



2-ая Міжнародная канферэнцыя

# ЛАЗЕРЫ, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ И СИСТЕМЫ НА ИХ ОСНОВЕ

*LSES Minsk 2024*

**ПРОГРАММА  
И ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

20-24 мая 2024 года  
Республика Беларусь,  
Минск

2-ая Международная конференция  
**ЛАЗЕРЫ, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ И  
СИСТЕМЫ НА ИХ ОСНОВЕ**

20 – 24 мая 2024 г., Минск, Беларусь

2-nd International Conference  
**LASERS, SEMICONDUCTOR EMITTERS AND SYSTEMS**

Minsk, May 20 – 24



**ПРОГРАММА И ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**



## Организаторы

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ

Государственное научное учреждение  
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Государственное научно-производственное объединение  
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научно-техническая ассоциация «ОПТИКА И ЛАЗЕРЫ»

## Программный комитет

**С.В. Иванов** (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПб, РФ),

**Н.А. Пихтин** (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПб, РФ),

**М.В. Богданович** (ГНПО «Оптика, птоэлектроника  
и лазерная техника», Минск, РБ),

**С.В. Гапоненко** (Институт физики НАН Беларуси,  
Минск, РБ),

**А. Мармалюк** (НИИ ПОЛЮС им. М.Ф. Стельмаха,  
Москва, РФ),

**Г.Т. Микаелян** (LASSARD, ИНЖЕКТ, РФ)

**В.Э. Кисель** (БНТУ, Минск, РБ)

**В.Ю. Плавский** (Институт физики НАН Беларуси,  
Минск, РБ)

**Г.П. Яблонский** (Институт физики НАН Беларуси,  
Минск, РБ)

**Ю.П. Яковлев** (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПб, РФ),

**А.Л. Толстик** (Белгосуниверситет, Минск, РБ)

**С.Н. Соколов** (ИНЖЕКТ, Саратов, РФ)

**Е.В. Луценко** (Институт физики НАН Беларуси,  
Минск, РБ)

**Е.А. Чешев** (Физический институт им.

П.Н. Лебедева РАН, Москва, РФ)

**А.Л. Чиж** (ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и  
лазерная техника», Минск, РБ)

## Организационный комитет

**Г.И. Рябцев** (Институт физики НАН Беларуси), Председатель Оргкомитета,

**А.Г. Рябцев** (Институт физики НАН Беларуси), зам. Председателя Оргкомитета,

**З.Н. Соколова** (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПб, РФ), ученый секретарь комитета,

**Е.А. Невар** (Институт физики НАН Беларуси), ученый секретарь комитета,

**Е.С. Жарникова** (Институт физики НАН Беларуси),

**И.А. Сулим** (Институт физики НАН Беларуси),

**У.А. Малашенок** (Институт физики НАН Беларуси),

**И.В. Савинка** (Институт физики НАН Беларуси),

**О.М. Борздова** (Институт физики НАН Беларуси),

**Д.В. Шабров** (Институт физики НАН Беларуси)

В.Э. Анискевич, А.Ю. Ильин, А.Д. Лизурчик, О.С. Кулакович, И.Ю. Славинский,  
А.А. Таболич, А.И. Чернышевич, В.С. Шершень (Институт физики НАН Беларуси)

## При поддержке

ЗАО «СОЛАР ЛС»

ООО «ФОТОНИКС ИНСТРУМЕНТС»



2-ая Международная конференция  
**ЛАЗЕРЫ, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ  
И СИСТЕМЫ НА ИХ ОСНОВЕ**

20–24 мая 2024, Минск, Беларусь

**ПРОГРАММА**

**20 мая, понедельник**

**10.00-14.00** *Регистрация*

**14.00-14.20** **Открытие конференции**

*Поздравления участников конференции: М.В. Богданович,  
С.В. Гапоненко, Ю.П. Яковлев, Н.А. Пихтин, Г.П. Яблонский*

**Секция 1 – Физика, техника и применение лазерных излучателей**

**Секция 2 – Физика и технологии создания новых материалов**

*Приглашенный доклад*

**14.20–14.40** **Мощные полупроводниковые лазеры ближнего ИК и приборы на их основе: последние достижения ФТИ им. А.Ф. Иоффе**  
**Н.А. Пихтин**

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, СПб, РФ*

*Приглашенный доклад*

**14.40–15.00** **Коллоидная нано-оптоэлектроника**

**С.В. Гапоненко**

*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, РБ*

*Приглашенный доклад*

**15.00–15.20** **Мощные квантово-каскадные лазеры среднего ИК-диапазона**

**Г.С. Соколовский**

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, СПб, РФ*

*Приглашенный доклад*

**15.20–15.40** **Молекулярно-пучковая эпитаксия слоев и гетероструктур AlGaInN: последние достижения Института физики НАН Беларуси**

**Е.В. Луценко**

*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, РБ*



*Приглашенный доклад*

**15.40–16.00** Вертикально излучающие лазеры диапазона 1260-1570 нм, изготовленные методами молекулярно-пучковой эпитаксии и спекания

**А.Ю. Егоров**<sup>1,2</sup>, Л.Я. Карачинский<sup>1,2</sup>, И.И. Новиков<sup>1,2</sup>, А.В. Бабичев<sup>1</sup>, Я.Н. Ковач<sup>2,3</sup>, С.А. Блохин<sup>3</sup>, А.Г. Гладышев<sup>1,2</sup>, К.О. Воропаев<sup>4</sup>

<sup>1</sup>«Коннектор Оптикс», <sup>2</sup>Университет ИТМО,

<sup>3</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, <sup>4</sup>АО «ОКБ-Планета», СПб, РФ

**16.00–16.20**

*Кофе-пауза*

*Приглашенный доклад*

**16.20–16.40** Современные полупроводниковые лазеры и технологические аспекты их производства

**Г.Т. Микаелян**

«Лассарл», «НПП» Инжект», Москва, РФ

*Приглашенный доклад*

**16.40–17.00** Фотохимия полупроводниковых квантовых точек

**Э.И. Зенькевич**

Белорусский государственный технический университет, Минск, РБ

*Приглашенный доклад*

**17.00–17.20** Современные твердотельные лазеры с диодной накачкой для видимого и ближнего ИК спектральных диапазонов

**М.В. Богданович**<sup>1,2</sup>, А.В. Григорьев<sup>2</sup>, А.Г. Рябцев<sup>1,2</sup>, Г.И.Рябцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси,

<sup>2</sup>Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, РБ

**17.20–17.40** Оптическая инжекционная синхронизация: эффективный путь улучшения характеристик полупроводникового лазера

**М.Е. Белкин**<sup>1</sup>, Д.А. Д.А. Ключник<sup>1</sup>, Н.В. Смирнов<sup>1</sup>, К.О. Воропаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский Технологический университет, Москва, РФ;

<sup>2</sup>«ОКБ-Планета», В. Новгород, РФ

**17.40–18.00** Движение в направлении закрытия «ТГц дыры» ККЛ

**А.А. Дубинов**<sup>1</sup>, Д.В. Ушаков<sup>2</sup>, А.А. Афоненко<sup>2</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, РФ;

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, РБ;

<sup>3</sup>Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова, Москва, РФ

*On-line*

**18.00–18.20** Semiconductor quantum dot lasers with a single asymmetric barrier layer

С. Hammack<sup>1</sup>, **L.V. Asryan**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The University of Texas at Arlington, <sup>2</sup>Virginia Polytechnic Institute and State University, USA

