

ОТДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК РАН
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ П.Н. ЛЕБЕДЕВА
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЖУРНАЛ «КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

**VII Международный симпозиум
по когерентному оптическому излучению
полупроводниковых соединений и структур**

Москва 18-20 ноября 2019 года

*Программа
Сборник тезисов докладов*

Москва

ББК 22.379
УДК 537.311.322(06):621.375.826(06)
С 23

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур. 18-20 ноября 2019 года. Программа. Сборник тезисов докладов. Москва, ФИАН, НИЯУ МИФИ 2019.– 64 с.

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (КОИПСС) является научным форумом, в котором участвуют все ведущие научные учреждения, работающие по современным направлениям фундаментальных исследований в области когерентного оптического излучения полупроводниковых соединений и структур.

К рассматриваемым на Симпозиуме разделам относятся: полупроводниковые лазеры на гетероструктурах, исследование мощного когерентного излучения инжекционных лазеров, полупроводниковые лазеры с оптической и электронной накачкой, униполярные полупроводниковые лазеры, перспективные направления создания оптических когерентных источников, физика разрушения и деградации полупроводниковых структур и т.п.

Тезисы издаются в авторской редакции

ISBN 978-5-7262-2633-0

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2019

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур

О симпозиуме

Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (КОИПСС) является регулярным научным форумом, в котором участвуют сотрудники ведущих научных учреждений, работающие по современным направлениям фундаментальных исследований в области когерентного оптического излучения полупроводниковых соединений и структур.

К рассматриваемым на VII Симпозиуме КОИПСС-2019 разделам относятся: полупроводниковые лазеры на гетероструктурах, исследование мощного когерентного излучения инжекционных лазеров, полупроводниковые лазеры с оптической и электронной накачкой, униполярные полупроводниковые лазеры, перспективные направления создания оптических когерентных источников, физика разрушения и деградации излучательных полупроводниковых структур.

Участие ученых Москвы, Владивостока, Нижнего Новгорода, Самары, Санкт-Петербурга, а также иностранных коллег из стран СНГ и дальнего зарубежья в работе Симпозиума позволяет представить результаты на широкое научное обсуждение и поставить новые научные цели в области изучения фундаментальных основ когерентного оптического излучения полупроводниковых структур.

Место и время проведения

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур КОИПСС-2019 будет проведен в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН с 18 по 20 ноября 2019г.

Рабочий язык школы: русский и английский

Научная программа

Программа симпозиума состоит из пленарных и приглашенных докладов, устных молодежных и стендовых докладов.

Организаторы симпозиума

Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Отделение физических наук РАН
Российский фонд фундаментальных исследований
Журнал «Квантовая электроника»

Состав организационного комитета

Председатель оргкомитета - академик О.Н. Крохин (ФИАН, НИЯУ МИФИ)

Зам. председателя - И.Н. Завестовская (НИЯУ МИФИ, ФИАН)

Ответственный секретарь - А.А.Шестухина (ФИАН)

Члены оргкомитета

Ю.А. Алещенко (ФИАН, НИЯУ МИФИ)

В.В. Безотосный (ФИАН)

Н.И. Каргин (НИЯУ МИФИ)

С.П. Котова (СФ ФИАН)

В.В. Кочаровский (ИПФ РАН)

Ю.Н. Кульчин (ДВО РАН)

В.Н. Лебедев В.Н. (ФИАН, МФТИ)

В.А. Макаров (МГУ)

Г.Т. Микаелян (ООО «Лассард»)

Ю.М. Попов (ФИАН, НИЯУ МИФИ)

А.С. Семенов (Журнал «Квантовая Электроника»)

А.Н. Стародуб (ФИАН)

В.Н. Шастин (ИФМ РАН)

Члены локального оргкомитета

А.Ф. Алыкова (НИЯУ МИФИ)

В.С. Бреви (ФИАН)

М.С. Григорьева (НИЯУ МИФИ, ФИАН)

А.А. Фроня (НИЯУ МИФИ, ФИАН)

Контакты:

Сайт Симпозиума: <http://corscs.mephi.ru/>

E-mail: corscs@mephi.ru

***VII Международный симпозиум
по когерентному оптическому излучению
полупроводниковых соединений и структур***

Программа

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур

18 Ноября, Понедельник
Конференц- зал Главного корпуса ФИАН,
Москва, Ленинский, 53

13.00 - 14.00

Регистрация участников. Чай, кофе.

14.00 - 14.20

Открытие Симпозиума

Академик Крохин Олег Николаевич

Семинар 1 - Председатель И.Н.Завестовская

14.20 - 15.00

Микаелян Геворг Татевосович

ООО Лассард, НИЯУ МИФИ, Обнинск, Москва
Реальное состояние индустрии мощных диодных лазеров
и систем на их основе

15.00 - 15.30

Пихтин Никита Александрович

ФТИ им. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Импульсные и непрерывные лазерные диоды и модули
800-1600 нм диапазона длин волн

15.30 - 16.00

Чулков Руслан Владимирович

ИФ им. Стапанова НАН, Беларусь
Эффект межмодовых биений в наносекундном импульс-
ном вкр – лазере

16.00 - 16.30

Кочаровский Владимир Владиленович

ИПФ РАН, Нижний Новгород
Возбуждение и синхронизация квазиэквидистантных мод
гетеролазера посредством параметрического резонанса их
биений с биениями сверхизлучательных мод

16.30 - 17.00

Балашов Владимир Владимирович

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва
Лазерная керамика на основе оксидных материалов с вы-
сокой теплопроводностью

17.00 – 17.30

Шастин Валерий Николаевич

ИФМ РАН, Нижний Новгород
THz Raman Lasing of group-V donors in silicon

17.30 – 20.00

Товарищеский ужин

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур

19 Ноября, Вторник

**Колонный зал Главного корпуса ФИАН,
Москва, Ленинский, 53**

Семинар 2 - Председатель З.Н. Соколова

10.00 – 10.25

Мармалюк Александр Анатольевич
АО "НИИ "Полюс" им. М.Ф. Стельмаха", Москва
Полупроводниковые лазеры на основе AlGaInAs/InP с
одномерным фотонным кристаллом в волноводе

10.25 – 10.50

Слипченко Сергей Олегович
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Интегральный и гибридный подходы для генерации мощ-
ных лазерных импульсов многопереходными
AlGaAs/GaAs гетероструктурами

10.50 – 11.15

Козловский Владимир Иванович
ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва
Исследование полупроводникового лазера с внешним зер-
калом на структуре InGaAs/GaAs при продольной накачке
электронным пучком

11.15 – 11.40

Засавицкий Иван Иванович
ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва
Квантовый каскадный лазер с фононной релаксацией в
квазиконтинуум, работающий при температуре до 340 К

11.40 – 12.00

Перерыв. Кофе, чай.

Семинар 3 - Председатель С.О. Слипченко

12.00 – 12.25

Жуков Алексей Евгеньевич
Национальный исследовательский Академический уни-
верситет РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург
Microlasers with active region of various quantum dimension-
ality on GaAs and Si substrates

12.25 – 12.50

Соколова Зинаида Николаевна
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Effect of temperature on the quantum well laser characteristics

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому
излучению полупроводниковых соединений и структур

12.50 – 13.15

Ладугин Максим Анатольевич
АО "НИИ "Полюс" им. М.Ф. Стельмаха, Москва
Высокоэффективные полупроводниковые гетероструктуры для мощных источников лазерного излучения

13.15 – 13.40

Дураев Владимир Петрович
ЗАО "Нолатех", Москва
Перестраиваемые одночастотные полупроводниковые лазеры с волоконно-брэгговской решеткой

13.40 – 14.00

Скасырский Ян Константинович
ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва
2mJ room temperature Fe: CdTe laser tunable from 5.1 to 6.3 μm

14.00 – 15.00

Обед

15.00 – 16.00

Стендовая секция
Председатель - Ю.А. Алещенко
Холл второго этажа главного корпуса ФИАН,
Москва, Ленинский, 53

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур

20 Ноября, Среда

**Колонный зал Главного корпуса ФИАН,
Москва, Ленинский, 53**

Семинар 4 - Председатель А.А. Фроня

10.00 – 10.25

Светогоров Владимир Николаевич

АО "НИИ "Полюс" им. М.Ф. Стельмаха", Москва
Упруго-напряженная активная область мощных лазерных диодов на основе $AlGaInAs/InP$

10.25 – 10.50

Котова Светлана Павловна

Самарский филиал ФИАН, Самара
Формирование вихревых световых полей с помощью жидкокристаллических модуляторов света

10.50 – 11.15

Харин Александр Юрьевич

НИЯУ МИФИ, Москва
Nonlinear optical responses of Si nanocrystals for bioimaging technologies

11.15 – 11.40

Фроня Анастасия Андреевна

НИЯУ МИФИ, ФИАН, Москва
Импульсное лазерное осаждение в газовой среде: получение наноструктурированных слоев кремния

11.40 – 12.00

Перерыв. Кофе, чай.

Молодежная сессия - Председатель С.П. Котова

12.00 – 12.20

Мишин Алексей Викторович

ИПФ РАН, Нижний-Новгород
Эффект спонтанного нарушения симметрии излучения сверхизлучающего гетеролазера с симметричным низкодобротным резонатором

12.20 – 12.40

Гордеев Василий Петрович

НИЯУ МИФИ, Москва
Термоупругие напряжения в мощных лазерных линейках

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому
излучению полупроводниковых соединений и структур

12.40 – 13.00

Багаев Тимур Анатольевич
АО "НИИ "Полюс" им. М.Ф. Стельмаха, Москва
Лазер-тиристор с двумя излучающими секциями

13.00 – 13.20

Попова-Кузнецова Елена
НИЯУ МИФИ, Москва
Лазерный синтез наночастиц самария для тераностики
онкологических заболеваний с использованием перспек-
тивных радиофармпрепаратов

13.20 – 13.40

Григорьев Андрей Андреевич
ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва
Воздействие электромагнитного излучения на коллоид-
ные растворы наночастиц кремния: моделирование и
применения

13.40 – 14.00

Николаев Сергей Николаевич
ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва
Низкотемпературная фотолюминесценция бислоев WSe₂
вблизи края фундаментального поглощения

14.00 – 14.20

Колесова Екатерина Петровна
ИТМО, Санкт-Петербург
Фотоиндуцированные процессы на поверхности кванто-
вых точек в гибридных наноструктурах на основе TiO₂

14.20 – 15.00

Заккрытие симпозиума.
Принятие решения.
О.Н. Крохин

Стендовая секция
19 Ноября, Вторник
Председатель - Ю.А. Алещенко
Холл второго этажа главного корпуса ФИАН,
Москва, Ленинский, 53

1. **Алыкова Алида Файзрахмановна (НИЯУ МИФИ)**
Исследование кремниевых наночастиц методом рамановской спектроскопии
2. **Баско Елизавета Андреевна (НИЯУ МИФИ)**
Исследование влияния этанола на транспорт метиленового синего в коже
3. **Бутаев Марат Раджабали Оглы (НИЯУ МИФИ, Троицкий технопарк ФИАН)**
Полупроводниковый лазер с продольной оптической накачкой на основе наноразмерной гетероструктуры CdS/ZnSe с разрывами зон второго типа
4. **Бухаров Дмитрий Николаевич (Владимирский государственный университет)**
Моделирование структуры и оптических свойств фрактальной нанопленки РВТЕ
5. **Детков Георгий (НИУ ВШЭ, ООО «ИТЭК»)**
Скрытая передача информации по оптоволоконным линиям связи используя технологию «временных карманов»
6. **Каргина Юлия Валерьевна (НИЯУ МИФИ)**
Кремниевые наночастицы с примесью железа как перспективные контрастные агенты в МРТ
7. **Карпов Никита Вадимович (НИЯУ МИФИ)**
The production of various nanoparticles by laser ablation and mechanical grinding followed by laser separation
8. **Климентьева Мария Вячеславовна (НИЯУ МИФИ)**
Исследование зависимости коэффициента поглощения фантома кожи от концентрации метиленового синего
9. **Литвинов Дмитрий Александрович (ФИАН)**
Экситонные эффекты и примесно-дефектное излучение в GaAs/AlGaAs-структурах, применяемых для изготовления де-

