным методом получения сплавов является электроимпульсное плазменное спекание порошков. Поверхность частиц порошка WC всегда окислена, из-за чего в спекаемом объеме при нагревании может возникнуть дефицит углерода вследствие образования CO и CO<sub>2</sub>. Нарушение стехиометрии провоцирует образование хрупких η-фаз (Co<sub>x</sub>W<sub>y</sub>C<sub>z</sub>) [1]. Диффузия углерода с графитовой пресс-формы, в которую засыпается порошок, позволяет уменьшить этот эффект: поверхностный слой образца не будет содержать η-фазы, но на некотором расстоянии от поверхности эти фазы могут существовать.

В качестве объектов исследования выступали 3 твердосплавных образца, спеченные из плазмохимического порошка WC и кобальта (10% масс.), нанесенного на поверхность частиц WC методом осаждения. Спекание осуществлялось на установке «Dr. Sintermodel SPS-625» в вакууме (V = 50 °C/мин, P = 70 МПа) при 1050 °C, 2 образца – с дегазационной выдержкой при 850 °C в течение 10 мин. Поверхность образцов последовательно шлифовалась алмазными дисками и полировалась алмазной пастой. Высота образцов контролировалась микрометром.

Рентгенодифракционные эксперименты проводились на дифрактометре «Shimadzu XRD-7000» (CuKα, λ = 1.54 Å). Для определения глубины диффузии углерода были построены зависимости I<sub>η(511)</sub>/I<sub>WC(111)</sub> от суммарной величины удаленного слоя (рис. 1). Толщина поверхностного слоя образцов, не содержащая η-фазу (Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C), не превышает 100 мкм.

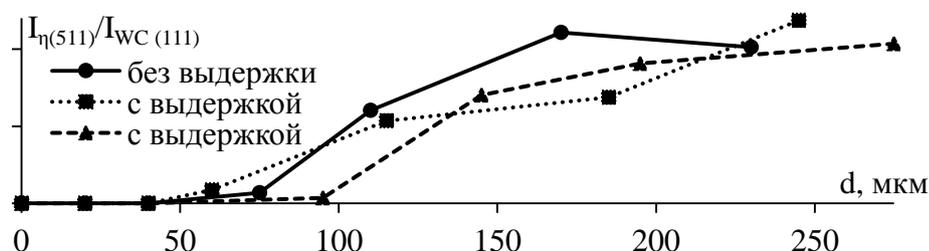


Рис. 1. Распределение I<sub>η(511)</sub>/I<sub>WC(111)</sub> по глубине образцов, спеченных при 1050 °C.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-73-10177.

1. А.С. Курлов, А.И. Гусев, *Физика и химия карбидов вольфрама*, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013.

# РАЗБАВЛЕННЫЙ МАГНИТНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК GaMnAs, СФОРМИРОВАННЫЙ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ

Ю.А. Данилов<sup>1,2</sup>, Б.Н. Звонков<sup>1</sup>, С.Ю. Зубков<sup>2</sup>, Р.Н. Крюков<sup>1</sup>,  
Д.Е. Николичев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ  
им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

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

Потребность в качественно новых материалах привела к необходимости создания систем, которые бы проявляли ферромагнитные и полупроводниковые свойства. Наиболее подходящими на эту роль являются разбавленные магнитные полупроводники (РМП) в общем и  $Ga_{1-x}Mn_xAs$  в частности. Такого рода материалы являются крайне прихотливыми к технологии их получения. Поэтому параллельно с оптимизацией физико-химических свойств РМП ведутся поиски производительных технологий получения, которые бы позволили создавать качественные слои РМП. Сегодня для этой цели применяют низкотемпературную молекулярно-лучевую эпитаксию, ионное легирование и импульсное лазерное осаждение (ИЛО). Возможность комбинирования ИЛО с другими технологиями роста в едином технологическом цикле делает его наиболее перспективным для создания  $Ga_{1-x}Mn_xAs$ .

В ходе исследований были изучены образцы, представляющие собой слои  $Ga_{1-x}Mn_xAs$ , выращенные на подложке n-GaAs (001) методом импульсного лазерного распылением мишени из металлического Mn и GaAs [1] при температуре 250–350 °С. Исследования методом РФЭС проводились на комплексе Multiprobe RM (OmicronNanotechnologyGmbH, Германия) с применением SFR-методики для спектрального анализа [2].

В ходе работы выявлено, что РМП GaMnAs представляет собой многокомпонентную магнитную систему: 1) комплекс кластеров  $\alpha$ -MnAs; 2) области GaAs, где атомы Ga полностью замещены атомами марганца; 3) хаотично расположенные изолированные атомы Mn, встроенные в решетку GaAs; 4) элементный марганец; 5) оксидные фазы марганца. Установлено, что количество арсина в реакторе в процессе импульсного лазерного осаждения при температуре подложки 250–350 °С регулирует состав и концентрацию химических соединений в слоях GaMnAs.

Работа выполнена в рамках реализации проекта РНФ №19-19-00545.

1. B.N. Zvonkov et al., J. Opt. Technol. **75**, 389 (2008).
2. A.V. Boryakov et al., J. Elec. Spectr. and Related Phen. **50(11)**, 1443 (2018).

## СВЕТОИЗЛУЧАЮЩАЯ ГЕКСАГОНАЛЬНАЯ ФАЗА 9R-Si

А.И. Белов, А.А. Конаков, Д.С. Королев, М.О. Марычев, А.Н. Михайлов,  
Р.И. Муртазин, А.А. Никольская, Д.А. Павлов, Д.И. Тетельбаум  
*Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*  
*E-mail: [nikolskaya@nifti.unn.ru](mailto:nikolskaya@nifti.unn.ru)*

Для повышения скорости передачи сигналов внутри суперкомпьютерных комплексов была выдвинута идея использования светового сигнала вместо электрического. Но кремний – традиционный материал микроэлектроники – не может быть использован в качестве излучателя света из-за особенностей зонной структуры в его обычной кубической фазе. Поэтому актуален поиск методов модификации кремния для повышения его люминесцентных свойств.

Ранее нами было обнаружено [1, 2], что при облучении системы SiO<sub>2</sub>(160 и 140 нм)/Si ионами Kr<sup>+</sup> с последующим отжигом в кремнии на границе с пленкой образуются включения гексагонального кремния – фазы 9R-Si. Средний проецированный пробег (R<sub>p</sub>) ионов криптона был меньше толщины плёнки. Для данных образцов обнаружена линия фотолюминесценции (ФЛ) при ~ 1235 нм, которая была отнесена нами к излучению фазы 9R-Si. Для изучения механизма формирования гексагональной фазы 9R-Si при ионном облучении системы SiO<sub>2</sub>/Si в настоящей работе методом ФЛ и просвечивающей электронной микроскопии исследовались три типа образцов: 1 – система SiO<sub>2</sub>(140 нм)/Si, облученная ионами Kr<sup>+</sup> (R<sub>p</sub> ~ 50 нм), 2 – Si, облученный Kr<sup>+</sup>, 3 – Si, облученный ионами Kr<sup>+</sup> и O<sup>+</sup>. Энергия и доза ионов Kr<sup>+</sup> для образцов 2 и 3 типа были подобраны так, чтобы профиль вакансий Si в кремнии по форме и высоте (согласно SRIM [3]) был близок к таковому в образце 1 типа. Энергия и доза ионов O<sup>+</sup> подбирались так, чтобы количество атомов кислорода на единицу площади совпадало с количеством атомов отдачи кислорода, образовавшихся при облучении образца 1 типа. Все образцы были подвергнуты постимплантационному отжигу. В образце 1 типа обнаружены фаза 9R-Si и линия ФЛ при ~ 1235 нм; в образце 3 типа – такая же линия и дефекты двойникования, в образце 2 типа ФЛ при ~ 1235 нм не выявлено. Результаты обсуждаются с учетом роли механических напряжений, радиационных дефектов и кислорода в формировании гексагональной фазы 9R-Si в кремнии.

Работа поддержана РФФИ (гранты №8-32-20168 и №19-53-45056).

1. A.A. Nikolskaya et al., Appl. Phys. Lett. **113**,182103 (2018).
2. A.A. Nikolskaya et al., Surf. Coat. Technol. **386**, 125496 (2020).
3. J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **268**, 1818 (2010).

## КРАСНЫЕ ЛЮМИНОФОРЫ НА ОСНОВЕ ФТОРХЛОРЦИРКОНАТНЫХ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ МАРГАНЦА

С.Х. Батыгов<sup>1</sup>, М.Н. Бреховских<sup>2</sup>, В.В. Глушкова<sup>2</sup>, Л.В. Моисеева<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва*

*E-mail: [lmois@lst.gpi.ru](mailto:lmois@lst.gpi.ru)*

В последнее время проводятся исследования по разработке светодиодных источников «теплого» белого свет. Одним из решений этой задачи является добавление красного люминофора, эффективно возбуждаемого УФ или синим светодиодом, к исходному желтому люминофору на основе граната. В связи с этим значительные перспективы имеют люминофоры, легированные ионами марганца различной валентности, которые в зависимости от матрицы могут излучать красный свет. В настоящей работе исследовали влияние замещения фтора хлором на оптические свойства легированных марганцем фторцирконатных стекол состава  $56\text{ZrF}_4 \cdot 14\text{BaF}_2 \cdot 6\text{LaF}_3 \cdot 4\text{AlF}_3 \cdot 20\text{NaF}$  (ZBLAN). Фторхлорцирконатные ZBLAN(Cl) стекла получали частичной или полной заменой  $\text{BaF}_2$  на  $\text{BaCl}_2$  в исходной шихте. Марганец вводили в шихту в виде  $\text{Mn}^{4+}$  с  $\text{MnO}_2$  или в виде  $\text{Mn}^{2+}$  с  $\text{MnF}_2$  в концентрации от 0.2 до 1 мол.%. УФ возбуждение (365 нм) стекол вызывает люминесценцию, спектр которой зависит от состава стекла. В ZBLAN:Mn спектр люминесценции состоит из широкой полосы с максимумом в области 550 нм, обусловленной переходом  ${}^4\text{T}_1 \rightarrow {}^6\text{A}_1$  в ионе  $\text{Mn}^{2+}$  [1]. Люминесценция  $\text{Mn}^{2+}$  наблюдается во всех стеклах, вне зависимости от того в какой валентности марганец вводился в шихту, и определяется скорее условиями синтеза. Замена  $\text{BaF}_2$  на  $\text{BaCl}_2$  в шихте вызывает длинноволновое смещение полос поглощения и люминесценции. УФ край пропускания ZBLAN:Mn расположен при 270 нм, а в ZBLAN(Cl):Mn край смещен до 330 нм. В спектрах пропускания  $\text{Mn}^{2+}$  дает слабые полосы поглощения, обусловленные запрещенными по спину переходами. Максимум полосы люминесценции для стекла с полной заменой  $\text{BaF}_2$  на  $\text{BaCl}_2$  расположен в районе 610 нм, что очень близко к оптимальной длине волны для красного люминофора, используемого в белых светодиодах. Смещение полос поглощения и люминесценции в сторону больших длин волн в ZBLAN(Cl):Mn вызван нефелоксетическим эффектом, связанным с большей ковалентностью связей ионов марганца с ионами хлора по сравнению с их связями с ионами фтора.

Таким образом, синтезирован новый красный люминофор на основе фторхлорцирконатного стекла, легированного ионами марганца, который имеет перспективы применения в светодиодных источниках белого света.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-13-00407, и в рамках государственного задания ИОФ РАН и ИОНХ РАН в области фундаментальных научных исследований.

1. M.A. Bunuel, R. Alcala, R. Cases, J. Phys. Condens. Matter. **10**, 9343 (1998).

ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩАЯ СТЕКЛОКЕРАМИКА В СИСТЕМЕ  
(Li,Na)<sub>2</sub>O-(Ga,Al)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>

Н.В. Голубев, М.З. Зиятдинова, Е.С. Игнатъева, Е.О. Козлова,  
Е.В. Лопатина, А.А. Маурис, В.Н. Сигаев

*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва*  
*E-mail: [ngolubev@muctr.ru](mailto:ngolubev@muctr.ru)*

На основе стекол системы Me<sub>2</sub>O-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> (Me = Li, Na) получен прозрачный стеклокристаллический материал с нанокристаллами  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [1–3]. Низкое светорассеяние и люминесценция при возбуждении только излучением УФ-С диапазона делает его перспективным для разработки солнечно-слепых конверторов. Однако формированию нанокристаллов  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в стеклах указанной системы предшествует фазовое разделение жидкостного типа, приводящее к образованию в исходных образцах областей неоднородности диаметром ~ 8 нм [4]. В результате средний размер выделяющихся нанокристаллов в прозрачной стеклокерамике, полученной по одноступенчатому режиму, составляет не менее ~ 6 нм. Относительно большие размеры нанокристаллов снижают вероятность излучательной рекомбинации, а двухфазная природа исходного стекла обуславливает широкое распределение наночастиц по размеру. Все это ограничивает потенциально достижимые светопропускание и интегральную интенсивность фотолюминесценции данной стеклокерамики. Дальнейшее их повышение возможно только после подавления фазового разделения жидкостного типа в исходных стеклах. С использованием методов «добавок» и «замещения» в настоящей работе изучено влияние Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на фазовое разделение и эффективность люминесценции малощелочных галлиевогерманосиликатных стекол. Показано, что при введении Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> интегральная интенсивность полосы фотолюминесценции растет, а размер выделяющихся нанокристаллов  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> уменьшается. Выявлены взаимосвязи между составом стекол, размерами нанокристаллов и содержанием кристаллической фазы, с одной стороны, и фотолюминесценцией стеклокерамики, с другой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №20-03-00809.

1. V.N. Sigaev et al., *Nanoscale* **6**, 1763 (2014).
2. N.V. Golubev et al., *Journal of Materials Chemistry* **3**, 4380 (2015).
3. A. Paleari et al., *Chem. Phys. Chem.* **18**, 662 (2017).
4. V.N. Sigaev et al., *Nanoscale* **5**, 299 (2013).

## ФОРМИРОВАНИЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ СТРУКТУР В НАТРИЕВОБОРАТНЫХ СТЕКЛАХ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ

А.С. Липатьев, С.В. Лотарев, В.Н. Сигаев, С.С. Федотов

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

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

Разработка новых микрооптических элементов и интегральных оптических схем стимулирует исследования в области прямого лазерного нано- и микроструктурирования прозрачных диэлектриков. Обнаруженные при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов на кварцевое стекло нанорешетки обладают двулучепреломлением, характеристики которого можно регулировать путем варьирования параметров лазерного пучка. Эта особенность открывает новые возможности в разработке сверхстабильной оптической памяти на основе стекла [1] и фазовых элементов [2]. Большинство теоретических и экспериментальных исследований, посвященных прямой лазерной записи нанорешеток, были выполнены на кварцевом стекле. Между тем исследования по формированию нанорешеток в двухкомпонентных стеклах представляют фундаментальный интерес [3] и могут помочь глубже понять механизмы взаимодействия лазера с веществом.

В данной работе исследовано лазерное модифицирование стекол системы  $\text{Na}_2\text{O}-\text{V}_2\text{O}_5$  с содержанием оксида натрия от 14 до 28 мол.%. Для лазерного модифицирования использовался фемтосекундный лазер Pharos SP, излучение которого фокусировалось в объем образцов стекла на глубину 150 мкм с помощью объектива микроскопа с числовой апертурой 0.45. Для натриевооборотных стекол впервые была продемонстрирована возможность возникновения поляризационно-зависимого двулучепреломления под действием фемтосекундных лазерных импульсов. Определены условия лазерной обработки, обеспечивающие двойное лучепреломление с медленной осью, перпендикулярной плоскости поляризации записываемого лазерного пучка. Установлены зависимости фазового сдвига в проходящем через двулучепреломляющие области свете от содержания оксида натрия в составе стекла, количества, частоты следования, энергии и длительности импульсов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (FSSM-2020-0003).

1. J. Zhang et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 033901 (2014).
2. M. Beresna, M. Gecevičius, P.G. Kazansky, Opt. Mater. Express **1**, 783 (2011).
3. S. Lotarev et al., J. Non-Cryst. Solids **479**, 49 (2018).

# ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ КАНАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА В СИТАЛЛЕ С ОКОЛОНУЛЕВЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ

А.С. Липатьев, С.В. Лотарев, В.И. Савинков, В.Н. Сигаев, С.С. Федотов,  
Г.Ю. Шахгильдян

*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва*  
*E-mail: [slotarev@muctr.ru](mailto:slotarev@muctr.ru)*

Прозрачные ситаллы с близким к нулю коэффициентом теплового расширения (КТР) имеют в основе литиевоалюмосиликатное стекло, в котором термообработкой выделяются наноразмерные кристаллы сподумена,  $\beta$ -эвкриптита или  $\beta$ -эвкриптитоподобных твердых растворов с отрицательным КТР. За последние десятилетия ситаллы нашли широкое применение в технике от зеркал телескопов до корпусов кольцевых лазерных гироскопов. Минимизированное тепловое расширение делает их привлекательным материалом для разработки интегральных оптических компонентов и схем для прецизионных устройств, требующих постоянства геометрических размеров в диапазоне рабочих температур.

Исследования фемтосекундного лазерного модифицирования таких ситаллов [1, 2] показали, что воздействие фемтосекундных лазерных импульсов вызывает заметное локальное понижение показателя преломления, связанное с частичной аморфизацией нанокристаллов [2]. Этот эффект дает возможность формирования в ситалле канальных волноводов путем лазерной записи оболочки с пониженным показателем преломления.

В данной работе сформирован набор канальных волноводов с диаметром сердцевины от 9 до 24 мкм и оболочкой в виде серии параллельных треков, записанных в объеме стекла сфокусированным фемтосекундным лазерным пучком с длиной волны 1030 нм, длительностью и частотой следования импульсов 180 фс и 10 кГц, перемещающимся вдоль поверхности пластины ситалла со скоростью 0.2 мм/с.

Установлена возможность формирования в ситалле одномодовых волноводов. Проведенный с помощью пучка непрерывного лазера с длиной волны 1064 нм анализ показал, что полученные одномодовые волноводы имеют потери на распространение света не выше 2.4 или 2.7 Дб/см в зависимости от ориентации плоскости поляризации канализированного в волноводе света.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, FSSM-2020-0003.