21 мая, вторник

Секция 1 – Физика, техника и применение лазерных излучателей

Секция 2 – Физика и технологии создания новых материалов

*Приглашенный доклад*

09.00–09.20 Инжекционные лазеры для мощных суб-нс импульсов на основе полупроводниковых гетероструктур

С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, И.В. Шушканов, Н.А. Пихтин  
*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, СПб, РФ*

*Приглашенный доклад*

09.20–09.40 Современные полупроводниковые лазеры и их применения

О.В. Коренченко, В.А. Панарин, С.Н. Соколов, М.Ю. Старынин  
*НПО «ИНЖЕКТ», Саратов, РФ*

*Приглашенный доклад*

09.40–10.00 Стабильность излучения полупроводниковых лазеров с наноразмерной активной областью

З.Н. Соколова<sup>1</sup>, Н.А. Пихтин<sup>1</sup>, С.О. Слипченко<sup>1</sup>, Л.В. Асрян<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПб, РФ;*  
<sup>2</sup>*Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, USA*

10.00–10.20 Прецизионный источник тока для мощных линеек лазерных диодов

А.А. Рубан, Е.В. Рубан, А.Н. Козырев  
*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, РФ*

10.20–10.40 Focused ion beam as a tool for prototyping new designs of semiconductor lasers

M.I. Mitrofanov<sup>1</sup>, А.А. Beckman<sup>2</sup>, E.S. Kolodeznyi<sup>3</sup>, A.S. Payusov<sup>4</sup>,  
G.V. Voznyuk<sup>4</sup>, V.P. Evtikhiev<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>*Ioffe Institute, SHM R&E Center, RAS, St.–Petersburg, Russia,*  
<sup>2</sup>*Ioffe Institute, St.–Petersburg, Russia,* <sup>3</sup>*ITMO University, St. Petersburg, Russia,* <sup>4</sup>*Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia*

10.40–11.00

*Кофе-пауза*

11.00–11.20 Эпитаксия и оптические свойства InGaAlN резонансных брэгговских отражателей

А.В. Сахаров<sup>1,2</sup>, Д.С. Артеев<sup>1,2</sup>, А.А. Иванов<sup>1</sup>, Е.Е.Заварин<sup>1,2</sup>,  
В.В.Лундин<sup>1</sup>, А.Е. Николаев<sup>1</sup>, В.В. Чалдышев<sup>1</sup>, А.Ф. Цацульников<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>*ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,* <sup>2</sup>*НТЦ микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, СПб, РФ*



**11.20–11.40 Генерация тока в фотодиодах Шотки Pd/InP в атмосфере водорода**  
В. А. Шутаев<sup>1</sup>, В. Г. Сидоров<sup>2</sup>, Е.А. Гребенщикова<sup>1</sup>, Ю. П. Яковлев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, <sup>2</sup>АИБИ, СПб, РФ

**11.40–12.00 Микродисковые лазеры при оптической накачке на основе гетероструктур с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe с квазирелятивистским законом дисперсии для носителей**  
С.В. Морозов  
ИФМ РАН, Нижний Новгород, РФ

**12.00–12.20 ВЧ розжиг лампы Nd<sup>3+</sup>:YAG лазера: кратное снижение порога и увеличение КПД генерации**  
А.М. Вальшин<sup>1</sup>, академик НАН Беларуси В.А. Орлович<sup>2</sup>, С.А. Бельков<sup>3</sup>, С.М. Першин<sup>4</sup>, М.Я. Гришин, В.И. Пузыревский<sup>5</sup>  
<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, РФ; <sup>2</sup>Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, РБ; <sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, РФ; <sup>4</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, РФ; <sup>5</sup>ООО «Зенит Трейдинг», г. Москва, Зеленоград, РФ

**12.20–12.40 Низкие тепловые и электрические сопротивления гетероструктур со связанными волноводами для диодных излучателей**  
А.С Паюсов<sup>1</sup>, Г.О. Корнышов<sup>1</sup>, А.А. Бекман<sup>1</sup>, Ю.М. Шерняков<sup>1</sup>, М.В. Максимов<sup>2</sup>, Н.Ю. Гордеев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, <sup>2</sup>Академический университет им. Ж.И. Алферова, СПб, РФ

### **12.40-14.00**      *Перерыв на обед*

**14.00–14.20 Применение твердотельных и многомодовых диодных лазеров в рамановских газоанализаторах**  
Д.В. Петров, М.А. Костенко, И.И. Матросов, А.Р. Зарипов  
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, РФ

**14.20–14.40 Суперлюминесцентные диоды с полосковым волноводом скользящего типа**  
Н.Ю. Гордеев<sup>1</sup>, А.С. Паюсов<sup>1</sup>, Ю.М. Шерняков<sup>1</sup>, А.А. Бекман<sup>1</sup>, Г.О. Корнышов<sup>1</sup>, М.В. Максимов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, <sup>2</sup>Академический университет им. Ж.И. Алферова, СПб, РФ

**14.40–15.00 Динамические характеристики микродискового лазера с квантовыми точками InAs/InGaAs/GaAs при оптической накачке**  
А.М. Надточий<sup>1</sup>, А.А. Караборчев<sup>1</sup>, К.А. Иванов<sup>1</sup>, Ю.А. Гусева<sup>2</sup>, М.М. Кулагина<sup>2</sup>, С.А. Блохин<sup>1,2</sup>, А.Е. Жуков<sup>1</sup>, Н.В. Крыжановская<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», <sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, РФ

**15.00–15.20 InGaAs/GaAs микродисковые лазеры, интегрированные с волноводом и волноводным фотодетектором**

**Н.В. Крыжановская**<sup>1</sup>, К.А. Иванов<sup>1</sup>, Н.А. Фоминых<sup>1</sup>,  
С.Д. Комаров<sup>1</sup>, И.С. Махов<sup>1</sup>, Е.И. Моисеев<sup>1</sup>, Ю.А. Гусева<sup>2</sup>,  
М.М. Кулагина<sup>2</sup>, С.А. Минтаиров<sup>2</sup>, Н.А. Калюжный<sup>2</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>3</sup>,  
Р.Р. Галиев<sup>3</sup>, А.Ю. Павлов<sup>3</sup>, К.Н. Томош<sup>3</sup>, А.Е. Жуков<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>НИУ ВШЭ, <sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, СПб, РФ,  
<sup>3</sup>Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники  
им. В.Г. Мокерова РАН, г. Москва, РФ

**15.20–15.40 Молекулярно-пучковая эпитаксия метаморфных гетероструктур с квантовыми точками InAs/InGaAs, излучающими в телекоммуникационном диапазоне длин волн**

**С.В. Сорокин**, Г.В. Климко, И.В. Седова, А.И. Галимов, Ю.В. Серов,  
Д.А. Кириленко, Н.Д. Прасолов, А.А. Торопов  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, СПб, РФ

**15.40–16.00 Запуск комплекса МОС-гидридной эпитаксии на основе установки AIXTRON CCS 6X2, разработка технологии получения эпитаксиальных слоев GaN с низкой плотностью дислокаций**

И.И. Марончук, **М.В. Меженный**, А.А. Чельный, П.С. Рыбин  
АО «Оптрон», Москва, РФ