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур

текторов среднего ИК-диапазона

10. **Рыбаков Алексей Владимирович** (Астраханский государственный университет)
Использование когерентного УФ-излучения в системах компьютерного зрения для диагностики грибковых заболеваний растений и плесневых очагов в таблицах
11. **Смирнов Сергей Владимирович** (Астраханский государственный университет)
Экспериментальное изучение особенностей работы маломощных полупроводниковых лазеров
12. **Тихоновский Глеб Валерьевич, Барматин Григорий Олегович** (НИЯУ МИФИ)
Синтез наночастиц сульфида серебра для биомедицинских применений
13. **Тупицын Иван Михайлович** (ФИАН)
Композитные чип-элементы Nd:YAG/Cr:YAG на основе отечественной керамики
14. **Шахов Павел Владимирович** (НИЯУ МИФИ, ФИАН)
Разработка методики выбора рациональных режимов роста метанотрофных микроорганизмов с целью обеспечения и повышения выхода белкового продукта

***VII Международный симпозиум
по когерентному оптическому излучению
полупроводниковых соединений и структур***

Пленарные и приглашенные доклады

ИМПУЛЬСНЫЕ И НЕПРЕРЫВНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ДИОДЫ И МОДУЛИ 800-1600 НМ ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

**Н.А.Пихтин¹, К.В. Бахвалов¹, Ю.К.Бобрецова¹, Д.А.Веселов¹,
В.С. Головин¹, А.В.Лютецкий¹, С.О. Слипченко¹,
И.С.Шашкин¹, М.А.Ладугин², А.А.Мармалюк², А.А.Падалица²,
Ю.Л.Рябоштан², В.А.Симаков²**

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, г. Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 26

² АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», 117342, Москва,
ул. Введенского, 3, корп. 1
e-mail: nike@hpld.ioffe.ru

В докладе будут представлены последние достижения в области разработки и исследований непрерывных и импульсных мощных лазерных диодов ближнего ИК диапазона (длины волн от 800 до 1600 нм), в том числе:

- для разработанных полупроводниковых лазеров на основе систем твердых растворов AlGaInAs/InP, излучающих в условно безопасном для глаз диапазоне длин волн 1400 – 1600 нм, и AlGaAs/InGaAs/GaAs (диапазон длин волн 800-- 1100 нм) будут приведены электрооптические характеристики: выходная оптическая мощность в непрерывном и импульсном (длительность от 1 нс до 100 нс) режимах [1,2], КПД, расходимость излучения по быстрой и медленной оси, спектр генерации, температурная чувствительность, температурное сопротивление. Будет дано сравнение характеристик для различных используемых конструкций квантоворазмерных гетероструктур, выращенных методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений: с широким и узким волноводом [3], барьерными слоями;

- будут приведены характеристики разработанных одномодовых полупроводниковых лазеров с выходной оптической мощностью ваттного диапазона. Лазеры на длину волны 1060 нм с длиной резонатора 3 мм изготовлены на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs с поперечным волноводом Al_{0,1}Ga_{0,9}As шириной 1.7 мкм и КЯ

толщиной 9 нм. Латеральный волновод шириной 5.5 мкм задан с помощью меза-каналов прямоугольной формы, обеспечивших скачок эффективного показателя преломления от каналов к области под полоском в 0.0004. Максимальная выходная оптическая мощность, до которой они работают в латерально-одномодовом режиме, составила 0.5 Вт при непрерывной накачке при комнатной температуре. Максимальная выходная оптическая мощность, при которой они работают в латерально-маломодовом режиме, составила 2 Вт на токе 2.65 А при температуре теплоотвода -8°C и КПД 40 %. Максимальный КПД составил 58% при выходной оптической мощности 0.25 Вт.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 19-79-30072)

[1] Ю.К. Бобрецова, Д.А. Веселов, Н.В. Воронкова, С.О. Слипченко, В.А.Стрелец, М.В. Богданович, П.В. Шпак, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, Н.А. Пихтин, Импульсный лазерный модуль спектрального диапазона 1500-1600 нм на основе мощного полупроводникового лазера, Квантовая электроника, т.49(5), стр. 488-492 (2019).

[2] S. O. Slipchenko, A. A. Podoskin, V. S. Golovin, D. N. Romanovich, V. V. Shamakhov, D. N. Nikolaev, I. S. Shashkin, N. A. Pikhitin, T. A. Bagaev, M. A. Ladugin, A. A. Marmalyuk, and V. A. Simakov, High peak optical power of 1ns pulse duration from laser diodes – low voltage thyristor vertical stack, Optics Express, vol. 27, issue 22, pp. 31446-31455 (2019)

[3] Ю.К. Бобрецова, Д.А. Веселов, А.А. Климов, Л.С. Вавилова, В.В. Шамахов, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, AlGaAs/GaAs/InGaAs-лазеры со сверхузким волноводом, Квантовая электроника, т.49(7), стр. 661-665 (2019).

ЭФФЕКТ МЕЖМОДОВЫХ БИЕНИЙ В НАНОСЕКУНДНОМ ИМПУЛЬСНОМ ВКР-ЛАЗЕРЕ

Р. Чулков¹, А. Алямани², О. Корожан¹ и В. Орлович¹

¹ *Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

² *Центр науки и технологии им. короля Абдулазиза, Риад, СА
r.chulkov@dragon.bas-net.by*

Лазеры на вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР) традиционно применяется для расширения спектра генерации импульсных источников лазерного излучения, в том числе диодно-накачиваемых источников (ДНИ). ДНИ, работающие в режиме модуляции добротности резонатора, генерируют многомодовые наносекундные импульсы. Влияние тонкой структуры спектра таких импульсов обычно не принимают во внимание при разработке и оптимизации ВКР-лазеров. В то же время известно, что согласование ансамблей мод в спектрах возбуждающего и преобразованного излучения приводит к резонансному увеличению мощности параметрических генераторов света [1,2].

В настоящей работе мы демонстрируем влияние такого согласования на динамику генерации твердотельного ВКР-лазера. Мы экспериментально показываем, что при синхронизации частот модовых биений в наносекундных импульсах АИГ:Nd ДНИ и стоксовых компонент ВКР-лазера, существенно снижается порог ВКР, увеличивается эффективность преобразования в стоксовые компоненты, а также реализуется возможность генерации последовательности стоксовых импульсов пикосекундной длительности. Обнаруженные закономерности обсуждаются в рамках формализма коэффициента кросс-корреляции интенсивностей, значение которого резко возрастает при согласовании частот межмодовых биений в лазерных импульсах [3].

[1] G. Arisholm et al., Opt. Lett., 25, 1654-1656, (2000).

[2] M. Henriksson et al., Opt. Expr., 18, 10742-10749, (2010).

[3] R. Chulkov et al., Opt. Lett., 24, 4824-4827, (2017).

**ВОЗБУЖДЕНИЕ И СИНХРОНИЗАЦИЯ
КВАЗИЭКВИДИСТАНТНЫХ МОД ГЕТЕРОЛАЗЕРА
ПОСРЕДСТВОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА ИХ
БИЕНИЙ С БИЕНИЯМИ СВЕРХИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ МОД**

**Вл.В. Кочаровский, А.В. Мишин, Е.Р. Кочаровская, В.А. Кукушкин,
В.В. Кочаровский**

*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия
kochar@appl.sci-nnov.ru*

Доклад посвящён теоретическому анализу и численному исследованию возможности совместить режимы активной (параметрической) и пассивной (когерентной) самосинхронизации мод в одном лазере, работающем на однородно распределённой усиливающей среде с неоднородным уширением спектральной линии в отсутствие каких-либо дополнительных нелинейных элементов. Для этого лазер, при наличии непрерывной накачки должен быть сверхизлучающим, т.е. иметь достаточно высокую пространственную и спектральную плотность активных центров, обладать низкодобротным резонатором с временем жизни фотонов меньше времени некогерентной релаксации оптических дипольных колебаний активных центров и одновременно генерировать не только большое число квазистационарных квазимонохроматических мод, но и хотя бы пару нестационарных сверхизлучательных мод [1]. Необходимая селекция указанных мод достижима, например, для гетеролазеров с комбинированными резонаторами Фабри-Перо при наличии эффективной распределённой обратной связи встречных волн.

В подобных лазерах ожидается сильное уширение динамического спектра сверхизлучательных мод в условиях мощной накачки благодаря автомодуляции и/или квазипериодической генерации импульсов коллективного спонтанного излучения Дике, так что пара таких мод может привести к эффективному параметрическому возбуждению и одновременному фазированию биений ряда квазиэквидистантных квазимонохроматических мод, если межмодовый интервал последних примерно вдвое превышает среднюю разность

частот первых. Наряду с этой активной синхронизацией квазимонохроматические моды испытывают значительное 4-волновое взаимодействие благодаря когерентной нелинейной динамике рассеивающих их активных центров лазерной среды, что в широкой области параметров лазера и накачки обеспечивает условия для пассивной самосинхронизации данных мод.

Необходимые условия, особенности и типичные параметры возникающего режима одновременной согласованной генерации длиннопериодической последовательности импульсов коллективного спонтанного излучения парой сверхизлучательных мод и более короткопериодической последовательности более коротких импульсов излучения, образованного самосинхронизованными квазимонохроматическими модами, исследованы в данной работе на основе численного моделирования одномерных уравнений Максвелла-Блоха для двухуровневой модели лазера.

Рассматриваемый метод, который не требует ни внешней модуляции параметров накачки или лазера, ни размещения в нём быстродействующих поглощающих ячеек, может быть назван *параметрической когерентной самосинхронизацией мод*. Он, в частности, применим для наиболее перспективных полупроводниковых лазеров, например, на многослойных гетероструктурах с субмонослойными квантовыми точками или яма-точками, в которых ожидаемые характерные длительности указанных импульсов лежат в пикосекундном и субпикосекундном диапазонах, что открывает многообещающие перспективы использования рассматриваемого режима генерации для различных оптических технологий и для фундаментальной физики многочастичных систем.

[1] Вл.В.Кочаровский, В.В.Железняков, Е.Р.Кочаровская, В.В.Кочаровский, Сверхизлучение: принципы генерации и реализация в лазерах, УФН, т. 187, с. 367-410 (2017).

ЛАЗЕРНАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ ОКСИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ

В.В.Балашов¹, Е.А. Чешев², А.Ю. Канаев³, Ю.Л. Копылов^{1,2,3}, С.М. Козлова^{1,4}, К.В. Лопухин^{1,2}, И.М. Тупицын², Л.Ю. Захаров¹, А.В. Инюшкин⁵, Д.А. Чернодубов⁵, А.А. Каминский⁶

1. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

2. ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

3. ФКП ГЛП «Радуга», Радужный, Владимирская область, Россия.

4. РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

5. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

6. ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

yvb215@fireras.su

Лазерные керамики, обладающие более высокой теплопроводностью в сравнении с иттрий-алюминиевым гранатом, имеют очевидные преимущества для мощных лазеров. Среди керамик, удовлетворяющих этому требованию, стоит выделить лютеций-алюминиевый гранат и полоторные оксиды РЗЭ, в частности, Y_2O_3 [1,2]. В данной работе получены лазерные керамики $(Lu_xY_{1-x})AG:Yb^{3+}$ и $Y_2O_3:Yb^{3+}$. Были исследованы оптические и структурные свойства образцов $(Lu_xY_{1-x})AG:Yb^{3+}$, такие как размер зерен, кривые усадки, спектры пропускания и поглощения, теплопроводность и время жизни люминесценции. Также, были исследованы структурные и оптические свойства образцов $Y_2O_3:Yb^{3+}$.

Работа выполнена в рамках государственного задания. Исследование выполнено при финансовой поддержке ПП РАН № 5.