1. V.R. Bhardwaj et al., J. Appl. Phys. **97**, 083102 (2005).
2. V.N. Sigaev et al., Glass Ceram. **76**, 370 (2020).

ПРОЗРАЧНЫЕ ЛИТИЕВОАЛЮМОСИЛИКАТНЫЕ СИТАЛЛЫ  
С РЕГУЛИРУЕМЫМ ТЕРМИЧЕСКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ  
ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ В ОБЛАСТИ НУЛЕВЫХ ЗНАЧЕНИЙ

Е.В. Лопатина, С.В. Лотарев, А.С. Наумов, В.И. Савинков, В.Н. Сигаев,  
Г.Ю. Шахгильдян

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

*E-mail: [andreynaum13@mail.ru](mailto:andreynaum13@mail.ru)*

Благодаря возможности достижения термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР), близкого к нулевым значениям, прозрачные стеклокристаллические материалы (ситаллы) литиево-алюмосиликатной (ЛАС) системы занимают особое место среди оптических материалов [1]. Основное внимание в разработках последних лет уделяется улучшению варочных свойств ситалловых стекол и достижению стабильных и прецизионно изменяемых значений ТКЛР.

Настоящая работа посвящена установлению взаимосвязей между условиями термообработки ЛАС стекла и значениями ТКЛР получаемых ситаллов для прецизионного регулирования ТКЛР ситаллов в области нулевых значений. Объектом исследования служило стекло на основе системы  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  (ЛАС), особенности состава и технологии синтеза которого подробно описаны в патенте [2].

С привлечением методов РФА, ДТА и просвечивающей электронной микроскопии (ThermoFisherScientificTitan 80–300 ТЕМ с ускоряющим напряжением 300 кВ в режиме темного поля) изучены процессы выделения и роста в ЛАС стекле нанокристаллов  $\beta$ -эвкрипититоподобных твердых растворов и определены их размеры, форма и количество в зависимости от режимов термообработки. Полученные данные сопоставлены с дилатометрическими кривыми, что позволило определить режимы тонкой регулировки ТКЛР вблизи нулевых значений. Установлены особенности возникновения и развития нанонеоднородной структуры в ЛАС стекле, которые открывают возможность создания прозрачных термостабильных ситаллов, обладающих слабо изменяющимся околонулевым ТКЛР в необычайно широком диапазоне температур: от  $-80$  до  $+400$  °С.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение №19-19-00613) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант №19-03-00684).

1. E.D. Zanotto, American Ceramics Society Bulletin **89**, 19 (2010).
2. В.Н. Сигаев и др., Патент РФ 2569703 С1 МПК С03С 10/12.

ПРОЗРАЧНЫЙ ЛИТИЕВО-АЛЮМОСИЛИКАТНЫЙ СИТАЛЛ,  
АКТИВИРОВАННЫЙ ИОНАМИ НЕОДИМА С ТКЛР,  
СТАБИЛИЗИРОВАННЫМ ВБЛИЗИ НУЛЕВОГО ЗНАЧЕНИЯ

С.В. Лотарев, А.С. Наумов, В.И. Савинков, В.Н. Сигаев

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

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

Прозрачные ситаллы литиево-алюмосиликатной (ЛАС) системы занимают особое место среди оптических материалов, выступающих в качестве матричной среды для введения активаторов люминесценции (ионов редкоземельных элементов). Интерес к этим материалам объясняется возможностью совмещать спектрально-люминесцентные характеристики с высокой термостойкостью, которая обеспечивается ультранизкими значениями температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР). В общем случае значения ТКЛР ситаллов имеют нелинейную температурную зависимость и тонкая настройка значений ТКЛР возможна путем оптимизации фазового состава и установления прецизионных соотношений между объемными долями аморфной и кристаллических фаз. Ранее было показано, что особенности возникновения и развития нанонеоднородной структуры в стеклах ЛАС системы дают возможность прецизионного регулирования ТКЛР формируемого прозрачного ситалла, открывая путь к дальнейшему совершенствованию этого важного для оптического приборостроения материала. Однако введение заметного количества редкоземельного активатора люминесценции может существенно повлиять на характер кристаллизации стекла, что изучено явно недостаточно.

В представленной работе исследованы процессы катализированной кристаллизации твердых растворов  $\beta$ -кварца с добавками ионов неодима для получения термостабильных светоизлучающих сред в ближней ИК области. Исследованы спектрально-люминесцентные свойства стекол и ситаллов ЛАС системы с легирующими добавками в зависимости от условий синтеза. Количество оксида неодима варьировалось от 0.1 до 3 мол.% ( $\text{Nd}_2\text{O}_3$  вводился сверх 100% состава матрицы). Температурная обработка синтезированных стекол длительностью до 48 ч изменялась на второй ступени ситаллизации от 710 до 760 °С.

На данном этапе установлено, что в ЛАС ситалле с ТКЛР, близким к нулевому значению, могут быть воспроизведены спектрально-люминесцентные свойства исходного ЛАС стекла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение №19-19-00613) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант №19-03-00684).

ПРОЗРАЧНЫЕ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ  
ПОВЫШЕННОЙ ТВЕРДОСТИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ  
 $MgO-ZnO-Al_2O_3-SiO_2$

В.И. Савинков, В.Н. Сигаев, А.Ю. Шахгильдян, Г.Ю. Шахгильдян  
*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва*  
*E-mail: [vlad.sigayev@gmail.com](mailto:vlad.sigayev@gmail.com)*

Низкая твердость материалов, используемых для защиты сенсорных экранов, является одной из главных проблем, с которой сталкиваются производители мобильных устройств. В основном для защиты экранов используются ионноупрочненные стекла типа GorillaGlass, однако по своим физическим характеристикам они уже не отвечают возрастающим требованиям рынка мобильных устройств. Непродолжительный контакт стекла с твердыми частицами приводит к образованию дефектов, за которыми следует его разрушение при ударном воздействии.

Эта проблема может быть решена переходом к стеклокристаллическим технологиям и созданием прозрачных ситаллов с равномерным распределением в объеме аморфной матрицы нанокристаллов с высокой твердостью.

В данной работе изучено влияние условий термообработки (т/о) на микротвердость (МТ) прозрачных ситаллов. Исходное стекло состава мас. %: 8 MgO; 15 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 42 SiO<sub>2</sub> и 35 (Na<sub>2</sub>O, ZnO, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) было синтезировано методом варки из шихты в корундовом тигле в электрической печи при температуре 1620 °С. Образцы стекла были обработаны по двухступенчатому режиму (680 °С – 4 ч и 750, 780, 800, 820, 830 и 845 °С с выдержкой 10 или 30 ч).

Фазовый состав полученных ситаллов включает смесь сапфирина и ганита, кристаллических структур высокой твердости. Оказалось, что значения МТ исходного стекла уже превышают МТ стекла GorillaGlass. Т/о исходного стекла при 640 °С в течение 4 ч приводит к небольшому снижению МТ, что может быть связано с формированием малого количества твердой фазы, снижающей общую МТ материала [1]. Т/о по двухступенчатому режиму ведет к росту МТ вплоть до значений, превышающих 1050 HV при сохранении прозрачности. При дальнейшем увеличении температуры второй стадии т/о МТ начинает снижаться. Предложены модели, объясняющие поведение механических свойств в зависимости от структурных изменений ситалла.

Полученные значения МТ сапфириновых ситаллов превышают микротвердость всех известных прозрачных стеклокристаллических материалов, и могут быть использованы в качестве защитных экранов широко класса приборов и устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, FSSM-2020-0003.

1. A.J.Stryjak, P.W. McMillan, J.Mat.Sci. **13(8)**, 1794 (1978).

# ФОРМИРОВАНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ МИКРОПОЛОСТЕЙ В ОБЪЕМЕ НАНОПОРИСТОГО СТЕКЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

А.С. Липатьев<sup>1</sup>, С.В. Лотарев<sup>1</sup>, А.Г. Охримчук<sup>1,2</sup>, М.Ю. Пресняков<sup>3</sup>,  
В.Н. Сигаев<sup>1</sup>, С.С. Федотов<sup>1</sup>, Г.Ю. Шахгильдян<sup>1</sup>

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

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

<sup>3</sup>*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва*

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

Нанопористые стекла (НПС) привлекают внимание исследователей благодаря своей уникальной структуре, состоящей из наноразмерных каналов, содержащих глобулы вторичного кремнезема, а также хорошей оптической прозрачности, механической и температурной устойчивости. Ранее было показано, что воздействие на такие стекла фемтосекундными лазерными импульсами может приводить к возникновению двулучепреломления, медленная ось которого направлена перпендикулярно поляризации линейно-поляризованного лазерного пучка, что позволяет использовать данные структуры для многоуровневого кодирования информации [1, 2].

В данном исследовании нанопористое стекло было модифицировано фемтосекундными лазерными импульсами с частотой следования 1МГц, длительностью 180 фс и энергией 50 нДж. Количество импульсов в точку варьировалось от 1 до 3. Методом СЭМ было обнаружено, что двулучепреломляющая структура является полостью с эллиптическим сечением в плоскости перпендикулярной лазерному пучку, окруженная слоем уплотненного водонепроницаемого стекла. При этом большая ось эллипса перпендикулярна поляризации лазерного пучка. Исследование динамики формирования полости показала, что после первого импульса полость имеет круглое сечение и не обладает двулучепреломлением. После второго и третьего импульсов полость вытягивается в направлении перпендикулярном поляризации лазерного излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №19-03-00684).

1. A.S. Lipatiev et al., Appl. Opt. **57**, 978 (2018).
2. S.S. Fedotov et al., Opt. Lett. **43**,851(2018).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ НА СТРУКТУРУ ВОЛНОВОДОВ В $\text{Ag}_2\text{O-ZnO-P}_2\text{O}_5$ СТЕКЛЕ

А.С. Липатьев, С.В. Лотарев, В.Н. Сигаев, С.С. Федотов, Г.Ю. Шахгильдян  
*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва*  
*E-mail: georgiy.shahgildyan@gmail.com*

Нелинейный характер поглощения сверхкоротких лазерных импульсов материалом обеспечивает возможность управления пространственным положением модифицированных областей в объеме, и создавать новые типы интегральных устройств для фотоники, оптоэлектроники и хранения информации. Особый интерес предоставляет возможность создания нелинейно-оптических волноводов в объеме оксидных стекол, что позволит управлять передачей информации на чипе.

В данной работе в объеме стекла состава (мол.%)  $8\text{Ag}_2\text{O}$ ;  $53\text{ZnO}$ ;  $39\text{P}_2\text{O}_5$  записаны волноводы сечением  $3.5 \times 14$  мкм<sup>2</sup> длиной 25 мм, состоящие из наночастиц и кластеров серебра. Лазерно-индуцированное формирование наночастиц подтверждается характерной желтой окраской и конфокальными спектрами поглощения, записанными в областях, содержащих волноводы. Спектры демонстрируют полосы поглощения с максимумом при 450 нм, что соответствует ППР наночастиц серебра. Записанные волноводы также обладают люминесценцией в видимой области, вызванной формированием кластеров серебра. Показано, что при повышении скорости записи волноводов от 2 до 5 мкм/с происходит уменьшение  $\Delta n$  от 4.8 до  $2.3 \cdot 10^{-3}$ , снижение интенсивности полосы ППР и увеличение интенсивности люминесценции, по все вероятности, вследствие снижения числа плазмонных наночастиц серебра и роста числа кластеров. Волноводные свойства продемонстрированы для лазерных пучков с длиной волны 1030 и 1550 нм. Потери, определенные интерференционным методом на длине волны 1550 нм, составляют 1.08 дБ/см.

Впервые показана возможность генерации суперконтинуума в волноводах, содержащих наночастицы серебра: при прохождении по ним фемтосекундного лазерного излучения его спектр уширялся более чем на 60 нм, свидетельствуя о наличии нелинейных свойств у записанных волноводов. Изменение скорости записи волноводов влияет на форму спектров суперконтинуума и характер оптического пробоя волноводов. При большом содержании плазмонных наночастиц в волноводе наблюдается самофокусировка, и оптический пробой локализуется на глубине 60 мкм, тогда как снижение количества наночастиц серебра ведет к оптическому пробоя на поверхности образца. Полученные результаты открывают новые возможности для создания интегральных нелинейно-оптических элементов фотонных чипов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта №19-32-80032 Российского фонда фундаментальных исследований.

## ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА

А.М. Зюзин, А.А. Карпеев, В.В. Наумкин, Н.В. Янцен  
*Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет им. Н.П. Огарева, Саранск*  
*E-mail: [nkyancen@yandex.ru](mailto:nkyancen@yandex.ru)*

Представлены результаты исследований температурных зависимостей удельного объемного сопротивления пероксидносшиваемого электропроводящего композита, матрицей которого являлся этиленвинилацетат. В качестве электропроводящих наполнителей использовались технический углерод (ТУ) и одностенные углеродные нанотрубки (УНТ).

Были исследованы две серии образцов, первые содержали 35% ТУ, вторые – 10% ТУ и 0.1-0.2% УНТ. Получение композитного материала производили путем смешения в расплаве полимерной матрицы. Измерение удельного объемного сопротивления (УОС) образцов композита проводили четырехзондовым методом в нагревательной камере, позволяющей регулировать температуру в диапазоне от 20 °С до 150 °С.

Как видно из рис. 1. температурные зависимости УОС образцов первой и второй серий имеют схожий характер, но образцы первой серии обладают более высоким значением температурного коэффициента сопротивления, причем как в области положительных, так и отрицательных значений. Установлено, что добавление к композитам, содержащим 10% ТУ, всего 0.1-0.2% УНТ позволяло достичь такого же значения УОС при комнатной температуре ( $\rho_0 = 7 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) как и в образцах, содержащих 35% ТУ. Кроме того, присутствие незначительного количества УНТ позволяет обеспечить более высокую термостабильность электропроводности полимерных композитов.

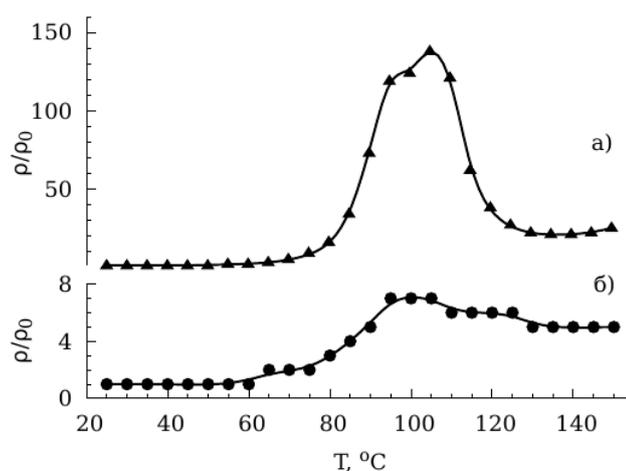


Рис. 1. Температурная зависимость относительного удельного сопротивления:  
(а) – образец первой серии; (б) – образец второй серии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Мордовия в рамках научного проекта №18-48-130015 р\_а.

## КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ФАЗЫ В УГЛЕРОДСОДЕРЖАЮЩЕМ ПОЛИМЕРНОМ КОМПОЗИТЕ

А.М. Зюзин, А.А. Карпеев, В.В. Наумкин, Н.В. Янцен  
*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск*  
*E-mail: [karpeian@yandex.ru](mailto:karpeian@yandex.ru)*

Исследовано влияние технического углерода (ТУ) и насыщения пероксидом на фазовый состав композиционного материала на основе этиленвинилацетата. На рис. 1 представлены кривые ДСК для исходных образцов с разным содержанием ТУ, а также образцов, насыщенных пероксидом. Два ярко выраженных пика на кривой для образца с содержанием ТУ 35% (рис. 1 (а)) свидетельствуют о наличии в исходном композите двух кристаллических фаз: – «1» и более высокотемпературной – «2». Установлено, что доля второй фазы практически линейно возрастает с содержанием ТУ. Для образцов композита, насыщенного пероксидом, кривые ДСК имеют один пик (рис. 1 (b)), свидетельствуя о наличии лишь одной кристаллической фазы. Ярко выраженная зависимость доли кристаллической фазы «2» от содержания ТУ позволяет сделать вывод о том, что формирование этой фазы инициировано частицами технического углерода, которые являются центрами образования кристаллических фрагментов, образуемых макромолекулами матрицы. Отсутствие кристаллической фазы в композите, насыщенном пероксидом, объясняется сшивкой макромолекул полимерной матрицы, которая подавляет кристаллизацию, инициируемую частицами технического углерода.

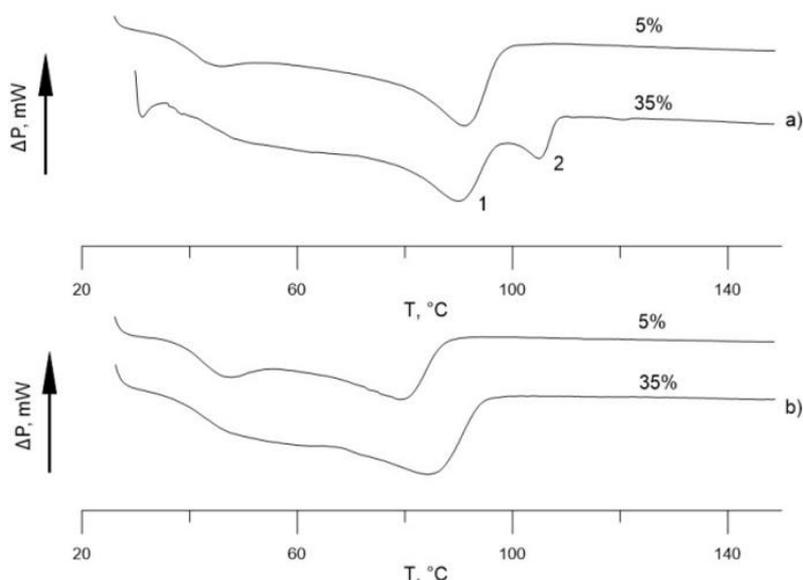


Рис. 1. Кривые ДСК для образцов композита.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Мордовия в рамках научного проекта №18-48-130015 ра.

# NEW FUNCTIONAL MATERIALS

## OPTICAL SPECTROSCOPY OF THE HYBRID PEROVSKITE $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ — A PROMISING MATERIAL OF OPTOELECTRONICS

V.E. Anikeeva<sup>1,2</sup>, K.N. Boldyrev<sup>1,2</sup>, M.N. Popova<sup>1,2</sup>, O.I. Semenova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Spectroscopy of RAS, Troitsk, Russia*

<sup>2</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

<sup>3</sup>*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB of RAS, Novosibirsk, Russia*

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

Hybrid organo-inorganic compounds with perovskite structure are intensively studied in connection with their functional properties. In particular, methylammonium lead iodide  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ( $\text{MAPbI}_3$ ) is considered as the most promising base material for new generation solar cells. This compound is also used in X-ray and gamma-ray detectors, in lasers and LEDs. In the literature one can find a large number of works devoted to the study of  $\text{MAPbI}_3$  by various methods, including optical ones. However, most of these works were performed for thin films. In the A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics in Novosibirsk good quality  $\text{MAPbI}_3$  single crystals were grown with sizes of about a centimeter [1, 2]. In the same Institute, the samples were characterized by X-ray methods, and photoconductivity was measured. A complex of optical studies of  $\text{MAPbI}_3$  single crystals was performed in the Institute of Spectroscopy in a wide range of frequencies (from terahertz to visible) and temperatures (5 – 350 K).