**16.00–16.20 Кофе-пауза**

**16.20–16.40 III-N гетероструктуры на подложках кремния диаметром до 200 мм**

**А.Ф. Цацульников**<sup>2</sup>, В.В. Лундин<sup>1</sup>, А.В. Сахаров<sup>1,2</sup>, А.Е. Николаев<sup>1</sup>,  
Е.Е. Заварин<sup>1,2</sup>, Д.С. Артеев<sup>1,2</sup>, С.Н. Родин<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, <sup>2</sup>НТИЦ микроэлектроники РАН, СПб, РФ

**16.40–17.00 Вертикально-излучающие лазеры для компактных атомных сенсоров на основе атомов  $^{133}\text{Cs}$**

**С.А. Блохин**<sup>1</sup>, Я.Н. Ковач<sup>1</sup>, М.А. Бобров<sup>1</sup>, А.А. Блохин<sup>1</sup>, Н.А. Малеев<sup>1</sup>,  
А.Г. Кузьменков<sup>1</sup>, М.Н. Марчий<sup>1</sup>, А.П. Васильев<sup>2</sup>, В.М. Устинов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
<sup>2</sup>НТИЦ Микроэлектроники и субмикронных гетероструктур, СПб, РФ

**17.00–17.20 Источники лазерного излучения на основе  $\text{A}_3\text{B}_5$  гетероструктур для фотонных интегральных схем**

**С.О. Слипченко**, Н.А. Пихтин  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, СПб, РФ

**17.20–17.40 Зависимость тока прозрачности от длины волны излучения структур переходной размерности - InGaAs/GaAs квантовых яма-точек**

**Г.О. Корнышов**<sup>1</sup>, А.С. Паюсов<sup>1</sup>, А.А. Бекман<sup>1</sup>, Н.Ю. Гордеев<sup>1</sup>,  
С.А. Минтаиров<sup>1</sup>, Н.А. Калюжный<sup>1</sup>, М.В. Максимов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе,  
<sup>2</sup>Академический университет им. Ж.И. Алферова, СПб, РФ



**17.40–18.00 Двухуровневая генерация в лазерах с квантовыми яма-точками**

**А.А. Бекман<sup>1</sup>, Г.О. Корнышов<sup>1</sup>, Ю.М. Шерняков<sup>1</sup>, А.С. Паюсов<sup>1</sup>,  
А.А. Харченко<sup>2</sup>, Н.Ю. Гордеев<sup>1</sup>, М.В. Максимов<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, <sup>2</sup>Академический университет  
им. Ж.И. Алферова, СПб, РФ*



**18.30 – 22.00**      *Товарищеский ужин*



22 мая, среда

## **Секция 1 – Физика, техника и применение лазерных излучателей**

**9.00-10.40** Обсуждение перспективных разработок и научно–технических проектов ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси, Института физики НАН Беларуси, «ИНЖЕКТ», «ЛАССАРД» и др.

Посещение лабораторий ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси и Института физики НАН Беларуси.

Посещение лабораторий Белорусского государственного университета.

## **Секция 2 – Физика и технологии создания новых материалов**

**9.00-10.40** Круглый стол на тему «Проектирование, синтез и исследование гетероструктур на основе широкозонных III-N материалов и микролазеров на основе высокодобротных резонаторов» по материалам совместного исследования в рамках проекта НИУ ВШЭ «Международное академическое сотрудничество» (Academic Cooperation) Международной лаборатории квантовой оптоэлектроники НИУ ВШЭ Санкт-Петербург и научного коллектива Центра «Широкозонная нано- и микроэлектроника» Института физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси.

**11.00 – 20.00** *Экскурсия*

23 мая, четверг



**Секция 1 – Физика, техника и применение лазерных излучателей**

**Секция 2 – Физика и технологии создания новых материалов**

*On-line*

**9.00–9.20 Гибридные наноструктуры для прецизионного оптического нагрева и измерения температуры нагревателей в режиме реального времени**

**А.В. Поволоцкий**<sup>1</sup>, Д.А. Солдатова<sup>2</sup>, А.А. Тыщенко<sup>1</sup>, А.В. Шмакова<sup>1</sup>,  
Д.А. Лукьянов<sup>1</sup>, А.С. Конев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, СПб, РФ

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого, СПб, РФ

**9.20–9.40 Ультрафиолетовые фотоприемники Шоттки на основе НЕМТ гетероструктур AlGaIn/GaN**

**Б.Д. Урманов**<sup>1</sup>, А.В. Нагорный<sup>1</sup>, Е.В. Луценко<sup>1</sup>, Т.Б. Сахарова<sup>2,3</sup>,  
Г.Г. Перадзе<sup>3</sup>, Л.П. Саникидзе<sup>3</sup>, Т.Ю. Абашидзе<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Тбилисский Государственный Университет им. И.Джавахишвили,  
Институт Прикладной Полупроводниковой Технологии,

<sup>3</sup>Институт Микро и Нанoeлектроники, Тбилиси, Грузия

*On-line*

**9.40–10.00 Волноводные ИК лазеры с волоконным выводом излучения**

**Б.А. Кузяков**

РТУ МИРЭА, Москва, РФ

**10.00–10.20 Использование сильного светоиндуцированного дихроизма в парах рубидия для регистрации магнитных резонансов методами Ханле и Белла-Блума**

**А.О. Макаров**<sup>1,2</sup>, В.И. Вишняков<sup>1</sup>, К.С. Козлова<sup>1,2</sup>, Д.В. Бражников<sup>1,2</sup>,  
А.Н. Гончаров<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, РФ

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, РФ

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, РФ



*On-line*

**10.20–10.40 Мощный 532 нм субнаносекундный Nd:YAG/Cr:YAG микрочип-лазер**

М.Д. Яковин<sup>1</sup>, Д.В. Яковин<sup>1</sup>, А.В. Грибанов<sup>1</sup>, П.Д. Кораблин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, РФ

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, РФ

**10.40–11.00**

*Кофе-пауза*

*Приглашенный доклад*

**11.00–11.20 Гибридные излучатели на основе люминесцентных полупроводниковых нанокристаллов в оптике, сенсорике и биомедицине**

М. Артемьев, Д. Муравский, П. Малаховский, Р. Власовец, В. Грибовская

Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, РБ

**11.20–11.40 Люминесцентная термометрия с использованием двухцентровых наночастиц  $Gd_2O_3:Tb^{3+}/Eu^{3+}$  для задач микроэлектроники**

М.А. Курочкин, Д.В. Мамонова, В.А. Медведев, И.Е. Колесников  
Санкт-Петербургский государственный университет, СПб, РФ

**11.40–12.00 Физико-химическая модификация электронной структуры поверхности полупроводников АЗВ5**

И.В. Седова, Т.В. Львова, С.В. Сорокин, М.В. Лебедев  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПб, РФ

**12.00–12.20 Влияние состава матричного слоя на фотолюминесценцию квантовых точек InGaP(As), сформированных методом замещения элементов пятой группы**

В.В. Андриюшкин<sup>1,2</sup>, И.И. Новиков<sup>1,2</sup>, А.Г. Гладышев<sup>1,2</sup>,

А.В. Бабичев<sup>1,2</sup>, Д.С. Папылев<sup>1</sup>, В.Н. Неведомский<sup>3</sup>, Е.С. Колодезный<sup>1</sup>, Л.Я. Карачинский<sup>1,2</sup>, А.Ю. Егоров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО,