[1]K. Beil, S. T. Fredrich-Thornton, F. Tellkamp, R. Peters, C. Kränkel, K. Petermann, and G. Huber, Thermal and laser properties of Yb:LuAG for kW thin disk lasers, Vol. 18, No. 20, 2010, *OPTICS EXPRESS* 20712

[2]L.L. Zhu, Y.J. Park, L. Gan, H.N. Kim, J.W. Ko, H.D. Kim, Fabrication of transparent Y_2O_3 ceramics with record-high thermal shock resistance, Journal of the European Ceramic Society 38(2018) 4050 – 4056.

THz RAMAN LASING OF GROUP-V DONORS IN SILICON

V.N. Shastin¹, R.Kh. Zhukavin¹, S.G. Pavlov², H-W. Hübers^{2,3}

¹*Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhniy Novgorod, Russia*

²*Institute of Optical Sensor System, DLR, Berlin, Germany*

³*Department of Physics, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, Germany*
shastin@ipmras.ru

The THz Raman laser action based on optical transitions (Stokes process) in group-V donor centers (P, Sb, As, Bi) in silicon crystal can be obtained under optical intracenter excitation at cryogenic temperatures $T=10-20$ K [1]. The $1s(E)$ state is a final state of Raman optical transition for any donor and is quickly depleted due to phonon assisted transition into the ground $1s(A_1)$ state. The energy gap between mentioned above states which determines Stokes shift strongly depends on donor nature (Fig. 1). In this survey the main results on Raman lasing from donors in silicon are summarized. Special attention will be paid to characteristics of such effects in uniaxially stressed silicon crystal. This work was partly supported by RFBR 19-02-00979.

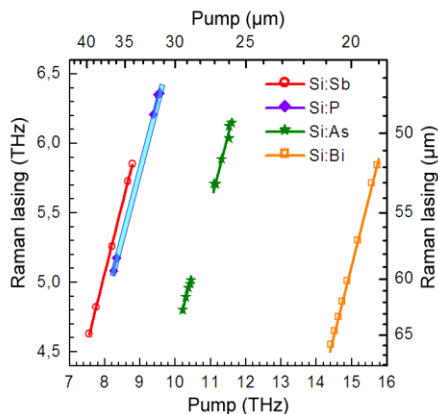


Fig. 1. Raman laser frequency tunability.

[1] S.G. Pavlov et al, Phys. Stat. Sol. B, **250** (1), 9–36 (2013).

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ
AlGaInAs/InP С ОДНОМЕРНЫМ ФОТОННЫМ
КРИСТАЛЛОМ В ВОЛНОВОДЕ**

**А.А. Мармалюк, Ю.Л. Рябоштан, В.Н. Светогоров, М.А. Ладугин,
А.А. Падалица, А.В. Лобинцов, С.М. Сапожников, В.Д. Курносов, В.И.
Романцевич, К.В. Курносов, А.В. Иванов**

*АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, Россия
e-mail address: almarm@mail.ru*

Во многих практических приложениях полупроводниковые лазеры, излучающие на длинах волн 1540-1560 нм, требуют стыковки с оптическим волокном. Эффективность ввода излучения во многом зависит от диаграммы направленности полупроводникового лазера. Традиционные конструкции лазеров на основе двойных гетероструктур раздельного ограничения AlGaInAs/InP, как правило, характеризуются расходимостью в плоскости, перпендикулярной р-п переходу, превышающей 40-45°. В [1] продемонстрирована возможность сужения диаграммы направленности полупроводниковых лазеров, излучающих на длинах волн 650-1000 нм, путем введения одномерного фотонного кристалла в волновод или формирования двумерной периодической структуры. В данной работе развит данный подход применительно к снижению расходимости полупроводниковых лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 1,5-1,6 мкм. Показано, что использование одномерного фотонного кристалла в волноводе позволяет создавать одномодовые полупроводниковые лазеры на основе AlGaInAs/InP с расходимостью в плоскости, перпендикулярной р-п переходу, менее 30°.

[1] M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, I.I. Novikov et al., High-Power Low-Beam Divergence Edge-Emitting Semiconductor Lasers with 1- and 2-D Photonic Bandgap Crystal Waveguide, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 14, 1113-1122 (2008).

**ИНТЕГРАЛЬНЫЙ И ГИБРИДНЫЙ ПОДХОДЫ ДЛЯ
ГЕНЕРАЦИИ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ
МНОГОПЕРЕХОДНЫМИ AlGaAs/GaAs
ГЕТЕРОСТРУКТУРАМИ**

**Слипченко С.О.¹, Подоскин А.А.¹, Соболева О.С.¹, Гаврина П.С.¹,
Багаев Т.А.², Ладугин М.А.², Мармалюк А.А.², Симаков В.А.²,
Пихтин Н.А.¹**

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

² НИИ "Полюс" им. М.Ф. Стельмаха, Москва

Presenting author e-mail address: serghpl@mail.ioffe.ru

В представлены результаты исследований многопереходных AlGaAs/GaAs структур тиристорного типа для решения задачи генерации мощных лазерных импульсов. Показано, что данная задача может быть решена в рамках двух подходов. Первый основан на использовании конструкций, в которых функции сильноточного ключа и лазерного источника интегрированы в одной гетероструктуре. Показано, что в подобных структур расширение апертуры за счет использования микролинеек позволяет поднять пиковую мощность без заметного падения излучательной эффективности. Однако, ограничивающим фактором, приводящем к падению эффективности при уменьшении длительности импульса, является эффект локализации тока на начальном этапе включения. Для решения данной проблемы был исследован гибридный подход, основанный на использовании вертикальных стеков, включающих кристаллы полупроводниковых лазеров и линеек одиночных тиристоров. Показано, что конструкция вертикальных гибридных стеков обеспечивает минимальную паразитную индуктивность в контуре тока, в результате была продемонстрирована возможность генерации мощных лазерных импульсов амплитудой 8Вт и длительностью 2.5нс, а также 78Вт и длительностью 40нс.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-79-30072).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА С ВНЕШНИМ ЗЕРКАЛОМ НА СТРУКТУРЕ InGaAs/GaAs ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ НАКАЧКЕ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

**А. Ю. Андреев¹, Т. А. Багаев¹, М. Р. Бугаев^{2,3}, Н. А. Гамов⁴,
Н. И. Гладышев⁴, М. М. Зверев^{3,4}, В. И. Козловский^{2,3},
Я. К. Скасырский³, И. В. Яроцкая¹**

¹*Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха,
Москва, Россия*

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия*

³*Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия*

⁴*Российский технологический университет «МИРЭА», Москва, Россия
e-mail, kozlovskiyvi@lebedev.ru*

Полупроводниковый дисковый лазер (ПДЛ) интенсивно развивается с момента выхода первой публикации в 1997 году [1]. Многочисленные применения этих лазеров связаны с высоким качеством лазерного пучка при мощности в несколько ватт, возможностью плавной перестройки длины волны излучения и освоением актуальных спектральных диапазонов: УФ, видимого, среднего ИК и терагерцового диапазонов.

Наилучшие результаты по ПДЛ были получены на структурах с квантовыми ямами (КЯ) InGaAs/GaAs, излучающими на длине волны вблизи 1.03 мкм. В ряде случаев предпочтительно использовать широкозонные гетероструктуры типа InGaN/GaN или гетероструктуры на основе соединений A₂B₆, излучающих в сине-зеленой области спектра. Однако для накачки таких структур пока нет коммерчески доступных и эффективных лазерных диодов. В этой связи актуальной является накачка электронным пучком. ПДЛ лазер на основе гетероструктуры InGaAs/GaAs был исследован при накачке электронным пучком в работе [2]. Структура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии. В настоящей работе мы представляем новые результаты аналогичных исследований с ис-

пользованием гетероструктуры, выращенной методом эпитаксии из металлоорганических соединений.

Методом осаждения из газовой фазы металлоорганических соединений были выращены две структуры, которые содержали последовательно наращенные на подложку GaAs *n*-типа встроенное брэгговское зеркало из 30 пар $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$, 10 КЯ $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}/\text{GaAs}$ с компенсирующими упругие напряжения слоями $\text{GaAs}_{1-u}\text{P}_u$, дополнительные согласующий слой GaAs и барьерный для диффузии слой $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$. Параметры составов x , y , z , u и толщины слоев были различными для двух исследуемых структур и выбраны из расчета достижения генерации вблизи 1.02 мкм и 1.06 мкм.

Схема лазера представлена на рис. 1. Структура закреплялась серебряной пастой на медном хладопроводе, который находился при комнатной температуре ($\sim 20^\circ\text{C}$) внутри вакуумной камеры. Внешнее плоско-вогнутое зеркало ПДЛ имело радиус кривизны $r = 30$ мм и коэффициент отражения 98% на длине волны $\lambda = 1.015$ мкм и 98.5% при $\lambda = 1.06$ мкм. Оно размещалось также внутри вакуумной камеры. Длина резонатора составляла $L = 26$ мм.

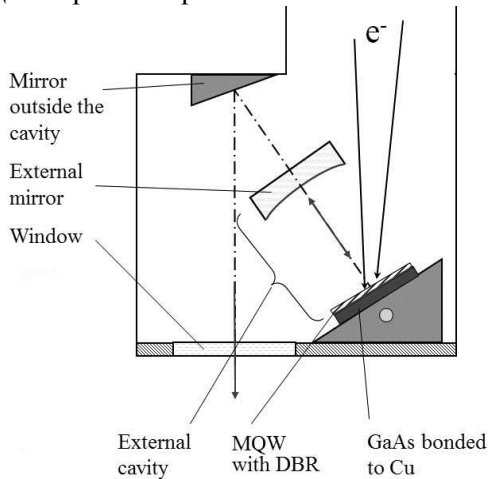


Рисунок 1. Схема лазера.

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур

В результате была получена генерация при комнатной температуре на обеих структурах. При импульсно-периодическом возбуждении электронным пучком (50 Гц, 250 нс) достигнута пиковая мощность 5 Вт на длине волны 1.062 мкм и 2.5 Вт на длине волны 1.013 мкм с полным углом расходимости не более 20 мрад.

- [1] [Oleg G. Okhotnikov](#). Semiconductor Disk Lasers: Physics and Technology (WILEY-VCH, 2010).
- [2] V.I. Kozlovsky, O.G. Okhotnikov, and Y.M. Popov. IEEE J. Quantum Electronics 49 (1), 108-113 (2013).

**КВАНТОВЫЙ КАСКАДНЫЙ ЛАЗЕР С ФОНОННОЙ
РЕЛАКСАЦИЕЙ В КВАЗИКОНТИНУУМ,
РАБОТАЮЩИЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ДО 340 К**

**И. С. Молодцов¹, Н. А. Распопов¹, Ю. В. Курнявко², А. И. Данилов²,
А. Б. Крыса³, И. И. Засавицкий¹**

¹ *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, г. Москва, РФ*

² *«НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», г. Москва, РФ*

³ *University of Sheffield, Mappin Street, Sheffield, S1 3JD, UK*

Presenting author e-mail: zasavitii@lebedev.ru

Разработан квантовый каскадный лазер с фононной релаксацией в квазиконтинуум и изучены его характеристики. Гетероструктура выращивалась методом МОС-гидридной эпитаксии [1]. Лазеры с полосковой геометрией имели ширину полоска 20 мкм и варьируемую длину резонатора 1 – 3 мм. Лазер работал в импульсном режиме (длительность импульса 1 мкс и частота повторения 170 Гц) при температуре до 340 К. Из температурной зависимости пороговой плотности тока определен параметр $T_0 = 170$ К. Такая высокая рабочая температура достигнута благодаря тому, что электроны с нижнего лазерного уровня релаксируют по набору локализованных состояний в квантовых ямах, при этом энергетическое расстояние между уровнями составляет ~ 20 мэВ (квазиконтинуум) [2]. Результирующий вольтовый дефект составляет $\sim 0,1$ эВ, что существенно превышает тепловую энергию даже при 340 К. Длина волны излучения лазера составляла 7,2 и 7,4 мкм соответственно при 80 К и 300 К. Мощность излучения лазера достигала 0,3 Вт при температуре 80 К. Из зависимости пороговой плотности тока от длины резонатора определены внутрирезонаторные потери, которые составляли $2,6 \text{ см}^{-1}$ при 80 К и $7,7 \text{ см}^{-1}$ при 250 К.