The lecture will give a brief overview of the properties of the hybrid perovskite  $\text{MAPbI}_3$ , mainly optical ones, and the results of our recent studies of single crystals of this compound will be presented. The terahertz reflection spectra provided new information on low-frequency phonons, essential for understanding the thermal properties of the compound and the peculiarities of the electron-phonon interaction. The temperature behavior of the transmission spectra in the mid- and near-IR regions corresponding to multiphonon absorption reflects a change in the dynamics of the organic cation. Optical transmission spectra show a change in the band gap with temperature. In all the spectra, pronounced features were observed at phase transition temperatures from the cubic to tetragonal phase (~ 320 K) and then to the rhombic phase (~ 160 K).

Crystal growth was performed in the frame of State Assignment No. AAAA-A18-118020190098-5. Spectroscopic measurements were carried out with financial support from the RFBR, grant No. 18-32-20142.

1. O.I. Semenova et al., *J. Cryst. Growth* **462**, 45 (2017).
2. E.S. Yudanov et al., *J. Struct. Chem.* **58**, 1567 (2017).

# SYNCHROTRON RADIATION AND LUMINESCENCE SPECTROSCOPY OF NOVEL MATERIALS

V. Pankratov

*Institute of Solid State Physics, University of Latvia, Riga, Latvia*

*E-mail: [vpank@latnet.lv](mailto:vpank@latnet.lv); [vladimirs.pankratovs@cfi.lu.lv](mailto:vladimirs.pankratovs@cfi.lu.lv)*

After its discovery in 1946/47, it took about 15 years until synchrotron radiation (SR) was systematically used for spectroscopy. From that time many spectroscopic methods under SR excitations have been developed. However, the tuneability of SR and its inherent well-defined time structure makes it particularly well suited for time-resolved luminescence studies. Nevertheless, the first pioneering work was published only in 1970 reporting the luminescence spectroscopy experiments under SR excitations. The measurements were performed at TANTALUS storage ring (Wisconsin, USA). Afterwards, luminescence activities at other synchrotron centers around the world started. Since 1970 luminescence spectroscopy experiments have been carried out for instance at Tokyo synchrotron (Japan), at synchrotron center of Lebedev Physical Institute (Moscow, USSR), at ACO storage ring (Orsay, France), MAXLAB (Lund, Sweden), UVSOR (Okazaki, Japan) and others. However, the most successful and significant luminescence experiments under SR were performed at SUPERLUMI setup. The SUPERLUMI end station was constructed and developed as a user facility in 1981 at DORIS III storage ring of HASYLAB at DESY (Hamburg, Germany) and it was a flagship experiment for three decades [1, 2].

In the present lecture, after brief introduction about SR the pioneering luminescence experiments are illustrated. The exciting development is demonstrated presenting highlights for the whole period from the beginning to the present day. The highlights are taken from fields like exciton self-trapping, inelastic electron-electron scattering, cross luminescence, or probing of nanocluster properties with luminescence spectroscopic methods. More technological aspects play a role in present day's experiments, like quantum cutting in rare-earth-doped insulators.

Finally, a few ideas concerning the future development of luminescence spectroscopy with SR will be sketched. The main attention will be paid to the new luminescence setup – FINESTLUMI [3] that was installed in 2019 on the Finnish-Estonian beamline (FinEstBeAMS) [4] of the 1.5 GeV storage ring at MAX IV Laboratory (Lund, Sweden). The first experiments as well as the first results [5, 6] obtained at FINESTLUMI for novel luminescence materials (including nanophosphors) and prospective scintillators will be demonstrated and discussed. Special attention will be paid on the analysis of excitation spectra in vacuum ultraviolet and soft X-rays spectral range where multiplication of electronic excitation processes occur. The role of these processes in the luminescence efficiency as well as in radiation resistance of novel materials will be elucidated.

1. G. Zimmerer, Rad. Measur. **42**, 859 (2007)
2. V. Pankratov, A. Kotlov, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B **474**, 35 (2020).
3. V. Pankratov et al., Radiation Measurements **121**, 91 (2019).
4. R. Pärna et al., Nucl. Inst. Meth. A **859**, 83 (2017).
5. A.P. Kozlova et al., Results in Physics **16**, 103002 (2020).
6. A. Shalaev et al., Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B **467**, 17 (2020).

STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND MECHANICAL PROPERTIES  
OF SOLID SOLUTIONS OF PARTIALLY STABILIZED ZIRCONIUM  
DIOXIDE  $ZrO_2$ -2.5mol.%Y-(0.5, 0.7, 1.2)mol.%RSZ (R – Ce, Nd, Er, Yb)

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

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

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

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

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

One of the current trends in modern materials science is the search and improvement of high-strength materials that are resistant to inimical environments and high temperatures. Such materials include crystals and ceramics based on zirconium dioxide. Partially stabilized zirconia (PSZ) crystals, due to a combination of special physical and mechanical properties, are widely used as structural materials, thermal barrier coatings, medical cutting tools, prostheses and implants.

Thanks to numerous studies of solid solutions based on zirconia stabilized with yttrium oxide, compositions with optimal strength characteristics were determined [1–3].

At the same time, along with yttrium oxide in the formation of solid solutions based on  $ZrO_2$  can be used oxides of rare earth elements. By modifying the type and concentration of co-doping oxides in a ternary solid solution, materials with improved mechanical properties can be obtained. Accordingly, the aim of this work was to study the effect of the ratio of co-doping oxides on the structural features, phase composition, and mechanical properties (microhardness, fracture toughness) of solid solutions 2.5Y-0.5RSZ, 2.5Y-0.7RSZ, 2Y-1.2RSZ (R – Ce, Nd, Tb, Er, Yb).

A comparative analysis of the strength characteristics of PSZ crystals made it possible to determine the relationship between the chemical composition, structure, and properties of crystals and to detect the compositions with the highest values of crack resistance.

This work was financially supported by the Russian Science Foundation grant No. 18-00-397.

1. M. Rühle, N. Claussen, A.H. Heuer, J. Am. Ceram. Soc. **12**, 352 (1984).
2. N. Gupta, P. Mallik, B. Basu, J. Alloys Compd. **379**, 228 (2004).
3. M.A. Borik et al., J. Alloys Compd. **586**, 231 (2014).

## FEATURES OF PHASE TRANSITIONS IN $\text{ZrO}_2\text{-Yb}_2\text{O}_3$ CRYSTALS AFTER HEAT TREATMENT IN AIR

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

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

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

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

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

Crystalline materials based on  $\text{ZrO}_2$  are characterized by the presence of two polymorphic transitions, as a result of which the monoclinic modification is stable at room temperature. However, the introduction of rare-earth or alkaline-earth elements during the synthesis of oxides makes it possible to significantly reduce the temperature of the tetragonal-monoclinic phase transition and stabilize high-temperature modifications of  $\text{ZrO}_2$  [1].

Due to the presence of free oxygen vacancies, crystals of stabilized zirconia have oxygen-ionic conductivity at elevated temperatures, which allows the use of these materials as solid electrolytes in various electrochemical devices. Currently, a promising direction is the development of oxygen-conducting membranes for solid oxide fuel cells based on crystals of stabilized zirconia.

It was shown in [2, 3] that the location of oxygen vacancies in the crystal structure of yttrium oxide stabilized zirconia, as well as the phase composition, significantly affect the transport properties of these materials. However, the issue of optimizing the chemical composition by selecting the type and concentration of stabilizing oxide, as well as studying the phase composition changes that occur in the oxygen sublattice of these materials with increasing temperature (in the range of operating temperatures of solid electrolyte from 500 to 1000°C), remains relevant.

In the present work, the features of the phase transitions in  $\text{ZrO}_2\text{-(8–12 mol.%) Yb}_2\text{O}_3\text{-0.1 mol.% Eu}_2\text{O}_3$  cubic solid solutions, obtained by directional melt crystallization with direct high-frequency heating in a cold container, are revealed using Raman spectroscopy and optical spectroscopy methods, before and after heat treatment in air ( $T = 1000^\circ\text{C}$ ,  $t = 400$  h).

This work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 16-13-00056).

1. Yu.S. Kuz'minov, E.E. Lomonova, V.V. Osiko, *Refractory materials from a cold crucible*, M.: Nauka, 2004.
2. H. Yugami, A. Koike, M. Ishigame, *Phys. Rev.* **44**, 9214 (1991).
3. M.A. Borik et al., *J. Alloys and Compounds* **770**, 320 (2019).

# STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF SILICON NITRIDE CERAMICS AND POWDERS PLATED WITH YTTRIUM-ALUMINUM GARNET

L.S. Alekseeva<sup>1</sup>, P.V. Andreev<sup>1,2</sup>, S.S. Balabanov<sup>2</sup>, M.S. Boldin<sup>1</sup>,  
P.D. Drozhilkin<sup>1</sup>, K.O. Karazanov<sup>1</sup>, K.E. Smetanina<sup>1</sup>

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

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

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

One of the modern methods of creating refractory ceramic nanocomposites based on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> is application of ultra-thin coatings of oxides on silicon nitride powder particles of various dispersity and their subsequent compaction by spark plasma sintering (SPS) method.

The development of the plating technology of nanopowders with ultra-thin layers of oxides requires optimization of deposition modes, including the solution of the Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> pre-agglomeration problem.

Powder compositions were obtained in three ways: (1) Pechini method (with the addition of citric acid) and (2) deposition in gelatin matrix, and also (3) the vacuum dispersal method. The intermediate products obtained from the syntheses were annealed in stages for 2–8 hours at 300, 500, 800, 1000 °C with grinding in the agate mortar between stages.

Powder samples annealed to 1000 °C and their intermediates, which annealed for 3 hours at 300 °C, were compacted by spark plasma sintering method.

Sintering was carried out on the «Dr. Sinter model SPS-625» (SPS Syntex, Japan) in vacuum in a graphite mold with an inner diameter of 12 mm. The heating speed was 50 °C /min, pressure was 70 MPa, the sintering temperature varied between 1200–1680 °C.

Control of phase composition of powders and ceramics was carried out on X-ray diffractometer «Shimadzu XRD-7000» (CuKα, λ = 1.54 Å). The microstructure of the powders and ceramics was studied by scanning electron microscopy technique on the JEOL JSM-6490.

The reported study was funded by RFBR, project number №19-33-60084.

PHASE TRANSFORMATIONS IN  $\text{ZrO}_2\text{-Sc}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}_3$  (R = Y, Yb, Ce)  
SOLID SOLUTIONS

M.A. Borik<sup>1</sup>, M.V. Gerasimov<sup>2</sup>, A.V. Kulebyakin<sup>1</sup>, N.A. Larina<sup>2</sup>,  
E.E. Lomonova<sup>1</sup>, V.A. Myzina<sup>1</sup>, P.A. Ryabochkina<sup>2</sup>, N.V. Sidorova<sup>2</sup>,  
N.Yu. Tabachkova<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*  
*E-mail: saharova.1996@mail.ru*

Solid solutions based on zirconia stabilized by scandium oxide are of considerable interest as materials for electrolytic membranes for solid oxide fuel cells (SOFCs) because of their high ionic conductivity compared to other electrolytes based on zirconia [1].

As is known, the phase composition and local crystal structure, which are determined by the type and concentration of stabilizing oxides [2–3], are the main factors on which the ionic conductivity of these materials depends. Therefore, to identify the effective composition of the electrolyte material based on  $\text{ZrO}_2\text{-Sc}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}_3$ , which will have high ionic conductivity and increased stability, detailed studies of the structure and phase transformations in these compounds are necessary.

In this work, using the X-ray diffraction method, we studied the phase composition of  $(\text{ZrO}_2)_{1-x-y}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_x(\text{R}_2\text{O}_3)_y(\text{Eu}_2\text{O}_3)_{0.001}$  solid solutions, where R = Y, Yb, Ce, and  $x = 0.10$ ,  $y = 0.01$  grown by the cold crucible method with directional crystallization from the melt.

The microstructure of these solid solutions was studied by optical microscopy and, using Raman spectroscopy, a local phase distribution was found for regions of the crystal with a specific microstructure. Using the method of optical spectroscopy with  $\text{Eu}^{3+}$  ion probe, changes in the local environment associated with phase transformations in solid solutions are revealed.

This research was financially supported by the Russian Scientific Foundation (grant number №16-13-00056).

1. S.P.S. Badwal et al., *Solid State Ionics* **136-137**, 91 (2000).
2. C.R.A. Catlow, *Solid State Ionics* **12**, 67 (1984).
3. V.G. Zavodinsky, *FTT* **46**, 441 (2004).

## PREPARATION OF HIGH-PURITY ISOTOPICALLY ENRICHED SILICON DIOXIDE-28 BY SOL-GEL METHOD

K.F. Ignatova<sup>1,2</sup>, M.E. Komshina<sup>1</sup>, I.A. Kuzhelev<sup>2</sup>, O.Yu. Troshin<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*

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

Isotopically modified quartz glass is promising for the production of quartz fiber with different isotopic composition of the cladding ( $^{28}\text{Si}^{16}\text{O}_2$ ) and core ( $^{30}\text{Si}^{18}\text{O}_2$ ), that provides a difference in refractive indices without using doping additives [1–2]. However, information about the preparation and properties of such glasses in the literature is very limited.

A promising approach for producing quartz glass is the sol-gel method. Its advantages are the uniformity of the samples obtained, the relatively low sintering temperature and the use of small amounts of scarce and expensive isotopically enriched substances.

Isotopically enriched  $^{28}\text{SiF}_4$  was used as the initial silicon compound. Conversion of silicon tetrafluoride to tetrachloride was carried out using aluminum chloride (III) [3]. In order to obtain  $^{28}\text{SiO}_2$ ,  $^{28}\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  was synthesized from  $^{28}\text{SiCl}_4$  (the degree of enrichment according to  $^{28}\text{Si}$  99.99 at.%) and dried ethanol, then hydrolysis of  $^{28}\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  by ethanol-water mixture ( $^{28}\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:4:4$  mol.) [4]. Further, the solution was cast into forms and kept until the formation of xerogel. The resulting xerogel was dried by heating to obtain glassy  $\text{SiO}_2$ . For acceleration of the gelation process and formation of monolithic samples, the investigation on the selection of catalysts (HF, HCl,  $\text{HNO}_3$ ) and the temperature treatment of drying was carried out. The impurity and isotopic elemental composition of samples was determined by inductively coupled plasma mass spectrometry. Transparent samples of quartz glass  $^{28}\text{SiO}_2$  (light transmission > 90% in the visible region) with an isotope content of  $^{28}\text{Si}$  99.85 at. % was obtained. According to X-ray phase analysis, the samples of glass are amorphous and do not contain crystalline inclusions.

1. V.G. Plekhanov, *Phys.-Uspekhi*. **108(11)**, 1245 (2000).
2. D.C. Allan, J.T. Brown, Patent (USA) № 0022562 (03.02.2005).
3. M.F. Churbanov et al., Patent (Russian Federation) № 2618265 (03.05.2017).
4. M.F. Churbanov et al., Patent (Russian Federation) № 2692310 (24.06.2019).

# STUDY OF REFLECTION AND TRANSMISSION SPECTRA OF SILVER HALIDE POLYCRYSTALS IN THE TERAHERTZ FREQUENCY RANGE

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

Today, the use of THz fiber systems in real time is rapidly developing in areas such as imaging [1], spectroscopy [2]. A great deal of different materials and structures have been developed, for example, wire fibers [3], sapphire fibers [4], metal/glass fibers with a hollow core [2, 5], photonic crystal fibers, including 3D-printed [6], each of which has its own set of advantages and disadvantages.

Silver halides have several benefits, since their operating temperature covers the range from  $-150$  to  $+400$  °C, they are resistant to ionizing radiation, and flexible. We studied the transmission and reflection spectra of silver halide polycrystals at terahertz frequencies. Samples of silver halide crystals were made from single-crystal of  $\text{AgBr}_{0.95}\text{Cl}_{0.05}$  billets using hot embossing technology. The resulting samples were polycrystalline with a thickness of 0.4–0.5 mm and a diameter about 15 mm. The plates had a high parallelism degree. Spectral measurements were carried out using the Epsilon submillimeter spectrometer. The following data were obtained: the phonon frequency was  $77.5\text{ cm}^{-1}$ , the contribution of the phonon-dielectric was 6.2, the extinction coefficient was  $18\text{ cm}^{-1}$ , and the oscillations were anharmonic.

The transmission range in the mid-infrared has a plateau profile, and the transmission edge in the long-wavelength range is about  $260\text{ cm}^{-1}$  (which is consistent with previously obtained data [7]). In the terahertz range, peak-like bandwidths can be observed.

1. H. Guerboukha, K. Nallappan, M. Skorobogatiy, *Adv. in Opt. and Photonic* **10** (4), 843 (2018).
2. T. Katagiri, T. Suzuki, Y. Matsuura, *Opt. Eng.* **57** (5), 054104 (2018).
3. K. Wang, D.M. Mittleman, *Nature* **432** (7015), 376 (2004).
4. G.M. Katyba et al., *Proc. SPIE Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology XII*, 111640G (2019).
5. R. Wallis et al., *Opt. Express* **24** (26), 30002 (2016).
6. J. Yang et al., *Opt. Express* **24** (20), 22454 (2016).
7. A.S. Korsakov et al., *App. Opt.* **54** (26), 8004 (2015).

# LUMINESCENT HYBRID MATERIALS BASED ON METAL-ORGANIC PHOSPHORS IN OXYFLUORID GLASSES AND OXIDES AND FLUORIDES POLYCRYSTALS

I.Ch. Avetisov<sup>1</sup>, R.I. Avetisov<sup>1</sup>, M.N. Mayakova<sup>2</sup>, O.B. Petrova<sup>1</sup>, K.I. Runina<sup>1</sup>, P.V. Strekalov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

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

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

Hybrid materials (HM) are widely used in new devices of optics and photonics [1–3]. Luminescent HM based on organic phosphors the 8-hydroxyquinolates of metals of groups I, II and III of the Periodic Table [2] and  $\beta$ -diketonates of rare-earth metals [3], obtained as a result of a high-temperature exchange reaction in PbF<sub>2</sub>-consist fluoroborate glass melt, have a wide smooth photoluminescence (PL) spectrum covering almost the entire visible range chromaticity coordinates close to white, allows us to consider them as a promising material for the manufacture of light sources with high color reproduction.