<sup>2</sup>ООО «Коннектор Оптикс», <sup>3</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПб, РФ

**12.20–12.40 Специфика действия лазерного излучения синей области спектра на раковые и нетрансформированные клетки в условиях in vitro**

В.Ю. Плавский, А.И. Третьякова, Л.Г. Плавская, О.Н. Дудинова, А.Д. Свечко, Р.К. Нагорный, А.В. Микулич, А.Н. Собчук, Т.С. Ананич, Н.Д. Прокопенко, С.В. Якимчук, И.А. Леусенко

Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

**12.40–14.00**

*Перерыв на обед*



*On-line*

- 14.00-14.20 Сравнительное исследование излучательных свойств Al-содержащих и безалюминиевых гетероструктур**  
**Н.В. Гультиков**, С.Ю. Гаврилов, А.Ю. Андреев, И.В. Яроцкая, К.Ю. Телегин, А.А. Мармалюк, М.А. Ладугин  
*АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, РФ*
- 14.20-14.40 Лазерные диодные модули с килогерцовой шириной линии генерации в режиме самосинхронизации**  
**В.В. Шестаков**, К.Б. Микитчук, Н.З. Капуза, А.Л. Чиж  
*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, РБ*
- 14.40-15.00 Система измерения частоты СВЧ-сигналов на основе высокоскоростного лазерного диода и волоконных брэгговских решеток с высокой хроматической дисперсией**  
**Д.Ю. Сидлеров**, К.Б. Микитчук, Н.З. Капуза, А.Л. Чиж  
*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, РБ*
- 15.00-15.20 Компенсация светового сдвига резонансов когерентного пленения населённости в парах цезия при использовании двойной АМ-ЧМ модуляции лазерного излучения**  
**В.И. Вишняков**<sup>1</sup>, Д.В. Бражников<sup>2</sup>, М.Н. Скворцов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>*Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, РФ*  
<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, РФ*
- 15.20-15.40 Модель лазерного модуля с поперечной диодной накачкой стержневого активного элемента**  
**К.А. Галюк**, Б.Д. Овчаренко, А.А. Ушаков, В.В. Букин  
*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, РФ*
- 15.40-16.00 Эффективные дизайны лазерных переходов квантово-каскадных лазеров с частотой менее 3 ТГц**  
**Д.В. Ушаков**<sup>1</sup>, А.А. Афоненко<sup>1</sup>, Д.С. Пономарёв<sup>2,3</sup>, С.С. Пушкарёв<sup>2,3</sup>, В.И. Гавриленко<sup>4</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>2,3</sup>  
<sup>1</sup>*Белорусский государственный университет, Минск, РБ*  
<sup>2</sup>*Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Москва, РФ*, <sup>3</sup>*Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, РФ*  
<sup>4</sup>*Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, РФ*

**16.00–16.20**

***Кофе-пауза***



## 16.20-18.00 Стендовая секция

- Ст-1** Исследование температуры активной области и теплового сопротивления мощного AlInGaN синего лазерного диода методами инфракрасной микроскопии и релаксации прямого напряжения  
**А.В. Аладов**<sup>1</sup>, А.Л. Закгейм<sup>1</sup>, А.Е. Иванов<sup>1,2</sup>, А.Е. Черняков<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>НТЦ микроэлектроники РАН,  
<sup>2</sup>СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), СПб, РФ
- Ст-2** Энергетические характеристики попутного пикосекундного ВКР в воде в зависимости от глубины погружения в нее фокальной перетяжки возбуждающего пучка  
**А.И. Владчиц**<sup>1</sup>, В.А. Орлович<sup>1</sup>, И.А. Ходасевич<sup>1</sup>, С.М. Першин<sup>2</sup>, М.Я. Гришин<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Институт физики НАН Беларуси, Минск, РБ,  
<sup>2</sup>Институт общей физики РАН, Москва, РФ
- Ст-3** Субнаносекундный РОС-лазер на красителе со стабильной длиной волны излучения  
**В.М. Катаркевич**, Т.Ш. Эфендиев  
Институт физики НАН Беларуси, Минск, РБ
- Ст-4** Предварительная обработка спектров для улучшения долговременной стабильности результатов лазерно-искрового эмиссионного спектрального анализа  
**В.В. Кирис**, К.Ю. Кацалап, М.В. Бельков  
Институт физики НАН Беларуси, Минск, РБ
- Ст-5** Анализ ширины линии излучения вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 85X/89X нм  
**Я.Н. Ковач**<sup>1</sup>, С.А. Блохин<sup>1</sup>, М.А. Бобров<sup>1</sup>, А.А. Блохин<sup>1</sup>, Н.А. Малеев<sup>1</sup>, А.Г. Кузьменков<sup>1</sup>, М.Н. Марчий<sup>1</sup>, А.П. Васильев<sup>2</sup>, В.М. Устинов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
<sup>2</sup>НТЦ «Микроэлектроники и субмикронных гетероструктур», Санкт-Петербург, Россия
- Ст-6** Активно-импульсная лазерная видеосистема для транспортных средств при наличии помех  
**Б.Ф. Кунцевич**  
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси, Минск, РБ



- Ст-7**      **Оптические технологии повышения эффективности действия противогрибкового препарата амфотерицин В**  
А.В. Микулич<sup>1</sup>, В.Ю. Плавский<sup>1</sup>, А.И. Третьякова<sup>1</sup>, Л.Г. Плавская<sup>1</sup>, А.Н. Собчук<sup>1</sup>, И.А. Леусенко<sup>1</sup>, Т.С. Ананич<sup>1</sup>, Р.К. Нагорный<sup>1</sup>, С.В. Якимчук<sup>1</sup>, А.Д. Свечко<sup>1</sup>, И.Л. Морозова<sup>2</sup>, Т.Е. Кузнецова<sup>2</sup>, А.Э. Пыж<sup>2</sup>, Н.И. Счастливая<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Институт физики НАН Беларуси, <sup>2</sup>Институт физиологии НАН Беларуси, Минск, РБ
- Ст-8**      **Исследование кольцевых микролазеров с нарушенной вращательной симметрией**  
Э.И. Моисеев<sup>1</sup>, Н.В. Крыжановская<sup>1</sup>, С.Д. Комаров<sup>1</sup>, К.А. Иванов<sup>1</sup>, Н.А. Афанасьев<sup>1</sup>, С.А. Минтаиров<sup>2</sup>, Н.А. Калужный<sup>2</sup>, М.М. Кулагина<sup>2</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>3</sup>, Р.Р. Галиев<sup>3</sup>, А.Ю. Павлов<sup>3</sup>, К.Н. Томош<sup>3</sup>, А.Е. Жуков<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>НИУ ВШЭ, <sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, <sup>3</sup>ИСВЧПЭ РАН, РФ
- Ст-9**      **Метод предварительной обработки массивов данных измерений биаксиальных одноволновых лидаров**  
П.Н. Назаренко  
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси, Минск, РБ
- Ст-10**     **Теоретическое моделирование возбуждения ВКР в водороде двухимпульсным разночастотным лазерным излучением**  
Р.В. Чулков<sup>1</sup>, Ж. Даваасамбуу<sup>2</sup>, Г. Шилагарди<sup>2</sup>, Л.Е. Батай<sup>1</sup>, А.С. Грабчиков<sup>1</sup>, О.П. Корожан<sup>1</sup>, В.А. Орлович<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Институт физики НАН Беларуси, <sup>2</sup>Лазерный исследовательский центр Национального университета Монголии
- Ст-11**     **Оптимизация концентрации ионов гольмия и иттербия во фторфосфатном стекле для флуоресцентной термометрии**  
А.С. Пиотух, И.А. Ходасевич  
Институт физики НАН Беларуси, Минск, РБ
- Ст-12**     **Детектирование углекислого газа в атмосферном воздухе при помощи одномодового лазерного диода**  
А.Л. Уласевич, А.А. Кузьмук  
Институт физики НАН Беларуси, Минск, РБ
- Ст-13**     **Полностью оптический способ характеристики магнитных полей на основе ансамбля NV-центров в алмазе**  
Д.С. Филимоненко, А.П. Низовцев, С.Я. Килин  
Институт физики НАН Беларуси, Минск, РБ