[1] A. B. Krysa, J.S. Roberts, J.S., R.P. Green, L.R. Wilson, H. Page, M. Garcia, J.W. Cockburn, J. Cryst. Growth, **272**, 682-685 (2004).

[2] J. Faist, D. Hofstetter, M. Beck, T. Aellen, M. Rochat, S. Blaser, J. Quantum Electron., **38**, 533-546 (2002).

**MICROLASERS WITH ACTIVE REGION OF
VARIOUS QUANTUM DIMENSIONALITY ON
GaAs AND Si SUBSTRATES**

**A. Zhukov¹, N. Kryzhanovskaya¹, E. Moiseev¹, S. Kadinskaya¹,
A. Dragunova¹, M. Muretova¹, F. Zubov¹, M. Maximov¹, N. Kalyuzhnyy²,
S. Mintairov², M. Kulagina², S. Blokhin², N. Ledentsov³, S. Rouvimov⁴**

¹ *Alferov University, St Petersburg, Russia*

² *Ioffe Institute, St Petersburg, Russia*

³ *VI Systems GmbH, Berlin, Germany*

⁴ *University of Notre Dame, Notre Dame, USA*

Presenting author e-mail address: zhukale@gmail.com

Microdisk and microring semiconductor lasers are promising for different applications, such as on-chip optics, optical interconnections, sensors, etc. for their small footprint, relatively simple fabrication methods, light emission in lateral direction, and stable emission wavelength. Use of nanostructures, which ensure deep localization of charge carriers in the microlaser active region, is efficient for preventing negative effect of non-radiative recombination on microresonator sidewalls as well as various crystalline defects in III-V-on-Si. This makes microlasers suitable for integration of laser components with CMOS IC. Stranski-Krastanow quantum dots (QDs) provide low threshold current densities (the minimal one is 250 A/cm²), high lasing temperatures (in excess of 100°C), and emission around 1300 nm suitable for fiber optics. However, QDs are characterized by a broad gain spectrum, which makes it difficult to achieve single-frequency lasing. Quantum well-dots (QWDs) represent a hybrid semiconductor nanostructure, which combines certain advantages of conventional two-dimensional quantum wells (such as high optical gain/absorption coefficients) and Stranski-Krastanow QDs (spatial localization of charge carriers). Optical data transmission with a bitrate of 5-10 GB/s has been recently demonstrated with uncooled QWD microdisk lasers. Other characteristics of QD- and QWD-microlasers will be discussed in the symposium presentation.

EFFECT OF TEMPERATURE ON THE QUANTUM WELL LASER CHARACTERISTICS

Z.N. Sokolova¹, N.A. Pikhtin¹, S.O. Slipchenko¹, L.V. Asryan²

¹ *Ioffe Institute, 194021, St. Petersburg, Russia*

² *Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, USA*
E-mail: zina.sokolova@mail.ioffe.ru

The internal optical loss is inherent to semiconductor lasers and among the key factors controlling their operating characteristics [1]-[4].

In this work, the temperature behaviour of the quantum well laser characteristics is studied with a proper account for the internal optical loss that depends on the charge carrier densities. The shape of the laser characteristics (such as the output optical power versus the pump current) is shown to transform significantly with increasing temperature: the characteristics are conventional, i.e., single-branched, at low temperatures but they have two branches at high temperatures. The conventional (first) threshold current, the threshold current for the second branch, and the maximum operating current are discussed as functions of the temperature.

This work was supported by the Russian Science Foundation under Grant No. 19-79-30072 and the U.S. Army Research Office under Grant No. W911NF-17-1-0432.

[1] L.V. Asryan, S. Luryi, Two lasing thresholds in semiconductor lasers with a quantum-confined active region, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, pp. 5368-5370, (2003).

[2] L.V. Asryan, S. Luryi, Effect of internal optical loss on threshold characteristics of semiconductor lasers with a quantum-confined active region, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 40, pp. 833-843, (2004).

[3] Z.N. Sokolova, N.A. Pikhtin, L.V. Asryan, Two-valued characteristics in semiconductor quantum well lasers, *J. Lightw. Technol.*, vol. 36, pp. 2295-2300, (2018).

[4] Z.N. Sokolova, N.A. Pikhtin, L.V. Asryan, Evolution of light-current characteristic shape in high-power semiconductor quantum well lasers, *Electron. Lett.*, vol. 55, no. 9, pp. 550-552, (2019).

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому
излучению полупроводниковых соединений и структур

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ДЛЯ МОЩНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М.А. Ладугин

*АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, Россия
e-mail: maximladugin@mail.ru*

Современные научные исследования и большинство отраслей промышленности требуют создания новейших оптоэлектронных устройств с улучшенными характеристиками. Одними из таких широко востребованных с практической точки зрения и постоянно совершенствуемых устройств являются мощные лазерные излучатели (лазерные диоды, линейки, решетки), изготавливаемые на основе полупроводниковых гетероструктур A^3B^5 . С целью удовлетворения действующей потребности науки и техники в настоящей работе приведены результаты цикла исследований по разработке, получению и изучению высокомошных (до 10000 Вт) и одновременно энергоэффективных (КПД 60-70%) источников лазерного излучения импульсного, квазинепрерывного и непрерывного режима действия, работающих в ближнем ИК диапазоне спектра (750-1600 нм). Значительная часть представленной работы посвящена комплексной разработке наиболее эффективных конструкций гетероструктур и технологии их получения методом МОС-гидридной эпитаксии.

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ОДНОЧАСТОТНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ С ВОЛОКОННО-БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКОЙ

С.А. Воронченко, В.П. Дураев, С.В. Медведев

ЗАО "Нолатех", Москва

Представлены результаты работ по созданию одночастотных полупроводниковых лазеров с волоконно-брэгговской решеткой на длину волны 630... 1650 нм. Для стабилизации длины волны применялась волоконно-брэгговская решетка, которая служила выходным зеркалом внешнего резонатора. Перестройка длины волны осуществлялась пьезокерамикой, на которой располагалась брэгговская решетка. На пьезокерамику подавалось напряжение от 0 до 150 В, что позволяло перестраивать длину волны лазера в пределах 1...1,5 нм.

Основными элементами конструкции подобных излучателей являются полупроводниковый лазер, пьезокерамика и брэгговская решетка, сформированная в одномодовом световоде [1].

Задняя грань полупроводникового кристалла, формирующая резонатор, имеет отражающее покрытие с коэффициентом отражения до 90%, передняя грань – просветляющее покрытие с коэффициентом отражения 0,01%. Коэффициент отражения решетки обычно составляет 10–20%, селективность решетки 0,1–10 нм. Для лучшего согласования лазерного кристалла с волоконным световодом на конце световода формируют микролинзу, увеличивающую эффективность стыковки до 80% [2]. В работе продемонстрированы зависимости перестройки длины волны от растяжения пьезокерамики. Мощность излучения на выходе световода 1...100 мВт. Подавление боковой моды >40 Дб, ширина линии излучения < 100 кГц.

1. Duraev V.P., A.V.Melnikov. Spectrochemica Acta. Part A, 52, 1996, p.877-879.

2. Дураев В., Медведев С. Одночастотные полупроводниковые лазеры на основе двухпроходных усилителей. —фотоника №6.54. 2015.

**НАНОСЕКУНДНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ЛАЗЕР $\text{Fe}^{2+}:\text{CdTe}$ С
ЭНЕРГИЕЙ 1.8 мДж (40 нс), ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ В
ДИАПАЗОНЕ 5.1 – 6.3 мкм**

М.П. Фролов, Ю.В. Коростелин, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский

*Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия
e-mail, skasyrskiyk@lebedev.ru*

Множество химических соединений, которые требуется распознавать и их концентрацию контролировать, имеют линии поглощения в спектральной области 2-8 мкм. Перестраиваемые лазеры на ионах Cr^{2+} и Fe^{2+} в кристаллических матрицах ZnS, ZnSe и CdSe эффективно перекрывают область от 2 мкм до 6.1 мкм. Ожидается, что в лазере $\text{Fe}:\text{CdTe}$ можно будет получить более длинноволновое излучение, чем рекордное значение для длины волны генерации, достигнутой на кристаллах $\text{Fe}:\text{CdSe}$ (6.1 мкм).

Генерация на кристалле $\text{Fe}:\text{CdTe}$ была впервые получена на длине волны 5.7 мкм в работе [1]. Однако из-за низкого качества кристалла выходная энергия в импульсе была менее 0.2 мДж и кривую перестройки спектра получить не удалось. Трудности в изготовлении кристалла $\text{Fe}:\text{CdTe}$ отмечались также в [2]. Более качественные кристаллы теллуридов удавалось получить с использованием твердого раствора $\text{Fe}:\text{CdMnTe}$ [2] и $\text{Fe}:\text{ZnMnTe}$ [3]. Однако максимальная длина волны генерации на этих кристаллах не превышала 5.94 мкм, и энергия в импульсе была на уровне 30 мкДж при эффективности лазера меньше 1%. Кроме того, для получения высокой средней мощности, лазеры на бинарных соединениях более перспективны, чем на твердых растворах из-за значительно более низкой теплопроводности последних.

В настоящей работе мы сообщаем о получении эффективной генерации на кристалле $\text{Fe}:\text{CdTe}$ с максимальной энергией в наносекундном (35 нс) импульсе до 1.8 мДж и осуществлении перестройки длины волны генерации от 5.1 до 6.3 мкм. Генерация на $\lambda = 6.3$ мкм является наиболее длинноволновой генерацией при комнатной температуре в лазерах на кристаллах A_2B_6 с ионами переходных

металлов, достигнутой на сегодняшний день.

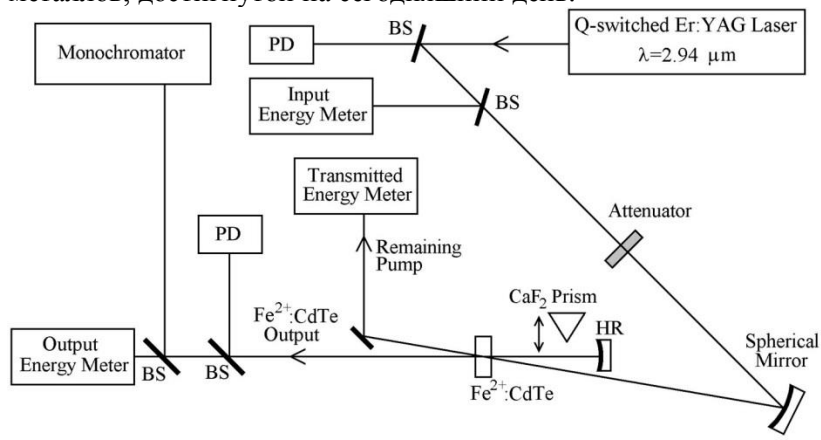


Рис. 1

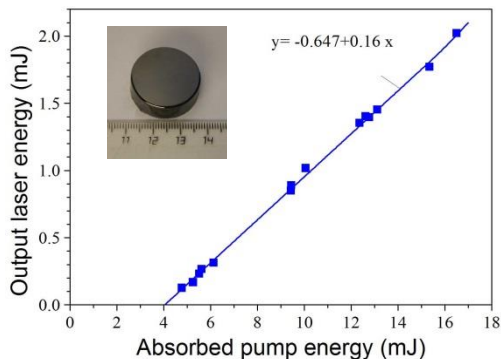


Рис. 2

На вставке рис. 2 представлен выращенный нами кристалл $\text{Fe}:\text{CdTe}$ методом физического транспорта в кварцевой ампуле на затравку. Замеренное время жизни верхнего лазерного уровня при комнатной температуре составило 530 нс, что заметно больше, чем аналогичное время жизни у наиболее исследованных кристаллов $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ (360 нс). На рис. 1 представлена схема установки для исследования лазера. В схеме отсутствует дополнительное выходное зеркало.