New HM's were synthesized by high temperature methods: glass-melt technique with low-melting glass matrices in PbF<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and PbF<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-ZnO systems [2] and by solid-phase synthesis with PbF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub> and ZnO; and by low temperature methods: co-precipitation with PbF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub> from aqueous solutions by hydrofluoric acid [3] and ammonium fluoride. As organic constituents, we used highly efficient phosphors: 8-hydroxyquinoline complexes Li, Zn, Al (Liq, Znq<sub>2</sub>, Alq<sub>3</sub>).

The PL photoluminescence spectra show that, at high-temperature synthesis, the same emitting centers are formed as at low-temperature. The formation of centers is associated with an exchange reaction leading to the creation of new complexes. When HF is co-precipitated, partial capture of Liq molecules occurs, and when NH<sub>4</sub>F is co-precipitated, the exchange reaction proceeds almost completely. When solid phase synthesis begins with the exchange reaction temperature to 100 and at 300 °C it passes almost completely.

The research was financially supported by Russian Science Foundation by the grant №19-79-10003.

1. B. Lebeaue, P. Innocenzi, Chem. Soc. Rev. **40**, 886 (2011).
2. M.O. Anurova et al., Phys. Chem. Glasses: Eur. J. Glass Sci. Technol. B **60(4)**, 140 (2019).
3. O.B. Petrova et al., Opt. Mat. **88**, 378 (2019).

# STRUCTURE AND LUMINESCENT PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS IN THE PbF<sub>2</sub>–ErF<sub>3</sub> SYSTEM

M.N. Mayakova<sup>1</sup>, O.B. Petrova<sup>2</sup>, K.I. Runina<sup>2</sup>, V.A. Smirnov<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

*E-mail: vladsmirnort54@mail.ru*

Fluoride compounds and solid solutions in MF<sub>2</sub>-REF<sub>3</sub> (RE = rare earth element) systems with the general formula M<sub>1-x</sub>R<sub>x</sub>F<sub>2+x</sub> are of interest for investigation as photonics materials, phosphors, including anti-Stokes ones. For PbF<sub>2</sub>-REF<sub>3</sub> systems there exists a wide region of crystallization of the fluorite-type cubic phase (above 20 mol.% at 650–700 °C) [1–2], but the phase diagrams and regions of existence phases in the low temperature (below 650 °C) was not described. Practically important luminescent systems PbF<sub>2</sub>-ErF<sub>3</sub> were investigated in this work. Samples were obtained by solid phase synthesis and co-precipitation from aqueous solutions at room temperature over the entire concentration range in the systems. We synthesized solid solutions both by the solid-phase method (using PbF<sub>2</sub> and ErF<sub>3</sub>) within the temperature at 450–600 °C and by co-precipitation from aqueous solutions (solutions Er and Pb nitrates, hydrofluoric acid) [3]. To prevent pyrohydrolysis in solid-phase method we formed a fluorinating atmosphere inside the furnace by placing in it expendable fluoroplastic (PTFE) plates.

At low erbium concentrations, two phases are formed: a low-temperature modification of PbF<sub>2</sub> (*Pnma*) and a solid solution based on a high-temperature modification of PbF<sub>2</sub> (*Fm3m*). The crystallization region of single-phase powders was ~ 12–42 mol.% ErF<sub>3</sub>, and the cell parameter decreases monotonically [1], so the real composition in this region is close to rated. With an increase in the relative erbium content in the initial solution over 50 mol. % two-phase samples precipitate, the second phase in which is a solid solution based on erbium fluoride with the tysonite structural type Er<sub>1-y</sub>Pb<sub>y</sub>F<sub>3-y</sub> (*P3c1*). The most intense bands on the Er<sup>3+</sup> PL spectra are those in the blue and green parts of the spectrum, corresponding to the <sup>2</sup>H<sub>9/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> and <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub>+<sup>2</sup>H<sub>11/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> transitions. In samples obtained by solid-phase synthesis, effective anti-Stokes luminescence (in the region of 650 nm, <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> transitions). Samples obtained by co-precipitation of anti-Stokes luminescence do not appear.

The research was financially supported by Russian Science Foundation by the grant №19-79-10003.

1. I.I. Buchinskaya, P.P. Fedorov, *Rus. Chemical Rev.* **73** (4), 371 (2004).
2. A.K. Tyagi et al., *J. Solid State Chem.* **177**, 1746 (2004).
3. M.N. Mayakova et al., *J. Fluorine Chem.* **187**, 33 (2016).

# LUMINESCENT PROPERTIES OF Eu/Gd-CO-DOPED LEAD FLUOROBORATE GLASS-CERAMICS

D.A. Velichkina, O.B. Petrova, K.I. Runina

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

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

Oxyfluoride glass-ceramics (GC's) combine the best properties of crystalline fluorides and oxide glasses, which make them promising for doping with rare-earth (RE) ions and creating novel laser materials [1]. The high luminescence efficiency of oxyfluoride GC's is associated with the fact that the RE activator is mainly located in a crystalline fluoride environment with a low phonon energy of the crystal lattice, which suppresses nonradiative relaxation [2]. Heterovalent stabilization of the high-temperature cubic phase of  $\beta$ -PbF<sub>2</sub> by trivalent rare-earth ions [1, 3], which are also introduced as activators into laser materials, is possible. The successful application of this approach for Nd/La and Nd/Lu pairs, shown in [1], in this study, the crystallization and luminescent properties of glass with Eu/Gd co-actives were investigated.

Samples of glasses and polycrystalline complex fluorides were synthesized from B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbF<sub>2</sub>, GdF<sub>3</sub> and EuF<sub>3</sub> of at least high purity grade. The glasses in (70-x-y)PbF<sub>2</sub>-30B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-xEuF<sub>3</sub>-yGdF<sub>3</sub> system (x = 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 3.0; y = 0, 1.5, 2.5, 2.9) have been synthesized. GCs received by the controlled crystallization of glasses in a variety of temperature-time conditions. The total RE concentration in the cubic crystalline phase varied from 11–12 at.% (for Pb<sub>1-x</sub>Gd/Eu<sub>x</sub>F<sub>2+x</sub>). The volume fraction of the cubic crystalline phase in the GC was more than 25%, which was much larger than in the GC based on the initial glasses doped with 1 mol.% EuF<sub>3</sub> (8–10 vol.%). After the partial crystallization of the glass we observed the increase in the relative intensity of the transition  $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$  (~ 580 nm) in PL spectrum, moreover, in co-activated Eu/Gd GC's it increases by 20–50% more than in GC activated 1 mol.% EuF<sub>3</sub>. Co-activated GC's exhibit greater symmetry of the crystalline phase.

The research was financially supported by Russian Science Foundation by the grant №19-79-10003.

1. O.B. Petrova et al., *J. Non-Cryst. Sol.* **531**, 119858 (2020).
2. P.A. Loiko et al., *Opt. and Spectr.* **118** (2), 235 (2015).
3. T.S. Sevostjanova et al., *Opt. and Spectr.* **123** (5), 733 (2017).

# UPCONVERSION POLYMER MATERIALS TO INCREASE EFFICIENCY OF SOLAR CELLS

M.K. Bubnow<sup>1</sup>, M.V. Chernov<sup>1</sup>, A.S. Ermakov<sup>1</sup>, S.V. Gushchin<sup>1</sup>,  
A.M. Kuzmin<sup>1</sup>, S.V. Kuznetsov<sup>2</sup>, A.A. Lyapin<sup>1</sup>, P.A. Ryabochkina<sup>1</sup>

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

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

*E-mail: [sasha41450@gmail.com](mailto:sasha41450@gmail.com)*

Currently, many scientific groups are actively researching upconversion materials for their use in photovoltaic [1–2]. Solar cells provide photoelectric conversion only under the influence of radiation of a limited spectral range. For example, the sensitivity of a crystalline silicon cell is 380–1100 nm. To expand the spectral range of the photoelectric conversion radiation, a combination cell with a layer of upconversion material can be used (fig. 1). Upon using such a material, the photoelectric conversion efficiency is increased due to the conversion of infrared radiation exceeding the spectral operating range of the panel.

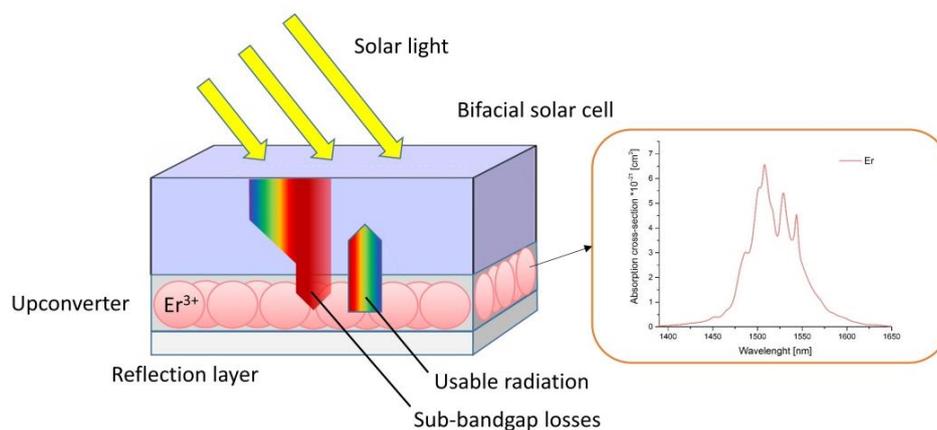


Fig. 1. Model of a bifacial solar cell with an upconversion polymer doped Er<sup>3+</sup> ions on the back side of the cell.

In this work, we studied the characteristics of the photoelectric conversion process for laser and broadband infrared radiation in a combined cell. This cell consisted of a silicon heterostructure and a polymer film. These films were obtained from oxysulfide and fluoride powders doped with rare-earth ions and were manufactured by extrusion and hot pressing. The results indicate the promising application of these upconversion materials in photovoltaics.

The study was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-42-130011).

1. T. Trupke et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells **90**, 3327 (2006).
2. J.C. Goldschmidt, S. Fischer, Adv. Optical Materials **3**,510 (2015).

# LOCAL XRD ANALYSIS OF THE NEAR $\alpha$ -TITANIUM ALLOY PT3V PREPARED BY ROTARY SWAGING

P.V. Andreev<sup>1,2</sup>, D.A. GudZ<sup>2</sup>, K.E. Smetanina<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia  
E-mail: [andreev@phys.unn.ru](mailto:andreev@phys.unn.ru)*

Rotary swaging is one of the types of intense plastic deformation used to form ultra-fine grained structure [1]. A number of studies have shown that such material treatment applies its features to the microstructure and phase composition. These include, for example, the microstructure heterogeneity in the cross section of the sample and the formation of metastable phases [1, 2].

Phase composition study requires locality due to the microstructure heterogeneity (the grain size gradient in the cross section of the swaged rod after annealing). Traditional polycrystal research methods – the method of X-ray diffraction in Bragg-Brentano geometry cannot meet this requirement.

Obviously, areas with different grain sizes can differ in phase composition both qualitatively and quantitatively, and therefore have different operational and corrosive properties.

It is supposed to solve the problem of local analysis using X-ray technology with a narrow primary beam technique. One option is to use an Oxford Diffraction single crystal diffractometer equipped with an X-ray tube with a copper anode, a graphite monochromator and collimator that generates a primary beam with a diameter of 0.3 mm and a CCD detector.

This work was supported by the Russian Science Foundation (grant №19-73-00295).

1. V.N. Chuvildeev et al, J. of Alloys and Compounds **790**, 347 (2019).
2. Y. Cao et al, Materials Science and Engineering **133**, 1 (2018).

# ELECTRONIC STATES SHALLOW DONORS IN SILICON AND GERMANIUM: ACCOUNTING FOR SHORT-RANGE POTENTIAL

A.A.Konakov, A.M.Mikhaylova, A.A. Revin

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

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

Theoretical and experimental research of electronic properties of impurity centers in indirect-gap semiconductors (primarily silicon and germanium) has been conducted since the 50s of the last century. These objects are still of considerable interest due to their possible application in the field of constructing coherent THz radiation sources [1] and quantum computers [2]. At the stage of analyzing experimental data or planning experimental studies of non-stationary processes associated with electronic transitions between States of small impurity centers, information about the spectra and wave functions of localized carriers, including their excited States, is essential.

In our work, solves the effective mass equation for the envelope function of an electron localized on a shallow donor in silicon and Germany. The  $p$ -type excited States were described by the test functions proposed in [4]. In the ground state, the multi-doline equation [5] was solved taking into account the short-acting potential. The ground and excited  $s$ -states were modeled by wave functions with two effective Bohr radii, taking into account both the long-range hydrogen-like and short-range potential of the donor. Modification of the ground state function in comparison with the hydrogen-like one is necessary to account for the effects of splitting and chemical shift caused by the short-acting potential of the impurity. The energies of the excited  $s$ -states do not change much in comparison with the hydrogen-like model due to the fact that the electron density on the core in these States is small, but the completeness property of the basis requires preserving the orthogonality of the envelope functions of different States.

The results of theoretical calculations are compared with experimental data available in the literature [3, 6].

The work was supported by RFBR (grant No 19-53-45056).

1. S.G. Pavlov et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 5220 (2000).
2. J.J. Plaet al., Nature **489**, 541 (2012).
3. A.K. Ramdas, S. Rodriguez, Rep. Prog. Phys. **44**, 1297 (1981).
4. R.A. Faulkner, Phys. Rev. **184**, 713 (1969).
5. S.T. Pantelides, C.T. Sah, Phys. Rev. **10**, 621 (1974).
6. V.V.Tsyplenkov, V.N. Shastin, Semicond. **52**, 1469 (2018).

## GROWING AgBr–AgI SINGLE CRYSTALS AND INVESTIGATION OF THEIR PHASE DIAGRAM

A.S. Korsakov, M.S. Korsakov, A.E. Lvov, D.D. Salimgareev, Y.V. Shokhina,  
A.A. Yuzhakova, L.V. Zhukova

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

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

For the fiber optic elements development in the mid-IR region, photostable, flexible materials that are transparent in a wide spectral range are needed. Silver halide solid solutions are the most suitable crystalline medium for this purpose. Solid solutions of the AgCl – AgBr system, transparent from 0.4 to 30.0  $\mu\text{m}$ , were currently the only non-toxic, non-hygroscopic and plastic crystals intended mainly for the production of polycrystalline IR fibers.

Based on the literature data and the results of the AgBr - AgI phase diagram studies, new optical single crystals of solid solutions were obtained in the composition range from 0 to 33 wt. % of AgI in AgBr, from which various optical products, including polycrystalline IR fibers, can be obtained by hot embossing.

Single crystals of the AgBr - AgI system were grown using the vertical Bridgman method, from a mixture obtained by the hydrochemical method of thermo-zone crystallization-synthesis (TZCS). The TZCS method is the basic one and allows stably obtaining a high degree of purity raw materials (up to 99.99999 wt. %) in the form of polycrystalline solid solutions of a given composition intended for crystal growth.

The main characteristic of the new crystals is the optical transparency range. The studies were carried out on polycrystalline and single crystal samples 0.35–3.00 mm thick in the wavelength ranges 0.19–1.10  $\mu\text{m}$  (Shimadzu UV-1800 UV spectrophotometer), 1.28–41.60  $\mu\text{m}$  (IRPrestige-21 Shimadzu IR Fourier spectrometer), 14.7–60.6  $\mu\text{m}$  (Vertex 80, Bruker with extended IR range). It was found that, depending on the content of I, which has heavy molecular mass, in the AgBr–AgI system in the crystals, the transmission range for the short-wave and long-wave absorption edges shifts toward an increase in wavelength (from 0.465 to 0.480  $\mu\text{m}$  and from 46.0 to 50.0  $\mu\text{m}$ , respectively). In this case, a strong increase in the material photostability is observed, which, according to preliminary data, even exceeds the photostability of the AgBr– $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$  solid solutions system [1].

1. A.S. Korsakov et al., *Chinese Opt. Latt.* **14** (2), 020603 (2016).

## RESEARCH OF AgBr–AgI PHASE DIAGRAM

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

Currently, fiber-optic products based on silver halide optical fibers of the AgCl –AgBr system for various science and technology fields, including for biotechnology and laser medicine, are actively sold by various companies. The disadvantage of this solid solutions system is the aging effect associated with high photosensitivity. Nevertheless, solid solutions of the AgCl –AgBr system, transparent from 0.4 to 30.0  $\mu\text{m}$ , are the only non-toxic, non-hygroscopic, and flexible crystals intended primarily for the production of polycrystalline IR fibers [1]. The need to expand the operational spectral range of optical fibers from the near IR region (0.8–2.0  $\mu\text{m}$ ), where quartz fibers are used, to the middle and even far IR region (up to 100.0  $\mu\text{m}$ ), justifies the search for new optical materials, the development of technologies for their synthesis, the structure, properties and applications study. Therefore, an urgent task is the development of radiation-resistant, non-hygroscopic and plastic crystals for the manufacture of optical products.

In this regard, it was of interest to study the quasibinary AgBr–AgI system. This choice was explained, firstly, by the similar physicochemical materials properties that well form substitutional solid solutions melting at a lower temperature than the starting components, and secondly, by a heavier iodine ion, the introduction of which should increase the transmission range to the far IR and reduce the photosensitivity of the material.

The AgBr–AgI phase diagram was studied by using differential thermal and X-ray diffraction analysis (DTA, XRD). The experiments were carried out in sealed ampoules made of a special form Pyrex glass, with homogenization of the samples for 20 hours at a temperature of 550 °C. The heating and cooling rates were 2 and 5 °C per minute. The study of the phase diagram showed the possibility of obtaining a single-phase homogeneous material in the composition range from 0 to 33 wt. % of AgI in AgBr and the growing possibility optical single crystals from it.

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

1. A.S. Korsakov et al., *App. Opt.* **54** (26), 8004 (2015).

# SPECTRAL PROPERTIES OF BISMUTH GERMANATE GLASSES DOPED WITH CERIUM OXIDE

O.B. Petrova, L.M. Savenko, K.S. Serkina, I.V. Stepanova  
*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*  
*E-mail: [ivstepanova@muctr.ru](mailto:ivstepanova@muctr.ru)*

Bismuth germanate glasses are a promising active medium for lasers with a tunable radiation frequency in the infrared range due to the presence of broadband luminescence in the 1100–1500 nm region associated with bismuth active centers (BACs) [1]. The amount of BACs can be controlled by changing the glass synthesis or annealing conditions [2], or by introducing oxidizing ions into the glass [3], including  $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{Ce}^{4+}$  ions which do not have intrinsic absorption bands in the visible and near infrared spectral regions. This paper is about research of the cerium ions effect on the BACs concentration in glasses.