Ст-14 **Лазерный источник излучения, генерирующий в двух спектральных диапазонах**

**С.С. Шавель**, В. А. Горобец, С. Б. Бушук

*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси, Минск, РБ*

Ст-15 **Наведенное поглощение и нелинейность активированного красителем нанокompозита при пикосекундном возбуждении**

В.Ю. Курстак, **С.С. Ануфрик**

*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, РБ*

Ст-16 **Мультипараметрическая люминесцентная криогенная термометрия слоев ZnTe/CdTe**

**Е.В. Борисов**, А.А. Калиничев, И.Е. Колесников

*Санкт-Петербургский государственный университет, РФ*

Ст-17 **Геттерирование редкоземельным элементом гольмием в технологии создания гетероструктур для оптоэлектронных систем**

**А.А. Пивоварова**<sup>1</sup>, Е.В. Куницына<sup>1</sup>, Я.А. Пархоменко<sup>1</sup>, И.А. Андреев<sup>1</sup>, Ю.П. Яковлев<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, СПб, РФ*

Ст-18 **Визуализаторы лазерного ИК-излучения, полученные золь-гель методом**

Н.В. Гапоненко<sup>1</sup>, **Е.И. Лашковская**<sup>1</sup>, Ю.Д. Корнилова<sup>1</sup>, К.В. Шустикова<sup>1</sup>, Н.В. Насонова<sup>1</sup>, В.А. Лабунов<sup>1</sup>, Л.В. Судник<sup>2</sup>, А.Р. Лученок<sup>2</sup>, П.А. Витязь<sup>2</sup>, Т.Ф. Райченко<sup>3</sup>, В.Д. Живулько<sup>4</sup>, А.В. Мудрый<sup>4</sup>, Ю.В. Радюш<sup>4</sup>, И.Л. Мартынов<sup>5</sup>, А.А. Чистяков<sup>5</sup>, Н.И. Каргин<sup>5</sup>, В.Ю. Тимошенко<sup>3</sup>, М.В. Степихова<sup>6</sup>, А.Н. Яблонский<sup>6</sup>

*<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, <sup>2</sup>Институт порошковой металлургии им. акад. О.В. Романа НАН Беларуси, <sup>3</sup>Институт физики НАН Беларуси, <sup>4</sup>Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь; <sup>5</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, РФ; <sup>6</sup>Институт физики микроструктур РАН, Н.-Новгород, РФ*

Ст-19 **Жидкофазный лазерно-плазменный синтез композитных полупроводниковых Si-Sn наноструктур**

**В. Корнев**, Н. Босак, С. Коломыцкий, Н. Тарасенко

*Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, РБ*





- Ст-20**      **Численное моделирование характеристик солнечных элементов на основе GaPNAs/Si гетероструктур**  
**Е.В. Никитина**<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>*Академический университет им. Ж.И. Алферова,*  
<sup>2</sup>*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПб, РФ*
- Ст-21**      **Отечественные компоненты радиофотоники производства АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»**  
**А.В. Иванов**, А.А. Мармалюк, А.В. Лобинцов, Ю.В. Курнявко, А.И. Данилов, С.М. Сапожников, В.А. Симаков, М.А. Ладугин  
*АО «НИИ «Полюс» им.М.Ф. Стельмаха», Москва, РФ*
- Ст-22**      **Шумовые характеристики одномодовых вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 89X нм**  
**М.А. Бобров**<sup>1</sup>, С.А. Блохин<sup>1</sup>, Я.Н. Ковач<sup>1</sup>, А.А. Блохин<sup>1</sup>, Н.А. Малеев<sup>1</sup>, А.Г. Кузьменков<sup>1</sup>, М.Н. Марчий<sup>1</sup>, А.П. Васильев<sup>2</sup>, В.М. Устинов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,*  
<sup>2</sup>*НТИЦ Микроэлектроники и субмикронных гетероструктур, СПб, РФ*
- Ст-23**      **Импульсный излучающий модуль на основе мощных полупроводниковых лазеров  $\lambda = 905$  нм для лидарных применений**  
**Д.А. Веселов**, Ю.К. Кириченко, А.А. Климов, А.В. Лютецкий, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин  
*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, СПб, РФ*

24 мая, пятница 2024 г.

Секция 1 – Физика, техника и применение лазерных излучателей

Секция 2 – Физика и технологии создания новых материалов

*On-line*

9.00-9.20 Электрооптические характеристики мощных лазеров ( $\lambda = 1550$  нм) в зависимости от ширины апертуры

Ю.К. Кириченко<sup>1</sup>, Д.А. Веселов<sup>1</sup>, С.О. Слипченко<sup>1</sup>, Н.А. Пихтин<sup>1</sup>, А.А. Мармалюк<sup>2</sup>, Ю.Л. Рябоштан<sup>2</sup>, М.А. Ладугин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф.Иоффе, <sup>2</sup>ООО «Сигм Плюс», РФ

*On-line*

9.20-9.40 Определение угла прихода сигнала путем радиофотонного формирования и регистрации свч радиоголограмм

В.В. Валуев<sup>1</sup>, Н.И. Каргин<sup>1</sup>, В.В. Кулагин<sup>1,2</sup>, Р.В. Рыжук<sup>1</sup>, Д.Е. Буркитбаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, РФ, <sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, РФ

*On-line*

09.40-10.00 Моделирование дихроичных зеркал на основе  $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$

Е.С. Слюнько, В.С. Кузнецов, М.М. Зиновьев, Н.Н. Юдин, С.Н. Подзывалов, А.Б. Лысенко, А.Ю. Кальсин, А.Ш. Габдрахманов  
Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, РФ

10.00-10.20 Перспективы применения светодиодов ( $\lambda = 405$  нм) в антимикробной фотодинамической терапии с использованием фуразидина и нитрофураля в качестве фотосенсибилизаторов

Р.К. Нагорный, Н.Д. Прокопенко, А.В. Микулич, А.И. Третьякова, Т.С. Ананич, Л.Г. Плавская, В.Ю. Плавский, И.А. Леусенко, С.В. Якимчук, А.Д. Свечко