Обратная связь осуществляется френелевским отражением поверхности кристалла. На рис. 2 представлена выходная характеристика лазера.

[1] M.P. Frolov et al. Int. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO) / Conf. on Lasers, Applications, and Technologies (LAT), Moscow, Russia, June 18–22, 2013, paper LWJ15.

[2] J.W. Evans et al. OPTICAL MATERIALS EXPRESS **7**(3) 860-867 (2017).

[3] M.E. Doroshenko et al. Optics Letters **43**(20), 5058-61 (2018).

УПРУГО-НАПРЯЖЕННАЯ АКТИВНАЯ ОБЛАСТЬ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$

**В.Н. Светогоров^{1,2}, Р.Х. Акчурин², А.А. Мармалюк¹, М.А. Ладугин¹
Ю.Л. Рябоштан¹, И.В. Яроцкая¹**

¹ ФТИ РТУ МИРЭА, Москва, Россия

² АО «НИИ «ПОЛЮС» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, Россия
e-mail: svetogorvlad@mail.ru

Гетероструктуры (ГС) $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$, излучающие в области 1.2 – 1.7 мкм, обладают множеством применений в оптоэлектронике. Одним из актуальных направлений совершенствования их рабочих характеристик является применение упруго-напряженной активной области в данных ГС.

На основе модели силового баланса спроектирована конфигурация активной области ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с напряжением сжатия в квантовых ямах (КЯ) и растяжения в барьерных слоях (БС), а также проанализирована вероятность образования дислокаций несоответствия (ДН) в формируемых многослойных ГС. Данная модель обладает возможностью учитывать воздействия напряжений уже выращенных слоев на напряжение слоя наращиваемого. Однако, модель силового баланса не учитывает обратного влияния, которое оказывает наращиваемый слой на напряжение в уже выращенных слоях.

В данной работе предложена реализация модели, способной учитывать подобные взаимодействия между выращенными и наращиваемыми слоями, основываясь на модели силового баланса.

Использование данного направления и нахождение максимальных допустимых значений напряжений в КЯ и БС, по предложенной модели, позволило как повысить излучательные характеристики активной области – увеличить интенсивность фотолуминесценции на порядок, так и улучшить основные характеристики лазеров на основе такой структуры - увеличить мощность в два раза.

ФОРМИРОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА

**С.П. Котова¹, В.Г. Волостников¹, Н.Н. Лосевский¹, А.М. Майорова¹,
Е.П. Пожидаев², С.А. Самагин¹**

¹ Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара, Россия

² Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
Москва, Россия
e-mail: kotova@fian.smr.ru

Вихревым световым полям или световым полям, обладающим орбитальным угловым моментом (ОУМ), уделяется пристальное внимание научного сообщества в последние два десятилетия, поскольку ОУМ светового поля является дополнительным параметром, позволяющим существенно расширить области применений света.

В работе представлены результаты по формированию вихревых световых полей, имеющих форму произвольной кривой в поперечном сечении, а также аксиально-симметричных полей с различным топологическим зарядом. Генерация полей первого типа основана на оптике спиральных пучков света. Экспериментальная реализация осуществляется с помощью многоэлементного пространственного модулятора света HOLOEYE НЕО-1080Р. Для получения аксиально-симметричных полей авторами предложены новые типы компактных жидкокристаллических модуляторов света. Это перестраиваемая спиральная фазовая пластинка с модальным принципом управления и секторная спиральная фазовая пластинка на основе жидкокристаллических сегнетоэлектриков, позволяющая изменять конфигурацию поля с частотой около 2кГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-29-14012 офи_м).

NONLINEAR OPTICAL RESPONSES OF SI NANOCRYSTALS FOR BIOIMAGING TECHNOLOGIES

**A.Yu. Kharin¹, V. V. Lysenko^{1,2}, A. Rogov³, Yu. V. Ryabchikov^{2,4},
A. Geloen², I. Tishchenko⁸, O. Marty², P. G. Sennikov⁷, R. A. Kornev⁷,
I. N. Zavestovskaya^{1,5}, A. V. Kabashin^{1,4}, V. Yu. Timoshenko^{1,5,6}**

¹ *Institute of Engineering Physics for Biomedicine (Phys-Bio)
MEPhI, Moscow, Russia*

² *Lyon University, Lyon, France*

³ *Department of Applied Physics Université de Genève, Geneva, Switzerland*

⁴ *Laboratoire LP3 Aix-Marseille University, Marseille, France*

⁵ *Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia*

⁶ *Physics Department Lomonosov Moscow State University Moscow, Russia*

⁷ *Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the Russian
Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Presenting author e-mail address: in 10 point, centred and in italics

⁸ *R&D Department KM Labs LLC, Kiev, Ukraine*

Presenting a safe alternative to conventional compound quantum dots and other functional nanostructures, nanosilicon can offer a series of breakthrough hyperthermia-based therapies under near-infrared, radio-frequency, ultrasound, etc., excitation, but the size range to sensitize these therapies is typically too large (>10 nm) to enable efficient imaging functionality based on photoluminescence properties of quantum-confined excitonic states. Here, it is shown that large Si nanoparticles (NPs) are capable of providing two-photon excited luminescence (TPEL) and second harmonic generation (SHG) responses, much exceeding that of smaller Si NPs, which promises their use as probes for bi-modal nonlinear optical bioimaging. We propose the origin of SHG into the centrosymmetric structures of silicon nanoparticles. It is demonstrated that the combination of TPEL and SHG channels makes possible efficient tracing of both separated Si NPs and their aggregations in different cell compartments, while the resolution of such an approach is enough to obtain 3D images. The obtained bi-modal contrast provides lacking imaging functionality for large Si NPs and promises the development of novel cancer theranostic modalities on their basis [2].

- [1] Kharin, A., Syshchyk, O., Geloen, A., Alekseev, S., Rogov, A., Lysenko, V., & Timoshenko, V. (2015). Carbon fluoroxide nanoparticles as fluorescent labels and sonosensitizers for theranostic applications. *Science and technology of advanced materials*, 16(4), 044601.
- [2] Kharin, A. Y., Lysenko, V. V., Rogov, A., Ryabchikov, Y. V., Geloen, A., Tishchenko, I., ... & Kabashin, A. V. (2019). Bi-Modal Nonlinear Optical Contrast from Si Nanoparticles for Cancer Theranostics. *Advanced Optical Materials*, 1801728.

ИМПУЛЬСНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ОСАЖДЕНИЕ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ: ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ

**А.А. Фроня^{1,2}, С.В. Антоненко¹, С.И. Державин^{1,3}, А.Ю. Харин¹,
В.Ю. Тимошенко^{1,2,4}, А.В. Кабашин^{1,5}, С.М. Климентов¹**

1 НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

2 ФИАН, Москва, Россия

3 ИОФРАН, Москва, Россия

4 МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

5 CNRS, Aix-Marseille University, France

В представленной работе исследованы фотолюминесцентные свойства образцов кремния, полученного методом импульсного лазерного осаждения в газовой среде. Кремниевые наночастицы рассматриваются как перспективный материал для диагностики и терапии онкологических заболеваний [1].

Образцы были получены на установке PLD/MBE-2000 («PVDProduct»). В качестве источника излучения использовался эксимерный лазер СОМРехPro 110 на фториде криптона с длиной волны 248 нм и наносекундной длительностью импульса. Выходная энергия в экспериментах составляла 50–300 мДж. Монокристаллические пластины кремния использовались как мишень для распыления и подложки для напыления. В качестве буферного газа во время осаждения использовался гелий или смесь гелия и азота.

Полученные образцы исследовались на наличие фотолюминесценции при возбуждении лазерным излучением. Наблюдаемая фотолюминесценция имеет достаточно широкую полосу излучения с различным положением спектрального максимума. В результате анализа комбинационного рассеяния образцов четко идентифицируется наличие кристаллического кремния в исследуемых образцах.

Работа поддержана проектом Миобрнауки РФ (госзадание № 16.2969.2017/4.6).

[1] A.V. Kabashin and V.Yu. Timoshenko, Nanomedicine, 11 (17), 2247 (2016).

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому
излучению полупроводниковых соединений и структур

***VII Международный симпозиум
по когерентному оптическому излучению
полупроводниковых соединений и структур***

Молодежные доклады

ТЕРМОУПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЛИНЕЙКАХ

В. П. Гордеев¹, В. В. Безотосный², В. А. Олещенко²

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409 Москва, Россия*

² *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Russia vs.gordeev@yandex.ru*

В работе обсуждаются результаты трёхмерного моделирования термо-упругих напряжений, возникающих в ходе работы мощной диодной лазерной линейки, смонтированной на термокомпенсаторе CuW при помощи твёрдого припоя AuSn, при экстремальных тепловых нагрузках. Сравняется картина термоупругих напряжений на выходном и заднем зеркале лазерной линейки. Объясняется возникновение более высоких значений термо-упругих напряжений на менее горячем заднем зеркале, по сравнению с более горячим выходным зеркалом.

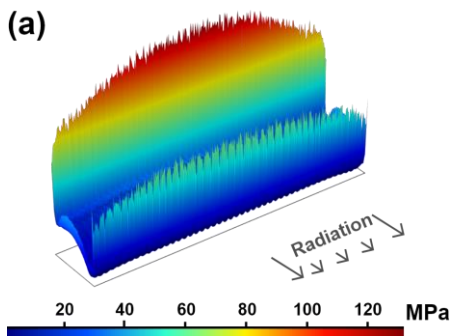


Рисунок 1. Распределение термоупругих напряжений в мощной лазерной линейке при тепловой нагрузке 220 Вт.

ЛАЗЕР-ТИРИСТОР С ДВУМЯ ИЗЛУЧАЮЩИМИ СЕКЦИЯМИ

**Т. Багаев¹, М. Ладугин¹, А. Падалица¹, А. Мармалюк¹, Ю. Курнявко¹,
А. Лобинцов¹, А. Данилов¹, С. Сапожников¹, В. Кричевский¹,
В. Коняев¹, В. Симаков¹, С. Слипченко², А. Подоскин², Н. Пихтин²**

¹ ААО «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха», 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1

² А Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, С.-Петербург, ул.

Политехническая, 26

tim_himik@mail.ru

Продемонстрированы характеристики приборов на основе монокристаллической эпитаксиальной интеграции в одном кристалле управляющего элемента (тиристора) и лазера. Лазер-тиристоры с одной излучающей секцией при напряжении включения 15-25 В показали выходную мощность 40-50 Вт в импульсном режиме [1]. Двойной лазер-тиристор характеризовался S-образной ВАХ с напряжением включения 15-20 В и квантовой эффективностью в 1,6-1,7 раза превышавшей значения для лазер-тиристора с одной излучающей секцией.

[1] S. Slipchenko, A. Podoskin, A. Rozhkov, N. Pikhitin, I. Tarasov, T. Bagaev, M. Ladugin, A. Marmalyuk, A. Padalitsa, V. Simakov, High-power laser thyristors with high injection efficiency ($\lambda = 890-910$ nm), IEEE Photonics Technology Letters, vol.27, pp. 307-310, (2015).

ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ САМАРИЯ ДЛЯ ТЕРАНОСТИКИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАДИОФАРМПРЕПАРАТОВ

Е.А. Попова-Кузнецова¹, Г.В. Тихоновский¹, А.А. Попов¹, И.Н. Завестовская^{1,2}, С.М. Климентов¹, П.Н. Прасад¹, А.В. Кабашин¹

¹ НИЯУ МИФИ, Инженерно-физический институт биомедицины, лаборатория Бионанофотоники, Москва, Россия.

² Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН
EAPopovaKuznetsova@mephi.ru

Ядерная наномедицина предоставляет уникальные возможности для лечения онкологических заболеваний. Перспективным направлением ядерной медицины является создание новых радиофармпрепаратов с использованием наночастиц (НЧ) оксида самария ^{152}Sm для таргетной терапии рака.