The synthesis of glasses with general composition formula  $x\text{Bi}_2\text{O}_3 - (100-x)\text{GeO}_2 - y\text{CeO}_2$ , where  $x = 10, 15, 20, 25$  mol.%;  $y = 0; 0.01; 0.05; 0.1; 1$  mol.% was carried out. The oxide mixture was melted at  $t = 1100$  °C for 30 min, then the melt was quenched onto a metal substrate. The absorption spectra were fixed using an UNICO 2800 (UV/VIS) spectrophotometer (190 – 1100 nm).

The synthesized bismuth germanate glasses without cerium oxide have red color. Their absorption spectra contain a characteristic wide absorption band in the region of 500 nm, the intensity of which depends on the amount of BACs [2].

The addition of  $\text{CeO}_2$  leads to BACs amount decreasing due to the oxidation of bismuth ions included in the BACs structure. The degree of influence of  $\text{CeO}_2$  on the glasses properties depends on the concentration of both cerium oxide and bismuth oxide in the glasses. In series containing 10 and 15 mol.%  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , glass samples are completely discolored with the addition of 0.05 mol.%  $\text{CeO}_2$ , and they turn yellow with a further increase in the amount of cerium. Discoloration is associated with the destruction of the BACs, and the appearance of a yellow color is related to a shift in the short-wavelength absorption edge to the long-wavelength region due to a decrease in the energy gap of glasses under the influence of  $\text{CeO}_2$ . In glass series containing 20 and 25 mol.%  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , at the same  $\text{CeO}_2$  concentration (0.05 mol.%), the absorption intensity at the 500 nm decreases, but the BACs do not completely disappear due to the oxidation of only part of bismuth ions.

1. E.M. Dianov, *Quantum Electronics* **40** (4), 283 (2010).
2. I.V. Stepanova, K.S. Serkina, O.B. Petrova, *Optics and spectroscopy of condensed matter: materials of XXV Inter. sci. conf. Krasnodar: Kuban st. univ*, 95 (2019).
3. A. Winterstein et al., *Optical Materials Express* **2** (10), 1320 (2012).

HEAT TREATMENTS EFFECTS IN AIR AND IN VACUUM  
ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PARTIAL STABILIZED  
ZIRCONIUM CRYSTALS 2Y-0.8RSZ (R – Ce, Nd, Tb, Er, Yb)

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

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

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

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

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

High strength, wear resistance, fracture toughness and low coefficient of friction of crystals of partially stabilized zirconia (PSZ) give great prospects for their use as structural materials, tribotechnical elements, cutting medical instruments, etc. One of the key advantages of zirconia-based materials is their ability to save strength properties when to high temperatures exposed. However, PSC crystals are metastable, therefore, an important aspect of their practical application, which allows us to establish the temperature ranges of operation, is the study of the effect of thermal annealing on phase stability.

Previous studies have shown that the variation of co-doping additives in solid solutions based on zirconium dioxide can provide materials with improved mechanical characteristics [1]. Also in [1], the influence of the type of impurity on the fracture toughness of 2Y-0.8RSZ crystals (R – Ce, Nd, Y, Er, Yb) was demonstrated and the composition with the highest values of the fracture toughness coefficient was detect.

In this work, we analyzed the evolution of the phase composition and values of the fracture toughness of 2Y-0.8RSZ crystals (R – Ce, Nd, Tb, Er, Yb) during heat treatment in air and in vacuum, to identifying compositions with optimal mechanical characteristics for use in wide temperature range.

This work was financially supported by the Russian Science Foundation grant No. 18-00-397.

1. M.A. Borik et al., *Materials Chemistry and Physics* **232**, 28 (2019).

INFLUENCE OF BATCH NON-STOICHIOMETRY AND SYNTHESIS  
CONDITIONS ON FERROELECTRIC PHASE  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$   
CRYSTALLIZATION

I.Ch. Avetisov, M.I. Guslistov, O.B. Petrova, K.I. Runina, I.V. Stepanova,  
M.P. Zykova

*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*  
*E-mail: ivstepanova@muctr.ru*

The  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$  crystalline phase is an analog of  $\text{BaTiO}_3$  ceramics according to some ferroelectric characteristics [1]. According to most authors, this phase is metastable, which requires certain temperature conditions for its synthesis [2]. From our point of view, this phase can be considered as non-stoichiometric, which crystallize when oxygen deficiency (bismuth excess) takes place in the Bi-Ge-O system. In this paper, we have studied the effect of batch non-stoichiometry and melt temperature on phase formation in the Bi-Ge-O system.

For the synthesis, a mixture of the composition 50  $[(1-x)\text{Bi}_2\text{O}_3-2x\text{Bi}] - 50\text{GeO}_2$  (mol.%), where  $x = 0; 0.05; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5$ . Such a molar ratio of bismuth and germanium oxides (50:50) corresponds to the formula of the  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$  compound, and the substitution of a part of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  with metallic Bi creates the necessary oxygen non-stoichiometry. The synthesis of crystalline phases was carried out by cooling of the initial batch, previously melted for 15 minutes at temperatures of 1020 °C or 1100 °C. The phase structure was analyzed using an Inel Equinox-2000 X-ray diffractometer ( $\text{CuK}\alpha$ ,  $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$ ) in the range of angles  $2\Theta = 10-80^\circ$ .

When cooling the melt obtained from the stoichiometric batch ( $x = 0$ ) at 1020 °C, the content of the desired  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$  phase in the final product does not exceed 33%. Substitution of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  for Bi under the same synthesis conditions increases the fraction of the  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$  phase, up to 100% at  $x = 0.4$ . It should be noted that the structure and amount of secondary crystalline phases vary depending on the amount of introduced Bi.

When the melt is cooled from  $t = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ , the content of the  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$  phase in the final product at  $x = 0$  reaches 87%, and already at  $x = 0.1$  it becomes the only crystalline phase. We suppose that the melt temperature increasing leads to the reduction of bismuth ions, which contributes to the oxygen deficiency and, as a result, leads to the predominant formation of the  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$  phase. Thus, an increase in the non-stoichiometry of the initial batch, as well as an increase in the melt temperature, contributes to the crystallization of a single  $\text{Bi}_2\text{GeO}_5$  phase.

1. K. Pengpat, D. Holland, J. of the Europ. Ceram. Soc. **23**, 1599 (2003).
2. V.P. Zhereb, V.M. Skorikov, Inorg. Mat. **39**, 2, S121 (2003).

# INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ZIRCONIA CRYSTALS PARTIALLY STABILIZED WITH GADOLINIA

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

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

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

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

Solid solutions based on zirconium dioxide are promising refractory materials that can work in aggressive oxidizing environments at elevated temperatures, which significantly expands the scope of their application. The high mechanical characteristics of these materials are mainly due to the transformational hardening mechanism. The mechanism is implemented by means of the transition of the tetragonal phase of zirconia to monoclinic, and the stresses caused by the phase transformation compensate for the stresses of the propagating crack. However, solid solutions based on ZrO<sub>2</sub> with a tetragonal structure are thermodynamically metastable at room temperature, and high-temperature exposure can lead to an undesirable transformation of the tetragonal phase into a monoclinic phase in the bulk of the material.

This paper presents the results of investigation of mechanical properties, structure and phase stability of solid solutions of ZrO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> after annealing at 1600 °C in air and in vacuum.

The crystals have been grown using the directional melt crystallization in a cold crucible. The phase composition of crystals was determined by x-ray diffractometry. The microhardness and fracture toughness of the crystals have been measured by indentation.

The study of the phase composition and mechanical characteristics of crystals based on zirconia, depending on the concentration of stabilizing oxide, showed that the increase in the concentration of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in crystals from 2.8 to 4.0 mol.% leads to a decrease in the content of the transformed tetragonal t-phase, a decrease in its degree. Eventually, these factors lead to a decrease in the fracture toughness of crystals with an increase in the concentration of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

It is shown that annealing of tetragonal solid solutions of ZrO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> leads to an increase in the values of fracture toughness for all the studied compositions, due to the removal of micro-stresses in the crystals. Phase analysis showed that after annealing at 1600 °C in air, the amount of nontransformable tetragonal phase increased for all samples in comparison with growth crystals and crystals heat-treated in air. When annealing in air, the values of fracture toughness are higher than when annealing in vacuum, since the amount of nontransformable phase does not increase during annealing in air.

The work is supported by RSF (project No. 16-13-00397).

# BORATE CRYSTALS FOR THZ WAVE GENERATION

Yu.M. Andreev<sup>1</sup>, S.G. Grechin<sup>2</sup>, G.V. Lanski<sup>1</sup>, A.A. Mamrashev<sup>3</sup>,  
N.A. Nikolaev<sup>3</sup>, P.P. Nikolaev<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia*

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

<sup>3</sup>*Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia*

<sup>4</sup>*LLC Neophotonics, Saint-Petersburg, Russia*

*E-mail: S.G.Grechin@mail.ru*

We present for the first time results on subterahertz (0.3–0.1 THz or 1–3 mm) wave generation in nonlinear borate crystals with low second order nonlinearity: uniaxial  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (further BBO) of point symmetry group 3m with 42 atoms in elementary cell and maximal nonlinear coefficient  $d_{22} = 2.3$  pm/V; biaxial LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> or LBO (mm2, 36 atoms,  $d_{32} = 0.85$  pm/V) and  $\beta$ -BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> or BIBO (group 2, 20 atoms,  $d_{26} = 3.48$  pm/V pm/V). Specific feature of these crystals is complicated structure, high damage threshold and well-known large absorption coefficient for nonpolarized at frequencies over 0.5 THz.

Optical properties in the THz range were studied with time-domain spectrometer TeraPulse 4000 (TeraView, UK) supplied with own design software. The observed linear absorption coefficient of the BIBO crystal at 1064 nm is 2 times lower to that of high quality BBO. LBO possesses extreme low absorption coefficient of  $\leq 10^{-5}$  cm<sup>-1</sup> at pump wavelength.

In fig. 1 it is seen that BIBO crystal possesses minimal absorption coefficient in line with the maximal nonlinear coefficient in the THz range. So that it is the most prospective crystal for THz wave generation. On other hand it belongs to the point group 2 and possessing very complicated physical properties that render control of output parameters quite complicated. Other results will be delivered.

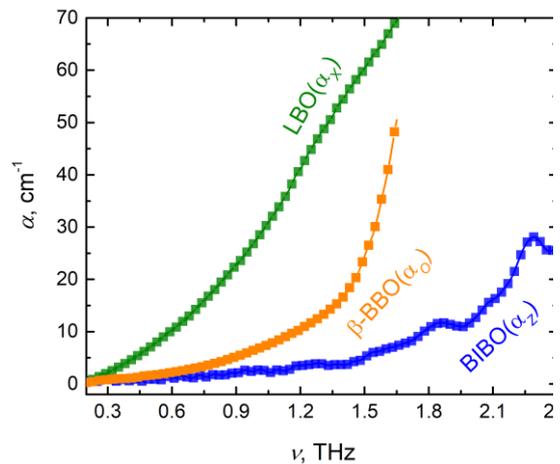


Fig. 1. Spectra of highest absorption coefficients of the crystals

1. D.M. Lubenko et al., Proc. SPIE **11322**, 274351 (2019).
2. N.A. Nikolaev et al., J. of Physics: Conference Series **951**, 012005 (2018).
3. Y. Lee et al., Results in Physics **19**, 102815 (2019).

# STUDY OF PHASE COMPOSITION HOMOGENEITY OF HARD ALLOYS BASED ON TUNGSTEN CARBIDE AND COBALT

P.V. Andreev, E.A. Lantsev, K.E. Smetanina

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

*E-mail: smetanina-ksenia@mail.ru*

Hard alloys based on WC – Co are characterized by high resilience and wear resistance, which allows them to be used as metal cutting tool. Increase in the mechanical properties of these materials is associated with the problem of their phase composition homogeneity.

Spark plasma sintering (SPS) is promising method of hard alloys manufacturing. The surface of the WC powder particles is always oxidized, so that carbon deficiency can occur in the sintering volume at heating due to CO and CO<sub>2</sub> formation. Violation of stoichiometry leads to the formation of brittle  $\eta$ -phases (Co<sub>x</sub>W<sub>y</sub>C<sub>z</sub>) [1]. Carbon diffusion from the graphite mold in which the powder is poured reduces this effect: the surface layer of the sample will not contain  $\eta$ -phases, but at some distance from the surface these phases may exist.

The objects of this study were 3 hard alloy samples sintered from plasma chemical WC powder and cobalt (10% wt.) applied to the surface of WC particles by deposition method. SPS of powder compositions was performed at «Dr. Sinter model SPS-625» in a vacuum (heating speed was 50 °C/min, pressure was 70 MPa, sintering temperature was 1050 °C). Degassing exposure at 850°C for 10 minutes was conducted during the sintering process of two samples. The surface of the samples was subjected to consecutive mechanical grinding with diamond discs and mechanical polishing with diamond paste. The sample height was controlled by a micrometer.

X-ray diffraction experiments were performed on a powder diffractometer «XRD-7000» (CuK $\alpha$ ,  $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ ). The dependencies  $I_{\eta(511)}/I_{WC(111)}$  on the total value of the remote layer were constructed to determine the carbon diffusion depth (fig. 1). Surface layer thickness of samples not containing  $\eta$ -phase (Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C) does not exceed 100  $\mu\text{m}$ .

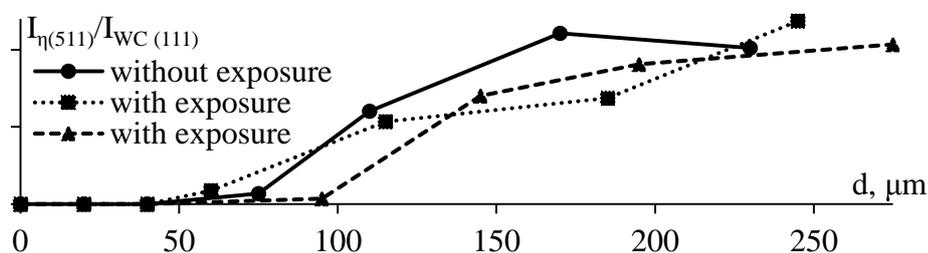


Fig. 1. Distribution of ratio  $I_{\eta(511)}/I_{WC(111)}$  by depth of the samples sintered at 1050 °C

The work was financial supported by Russian Science Foundation, grant №18-73-10177.

1. A.S. Kurlov, A. I. Gusev, *Physics and chemistry of tungsten carbide*, M.: FIZMATLIT, 2013.

## LIGHT-EMITTING HEXAGONAL 9R-Si PHASE

A.I. Belov, A.A. Konakov, D.S. Korolev, M.O. Marychev, A.N. Mikhaylov,  
R.I. Murtazin, A.A. Nikolskaya, D.A. Pavlov, D.I. Tetelbaum  
*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*  
*E-mail: [nikolskaya@nifti.unn.ru](mailto:nikolskaya@nifti.unn.ru)*

The idea of using optical signal instead of electrical one was offered in order to increase the rate of signal transmission inside high-power computing systems. But silicon, being a traditional material of microelectronics, cannot be used as light emitter due to the peculiarities of band structure in its conventional cubic phase. Therefore, there is a demand in the silicon processing methods which would allow improving its optical properties.

Previously [1, 2], it was found by us that inclusions of hexagonal silicon of the 9R-Si phase were formed in silicon substrate at the interface with the film upon irradiation of the SiO<sub>2</sub> (160 and 140 nm)/Si system by Kr<sup>+</sup> ions followed by annealing. The average projected range (R<sub>P</sub>) of Kr<sup>+</sup> ions was less than the film thickness. For such samples, a photoluminescence (PL) band was detected at ~ 1235 nm, which was assigned to the emission of the 9R-Si phase. To study the mechanism of a 9R-Si hexagonal phase formation upon ion irradiation of the SiO<sub>2</sub>/Si system, three types of experimental samples have been investigated by PL spectroscopy and transmission electron microscopy: 1 – SiO<sub>2</sub>(140 nm)/Si system irradiated by Kr<sup>+</sup> ions (R<sub>P</sub> ~ 50 nm), 2 – Si irradiated by Kr<sup>+</sup> ions, 3 – Si irradiated by Kr<sup>+</sup> and O<sup>+</sup> ions. For the samples of the 2nd and 3rd types, the values of energy and dose of Kr<sup>+</sup> ions were chosen so that the displacements profile was close in shape and height to that in silicon substrate for the first type sample (according to the SRIM code [3]). The values of energy and dose of O<sup>+</sup> ions were chosen so that the number of oxygen atoms implanted per unit area was approximately equal to the number of oxygen recoil atoms when the SiO<sub>2</sub>/Si system was irradiated by Kr<sup>+</sup> ions (for the first type sample). All the samples were annealed after irradiation. The first type sample shows the presence of the 9R-Si phase and PL band at ~ 1235 nm; the third type sample shows the same PL band and twinning defects; for the second type sample, the PL at ~ 1235 nm is not detected. The results are discussed taking into account the role of mechanical stresses, radiation defects and oxygen in the formation of the hexagonal phase.

The work was supported by Russian Foundation for Basic Research (Grants No.18-32-20168 and 19-53-45056).

1. A.A. Nikolskaya et al., Appl. Phys. Lett. **113**,182103 (2018).
2. A.A. Nikolskaya et al., Surf. Coat. Technol. **386**, 125496 (2020).
3. J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **268**, 1818 (2010).

LUMINESCENT GLASS-CERAMICS IN THE SYSTEM  
(Li,Na)<sub>2</sub>O-(Ga,Al)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>

N.V. Golubev, E.S. Ignat'eva, E.O. Kozlova, E.V. Lopatina, A.A. Maurus,  
V.N. Sigaev, M.Z. Ziyatdinova  
*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*  
*E-mail: [ngolubev@muctr.ru](mailto:ngolubev@muctr.ru)*

On the basis of glasses in the Me<sub>2</sub>O-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> (Me = Li, Na) system, we have obtained a transparent glass-ceramics with  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocrystals [1-3]. Low light scattering and luminescence when excited only by UV-C radiation makes it promising for the development of solar-blind converters. However, the formation of  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocrystals in glasses of this system is preceded by liquid-liquid phase separation, which leads to the formation of inhomogeneity regions with a diameter of  $\sim 8$  nm in the initial samples [4]. As a result, the average size of the precipitated nanocrystals in transparent glass-ceramics obtained by the one-stage regime is no less than  $\sim 6$  nm. The relatively large sizes of nanocrystals reduce the probability of radiative recombination, and the two-phase nature of the initial glass determines a wide distribution of nanoparticles in size. All this limits the potentially achievable light transmission and integrated photoluminescence intensity of this glass-ceramic. Their further increase is possible only after suppressing the phase separation of the liquid type in the initial glasses. Using the methods of «additions» and «substitution» in this work, we studied the effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the phase separation and luminescence efficiency of low-alkali gallium germanosilicate glasses. The addition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is shown to enhance the integrated photoluminescence intensity and to decrease the size of precipitated  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocrystals. The correlations between glass composition, nanocrystals size and crystallized phase content, on the one hand, and the photoluminescence of glass-ceramics, on the other, have been revealed.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant №20-03-00809.