Институт физики НАН Беларуси, Минск, РБ

*On-line*

10.20-10.40 Whispering-gallery mode microlasers for reservoir computing

А. Babichev<sup>1</sup>, I. Makhov<sup>2</sup>, N. Kryzhanovskaya<sup>2</sup>, Y. Zadiranov<sup>1</sup>, Y. Sali<sup>1</sup>, M. Kulagina<sup>1</sup>, M. Bobrov<sup>1</sup>, A. Vasil'ev<sup>1</sup>, S. Blokhin<sup>1</sup>, N. Maleev<sup>1</sup>, L. Karachinsky<sup>3</sup>, I. Novikov<sup>3</sup>, A. Egorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute, <sup>2</sup>HSE University, <sup>3</sup>ITMO University

10.40–11.00

Кофе-пауза



*On-line*

**11.00-11.20 Перспективы модификации оптических и электрофизических свойств дифосфида цинка-германия с помощью легирования примесными атомами**

А.Б. Лысенко, Н.Н. Юдин, С.Н. Подзывалов, Е.С. Слюнько, А.Ю. Кальсин, А.Ш.Габдрахманов  
*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, РФ*

*On-line*

**11.20-11.40 Quantum-cascade lasers with low sensitivity to layers-thickness fluctuations**

А. Babichev<sup>1</sup>, Е. Kolodeznyi<sup>1</sup>, D. Mikhailov<sup>2</sup>, V. Dudelev<sup>2</sup>, A. Gladyshev<sup>1</sup>, S. Slipchenko<sup>2</sup>, A. Lyutetskii<sup>1</sup>, L. Karachinsky<sup>1</sup>, I. Novikov<sup>1</sup>, G. Sokolovskii<sup>2</sup>, N. Pikhtin<sup>2</sup>, A. Egorov<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*ITMO University*, <sup>2</sup>*Ioffe Institute, РФ*

**11.40- 12.00 Фотолюминесценция микропорошков соединения  $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Nd},\text{Yb}$  в широком интервале уровней возбуждения**

П.П. Першукевич<sup>1</sup>, О.Б. Тагиев<sup>2,3</sup>, Т.Ш. Ибрагимова<sup>2</sup>, Ф.А. Казимова<sup>2</sup>, М.В. Бельков<sup>2</sup>, А.А. Таболич<sup>2</sup>, Е.В. Луценко<sup>2</sup>, А.В. Мудрый<sup>4</sup>, В.Н. Павловский<sup>1</sup>, Г.П. Яблонский<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*Институт физики НАН Беларуси*, <sup>2</sup>*Институт физики Министерства науки и образования Азербайджана, Баку*, <sup>3</sup>*Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова в Баку, Азербайджан*, <sup>4</sup>*НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск, РБ*

**12.00-12.20 Униполярный инжекционный лазер среднего ИК диапазона на основе  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  гетероструктуры с 2-мя квантовыми ямами**

А.А. Афоненко<sup>1</sup>, Д.В. Ушаков<sup>1</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>2,3</sup>, А.А. Дубинов<sup>4</sup>, С.В. Морозов<sup>4</sup>, В. И. Гавриленко<sup>4</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>5</sup>, С.А. Дворецкий<sup>5</sup>  
<sup>1</sup>*Белорусский государственный университет, Минск, РБ*, <sup>2</sup>*Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Москва*, <sup>3</sup>*Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), РФ*, <sup>4</sup>*Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, РФ*, <sup>5</sup>*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, РФ*

**12.20-12.40 Морфология поверхности, оптические и электрофизические свойства пленок  $\text{LaMn}_2\text{O}_3+1\%\text{Er}_2\text{O}_3$**

Н.А. Босак<sup>1</sup>, Л.В. Баран<sup>2</sup>, В.В. Малютина-Бронская<sup>3</sup>, А.А. Шевченко<sup>6</sup>, Н.В. Подвицкий<sup>5</sup>, А.В. Бука<sup>4</sup>, А. С. Кузьмицкая<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>*Институт физики НАН Беларуси*, <sup>2</sup>*Белорусский государственный университет*, <sup>3</sup>*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, РБ*, <sup>4</sup>*Белорусский государственный технологический университет*, <sup>5</sup>*БНТУ, Минск, РБ*, <sup>6</sup>*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, РБ*

**12.40-13.00 Калибровка состава низколегированных сталей интервальным методом частичных наименьших квадратов по эмиссионным спектрам низкого разрешения**

М. В. Бельков, К.Ю. Кацалап, Д.А. Королько, М.А. Ходасевич  
*Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

**13.00-13.20 Пикосекундная автоколебательная структура излучения лазеров на квантовых точках**

Е.В. Тимошенко<sup>1</sup>, В.А. Юревич<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>*МГУ имени А.А. Кулешова, Могилев, РБ,*  
<sup>2</sup>*Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Могилев, РБ*

**13.20-13.40 Джиттер компактных твердотельных лазеров с пассивной модуляцией добротности**

М.В. Богданович<sup>1,2</sup>, А.В. Григорьев<sup>2</sup>, В.Н. Дудиков<sup>1,2</sup>, А.Г. Рябцев<sup>1,2</sup>,  
Г.И. Рябцев<sup>2</sup>, П.О. Татура<sup>1,2</sup> И.В. Савинка<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, РБ*  
<sup>2</sup>*Институт физики НАН Беларуси, Минск, РБ*

**13.40-14.00 Радиофотонное формирование и регистрации свч радиоголограмм для определение угла прихода сигнала**

В.В. Валуев<sup>1</sup>, Д. Буркитбаев<sup>1,2</sup>, Н.И. Каргин<sup>1</sup>, В.В. Кулагин<sup>1,2</sup>,  
Р.В. Рыжук<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, РФ,* <sup>2</sup>*МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, РФ*

**14.00-14.20 Закрытие конференции**

ДЛЯ ЗАМЕТОК



## **ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

### **МОЩНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ БЛИЖНЕГО ИК И ПРИБОРЫ НА ИХ ОСНОВЕ: ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ ФТИ им. А.Ф. ИОФФЕ**

Н.А. Пихтин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26, Россия  
e-mail: nike@hpld.ioffe.ru

Доклад посвящен современным тенденциям в области разработок и исследований торцевых полупроводниковых лазеров, излучающих в диапазоне длин волн 900-2000 нм. Представлены результаты исследований лазерных диодов и приборов на их основе, созданных и разработанных в ФТИ им. А.Ф. Иоффе за последние 2 года. Обсуждаются конструкции лазерных диодов на основе квантоворазмерных гетероструктур, выращенных на подложках GaAs и InP методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Главное внимание уделено их основным выходным электрооптическим характеристикам - оптическая мощность, КПД, спектральная и пространственная яркость, температурная стабильность, а также надежность и стоимость. Рассматриваются следующие типы излучателей, работающие в непрерывном и импульсном (длительность от 0.1 нс до 100 нс) режимах:

- мощные многомодовые одиночные полупроводниковые лазеры с широкой апертурой излучения (100-800 мкм),
- мощные лазерные линейки и матрицы,
- одномодовые и лазерные диоды с небольшим числом мод.

### **КОЛЛОИДНАЯ НАНО-ОПТОЭЛЕКТРОНИКА**

С. В. Гапоненко

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси,  
пр. Независимости 68-2, Минск 220072, Беларусь  
e-mail: s.gaponenko@ifanbel.bas-net.by

Со времени обнаружения и систематического исследования квантовых размерных эффектов в полупроводниковых нанокристаллах («квантовых точек») достигнут значительный прогресс в создании лабораторных и экспериментальных прототипов различных компонентов оптической, лазерной техники и оптоэлектроники, что привело к присуждению Нобелевской премии А.И. Екимову, Л. Брюсу и М. Бавенди в 2023 г. Это направление может рассматриваться как альтернатива органической оптоэлектронике и как своеобразное дополнение по отношению к оптоэлектронике, базирующейся на традиционной эпитаксиальной технологии. На сегодняшний день продемонстрировано создание коллоидных нанокристаллических фильтров, лазерных затворов, светодиодов, фототранзисторов, солнечных элементов и даже лазеров (пока с оптической накачкой).