Синтез радиоактивных веществ в форме наноматериалов вызывает значительные трудности, связанные со сложностью обработки и обращения с подобными материалами. В этой связи перспективным является «обратный» подход: сначала синтезируется нерадиоактивная форма наноматериала и только после этого производится «активация» наночастиц в радиоактивную форму. Одна из основных проблем при синтезе таких наноматериалов – научиться производить биосовместимые, чистые НЧ с контролируруемыми структурными и морфологическими параметрами.

Наш подход основан на синтезе наночастиц оксида ^{152}Sm двухстадийным методом фемтосекундной лазерной абляции и фрагментации в воде с использованием Yb:KGW лазера (1030 нм, 270 фс, 10-100 кГц, Авеста, Россия). Прямая абляция мишени оксида самария приводит к широкому распределению по размеру и форме наночастиц. Применение дополнительного этапа лазерной фрагментации позволяет получать сферические НЧ и точно контролировать их размер от 7 до 70 нм. Полученные НЧ имеют важное значение для применений в катализе и биомедицине.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-30012).

НАНОЧАСТИЦЫ КАК СЕНСИБИЛИЗАТОРЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ

**А.А. Григорьев¹, Ю.В. Каргина^{2,3}, А. Ю. Харин³,
А.П. Канавин^{1,3}, И.Н. Завестовская^{1,3}, В.Ю. Тимошенко^{1,2,3}**

¹Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, физ. факультет, 119991 Москва, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Инженерно-физический институт биомедицины, 115409 Москва, Россия

В настоящее время существует потребность в новых методах лечения рака. Один из этих методов основан на локальной гипертермии из-за Джоулева нагрева, связанного с локальными электрическими токами вокруг наночастицы (НЧ) [1].

В данной работе исследуется модель взаимодействия сферических кремниевых НЧ в электролите с различной электропроводностью с внешним радиочастотным (РЧ) электрическим полем. На основе данной модели были получены зависимости средней скорости тепловыделения вокруг НЧ от размера и дзета-потенциала наночастицы, проводимости раствора и частоты внешнего поля с учетом неоднородности электрического поля вблизи наночастицы.

Предложенная модель позволяет объяснить наблюдаемую немонотонную зависимость скорости ВЧ-нагрева от проводимости электролита и может быть полезна для выбора оптимальных параметров НЧ и ВЧ-излучения для применений при гипертермии злокачественных опухолей.

1. K. P. Tamarov, L. A. Osminkina, S. V. Zinovyev, K. A. Maximova, J. V. Kargina, M. B. Gongalsky, Y. Ryabchikov, A. Al-Kattan, A. P. Sviridov, M. Sentis, A.V. Ivanov, V. N. Nikiforov, A.V. Kabashin, V. Yu. Timoshenko, Sci. Rep. **4**, 7034, (2014).

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ БИСЛОЕВ WSe_2 ВБЛИЗИ КРАЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

**Николаев С.Н.¹, Чернопицкий М.А.¹, Кривобок В.С.¹,
Онищенко Е.Е.¹, Багаев В.С.¹**

¹ *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 117942, Москва, Россия*
Presenting author e-mail address: nikolaev-s@yandex.ru

В последнее время активно развиваются направления, связанные, с так называемыми, 2D материалами на основе слоистых полупроводников, в том числе, дихалькогенидов переходных металлов. Интерес к этим материалам определяется возможностью получения истинно двумерных полупроводниковых систем, а также их необычным свойствам. Уже продемонстрирована как высокая эффективность фотолюминесценции (ФЛ), так и возможность создания различных оптоэлектронных устройств на основе таких соединений. Данная работа посвящена исследованию экситонной люминесценции вблизи прямого края фундаментального поглощения в бислоях WSe_2 толщиной 2-3 монослоя (МС).

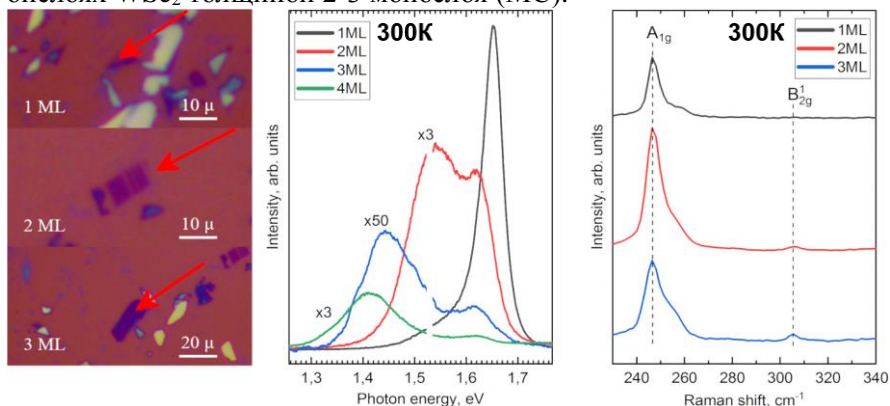


Рис.1. Оптическая микроскопия (слева), спектры ФЛ (по центру) и КРС (справа) атомарно-тонких слоев WSe_2 при температуре 300 К.

В работе top-down методом были получены атомарно-тонкие (1-3 монослоя) слои WSe_2 , проведена их оптическая характеристика при комнатной температуре, см. рис. 1. При исследовании низкотемпературной фотолуминесценции бислоев WSe_2 вблизи прямого края фундаментального поглощения обнаружено 2 новых линии. Первая представляет собой достаточно широкую полосу (~150 мэВ), расположенную в области 1.7 эВ. Ввиду большой ширины мы связываем эту линию с переходами зона-примесь. Вторая линия (1.778 эВ) расположена выше по энергии, чем полосы А-экситона в монослое и бислое, поэтому не может быть связана с собственным излучением WSe_2 . Оценка энергии активации этой линии составила 16 мэВ.

Тонкую структуру спектра излучения вблизи непрямого края фундаментального поглощения WSe_2 удастся, в основном, интерпретировать исходя из представлений о процессах рекомбинации, при которых энергия и импульс экситона передается фононам, соответствующим А-точке зоны Бриллюэна. Особенности широкой полосы, расположенной приблизительно на 100 мэВ ниже непрямого экситонного резонанса, не характерны ни для экситонно-примесных комплексов, ни для фононных повторений экситонной люминесценции. Данная полоса может быть следствием рекомбинации носителей в конденсированной фазе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (а 18-02-01129)

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур

***VII Международный симпозиум
по когерентному оптическому излучению
полупроводниковых соединений и структур***

Стеновые доклады

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭТАНОЛА НА ТРАНСПОРТ МЕТИЛЕНОВОГО СИНЕГО В КОЖЕ

**Е.А. Баско¹, М.В. Клементьева, А.Н. Башкатов²⁻³, В.В. Тучин²⁻⁴,
Э.А. Генина²⁻³**

¹ НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

² СГУ им. Н.А Чернышевского, Саратов, Россия

³ Томский Государственный Университет, Томск, Россия

⁴ Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия
+ 79085410101 baskoea@gmail.com

Красители представляют собой широкий класс препаратов, применяемых в оптических методах диагностики и терапии заболеваний. Метиленовый синий (МС) является одним из наиболее популярных красителей в медицине, благодаря его антисептическим и флуоресцентным свойствам, биосовместимости, доступности и безопасности[1-2]. Тем не менее, несмотря на его популярность, коэффициент диффузии МС в биоткани исследован недостаточно. Целью данной работы является изучение влияние концентрации этанола в водно-спиртовых растворах на транспорт МС в коже крысы и оценка значений эффективного коэффициента диффузии.

Образцы кожи были взяты из области бедра белых лабораторных крыс в течение часа postmortem. Волосяной покров и жировой слой предварительно были тщательно удалены. Толщина образцов измерялась до и после воздействия растворов МС. В работе исследовались водно-спиртовые растворы с концентрацией этанола 50%, 40% и 30%, а также водный раствор МС. Концентрация красителя составляла 0.5 мг/мл.

Оценка эффективного коэффициента диффузии проводилась на измерениях и последующем анализе диффузного отражения кожи под действием растворов МС. Более подробная информация об исследовании представлена в работе [3].

Анализ изменения эффективной оптической плотности (ΔA) позволил рассчитать значения эффективного коэффициента диффузии (D).

Значения эффективного коэффициента диффузии для водного раствора МС составило $(1.85 \pm 0.06) \times 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$ и для 50%, 40% и 30%-ных растворов $(3.34 \pm 0.07) \times 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$, $(3.04 \pm 0.07) \times 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$, и $(2.59 \pm 0.07) \times 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ соответственно. Средние значения характеристического времени для водного и спиртовых растворов составили (24.6 ± 4.42) мин и (40.1 ± 3.16) мин, (46.8 ± 2.7) мин and (79.4 ± 11.92) мин для 50%-, 40%-, 30% растворов соответственно. Результаты оценки эффективного коэффициента диффузии показали, что наличие в растворе этанола значительно увеличивает скорость окраски кожи.

[1] Yaroslavsky, A.N., Feng, X., Neel, V.A., "Optical mapping of nonmelanoma skin cancers-A pilot clinical study," *Lasers Surg. Med.* Vol. 49(9), 803-809 (2017).

[2] Yux, S., Yan, X., Jiaqiang, Q., Guoxin, N., "Visualization of the wrist ganglion capsule by methylene blue staining as an aid for complete resection in children," *J. Hand. Surg. Am.* Vol. 40, 685-688 (2015).

[3] Basko E.A., Klementeva M.V., Bashkatov A.N., Tuchin V.V., Genina E.A. "Effect of ethanol on the transport of methylene blue through the rat skin *ex vivo*," *Proc. SPIE* 11065, 1106509 (2019)

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕР С ПРОДОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ НА ОСНОВЕ НАНОРАЗМЕРНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ CdS/ZnSe С РАЗРЫВАМИ ЗОН ВТОРОГО ТИПА

М.Р. Бутаев^{1,2}, В.И. Козловский^{1,2}, Я.К. Скасырский²

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия*

² *Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия
e-mail, mbutaev@mail.ru*

Работа направлена на создание полупроводникового дискового лазера с оптической накачкой, работающего на основной частоте в синезеленом диапазоне спектра [1]. Эффективная внутрирезонаторная генерация второй гармоники в таком лазере позволяет освоить актуальный средний ультрафиолетовый диапазон спектра. Для этого в качестве активной среды лазера необходимо использовать резонансно-периодические структуры из широкозонных соединений. Одними из известных широкозонных соединений, соответствующих данному диапазону, являются соединения на основе ZnSe.

Эти соединения в конце прошлого столетия рассматривались как наиболее перспективные соединения для лазеров синезеленого диапазона спектра. Однако проблема деградации в лазерах на основе соединений A₂B₆ до сих пор не решена. Кроме факторов деградации, присущих инжекционным лазерам, в которых необходимо создавать p-n переход и надежные контакты, называли также недостаточную прочность химических связей атомов металла второй группы с селеном и внутренние упругие напряжения в квантовых ямах [2]. В лазерах с оптической накачкой лишь последние факторы могут играть существенную роль в деградации. В связи с этим в данном сообщении мы рассматриваем относительно новую гетероструктуру с квантовыми ямами CdZnS/ZnSSe, выращенную на подложке GaAs, как потенциальную активную структуру полупроводникового дискового лазера. При определенном составе в квантовых ямах и барьерах все слои гетероструктуры могут быть полностью согласованными по параметрам кристаллической решетки с подложкой GaAs, что существенно пони-

жает внутренние напряжения. С другой стороны, эти структуры могут легко быть перенесены на другую подложку из-за наличия селективных травителей GaAs относительно соединений A2B6. Однако предлагаемые гетероструктуры относятся к гетероструктурам с разрывами зон второго типа, что приводит к пространственному разделению генерируемых накачкой носителей заряда, что в свою очередь понижает скорость излучательной рекомбинации и может приводить к повышению порога генерации в лазере.