1. V.N. Sigaev et al., *Nanoscale* **6**, 1763 (2014).
2. N.V. Golubev et al., *Journal of Materials Chemistry* **3**, 4380 (2015).
3. A. Paleari et al., *Chem. Phys. Chem.* **18**, 662 (2017).
4. V.N. Sigaev et al., *Nanoscale* **5**, 299 (2013).

# FORMATION OF BIREFRINGENT STRUCTURES IN SODIUM BORATE GLASSES BY LASER BEAM

A.S. Lipatiev, S.V. Lotarev, V.N. Sigaev, S.S. Fedotov

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

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

The development of new micro-optical elements and integrated optical circuits stimulates research in the field of direct laser nano- and microstructuring of transparent dielectrics. The nanogratings discovered upon exposure of silica glass to femtosecond laser pulses exhibit birefringence, whose characteristics can be tuned by varying the parameters of the laser beam. This feature opens a new way in the development of ultrastable optical memory [1] and phase elements [2] based on glass. Most of the theoretical and experimental studies devoted to direct laser writing of nanogratings were performed on silica glass. Meanwhile, studies on the formation of nanogratings in two-component glasses are also of fundamental interest [3] and can help to better understand the mechanisms of interaction of a laser radiation with a matter.

In this work, we studied laser modification of glasses of the  $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$  system with sodium oxide content from 14 to 28 mol.%. Pharos SP femtosecond laser was used for laser modification of glasses. Its radiation was focused into the bulk of glass samples to a depth of 150  $\mu\text{m}$  using a microscope objective with a numerical aperture of 0.45. The possibility of the appearance of polarization-dependent birefringence under the femtosecond laser pulses was demonstrated for the first time for sodium borate glasses. The conditions of laser exposure providing birefringence with a slow axis perpendicular to the polarization plane of the writing laser beam are determined. The dependences of the phase shift of the laser-written birefringent structures on the content of sodium oxide in the glass composition, the number of pulses, pulse repetition rate, pulse energy and pulse duration are revealed.

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russia (FSSM-2020-0003).

1. J. Zhang et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 033901 (2014).
2. M. Beresna, M. Gecevičius, P.G. Kazansky, Opt. Mater. Express **1**, 783 (2011).
3. S. Lotarev et al., J. Non-Cryst. Solids **479**, 49 (2018).

## LASER WRITING OF CHANNEL WAVEGUIDE IN ULTRA-LOW EXPANSION GLASS-CERAMICS

A.S. Lipatiev, S.V. Lotarev, V.I. Savinkov, G.Yu. Shakhgildyan, V.N. Sigaev, S.S. Fedotov

*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*  
*E-mail: slotarev@muctr.ru*

Transparent glass ceramics with ultra-low coefficient of thermal expansion (CTE) are based on lithium aluminosilicate glass in which nanosized crystals of spodumene,  $\beta$ -eucryptite, or  $\beta$ -eucryptite-like solid solutions possessing negative CTE precipitated under heat treatment. In the recent decades, ultra-low expansion glass-ceramics has found wide application in engineering from telescope mirrors to housings of ring laser gyroscopes. The minimized thermal expansion makes it an attractive material for the development of integrated optical components and circuits for precision devices requiring constant geometric dimensions in the operational temperature range.

Studies of femtosecond laser modification of glass-ceramics of this kind [1, 2] have shown that the exposure to femtosecond laser pulses gives rise to a noticeable local decrease in the refractive index related to partial amorphization of nanocrystals [2]. This effect makes it possible to fabricate depressed-cladding channel waveguides inside a piece of glass-ceramics by direct laser writing of cladding with reduced refractive index.

In this study, we fabricated a set of channel waveguides with a core diameter from 9 to 24  $\mu\text{m}$  and cladding formed by a series of parallel tracks written in a glass volume by a focused femtosecond laser beam with 180 fs pulse duration and 10 kHz pulse repetition rate at 1030 nm wavelength moving along the surface of the glass-ceramic plate at 0.2 mm/s speed. Some of the laser-written waveguides were found to be single-mode. The analysis carried out using a 1064 nm cw laser beam showed that the obtained single-mode waveguides manifest light propagation losses not higher than 2.4 or 2.7 dB/cm, depending on the orientation of the polarization plane of the light channeled in the waveguide.

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russia, FSSM-2020-2003.

1. V.R. Bhardwaj et al., J. Appl. Phys. **97**, 083102 (2005).
2. V.N. Sigaev et al., Glass Ceram. **76**, 370 (2020).

LITHIUM ALUMOSILICATE TRANSPARENT GLASS-CERAMICS  
WITH ADJUSTABLE THERMAL COEFFICIENT OF LINEAR EXPANSION  
IN THE AREA OF ZERO VALUES

E.V. Lopatina, S.V. Lotarev, A.S. Naumov, V.I. Savinkov, G.Yu. Shakhgildyan,  
V.N. Sigaev

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

*E-mail: [andreynaum13@mail.ru](mailto:andreynaum13@mail.ru)*

Due to the possibility of achieving a thermal coefficient of linear expansion (CTE) close to zero values, transparent glass-ceramics of the lithium aluminosilicate (LAS) system occupy a special place among optical materials [1]. The main focus of recent studies is on improving the cooking properties of LAS glasses and achieving stable and precision-variable values of CTE.

This work is devoted to establishing relationships between processing conditions of LAS glass and the CTE values of the obtained glass-ceramics for precision regulation of the CTE of glass-ceramics in the area of zero values. The object of the study was glass based on the  $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  (LAS) system. The features of its composition and synthesis technology are described in detail in the patent [2].

Using the methods of X-ray diffraction, DTA and Transmission Electron Microscopy (Thermo Fisher Scientific Titan 80-300 TEM with an accelerating voltage of 300 kV in the dark field mode), the processes of nucleation and growth of  $\beta$ -eucryptite-like solid solutions in LAS glass were studied and their size, shape and quantity were determined depending on the heat treatment modes. The obtained data were compared with dilatometric curves, which allowed us to determine the modes of fine adjustment of the CTE near zero values. The features of the appearance and development of a nanoinhomogeneous structure in LAS glass were clarified, which open the possibility of creating transparent thermally stable glass-ceramics with a weakly varying near-zero CTE in an unusually wide temperature range: from  $-80$  to  $+400$  °C.

This work was supported by the Russian Science Foundation (Agreement No. 19-19-00613) and the Russian Foundation for Basic Research (grant №19-03-00684).

1. E.D. Zanotto, American Ceramics Society Bulletin **89**, 19 (2010).
2. V.N. Sigaev et al., Patent of Russia, 2569703 C1 MIIK C03C 10/12.

# TRANSPARENT LITHIUM ALUMINOSILICATE GLASS-CERAMICS ACTIVATED BY NEODYMIUM IONS WITH CTE STABILIZED NEAR ZERO

S.V. Lotarev, A.S. Naumov, V.I. Savinkov, V.N. Sigaev

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

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

Transparent glass-ceramics of the lithium aluminosilicate (LAS) system occupy a special place among optical materials that act as a matrix medium for the introduction of luminescence activators (rare earth element ions). Interest in these materials is explained by the ability to combine spectral-luminescent characteristics with high thermal stability, which is provided by ultra-low values of the temperature coefficient of linear expansion (CTE). In general, the CTE<sub>r</sub> values of glass-ceramics have nonlinear temperature dependence and fine-tuning of the CTE values is possible by optimizing the phase composition and establishing precise ratios between the volume fractions of the amorphous and crystalline phases. It was shown earlier that the features of the formation of the nanoinhomogeneous structure in LAS system glasses make it possible to precisely regulate the CTE of the formed transparent glass-ceramics, opening the way to further improvement of this important material for optical instrumentation. However, the introduction of a noticeable amount of rare-earth luminescence activator can significantly affect the nature of glass crystallization, which is clearly insufficiently studied.

In this work, the processes of catalyzed crystallization of  $\beta$ -quartz solid solutions with additions of neodymium ions for obtaining thermally stable light-emitting media in the near-IR region are studied. The spectral-luminescent properties of LAS glass and glass-ceramics with rare earths additives were investigated depending on the synthesis conditions. The amount of neodymium oxide varied from 0.1 to 3 mol.% ( $\text{Nd}_2\text{O}_3$  was introduced in excess of 100% of the matrix composition). The temperature treatment of synthesized glasses with a duration of up to 48 hours changed from 710 to 760 °C.

At this stage, it is established that the spectral-luminescent properties of the original LAS glass can be reproduced in a LAS glass-ceramics characterizing with a CTE values close to zero.

This study was supported by the Russian Science Foundation (agreement No. 19-19-00613) and the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 19-03-00684).

## TRANSPARENT GLASS-CERAMICS MATERIALS WITH INCREASED HARDNESS IN THE MgO-ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> SYSTEM

V.I. Savinkov, V.N. Sigaev, A.Yu. Shakhgildyan, G.Yu. Shakhgildyan  
*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*  
*E-mail: [vlad.sigaev@gmail.com](mailto:vlad.sigaev@gmail.com)*

The low hardness of the materials used to protect touch screens is one of the main problems faced by mobile device manufacturers. To a greater extent, ion-strengthened glass is used to protect screens, but its physical characteristics no longer meet the growing requirements of the mobile device market. Short-term contact of glass with solid particles leads to the formation of defects, followed by its destruction under impact.

This problem can be solved by the creation of new materials – transparent glass-ceramics, which represent a heterogeneous material based on amorphous matrix and crystalline nanophases. Precipitation of the phase with high hardness while maintaining the transparency of the glass-ceramics will provide a material that is promising for applications as screen protection.

For this purpose, the influence of heat treatment conditions (h/t) on the values of microhardness (MH) of transparent glass-ceramics was studied in this work. The initial glass composition wt.%: 8 MgO; 15 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 42 SiO<sub>2</sub> and 35 (Na<sub>2</sub>O, ZnO, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) was synthesized by melting from a batch in a corundum crucible in an electric furnace at a temperature of 1620 °C. Glass samples were h/t in a two-stage mode (680 °C – 4 h and 750, 780, 800, 820, 830 and 845 °C with an exposure time of 10 or 30 hours).

The phase composition of the obtained samples includes a mixture of sapphirine and gahnite characterizing with a high hardness. It turned out that the MT values of the original glass already exceed the MT of Gorilla Glass. H/t of the original glass at 640 °C for 4 hours leads to a slight decrease in MT, which may be due to the formation of a small amount of solid phase, which reduces the total MT of the material [1]. H/t in two-stage mode leads to an increase in MT up to values exceeding 1050 HV while maintaining transparency. Further increase in the temperature of the second stage of H/t leads to a decrease in MH. Models are proposed that explain the behavior of mechanical properties depending on the structural changes of the glass-ceramics.

The obtained values of MT of sapphirine glass-ceramics exceed the microhardness of all known transparent glass-crystal materials, and can be used as protective screens for a wide class of devices.

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia, FSSM-2020-0003.

1. A.J.Stryjak, P.W. McMillan, J.Mat.Sci. **13(8)**, 1794 (1978).

## FORMATION OF ANISOTROPIC MICROVOIDS IN THE VOLUME OF NANOPOROUS GLASS BY FEMTOSECOND LASER PULSES

S.S. Fedotov<sup>1</sup>, A.S. Lipatiev<sup>1</sup>, S.V. Lotarev<sup>1</sup>, A.G. Okhrimchuk<sup>1,2</sup>,  
M.Yu. Presniakov<sup>3</sup>, G.Yu. Shakhgildyan<sup>1</sup>, V.N. Sigaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

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

<sup>3</sup>*National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

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

Nanoporous glasses (NPG) attract the attention of researchers due to their unique structure, consisting of nanoscale channels containing secondary silica globules, as well as good optical transparency, mechanical and temperature stability. It was previously shown that exposure of such glasses under femtosecond laser pulses can lead to birefringence, with the slow axis oriented perpendicular to the polarization of a linearly polarized laser beam, which makes it possible to use these structures for multilevel information coding [1, 2].

In this study, nanoporous glass was modified by femtosecond laser pulses with a repetition rate 1 MHz, pulse duration 180 fs, and pulse energy 50 nJ. The number of pulses per point varied from 1 to 3. It was found by the SEM method that the birefringent structure is a cavity with an elliptical cross-section in the plane perpendicular to the laser beam, surrounded by a layer of compacted waterproof glass. The major axis of the ellipse is perpendicular to the polarization of the laser beam. The study of the dynamics of the formation of the cavity showed that after the first pulse the cavity has a circular cross-section and is not birefringent. After the second and third pulses, the cavity is extended in the direction perpendicular to the polarization of the laser radiation.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant №19-03-00684).

1. A.S. Lipatiev et al., *Appl. Opt.* **57**, 978 (2018).
2. S.S. Fedotov et al., *Opt. Lett.* **43**, 851 (2018).

## INFLUENCE OF LASER WRITING PARAMETERS ON THE WAVEGUIDES STRUCTURE IN $\text{Ag}_2\text{O-ZnO-P}_2\text{O}_5$ GLASS

S.S. Fedotov, A.S. Lipatiev, S.V. Lotarev, G.Yu. Shakhgildyan, V.N. Sigaev  
*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*  
*E-mail: [georgiy.shahgildyan@gmail.com](mailto:georgiy.shahgildyan@gmail.com)*

The nonlinear nature of the absorption of ultrashort laser pulses by the material makes it possible to control the spatial position of modified regions in the volume and create new types of integrated devices for photonics, optoelectronics and information storage. Of particular interest is the possibility of creating nonlinear optical waveguides in the volume of oxide glasses, which will allow controlling the data transfer on the chip.

In this work, waveguides with a cross section of  $3.5 \times 14 \text{ mm}^2$  and a length of 25 mm consisting of nanoparticles and silver clusters were recorded in the volume of glass composition (mol.%)  $8\text{Ag}_2\text{O}$ ;  $53\text{ZnO}$ ;  $39\text{P}_2\text{O}_5$ . The laser-induced formation of nanoparticles is confirmed by the characteristic yellow color and confocal absorption spectra recorded in regions containing waveguides. The spectra show absorption bands with a maximum at 450 nm, which corresponds to the SPR of silver nanoparticles. Written waveguides also have luminescence in the visible region caused by the formation of silver clusters. It is shown that when the writing speed of waveguides increases from 2 to 5 microns/s, the intensity of the SPR band decreases and the luminescence intensity increases, which indicates a decrease in the number of silver plasmon nanoparticles and an increase in the number of clusters.

It is also shown that an increase in the writing speed from 2 to 5 microns/s leads to a decrease in  $\Delta n$  from 4.8 to  $2.3 \cdot 10^{-3}$ . Waveguide properties are demonstrated when a laser beam with a wavelength of 1030 and 1550 nm is inserted. The loss at 1550 nm, determined by the interference method, is 1.08 dB/cm.

So, for the first time the possibility of generating a supercontinuum in the written waveguides containing silver nanoparticles – the spectrum of femtosecond laser beam after passing through the waveguides widens by more than 60 nm, which indicates the nonlinear properties of the written waveguides. Changes in the waveguide writing speed affect the shape of the supercontinuum spectra and the optical breakdown of waveguides. It is shown that with a higher content of plasmon nanoparticles in the waveguide, self-focusing is observed and an optical breakdown occurs at a distance of 60 microns from the sample border, while a decrease in the number of silver nanoparticles leads to an optical breakdown on the sample surface. The obtained results open up new possibilities for creating integrated nonlinear optical elements of photonic chips.

This work was supported by grant No. 19-32-80032 of the Russian Foundation for Basic Research.

# CRYSTALLINE PHASES IN A CARBON-CONTAINING POLYMER COMPOSITE

A.A. Karpeev, V.V. Naumkin, N.V. Yantsen, A.M Zyuzin

*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

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

The effect of carbon black (TU) and peroxide saturation on the phase composition of a composite material based on ethylene vinyl acetate was studied. In fig. 1 DSC curves are presented for the initial samples with different TU contents, as well as for samples saturated with peroxide. Two pronounced peaks in the curve for a sample with a TU content of 35% (fig. 1 (a)) indicate the presence of two crystalline phases in the initial composite: – «1» and a higher temperature – «2». It was found that the proportion of the second phase increases almost linearly with the content of TU. For samples saturated with peroxide, the DSC curves have one peak (fig. 1 (b)), indicating the presence of only one crystalline phase. The pronounced dependence of the fraction of the crystalline phase «2» on the content of TU allows us to conclude that the formation of this phase is initiated by carbon black particles, which are the centers of formation of crystalline fragments formed by matrix macromolecules. The absence of a crystalline phase in a peroxide-saturated composite is explained by crosslinking of the macromolecules of the polymer matrix, which suppresses crystallization initiated by carbon black particles.

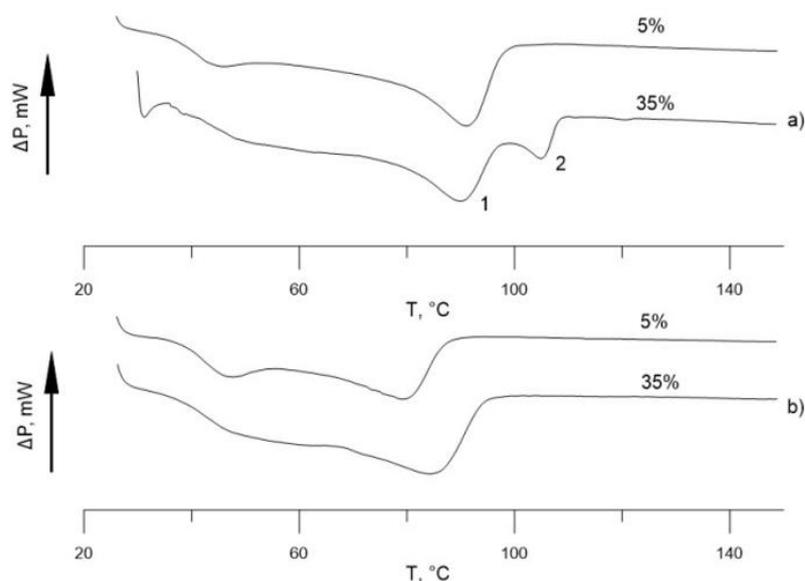


Fig. 1. DSC curves for composite samples.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Republic of Mordovia, project No. 18-48-130015 r\_a.

# ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ

## ИНТЕРФЕЙСНЫЕ ЭФФЕКТЫ В НАНОСТРУКТУРАХ

Е.Л. Ивченко

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
Санкт-Петербургский Академический университет им Ж.И. Алферова*

*РАН, Санкт-Петербург*

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

Главным элементом любых полупроводниковых наноструктур (квантовых ям, квантовых нитей, квантовых точек) является интерфейс: без границ раздела не бывает и наноструктур, а кроме того, влияние интерфейсов растет по мере уменьшения размерности. Несовершенства интерфейса ограничивают многие важнейшие параметры наноструктур, такие, например, как подвижность свободных носителей и квантовый выход люминесценции. Помимо несовершенств на границах раздела, которые в принципе устранимы, большое влияние на параметры наносистем может оказывать и сама атомарная структура идеальных интерфейсов. Лекция посвящена проявлению этой принципиально неустранимой микроструктуры интерфейса, понижающей симметрию нанообъекта. План лекции и ее краткое содержание приведены ниже.

1. Зонная структура объемных полупроводников с решеткой цинковой обманки (GaAs, AlAs, InP, ZnSe, BeTe, CdTe, HgTe и многие другие соединения  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$ ). Валентная зона  $\Gamma_8$ , гамильтониан Латтинжера.
2. Стандартные граничные условия Бастарда. Общий вид граничных условий для волновой функции электрона в простой зоне.
3. Граничные условия в случае сложной валентной зоны  $\Gamma_8$ . Проявление анизотропии химических связей на интерфейсе – смешивание состояний тяжелой и легкой дырки на интерфейсе (001).
4. Эффекты интерфейсного смешивания состояний тяжелой и легкой дырки.
  - Экситоны в сверхрешетке GaAs/AlAs типа II. Тонкая структура экситонов, наличие в одной и той же гетероструктуре двух экситонных состояний с равными по модулю, но противоположными по знаку значениями анизотропного обменного расщепления.
  - Гетероструктуры без общих катиона и аниона типа I (InGaAs/InP) и типа II (ZnSe/BeTe, InAs/AlSb, InAs/GaSb). Гигантская линейная поляризация излучения экситонов в структурах типа II (до 80% и выше): в структурах с неэквивалентными нормальным и инвертированным интерфейсами эта оптическая анизотропия наблюдается без приложения внешних сил, а при эквивалентных

интерфейсах она наводится электрическим полем (гигантский квантово-размерный эффект Погкельса).

- Интерфейсный вклад в спиновое расщепление электронных и дырочных дисперсионных ветвей в структурах с квантовыми ямами. В гетероструктуре Si/SiGe это расщепление имеет чисто интерфейсную природу. Описание спин-орбитального расщепления дырочных энергетических ветвей в многозонной модели.
- Энергетический спектр свободных носителей в структурах с квантовой ямой HgTe/CdHgTe. При определенной (критической) толщине  $d_c$  слоя квантовой ямы запрещенная зона в структуре исчезает, а зависимость энергии от квазиимпульса в окрестности точки  $k = 0$  становится линейной. В простой  $k \square p$  модели состояния в этом дираковском конусе двукратно вырождены (двумерный дираковский материал). Учет анизотропии интерфейсных химических связей приводит к снятию этого вырождения и раздвоению дираковского конуса.
- Наведенная интерфейсная оптическая анизотропия.

## ЭФФЕКТЫ ХОЛЛА В ДВУМЕРНЫХ СИСТЕМАХ

С.А. Тарасенко

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

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

Эдвин Холл. В истории физики не было, пожалуй, другого исследователя, который бы дал свое имя такому большому ряду эффектов. Эффект Холла, аномальный эффект Холла, целочисленный и дробный квантовые эффекты Холла, спиновый, обратный спиновый и квантовый спиновый эффекты Холла, топологический эффект Холла – вот далеко не полный список явлений, относящихся к транспорту носителей заряда в твердом теле. А есть еще множество оптических и акустических аналогов этих электронных эффектов.

В докладе представлен обзор современного состояния дел в области эффектов Холла в двумерных электронных системах, обсуждаются микроскопические механизмы этих явлений.

Особое внимание будет уделено квантовому, квантовому спиновому и квантовому аномальному эффектам Холла. В этих эффектах перенос заряда и спина осуществляется по одномерным каналам, возникающим на краях двумерной структуры конечного размера из-за нетривиальной топологии электронных состояний в объеме структуры [1]. В квантовом эффекте Холла краевые состояния имеют киральную структуру и связаны с формированием уровней Ландау в магнитном поле. В квантовом спиновом эффекте Холла краевые состояния возникают за счет инверсии зон в полупроводниках с сильным спин-орбитальным взаимодействием [1, 2]. В этом случае состояния имеют топологическую защиту, связанную с крамерсовым вырождением. Приложение внешнего магнитного поля снимает топологическую защиту и открывает щель в спектре краевых состояний, приводя к андерсоновской локализации электронов и подавлению электронного транспорта. В двумерных топологических изоляторах на основе полупроводников с решеткой цинковой обманки щель в спектре краевых состояний является сильно анизотропной функцией магнитного поля и достигает наибольшего значения в перпендикулярном магнитном поле [3]. Подавление транспорта по краевым каналам в перпендикулярном магнитном поле наблюдалось недавно в топологических изоляторах на основе теллурида ртути [4].

Работа поддержана грантом РФФИ (проект №17-12-01265).

1. M.Z. Hasan, C.L. Kane, Rev. Mod. Phys. **82**, 3045 (2010).
2. С.А. Тарасенко, УФН **188**, 1130 (2018).
3. M.V. Durnev, S.A. Tarasenko, Phys. Rev. B **93**, 075434 (2016).
4. S.U. Piatrush et al., Phys. Rev. Lett. **123**, 056801 (2019).

## ЧТО ТАКОЕ СИЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ГЕКСАБОРИДА САМАРИЯ)?

В.В. Глушков

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

*E-mail: [glushkov@lt.gpi.ru](mailto:glushkov@lt.gpi.ru)*

Гексаборид самария является классическим примером систем с сильными электронными корреляциями. В этом соединении состояния ионов самария с разным числом  $4f$ -электронов ( $4f^n$  и  $4f^{n-1}$ ) оказываются вырожденными [1,2]. Переходы между различными электронными конфигурациями приводят к нецелочисленной валентности иона самария (для  $\text{SmB}_6$ :  $\nu \approx 2.6$  [3]) и, как следствие, к частичной делокализации  $4f$ -состояний и сильным флуктуациям магнитного момента. В режиме сильного взаимодействия локализованных  $4f$ - и зонных  $5d$ -электронов в зонном спектре  $\text{SmB}_6$  открывается гибридационная щель ( $\epsilon_g \approx 19$  мэВ [4]), что позволяет отнести это соединение с кубической структурой к классу сильно коррелированных узкозонных полупроводников с аномально высокими значениями эффективных масс электронов ( $\sim 30m_0$ ) и дырок ( $\sim 1500m_0$ ) [5, 6].

Сильные электронные корреляции определяют и ряд аномалий транспортных свойств гексаборида самария, одна из которых связана с «насыщением» удельного сопротивления ( $\rho \sim 10 \div 100$  Ом·см), наблюдающимся при  $T < 5$  К для всех исследованных монокристаллических образцов. При более высоких температурах наличие двух активационных участков с энергиями активации  $\sim 3$ -6 мэВ и  $\sim 20$  мэВ на температурных зависимостях транспортных свойств позволяет четко идентифицировать смену режимов зарядового транспорта с переходом от собственной ( $T > 15$  К) к примесной ( $T < 15$  К) проводимости [6]. Интересно, что «малая» энергия активации ( $E_{\text{ex}} \approx 3.5 \div 6$  мэВ), определяющая поведение параметров зарядового транспорта при  $T < 15$  К, зависит от направления тока относительно кристаллической решетки  $\text{SmB}_6$  [7]. Обнаруженная анизотропия транспортных свойств согласуется с пространственной направленностью экситон-поляронных комплексов, формирующихся в режиме быстрых зарядовых флуктуаций в окрестности ионов Sm [8]. Экситон-поляронная модель зарядовых флуктуаций в  $\text{SmB}_6$  [8] позволяет разделить вклады в энергию связи многочастичных (экситон-поляронных) состояний от изотропной экситонной компоненты ( $E_{\text{ex}} \approx 3$  мэВ) и анизотропного поляронного потенциала ( $E_p \approx 0.5 \div 3$  мэВ), величина которого зависит от кристаллографического направления. При этом анализ совокупности данных измерений транспортных, оптических и магнитных свойств  $\text{SmB}_6$  при  $T < T^* \sim 5$  К [5-7, 9] позволяет сделать вывод об электронном фазовом переходе в когерентное состояние электронно-дырочной жидкости, описываемой экситон-поляронной моделью зарядовых флуктуаций [8].

Однако, экситон-поляронный механизм формирования основного состояния  $\text{SmB}_6$  [6–9] оспаривается данными фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением [10–11], указывающими на появление в запрещенной зоне гексаборида самария состояний с двумерным дираковским спектром. Согласно модели коррелированного топологического изолятора (КТИ) [12] эти поверхностные состояния возникают из-за нетривиальной топологии зонной структуры гексаборида самария (соответствующий  $Z_2$  инвариант для  $\text{SmB}_6$  равен (1;111) [12]). В отличие от экситон-поляронного подхода [8] концепция КТИ [12] связывает независящее от температуры удельное сопротивление в основном состоянии  $\text{SmB}_6$  с переходом от объемной проводимости с зонными носителями заряда к электронному транспорту по поверхностным состояниям, определяющим возникновение двумерного металлического слоя на границе материала [12–13]. Жесткая связь между поляризацией спина и направлением импульса электрона, определяемая сильным спин-орбитальным взаимодействием, обеспечивает сохранение ориентации спина и бездиссипативный перенос заряда из-за подавления процессов рассеяния электронов на немагнитных дефектах и неровностях поверхности [14]. Киральность дираковских электронов подтверждают наблюдения магнитного кругового дихроизма, обнаруженного для состояний в точках X и  $\Gamma$  зоны Бриллюэна по аналогии с данными для классического топологического изолятора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  [15]. На доминирующий вклад поверхностных состояний в процессы переноса заряда при низких температурах указывают и эффекты нелокальной проводимости, проявляющиеся при изменении геометрии токовых путей при переходе от трехмерного к двумерному режиму электронного транспорта [14, 16].

В докладе обсуждается современное состояние исследований этого удивительного соединения с промежуточной валентностью, рассмотрены противоречия в подходах и моделях, предлагаемых для объяснения особенностей электронных свойств  $\text{SmB}_6$ . В частности, параметры двумерной поверхности Ферми, определенные по данным квантовых осцилляций намагниченности [17], не согласуются с результатами [18] и данными измерений спектров рентгеновской фотоэмиссии с угловым разрешением (ARPES) [19–21]. Более того, несмотря на высокую подвижность поверхностных носителей заряда, квантовые осцилляции проводимости не наблюдаются во всем исследованном диапазоне температур (до 20 мК) и магнитных полей (до 15 Тл) [20–23]. Концентрация поверхностных состояний  $1.1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , оцененная из холловских измерений образцов разной толщины [13], оказывается аномально высокой для дираковского спектра. Обсуждается альтернативный подход к анализу ARPES спектров [24], в котором магнитный круговой дихроизм объясняется гигантским эффектом Рашбы без привлечения топологических моделей. В докладе подробно рассмотрены результаты магниторезонансных исследований  $\text{SmB}_6$  [25], согласно которым появление температурно-индуцированных магнитных

моментов в приповерхностном слое при гелиевых температурах не приводит к видимым изменениям поверхностной проводимости. Измерения магнитного резонанса показали, что температурная зависимость интегральной интенсивности демонстрирует аномальное критическое поведение  $I(T) \sim (T^* - T)^\alpha$  с характерной температурой  $T^* = 5.34$  К и показателем степени  $\alpha \approx 0.38$  [25]. Необычное поведение параметров магнитного резонанса указывает на возможный магнитный фазовый переход на поверхности (110)  $\text{SmB}_6$ , что не согласуется с температурно независимыми характеристиками поверхностных электронных состояний, предсказываемыми в рамках модели коррелированных ТИ [12].

Работа поддержана грантом РФФИ № 17-02-00127.

1. Д.И. Хомский, УФН **129**, 443 (1979).
2. P. Riseborough, Adv. Phys. **49**, 257 (2000).
3. M. Mizumaki et al., J. Phys.: Conf. Series **176**, 012034 (2009).
4. B. Gorshunov et al., Phys. Rev. B **59**, 1808 (1999).
5. G. Travaglini, P. Wachter, Phys. Rev. B **29**, 893 (1984).
6. N. Sluchanko et al., Phys. Rev. B **61**, 9906 (2000).
7. N. Sluchanko et al., Phys. Rev. B **64**, 153103 (2001).
8. K. Kikoin, A. Mishchenko, J. Phys.: Condens. Matter **7**, 307 (1995).
9. V. Glushkov et al., J. Sol. St. Chem. **179**, 2871 (2006).
10. M. Neupane et al., Nat. Commun. **4**, 2991 (2013).
11. N. Xu et al., Phys. Rev. B **88**, 121102 (2013).
12. M. Dzero et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 106408 (2010).
13. D.J. Kim et al., Sci. Rep. **3**, 3150 (2013).
14. D.J. Kim et al., Nature Mater. **13**, 466 (2014).
15. M. Xia et al., Sci. Rep. **4**, 5999 (2014).
16. S. Gabani et al., Sol. St. Sci. **47**, 17 (2015).
17. G. Li et al., Science **346**, 1208 (2014).
18. B.S. Tan et al., Science **349**, 287 (2015).
19. H. Miyazaki et al., Phys. Rev. B **86**, 075105 (2012).
20. N. Xu et al., Phys. Rev. B **88**, 121102 (2013).
21. M. Neupane et al., Nature Comm. **4**, 2991 (2013).
22. S. Thomas et al., Phys. Rev. B **94**, 205114 (2016).
23. Y. Nakajima et al., Nature Physics **12**, 213 (2016).
24. P. Hlawenka et al., Nature Comm. **9**, 517 (2018).
25. S.V. Demishev et al., Sci. Rep. **8**, 7125 (2018).

# ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ В СИСТЕМАХ С МАГНИТНЫМИ СКЕРМИОНАМИ

К.С. Денисов

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
Санкт-Петербургский Академический университет им Ж.И. Алфёрова  
РАН, Санкт-Петербург*

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

Поиск новых физических явлений, связанных со спиновыми степенями свободы носителей заряда в различных материальных системах, занимает важное место в фундаментальных и прикладных исследованиях. Среди наиболее ярких направлений последнего десятилетия выделяется изучение магнитных систем, в которых спин-орбитальное взаимодействие приводит к формированию сложного пространственно-упорядоченного распределения намагниченности. Важнейший пример исследований в этом направлении связан с изучением физики магнитных скирмионов в ферромагнитных пленках и магнитных гетероструктурах [1–3]. Магнитный скирмион представляет собой кирально-солитонное состояние намагниченности, характеризующееся нетривиальной топологией и компактным размером. Сложная топология распределения намагниченности внутри скирмиона обеспечивает его термодинамическую стабильность, которая в некоторых случаях может быть сохранена вплоть до комнатных температур. Более того, системы, допускающие формирование индивидуальных магнитных скирмионов, в последнее время приобрели особый интерес в связи с их большим прикладным потенциалом и возможностью применения в логических устройствах нового поколения [3]. В частности, в структурах на основе race-track архитектуры можно добиться быстрого перемещения скирмионов с помощью электрического тока [4]. Значительный прогресс, произошедший в недавнее время, связан с применением методов визуализации поверхности магнитных сред, что привело к открытию различных материальных платформ, допускающих образование магнитных скирмионов нанометрового масштаба [5–7].

Формирование магнитных скирмионов в системе существенным образом сказывается на ее электрических свойствах. При исследовании электросопротивления киральных спиновых систем обнаруживается дополнительное падение напряжения на поперечных контактах – топологический эффект Холла (ТЭХ). Данный эффект возникает в результате асимметрии движения электрона при его обменного взаимодействия с полем намагниченности внутри скирмионов [8]. Топологический эффект Холла имеет важное прикладное значение, поскольку позволяет детектировать киральные спиновые текстуры намагниченности чисто электрическими методами. Экспериментальное наблюдение ТЭХ было установлено в различных материальных системах [5, 6]. В докладе будет представлена микроскопическая картина

формирования данного явления, рассмотрены различные режимы и специфические особенности, отличающие свойства ТЭХ от прочих механизмов поперечного электронного отклика, а также освещено современное экспериментальное состояние исследований транспортных явлений в системах с магнитными скирмионами.

Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-12-01182.

1. N. Nagaosa, Y. Tokura, *Nature Nanotechnology* **8**, 899 (2013).
2. A. Fert, N. Reyren, V. Cros, *Nature Review Materials* **2**, 17031 (2017).
3. R. Wiesendanger, *Nature Review Materials* **1**, 16044 (2016).
4. X. Zhang et al., *Sci. Rep.* **5**, 11369 (2015).
5. A. Soumyanarayanan et al., *Natura Materials* **16**, 898 (2017).
6. W. Legrand et al., *Nano Lett.* **17**, 2703 (2017).
7. S. Meyer et al., *Nature Comm.* **10**, 3823 (2019).
8. K.S. Denisov et al., *Phys. Rev. B* **98**, 195439 (2018).

# ИНТЕРФЕЙСНЫЕ СОСТОЯНИЯ В ДВУМЕРНЫХ ГЕТЕРОПЕРЕХОДАХ СО СПИН-ОРБИТАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ОБЩЕГО ВИДА

А.Р. Зайнагутдинов, А.В. Тележников

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

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

В полупроводниковых структурах существенное значение на спектр носителей может оказывать спин-орбитальное взаимодействие (СОВ). Так, в полупроводниках без центра инверсии в ряде задач целесообразно учитывать СОВ Дрессельхауза, а в 2D электронном газе, сформированном в асимметричной квантовой яме, – СОВ Рашбы. Исследование особенностей спектра носителей, в том числе обсуждение возможности существования интерфейсных состояний, в гетеропереходах с СОВ Рашбы и СОВ Дрессельхауза выполнено, например, в [1].