В этой работе выращивание гетероструктур производилось методом парофазной эпитаксии из металлоорганических соединений в потоке водорода при атмосферном давлении в кварцевом реакторе. В качестве исходных соединений использовались диметил селенид $(\text{CH}_3)_2\text{Se}$, диметил кадмий $(\text{CH}_3)_2\text{Cd}$, диэтил сульфид $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{S}$ и диэтил цинк $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{Zn}$. Рост проводился на подложках GaAs, разориентированных от плоскости (001) на 10° к плоскости (111)A. В настоящей работе исследовалась структура с 10 квантовыми ямами ZnSe(5 нм)/CdS(4 нм)/ZnSe(5 нм), разделенными барьерами $\text{ZnS}_{0.11}\text{Se}_{0.89}$ толщиной 100 нм. На структуру наносилось диэлектрическое зеркало из слоев $\text{HfO}_2\text{-SiO}_2$ с коэффициентом отражения 99.5%. Этим зеркалом структура приклеивалась к сапфировой подложки. Далее ростовая подложка GaAs удалялась, и на свободную поверхность структуры наносилось второе диэлектрическое зеркало с коэффициентом отражения 98%. Структура с микрорезонатором накачивалась продольно через сапфир излучением азотного лазера ЛГИ-21.

В результате была получена генерация при комнатной температуре на длине волны 537 нм. В работе будут представлены другие результаты исследования лазера с микрорезонатором. Полученные результаты свидетельствуют, что, несмотря на разрывы второго типа, исследуемая структура перспективна для полупроводникового лазера зеленого диапазона с оптической накачкой.

[1] [Oleg G. Okhotnikov](#). Semiconductor Disk Lasers: Physics and Technology (WILEY-VCH, 2010).

[2] Sergey V. Ivanov, Sergey V. Sorokin and Irina V. Sedova. Molecular Beam Epitaxy of Wide Gap II-VI Laser Heterostructures, in «Molecular Beam Epitaxy» (2018 Elsevier Inc.).

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФРАКТАЛЬНОЙ НАНОПЛЕНКИ РВТЕ

Д.Н. Бухаров, В.Д. Самышкин, Назаренко Б.С.

*¹ Владимирский государственный университет
buharovdn@gmail.com*

Сегодня фрактальные нанопленки РeTe находят широкое применение в различных приложениях нано- и микроэлектроники, благодаря их оптическим свойствам, существенно зависящим от структуры сформированных на подложках различной природы наноагломератов.

Нанопленки РbTe толщиной 1.6 мкм были выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках (111) Si с тонким буферным слоем фторида кальция толщиной 2 нм[1]. Исследование их структуры выявило фрактальный характер.

В связи с фактом для моделирования их структуры применялся подход фрактальной геометрии, в частности для хорошо сформированных дендритообразных структур использовалась модель фрактала DLA[2].

Для описания оптических свойств оценивалась интенсивность рассеяния излучения на смоделированном фрактальном кластере:

$$S(k) \sim k^{-D}, \quad (1)$$

где S — интенсивность рассеянного света, $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны, D - фрактальная размерность кластера. [3]

Представленные модели на качественном уровне достаточно верно отображают структуру и оптические свойства получены нанопленок, что в первом приближении позволит откалибровать представленные экспериментальные методы получения материалов с наперед заданными свойствами.

[1] Аракелян С.М., Бухаров Д.Н., Емельянов В.И., Зимин С.П., Кутровская С.В., Кучерик А.О., Макаров А.А., Осипов А.В. Бимодальный ансамбль наночастиц на поверхности эпитаксиальных пленок теллурида свинца при

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур

воздействии непрерывного лазерного излучения, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, №11, с.41-49,(2015).

[2] Бухаров Д.Н., Кучерик А.О. , Истратов А.В. Моделирование агрегатов кластерной островковой пленки методом DLA, Четвертый междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии» Москва. 27-30 ноября 2018 г./Сборник материалов, т. 1, 300-302, (2018)

[3] Бухаров Д.Н., Кучерик А.О., Новикова О.А. Математическое моделирование структуры и оптических свойств фрактальной островковой металлической нанопленки, Современные проблемы физики и технологий.

VIII-я Международная молодежная научная школа-конференция, 15–20 апреля 2019 г.: Сборник тезисов докладов. Часть 2., с. 234-235,2019.

**СКРЫТАЯ ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ ПО
ОПТОВОЛОКОННЫМ ЛИНИЯМ СВЯЗИ
ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЮ
"ВРЕМЕННЫХ КАРМАНОВ"**

P.A. Tarasov¹, A.A. Gorbunov², E.A. Isaev^{2,3} and G.V. Detkov⁴

¹ *National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russia, E-mail: PTarasov@Hse.ru*

² *National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russia*

³ *P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences*

⁴ *LLC "Information technologies and electronic communications", Moscow, Russia*

В настоящее время активно развиты технологии передачи информации с помощью оптоволоконных линий связи [1]. В то же время существуют методики, позволяющие скрытно передавать информацию по оптическому каналу связи с помощью свойств лазерного излучения [2]. Одним из способов скрытной передачи информации является использование так называемых «временных карманов» - участков с низкой интенсивностью сигнала, возникающих вследствие использования оптического модулятора исходного сигнала. В рамках доклада будет показано, что использование технологии «временных карманов» позволяет не только скрыть сам факт обмена данными, но и обеспечить высокую скорость и надежность в процессе передачи информации.

[1] Isaev E., Tarasov P. A. Transmission of large amounts of scientific data using laser technology // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 740. No. 012015. P. 1-6.

[2] Глава книги Тарасов П. А., Исаев Е. А., Детков Г. В. Современные методы оптической стеганографии // В кн.: V Международная научно-практическая конференция «Управление информационной безопасностью в современном обществе» (30 мая — 1 июня 2017 г.): сб. науч. тр. М.: Издательский дом НИУ ВШЭ, 2017. С. 114-118.

КРЕМНИЕВЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ С ПРИМЕСЬЮ ЖЕЛЕЗА КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНТРАСТНЫЕ АГЕНТЫ В МРТ

**Ю.В. Каргина^{1,2}, А.Ю. Харин², С.В. Савилов¹, А.В. Соболев¹,
М.В. Гуляев¹, И.С. Глазкова¹, А.Ю. Пирогов¹, А.М. Перепухов³,
А.А. Максимычев³, А.Н. Васильев¹, А.А. Ищенко⁴, В.Ю. Тимошенко^{2,5}**

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

⁴ Российский технологический университет - МИРЭА, Москва, Россия

⁵ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

E-mail: juliakargina@gmail.com

Кремниевые наночастицы (НЧ) являются перспективными для использования в биомедицине из-за того, что они имеют низкую токсичность и могут быть выведены из организма путем биодegradации. Использование кремниевых НЧ как контрастных агентов в магнитно-резонансной томографии (МРТ) позволит повысить эффективность проводимой с использованием НЧ терапии.

НЧ на основе кремния с примесью железа были получены плазмохимическим синтезом и затем были исследованы в качестве ускорителей релаксации протонной намагниченности в их водных суспензиях. Как поперечное, так и продольное время релаксации протонной намагниченности сильно уменьшалось в приготовленных суспензиях из-за высокой плотности электронных спиновых центров в НЧ и примеси железа. Максимальная поперечная релаксация протонов составляла около 10 л / (г·с).

МРТ-визуализация *in vivo* мышей с привитой злокачественной опухолью и внутривенно введенными НЧ выявила потемнение опухолевой области на T2-взвешенных изображениях, что указывает на накопление наночастиц в опухоли. Полученные результаты показывают возможность использования кремниевых наночастиц с примесью железа в биомедицине в качестве контрастных агентов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ ФАНТОМА КОЖИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТИЛЕНОВОГО СИНЕГО

М.В. Клементьева¹, Е. А. Баско¹, А.Н. Башкатов^{2,3}, В.В. Тучин^{2,3},
Э.А. Генина^{2,3}

¹ НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

² СГУ им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия

³ ТГУ, Томск, Россия

e-mail: klementevamv@yandex.ru

Искусственные стандарты биологических тканей, известные как «оптические фантомы» (ОФ), моделирующие оптические свойства биоткани необходимы для оценки методов измерения, оптимизации терапевтических и диагностических процедур [1].

Для исследования зависимости коэффициента поглощения кожи от концентрации в ней красителя метиленового синего (МС) были разработаны оптические фантомы. Фантомы создавались на основе желатинового геля с различными концентрациями желатина: 10%, 15% и 20%. Рассеяние кожи моделировалось с помощью добавления в растворы желатина наночастиц диоксида титана TiO_2 с диаметром порядка 100 нм и концентрацией 1.5 мг/мл. Концентрация МС в ОФ составляла 0, 0.0125, 0.025, 0.05, 0.1 и 0.2 мг/мл. Толщина ОФ составляла 0.423 см.

Для оценки изменения содержания красителя в объекте рассчитывались значения эффективной разностной оптической плотности (ЭОП) [2] с помощью следующего выражения:

$$\Delta A(\lambda) = A(\lambda) - A_0(\lambda) = \Delta \mu_a(\lambda)L \quad (1)$$

где $A_0(\lambda)$ – ЭОП ОФ без красителя, λ – длина волны, $\Delta \mu_a(\lambda) = \varepsilon(\lambda)C$ – разность между коэффициентами поглощения ОФ с добавлением красителя и без красителя (фактически определяет коэффициент поглощения красителя внутри ОФ), $\varepsilon(\lambda)$ – молярный коэффициент поглощения красителя, C – концентрация красителя в ОФ, L – толщина ОФ.

В ходе данной работы были исследованы концентрационные зависимости изменения разностной ЭОП. Зависимость ЭОП от концентраций МС носит нелинейный характер, но при концентрациях МС в ОФ до 0.025 мг/мл в первом приближении можно считать данную зависимость линейной.

[1] G. Wagnieres et al., An optical phantom with tissue-like properties in the visible for use in PDT and fluorescence spectroscopy, *Phys. Med. Biol.*, Vol. 42, pp. 1415–1426, (1997).

[2] A.N. Bashkatov, E.A. Genina, V.V. Tuchin, E.E. Chikina, A.B. Knyazev, O.V. Mareev, Methylene blue laser therapy for the treatment of chronic maxillary sinusitis, *Proc. SPIE-OSA*, Vol. 5863, 58630Z, P. 178-185, (2005).

**ЭКСИТОННЫЕ ЭФФЕКТЫ И ПРИМЕСНО-ДЕФЕКТНОЕ
ИЗЛУЧЕНИЕ В GaAs/AlGaAs-СТРУКТУРАХ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТЕКТОРОВ
СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА**

**Кривобок В.С.¹, Литвинов Д.А.¹, Николаев С.Н.¹, Онищенко Е.Е.¹,
Пашкеев Д.А.^{1,2}, Чернопицкий М.А.¹, Григорьева Л.Н.¹**

¹ *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 117942, Москва, Россия*

² *АО НПО Орион“, 111538 Москва, Россия*

Presenting author e-mail address: mityalit@yandex.ru

Проведен цикл работ, направленный на установление взаимосвязи между спектрами возбуждения люминесценции GaAs/Al_xGa_{1-x}As квантовых ям и спектральной чувствительностью создаваемых на их основе детекторных структур, в которых для детектирования ИК излучения используются межподзонные переходы.

С помощью молекулярно-пучковой эпитаксии выращена серия гетероструктур с GaAs/Al_xGa_{1-x}As квантовых ям, легированные аналоги которых используются для создания ФПУ среднего ИК диапазона. На основе анализа низкотемпературной фотолюминесценции и спектров возбуждения фотолюминесценции определено спектральное положение линий поглощения, сформированных разрешенными переходами между состояниями зоны проводимости и валентной зоны выращенных гетероструктур. Установлено, что фоновые примеси, оказывая существенное влияние на спектры излучения квантовых ям ниже E1-НН1 резонанса, практически не влияют на вид спектров возбуждения люминесценции.

Полученные экспериментальные данные в сочетании с расчетами в рамках приближения огибающей волновой функции позволили восстановить структуру уровней в квантовых ямах в зависимости от их номинального (ростового) дизайна, как с учетом экситонной поправки к энергии перехода, так и без ее учета. В квантовых ямах наблюдается значительный низкочастотный сдвиг E1-НН1 перехода за счет заметного возрастания энергии связи экситона. При этом положение перехода E2-НН2 меняется слабо вследствие

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому
излучению полупроводниковых соединений и структур

существенно меньшей энергии связи экситона, сформированного E2 электронным и HH2 дырочным состояниями. Рассчитанные энергии связи экситона E1-HH1 согласуются с результатами оценок, сделанных на основе анализа спектров фотолюминесценции и спектров возбуждения люминесценции исследованных КЯ.

Определение энергии рабочего внутризонного перехода E2-E1 по положению межзонных E1-HH1 и E2-HH2 переходов без учета экситонной поправки приводит к заметной переоценке, которая может достигать ~ 10% для КЯ шириной 4.5–5 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 18-29-20122-мк.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ МАЛОМОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

С.В. Смирнов, Васильева О.А., Алыкова О.М., Смирнов В.В.

¹ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет», г. Астрахань

В качестве объекта исследования были взяты лазерные модули типа ZT-S121, ZT-S681, HLDPM12-655-10. На рис. 1 показан внешний вид экспериментальной установки.

Она состоит из 1-исследуемые лазерные модули ZT-S121, ZT-S681; 2- измерение силы тока лазера; 3- измерение фототока; 4- исследуемый лазерный модуль HLDPM12-655-10; 5 – фотодиод ФД-24К; 6- измерение напряжения лазера; 7- источник питания; 8 – соединительные провода.

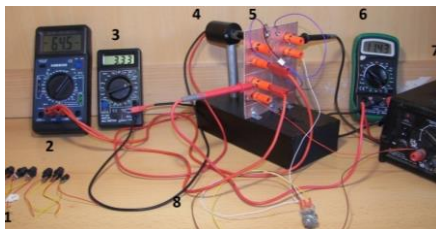


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки.

В процессе измерений выяснилась значительная нестабильность во времени работы модулей ZT-S121, ZT-S681. По результатам измерений примерно за 70 секунд работы при использовании половинной паспортной мощности, изменение излучаемой мощности составило 25%. Изменение излучаемой мощности происходило вследствие нагрева $p-n$ перехода, интенсивность излучения лазера заметно уменьшалась. В ряде случаев отмечались необратимые изменения в нем – свидетельством этого является не восстановление исходных параметров модуля после его охлаждения. Работа модуля HLDPM12-655-10 отличалась значительно большей стабильностью: после выведения модуля на номинальную мощность, за 1000 секунд (примерно 17 минут) работы, излучаемая мощность изменилась на примерно 3%, что свидетельствует о высокой стабильности работы данного модуля

VII Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур

(рис. 2).

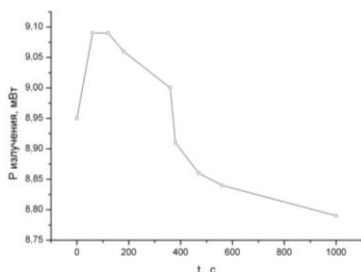


Рис. 2. Изменение излучаемой мощности модуля HLDPM12-655-10 с течением времени.

Также изучалась зависимость тока фотоприемника от напряжения питания лазера (рис. 3а), тока фотоприемника от мощности, потребляемой лазером (рис. 3б), мощности излучения лазера от мощности, потребляемой лазером (рис. 3в), коэффициента полезного действия лазера от мощности, потребляемой от источника питания (рис. 3г).

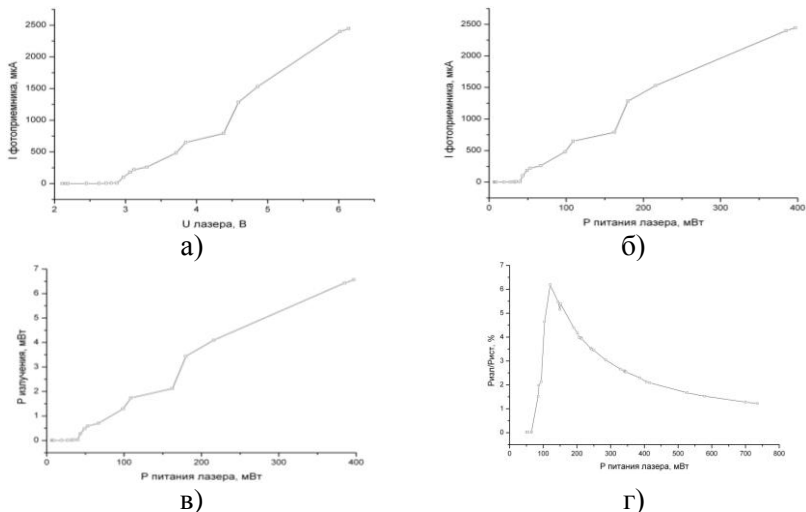


Рис. 3. Зависимости: а – тока фотоприемника от напряжения питания лазера; б – тока фотоприемника от мощности, потребляемой лазером; в – мощности излучения лазера от мощности, потребляемой лазером; г – коэффициента полезного действия лазера от мощности, потребляемой от источника питания.

NANOPARTICLES OF SILVER SULFIDE FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

G. Barmatin¹, G.Tikhonovsky¹, V. Timoshenko^{1,2}, A. Fojtik^{1,3}.

¹*National Research Nuclear University MEPHI, 115409 Moscow, Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Physics Dept., 119991 Moscow, Russia*

³*Czech Technical University in Prague, 166 36, Prague 6, Czech Republic*

E-mail: grigory.barmatin@gmail.com, +79039728766.

Silver sulfide (Ag_2S) is a promising semiconductor material with the band gap in the range from 0.9 to 1.1 eV [1]. Because of the strong absorption in the visible and near-infrared spectral region, Ag_2S nanoparticles (NPs) can act as sensitizers of local photohyperthermia (PHT) to destroy tumors without affecting the surrounding normal tissue and perform simultaneous temperature monitoring [2].

The aim of our work was to create stable Ag_2S NPs with strong optical absorption of the visible slight and temperature-dependent photoluminescence (PL) in the near-IR (800-1200 nm) spectral region.

The results obtained allow us to draw the following conclusions:

- 1) Ag_2S NPs with average size below 50 nm could be obtained.(Fig. 1.)
- 2) The prepared NPs absorb strongly light in the visible spectral region.
- 3) The PL spectra of Ag_2S NPs reveal peaks in the spectral region from 800 to 1050 nm.

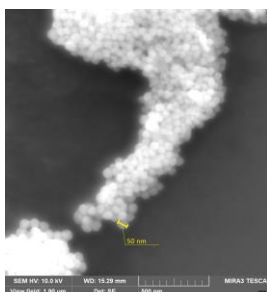


Fig. 1. SEM image of the prepared Ag_2S nanoparticles.

1. R Zamiri et al. Chem Cent J. 9, 28 (2015).
2. P. Kaur et al. J. Hypertherm. 32, 76 (2016).

КОМПОЗИТНЫЕ ЧИП-ЭЛЕМЕНТЫ Nd:YAG/Cr:YAG НА ОСНОВЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КЕРАМИКИ

В.В.Балашов¹, Л.Ю. Захаров¹, А.Ю. Канаев³, Ю.Л. Копылов^{1,2,3}, А.Л. Коромыслов², К.В. Лопухин^{1,2}, С.Л. Лысенко³, И.М. Тупицын², Е.А. Чешев², А.А. Каминский⁴

¹. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

². ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

³. ФКП ГЛП «Радуга», Радужный, Владимирская область, Россия.

⁴. ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

imtupitsyn@yandex.ru

Технология лазерной керамики позволяет создавать в одном технологическом процессе композитные элементы Nd:YAG/Cr:YAG, что имеет очевидные преимущества для компактных лазеров с модуляцией добротности. Такие лазеры находят применения в LIDAR, системах поджига в двигателях внутреннего сгорания и др.[1,2]. В данной работе получены лазерные керамики Nd:YAG/Cr:YAG и изготовлены чип-резонаторы. Были исследованы генерационные и структурные свойства образцов чип-элементов, такие как спектры пропускания, размеры зерен, характер границы между областями активного элемента и насыщающегося поглотителя, длительность импульса генерации, частота повторений импульсов, эффективность лазера.

Работа выполнена в рамках государственного задания. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-02-00285 и ПП РАН № 5.

[1] О.Санду, Г. Саламу, Н. Павел, и др., Композитные, полностью поликристаллические Nd:YAG/Cr4+:YAG-лазеры с пассивной модуляцией добротности и высокой пиковой мощностью, Квантовая электроника 42 (2012) 211-215.

[2] A. Ikesue, T. Yoda, S. Nakayama, et al., "Fabrication and laser performance of polycrystal and single crystal Nd:YAG by advanced ceramic processing," in: Abstracts of the 25th Annual Meeting of the Japan Society for Laser Reproduction (2005), I12

ЭФФЕКТ СПОНТАННОГО НАРУШЕНИЯ СИММЕТРИИ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХИЗЛУЧАЮЩЕГО ГЕТЕРОЛАЗЕРА С СИММЕТРИЧНЫМ НИЗКОДОБОРТНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

**А.В. Мишин, Е.Р.Кочаровская, И.В. Корюкин, Вл.В. Кочаровский,
В.В.Кочаровский**

*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия
mishin.nn@mail.ru*

Обычно в лазерах с симметричными высокодобротными резонаторами Фабри-Перо, в которых время жизни фотона значительно превышает время жизни поляризации (оптических дипольных колебаний) активных центров, при стационарной (одномодовой) генерации имеет место и симметричное распределение поля, так что из противоположных торцов резонатора выходит одинаковое излучение.

Как показано в настоящем докладе, в сверхизлучающих гетеролазерах с симметричными низкодобротными резонаторами (как чистыми Фабри-Перо, так и комбинированными с распределённой обратной связью встречных волн), в которых время жизни фотона меньше времени жизни поляризации активных центров, при определённом превышении порога генерации возможно сильно несимметричное распределение поля в резонаторе, так что излучение лазера через правый и левый торцы будет значительно отличаться [1]. Предсказываемый эффект спонтанного нарушения симметрии генерации вызван биениями встречных электромагнитных волн в резонаторе и образованием существенно неоднородной стационарной решётки инверсии населённостей активной среды в результате нестационарной эволюции её поляризации после включения накачки и высвечивания лазером одного или нескольких импульсов сверхизлучения.

С помощью численного моделирования решений одномерных уравнений Максвелла-Блоха для двухуровневой модели гетеролазера с небольшим неоднородным уширением спектральной линии активной среды нами проведено детальное исследование процесса

смещения указанной самосогласованной нелинейной решётки инверсии населённостей к одному из торцов лазера и установления стационарного несимметричного усиления и брэгговского переотражение встречных волн. Выявлены характерные особенности рассматриваемого явления несимметричной лазерной генерации и его качественные отличия от известных явлений сверхизлучательного фазового перехода Дике и генерации поляритонного лазера, для которых спонтанное нарушение симметрии не является типичным. Установлено, что при превышении накачкой порога нестационарной генерации возможны метастабильность асимметрии встречных волн и самопроизвольное переключение во времени средних интенсивности излучения и корреляционных свойств излучаемых импульсов, причем эти средние могут быть существенно различны для противоположных торцов лазера.

Показано, в частности, что рассмотренный неравновесный фазовый переход возможен в гетеролазерах на экситонах в предельно узких квантовых ямах или в специальных протяженных ловушках для бозе-конденсации экситонов. Обсуждаются возможности использования гетеролазеров с подобными несимметричными самосогласованными состояниями поля и активной среды для изучения фундаментальных вопросов физики многочастичных систем с сильным радиационным взаимодействием и практических применений в задачах диагностики различных сред, спектроскопии и обработки информации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90037.

[1] Вл.В.Кочаровский, В.В.Железняков, Е.Р.Кочаровская, В.В.Кочаровский, Сверхизлучение: принципы генерации и реализация в лазерах, УФН, т. 187, с. 367-410 (2017).

Подписано в печать 14.11.2019
Формат 60×84 1/16 Печ. л. 4,0 Тираж 50 экз.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Типография НИЯУ МИФИ
115409, Москва, Каширское ш., 31