В настоящей работе рассматривается гетеропереход с СОВ общего вида (что соответствует ситуации, когда квантовая яма выращена в произвольном кристаллографическом направлении). В этом случае гамильтониан СОВ оказывается по-прежнему линейным по волновому вектору  $k$ :

$$\hat{H}_{SO} = (\alpha_{xx} \hat{\sigma}_x + \alpha_{yx} \hat{\sigma}_y + \alpha_{zx} \hat{\sigma}_z) \hat{k}_x + (\alpha_{xy} \hat{\sigma}_x + \alpha_{yy} \hat{\sigma}_y + \alpha_{zy} \hat{\sigma}_z) \hat{k}_y \quad (1)$$

На прямолинейной границе, разделяющей плоские области с 2D-электронным газом с различными константами СОВ  $\alpha_{ki}$ , «сидит»  $\delta$ -образный потенциал (который широко используется для описания тампоподобных поверхностных состояний у границы раздела). Анализ дисперсионного уравнения показал, что помимо объемных состояний при определенных параметрах системы спектр содержит интерфейсные состояния, приведенные на вставке рис.1 (а). Поведение квадрата модуля волновой функции, соответствующей одному из таких состояний, показано на рис.1 (б). Также в работе проведён анализ зависимости энергетического спектра от различных параметров системы.

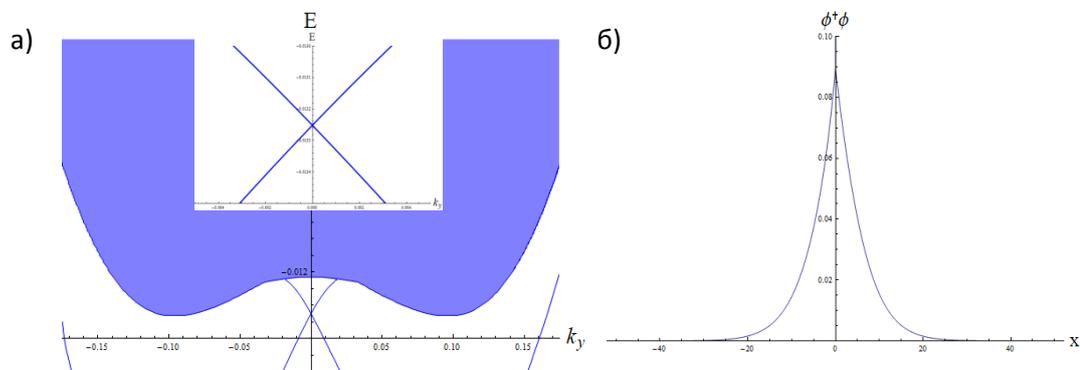


Рис. 1. (а) – пример энергетического спектра гетероперехода с СОВ общего вида. На вставке – ветви интерфейсных состояний; (б) – квадрат модуля волновой функции.

1. A.A. Sukhanov, V.A. Sablikov, J. Phys.: Condens. Matter **23**, 395601 (2011).

ДИНАМИКА КРАЕВЫХ СОСТОЯНИЙ И ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ  
НА ПОВЕРХНОСТИ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ  
В ПРИСУТСТВИИ БАРЬЕРОВ

Д.А. Кулаков, Д.В. Хомицкий

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

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

В последние годы возрос интерес к изучению свойств двумерных и трехмерных топологических изоляторов (ТИ). Последнее приводит к тому, что поляризованные по спину электроны практически не рассеиваются на дефектах и неровностях поверхности диэлектрика. Это свойство представляет большой интерес в практическом плане для создания устройств спинтроники на базе данных материалов. Вследствие чего метод управления движением и спином волнового пакета является важной исследовательской задачей.

В данной работе исследовано численное моделирование динамики волновых пакетов на поверхности топологических изоляторов [1] в присутствии однородного (по одной из координат) прямоугольного потенциального барьера с различной намагниченностью. Аналитически задача решается, используя статическое разложение волнового пакета на плоские волны. Решается задача о рассеянии плоских волн в данной системе [2] и полученный результат обобщается для двумерных электронных состояний, описываемых волновыми пакетами. Исследован эффект Клейновского туннелирования [3].

Исследована динамика волновых пакетов на поверхности трехмерных ТИ. Установлено влияние энергии волнового пакета, угла падения на прохождение через данные структуры. Исследована динамика спиновой плотности, обнаружено возникновение дополнительных спиновых плотностей. Показано, что для двумерного волнового пакета эффект Клейновского туннелирование может быть подавлен.

1. X.-L. Qi, S.-Ch. Zhang, Rev. Mod. Phys. **83**, 1057 (2011).
2. J. Milton Pereira et al., Phys. Rev. B **74**, 045424 (2006).
3. C. Yesilyurt et al., Sci. Rep. **6**, 38862 (2016).

# УЧЕТ КОРОТКОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЧАСТИ ПОТЕНЦИАЛА ПРИ РАСЧЕТЕ ОСНОВНОГО СОСТОЯНИЯ МЕЛКИХ ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

А.А. Конаков, А.М. Михайлова, А.А. Ревин

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

*E-mail: [annmihailova1998@mail.ru](mailto:annmihailova1998@mail.ru)*

Важной задачей физики полупроводников является расчет электронных состояний уединенных примесных центров – доноров и акцепторов. Состояния носителя, локализованного на мелком примесном центре, могут быть описаны в рамках приближения огибающей функции с эффективным гамильтонианом, потенциальная энергия в котором включает дальнедействующий (водородоподобный) и короткодействующий (типа экранированного кулоновского потенциала) вклады [1]. Последний затрудняет расчет квантовых состояний, поскольку рассматриваемое уравнение шредингеровского типа не имеет точного аналитического решения. Особенно важен учет короткодействующего потенциала для донорных состояний в непрямозонных полупроводниках типа кремния и германия ввиду резонансного междолинного смешивания, индуцированного короткодействующим потенциалом [2].

В рамках приближения огибающей функции нами разработан подход к расчету энергии и волновых функций основного состояния мелких донорных центров в прямозонных и непрямозонных полупроводниках с учетом короткодействующей части потенциала. Решение уравнения для огибающей проводилось вариационным методом Ритца. Сперва задача была решена в случае изотропной эффективной массы. Пробные функции выбирались двух видов: водородоподобная с эффективным радиусом Бора в качестве вариационного параметра и суперпозиция двух водородоподобных, где одна учитывала отклик на дальнедействующую часть потенциала, а вторая – на короткодействующую. Наилучший результат достигается при использовании функции второго типа, содержащей три вариационных параметра. Для сравнения также использовался пертурбативный подход к решению задачи, однако его точность оказалась ниже.

Полученная на предыдущем этапе волновая функция была преобразована в четырехпараметрическую для расчета структуры основного состояния доноров в полупроводниках с анизотропной эффективной массой. Найдены параметры волновых функций, наиболее близко отвечающие имеющимся экспериментальным данным [3].

Работа поддержана грантом РФФИ №19-53-45056.

1. W. Kohn, J.M. Luttinger, Phys. Rev. **98**, 915 (1955).
2. S.T. Pantelides, C.T. Sah, Phys. Rev. B **10**, 621 (1974).
3. A.K. Ramdas, S. Rodriguez, Rep. Prog. Phys. **44**, 1297 (1981).

# ELECTRONIC PHENOMENA IN NANOSTRUCTURES

## HALL EFFECTS IN TWO-DIMENSIONAL SYSTEMS

S.A. Tarasenko

*Ioffe Institute of RAS, Saint-Petersburg, Russia*

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

Edwin Hall. There was perhaps no other researcher in the history of physics who would give his name to such a large number of phenomena. Hall effect, anomalous Hall effect, integer and fractional quantum Hall effects, spin, inverse spin, and quantum spin Hall effects, topological Hall effect – this is not a complete list of phenomena related to transport of charge carriers in solids. And there are many more optical and acoustic analogues of these electronic effects.

In the talk, I will provide an overview of the current research in the field of Hall effects in two-dimensional electronic systems and discuss the microscopic mechanisms of these phenomena.

Particular attention will be paid to the quantum, quantum spin, and quantum anomalous Hall effects. In these effects, charge and spin transport occurs along one-dimensional channels arising at the edges of a two-dimensional structure of finite size due to the non-trivial topology of electronic states in the bulk of the structure [1]. In the quantum Hall effect, the edge states are chiral and associated with the formation of the Landau levels in a magnetic field. In the quantum spin Hall effect, the edge states arise due to band inversion in semiconductors with strong spin-orbit interaction [1, 2]. In this case, the edge states have a topological protection associated with the Kramers degeneracy. Application of an external magnetic field removes the topological protection and opens a gap in the spectrum of the edge states, leading to the Anderson localization of electrons and the suppression of electron transport. In two-dimensional topological insulators based on semiconductors with a zinc blende structure, the gap in the spectrum of the edge states is an anisotropic function of the magnetic field and reaches its maximum in a perpendicular magnetic field [3]. Such a suppression of electron transport along the edge channels by a perpendicular magnetic field has been recently observed in topological insulators based on mercury telluride [4].

This work was supported by the Russian Science Foundation (project №17-12-01265).

1. M.Z. Hasan, C.L. Kane, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 3045 (2010).
2. S.A. Tarasenko, *Physics - Uspekhi* **61**, 1026 (2018).
3. M.V. Durnev, S.A. Tarasenko, *Phys. Rev. B* **93**, 075434 (2016).
4. S.U. Piatrush et al., *Phys. Rev. Lett.* **123**, 056801 (2019).

# INTERFACE STATES IN TWO-DIMENSIONAL HETEROJUNCTIONS WITH A SPIN-ORBIT INTERACTION OF A GENERAL TYPE

A.V. Telezhnikov, A.R. Zaynagutdinov

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

*E-mail: zoya1066@mail.ru*

In semiconductor structures spin-orbit interaction (SOI) can have a significant effect on the carrier spectrum. So, in semiconductors without an inversion center in a number of problems it is advisable to take into account the Dresselhaus SOI, and the Rashba SOI in a 2D electron gas formed in an asymmetric quantum well. A study of the characteristics of the carrier spectrum, including a discussion of the possibility of the existence of interface states, in heterojunctions from the Rashba SOI and the Dresselhaus SOI was performed, for example, in [1].

In this paper, we consider a heterojunction with a SOI of a general type (which corresponds to the situation when a quantum well is grown in an arbitrary crystallographic direction). In this case, the SOI Hamiltonian is still linear in the wave vector  $k$ :

$$\hat{H}_{SO} = (\alpha_{xx} \hat{\sigma}_x + \alpha_{yx} \hat{\sigma}_y + \alpha_{zx} \hat{\sigma}_z) \hat{k}_x + (\alpha_{xy} \hat{\sigma}_x + \alpha_{yy} \hat{\sigma}_y + \alpha_{zy} \hat{\sigma}_z) \hat{k}_y \quad (1)$$

At the rectilinear boundary dividing planar regions with a 2D electron gas with various SOI constants, there is a « $\delta$ -shaped» potential (which is widely used to describe tamm-like surface states at the interface). The analysis of the dispersion equation showed that in addition to volumetric states for certain system parameters the spectrum contains interface states shown in the inset in fig.1 (a). The behavior of the squared modulus of the wave function corresponding to one of these states is shown in fig.1 (b). The paper also analyzes the dependence of the energy spectrum on various system parameters.

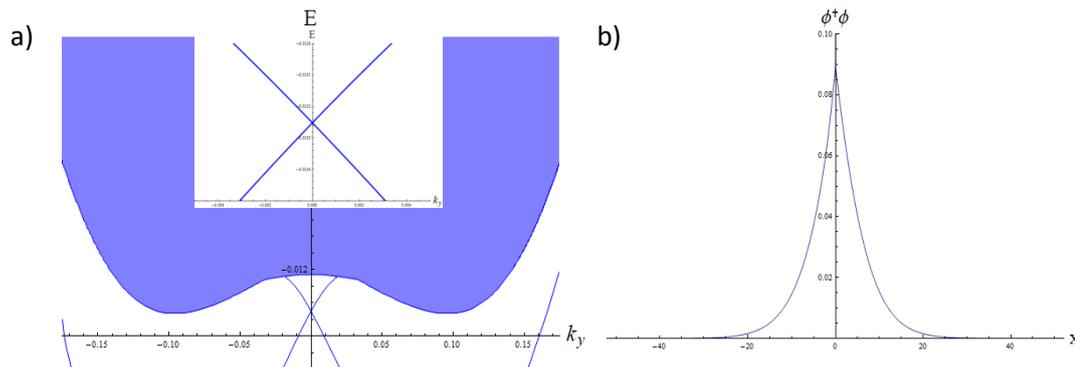


Fig. 1. (a) – an example of the energy spectrum of a heterojunction with a SOI of a general type. The inset – branches of interface states; (b) – the square of the modulus of the wave function.

1. A.A. Sukhanov, V.A. Sablikov, J. Phys.: Condens. Matter **23**, 395601 (2011).

# DYNAMICS OF EDGE STATES AND WAVE PACKETS ON THE SURFACE OF TOPOLOGICAL INSULATORS IN THE PRESENCE OF BARRIERS

D.V. Khomitsky, D.A. Kulakov

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

*E-mail: deniskulakov@mail.ru*

In recent years, there has been an increased interest in studying the properties of two-dimensional and three-dimensional topological insulators (TI). The latter leads to the fact that spin-polarized electrons are practically not scattered on defects and irregularities of the dielectric surface. This property is of great interest in practical terms for creating spintronics devices based on materials data. As a result, the method of controlling the motion and spin of the wave packet is an important research task.

In this paper, numerical research of the dynamics of wave packets on the surface of topological insulators [1] in the presence of a homogeneous (one of the coordinates) rectangular potential barrier with different magnetization is studied. Analytically, the problem is solved using static decomposition of the wave packet into plane waves. The problem of plane wave scattering in this system is solved [2] and the result is generalized for two-dimensional electronic States described by wave packets. The effect of Klein tunneling is studied [3].

The dynamics of wave packets on the surface of three-dimensional TI is studied. The influence of the energy of the wave packet and the angle of incidence on the passage through these structures is established. The dynamics of spin density is investigated, and the occurrence of additional spin densities is found. It is shown that for a two-dimensional wave packet, the Klein tunneling effect can be suppressed.

1. X.-L. Qi, S.-Ch. Zhang, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 1057 (2011).
2. J. Milton Pereira et al., *Phys. Rev. B* **74**, 045424 (2006).
3. C. Yesilyurt et al., *Sci. Rep.* **6**, 38862 (2016).

# CALCULATION OF THE GROUND STATE OF SHALLOW IMPURITY CENTERS IN SEMICONDUCTORS TAKING INTO ACCOUNT THE SHORT-RANGE POTENTIAL

A.A. Konakov, A.M. Mikhaylova, A.A. Revin

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

*E-mail: [annmihailova1998@mail.ru](mailto:annmihailova1998@mail.ru)*

One of the important problems in the semiconductor physics is the calculation of the electronic states of isolated impurity centers – donors and acceptors. The states of a carrier localized at a shallow impurity center can be described using the envelope function approximation with an effective Hamiltonian with potential energy includes 2 contributions: long-range (hydrogen-like) and short-range (such as a screened Coulomb potential) [1]. The latter introduces certain difficulties in the calculation of quantum states, since the considered Schrödinger-like equation does not have an exact analytical solution. It is especially important to take into account the short-range potential for donor states in indirect-gap semiconductors such as silicon and germanium due to the resonant intervalley mixing induced by the short-range potential [2].

Within the framework of the envelope function approximation, an approach has been developed to calculate the energy and wave functions of the ground state of shallow donor centers in direct-gap and indirect-gap semiconductors, taking into account the short-range part of the potential. The equation for the envelope was solved using the Ritz variational method. First, the problem was solved for the case of an isotropic effective mass. Two types of trial wave functions were selected: hydrogen-like with an effective Bohr radius as a variational parameter and a superposition of two hydrogen-like functions, where the first one takes into account the response to the long-range part of the potential, and the second one is determined mostly by the short-range potential. The best result is achieved using a function of the second type containing three variational parameters. For comparison, a perturbative approach to solving the problem was also used, but its accuracy turned out to be lower.

The wave function obtained at the previous stage was converted into a four-parameter one for calculating the structure of the donor ground state in indirect-gap semiconductors (Si and Ge) with an anisotropic effective mass. We found the parameters of the wave functions that most closely correspond to the available experimental data [3].

The work was supported by RFBR (grant №19-53-45056).

1. W. Kohn, J.M. Luttinger, Phys. Rev. **98**, 915 (1955).
2. S.T. Pantelides, C.T. Sah, Phys. Rev. B **10**, 621 (1974).
3. A.K. Ramdas, S. Rodriguez, Rep. Prog. Phys. **44**, 1297 (1981).

# ИНДУСТРИАЛЬНАЯ ФОТОНИКА

## ПРИМЕНЕНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ ОПТИКИ В КАНАЛЕ ВОЛС ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОТ ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ДАТЧИКОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА КАЧАЮЩЕМСЯ ОСНОВАНИИ

И.М. Бушмакин, А.В. Кошелев, С.В. Фатьянов  
АО ПО «Уральский оптико-механический завод им. Э.С. Яламова»,  
Екатеринбург  
E-mail: [kancelyariya@uomz.com](mailto:kancelyariya@uomz.com)

Практика использования гиростабилизированных оптико-электронных систем (ОЭС) в настоящее время все чаще сопряжена с решением задач передачи значительного объема информации в режиме реального времени. Применение волоконно-оптических линий связи для передачи телеметрической информации через подвижные узлы сочленения конструктивных составляющих ОЭС влечет за собой изменение требований к элементной базе волоконно-оптической техники в части повышения показателей надежности в эксплуатации и технологичности при изготовлении серийных образцов.

Коллектив конструкторов АО ПО «УОМЗ» им. Э.С. Яламова в своей практике продолжительное время использует различные элементы ВОЛС и ведет работу по изготовлению вращающегося соединителя для волоконных световодов, в состав которого введены конструктивные элементы градиентной оптики.

При проектировании вращающегося соединителя специалистами АО ПО «УОМЗ» учитывались факторы рассогласования элементов оптической системы. К таковым были отнесены величины: зазор между торцами соединяемых групп элементов, смещение продольных осей групп элементов в перпендикулярной плоскости, угловое смещение продольных осей элементов, непараллельность соединяемых групп элементов, шероховатость на торцах и поверхностях оптических элементов. Таким образом, задача проектирования вращающегося соединителя состояла в определении допусков на рассогласование соединяемых градиентных элементов по заданной величине вносимых оптических потерь.

Отличительной особенностью примененной оптической схемы является то, что поверхность сферической формы градиентного элемента уменьшает показатель обратных потерь, что дает возможность применять разработанный переход в оптических линиях широкополосной цифровой передачи, широкополосной аналоговой передачи или в магистральных линиях с большим числом разъемных соединений.

Выводы: Применение АО ПО «УОМЗ» градиентных оптических элементов в волоконно-оптических вращающихся соединителях вследствие повышения технологичности и высоких показателей

надежности в составе проектируемых приборов позволит создавать системы с расширенным спектром функций и высокой степенью автоматизации.