В докладе представлены принципы построения оптоэлектронных элементов методами коллоидной химии, а также краткая история и достижения этого зарождающегося технологического направления. Показана роль и место российских и белорусских ученых, включая представителей нашей научной диаспоры за рубежом. Обсуждаются возможные потребительские ниши и технологические проблемы коллоидных оптоэлектронных

устройств, а также возможность интегрирования полупроводниковых и металлических наночастиц в таких устройствах (наноплазмоника) с использованием металлических наночастиц в качестве своеобразных оптических нанотрансиверов (приемопередатчиков).

## **МОЩНЫЕ КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ И ДЕТЕКТОРЫ СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА**

Г.С. Соколовский  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26, Россия  
e-mail: gs@mail.ioffe.ru

В докладе представлен обзор мирового состояния исследований и разработок мощных квантово-каскадных лазеров (ККЛ) среднего инфракрасного диапазона. Обсуждаются результаты исследований и разработок отечественных квантово-каскадных лазеров и детекторов. Среди полученных результатов отмечается демонстрация выходной мощности лазерной генерации свыше 22 Вт на длинах волны в области 4.5 мкм и рекордную, превышающую 21 Вт мощность, достигнутую в ККЛ спектрального диапазона 8 мкм, динамические характеристики квантовых каскадных лазеров среднего инфракрасного диапазона, а также характеристики квантовых каскадных детекторов, созданных на основе гетероструктур квантовых каскадных лазеров.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 21-72-30020).

## **МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВАЯ ЭПИТАКСИЯ СЛОЕВ И ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaInN: ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН БЕЛАРУСИ**

Е.В. Луценко, Д.А. Шохонов, В.В. Микулич, А.В. Нагорный, А.Г. Войнилович,  
В.А. Шуленкова, Г.П. Яблонский  
Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68-2, 220072 Минск, Беларусь  
e-mail: e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by

Соединение AlGaInN, являясь прямозонным полупроводником, обеспечивает изменение ширины запрещенной зоны от 0,7 эВ до 6,2 эВ, обладает превосходной температурной, химической, механической, электрической и радиационной стойкостью. Поэтому гетероструктуры на основе AlGaInN перспективны для создания оптоэлектронных устройств, работающих в ультрафиолетовой – ближней инфракрасной областях спектра, а также устройств твердотельной СВЧ и силовой электроники.

Рассматриваются методы молекулярно-пучковой эпитаксии, структурные, оптические, люминесцентные и электрические характеристики эпитаксиальных слоев GaN, n++GaN, p++GaN, AlGaN, n AlGaN, а также зародышевых слоев AlN. Показываются возможности применения рассмотренных методов молекулярно-пучковой эпитаксии для формирования гетероструктур транзисторов с увеличенной подвижностью электронов. Обсуждаются структурные, оптические, люминесцентные и электрические характеристики полученных гетероструктур. Рассматриваются возможности применения отработанных слоев AlGaInN для формирования светодиодов, лазерных диодов, фотодиодов и транзисторов.

## **ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩИЕ ЛАЗЕРЫ ДИАПАЗОНА 1260-1570 НМ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ И СПЕКАНИЯ**

А.Ю. Егоров<sup>1,2</sup>, Л.Я. Карачинский<sup>1,2</sup>, И.И. Новиков<sup>1,2</sup>, А.В. Бабичев<sup>1</sup>, Я.Н. Ковач<sup>2,3</sup>,  
С.А. Блохин<sup>3</sup>, А.Г. Гладышев<sup>1,2</sup>, К.О. Воропаев<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ООО «Коннектор Оптикс», <sup>2</sup>Университет ИТМО, <sup>3</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,

<sup>4</sup>АО «ОКБ-Планета»

e-mail: Leonid.Karachinsky@connector-optics.com

В докладе представлены результаты НИОКР по созданию вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) телекоммуникационного диапазона длин волн 1260-1570 нм. Гетероструктуры таких ВИЛ представляют собой вертикальный микрорезонатор с выводом излучения вверх перпендикулярно подложке и состоят из нижнего и верхнего распределенных брэгговских отражателей (РБО) на основе гетеропары AlGaAs/GaAs, активной области на основе множественных квантовых ям InGaAs/InGaAlAs или короткопериодной сверхрешетки InGaAs/InGaAlAs [Бабичев А.В., и др. // Патент РФ № 188629 от 18.04.2019], области с захороненным туннельным переходом (ЗТП). Гетероструктуры изготавливались методом молекулярно-пучковой эпитаксии: РБО - на подложках GaAs, гетероструктура активной области с ЗТП - на подложке InP в результате двух эпитаксиальных процессов с промежуточным процессом формированием мезы ЗТП. Конечная гетероструктура изготавливалась методом спекания гетероструктур созданных на подложках InP и GaAs. Характеристики ВИЛ, созданных по данной технологии, соответствуют мировому уровню достижений для длинноволновых ВИЛ [Babichev A.V., et al. // Photonics - 2023, v.10(3), p.268]. Мощность оптического излучения таких ВИЛ в одночастотном режиме составляет 5-6 мВт, эффективная частота модуляции – более 13 ГГц, цифровая скорость передачи данных – свыше 25 Гбит/с, при этом имеется потенциал для их дальнейшего улучшения.

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИХ ПРОИЗВОДСТВА**

Г.Т. Микаелян

ООО «Лассарл», ООО «НПП «Инжект», Россия

e-mail: gmt15@mail.ru

Доклад посвящен анализу основополагающих работ, связанных с созданием полупроводниковых инжекционных лазеров. Представлено современное состояние технологии производства полупроводниковых диодных лазеров и уровень достигнутых параметров. Рассмотрен также современный уровень одной из перспективных областей фотоники и микроэлектроники, а именно: светодиоды и лазеры на основе непрямозонных полупроводников с напряженными слоями, имеющие потенциал интегрирования в фотонные чипы и высокоскоростные микросхемы.



## ФОТОХИМИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Э.И. Зенькевич

Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости 65,  
Минск, Беларусь  
e-mail: zenkev@tut.by

Полупроводниковые квантовые точки (КТ) и наноансамбли КТ+органический хромофор интересны для фундаментальной науки и применяются в нанотехнологиях и биомедицине. Соответственно, исследование строения наноансамблей, интерфейсных процессов и релаксации экситонного возбуждения в них (фотохимические процессы) имеет принципиальное значение. В докладе анализируются структура и свойства стабилизированных наноансамблей двух типов: 1) на основе КТ CdSe/ZnS, координационно связанных с порфиринами и этилен-бисимидами, и 2) на основе КТ AIS/ZnS/GSH, электростатически связанных с молекулами тетра-пиридил-порфирина. На основании спектрально-кинетических данных (поглощение, пикосекундная флуоресцентная спектроскопия, комбинационное рассеяние, спектроскопия одиночных нанообъектов и др.) в сочетании с теоретическим анализом (расчет параметров переноса энергии методом редуцированной матрицы плотности, квантово-механические расчеты квадрата волновой функции электрона в возбужденной КТ, квантово-химические расчеты структуры и свойств поверхности согласованной по размерам КТ и формирования наноансамблей) обосновано, что: 1) взаимодействие КТ ( $d_{\text{ядра}} \leq 3$  нм) не подчиняется статистике Пуассона, 2) связывание молекул хромофоров с поверхностью КТ сопровождается формированием низколежащих поверхностных состояний-ловушек, 3) в наноансамблях КТ AIS/ZnS/GSH + порфирин реализуется быстрая металлизация молекулы свободного основания, 4) безызлучательная релаксация энергии экситонного возбуждения КТ обусловлена двумя конкурирующими процессами: ферстеровским переносом энергии КТ→порфирин и туннелированием электрона сквозь барьер ZnS на внешнюю поверхность КТ в условиях квантового ограничения. Установлено, что исследованные наноансамбли способны генерировать синглетный кислород и могут найти применение при фотодинамической терапии рака.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ ДЛЯ ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИК СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ

М.В. Богданович<sup>1,2</sup>, А.В. Григорьев<sup>2</sup>, А.Г. Рябцев<sup>1,2</sup>, Г.И. Рябцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси,  
пр. Независимости 68-1, 220072 Минск, Беларусь,

<sup>2</sup>Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68–2, 220072 Минск, РБ  
e-mail: m.bogdanovich@ifanbel.bas-net.by

Анализируются характеристики твердотельных лазеров (ТЛ) с поперечной и продольной диодной накачкой на основе Nd:YAG и Yb,Er-активных элементов, которые разрабатываются и создаются в ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» и Институте физики НАН Беларуси. В качестве источников излучения накачки применяются импульсные и непрерывные лазерные диодные линейки и матрицы лазерных диодов. Излучение импульсных ТЛ модулируется электрооптическими ячейками или кристаллами/фильтрами  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  (1064 нм),  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  (1540 нм). Для продвижения в область 1570 нм разрабатываются компактные параметрические

генераторы света (ПГС). Специализированные оптические схемы позволяют создавать высокоинтенсивные одномодовые ТЛ с шириной линии генерации на уровне десятков МГц в видимой (355 нм, 532 нм) и ближней ИК (1064 нм) спектральных областях. Энергия импульсов ТЛ варьируется от нескольких миллиджоулей до 1–5 Дж при частотах следования импульсов от 1 до 30 Гц и выше. В непрерывном режиме мощность твердотельных излучателей превышает 300 Вт. Характерной особенностью создаваемых излучателей является их способность функционировать с высоким качеством выходного пучка (при необходимости ТЛ снабжаются телескопическими насадками) в интервале температур от минус 40 до плюс 60 градусов Цельсия в условиях воздействия внешних механических нагрузок.

### **ОПТИЧЕСКАЯ ИНЖЕКЦИОННАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ: ЭФФЕКТИВНЫЙ ПУТЬ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА**

М.Е. Белкин<sup>1</sup>, Д.А. Д.А. Ключник<sup>1</sup>, Н.В. Смирнов<sup>1</sup>, К.О. Воропаев<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>МИРЭА – Российский Технологический университет, Москва, Россия,  
<sup>2</sup>АО «ОКБ-Планета», Новгород, Россия  
e-mail: belkin@mirea.ru

В настоящей работе на примере отечественного поверхностно-излучающего лазера (ПИЛ) спектрального С-диапазона обсуждается метод оптической инжекционной синхронизации как эффективный путь значительного улучшения модуляционных, энергетических, спектральных и шумовых характеристик полупроводникового лазерного излучателя. Описываются структурные и конструктивные особенности и основные параметры и характеристики отечественного ПИЛ в бескорпусном и корпусном исполнениях, подготовленного к серийному производству АО «ОКБ-Планета», г. Новгород. Приводятся методики и сравнительные результаты измерения ключевых характеристик ПИЛ в автономном и синхронизированном режимах работы, включая: ватт-амперную характеристику, спектральную характеристику, полосу непосредственной модуляции, отношение сигнала к шуму, ширину линии излучения, относительный шум интенсивности, однополосный фазовый шум.

В качестве конкретного подтверждения эффективности предложенного подхода обсуждается преимущество применения оптической инжекционной синхронизации ПИЛ по сравнению со стандартно применяемом в мире подходом на основе амплитудно-импульсной модуляции при построении низкоэнергозатратных волоконно-оптических межсоединительных линий с терабитной пропускной способностью для современных и перспективных гипермасштабных центров обработки данных.

## ДВИЖЕНИЕ В НАПРАВЛЕНИИ ЗАКРЫТИЯ «ТГц ДЫРЫ» ККЛ

А.А. Дубинов<sup>1</sup>, Д.В. Ушаков<sup>2</sup>, А.А. Афоненко<sup>2</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, РФ,

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, РБ;

<sup>3</sup>Институт сверхвысококачастотной полупроводниковой электроники

им. В.Г. Мокерова, Москва, РФ

e-mail: sanya@ipmras.ru

За два десятка лет своего существования квантово-каскадные лазеры терагерцевого диапазона частот (ТГц ККЛ) прошли значительный путь от криогенных приборов с относительно невысокими значениями выходной мощности до мощных ТГц источников с термоэлектрическим охлаждением на элементе Пельтье. Однако существует диапазон частот (6 – 10.5 ТГц), где ККЛ не работают из-за сильного фононного поглощения в гетероструктурах, из которых они сделаны. Гетероструктуры GaInP/AlGaInP являются перспективной активной средой для решения задачи ККЛ с рабочим диапазоном частот 6 - 7 ТГц вследствие их высоких энергий оптических фононов.

В данной работе рассчитаны температурные зависимости усиления и поглощения на частотах 6.8 и 7 ТГц для ККЛ на основе GaInP/AlGaInP с 2 и 3 квантовыми ямами (КЯ) в каскаде, соответственно, и волноводом металл-металл. Кроме того, мы показываем, что возможности гетероструктур GaAs/AlGaAs с КЯ более широки, чем считалось ранее. Исследована возможность создания такого дизайна GaAs/AlGaAs ККЛ с двойным металлическим волноводом, который обеспечит генерацию с частотой большей 6 ТГц при температурах выше 77 К. Предложен зонный дизайн ККЛ с частотой генерации 5.7-6.3 ТГц и активной областью на основе 4 КЯ GaAs/Al<sub>0.14</sub>Ga<sub>0.86</sub>As. Результаты настоящего исследования открывают путь к созданию ККЛ для работы в значительной части области фононной полосы поглощения GaAs, недоступной для существующих ККЛ. Работа поддержана РФФ (№23-19-00436).

## SEMICONDUCTOR QUANTUM DOT LASERS WITH A SINGLE ASYMMETRIC BARRIER LAYER

C. Hammack<sup>1</sup>, L.V. Asryan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The University of Texas at Arlington, Arlington, TX 76019, USA

<sup>2</sup>Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, USA

e-mail: asryan@vt.edu

Conventional diode lasers suffer from electron-hole recombination in the optical confinement layer (OCL). This parasitic recombination outside of the laser's active region negatively impacts its operating characteristics by raising the threshold current, making it more temperature-sensitive (decreasing the characteristic temperature), and leading to a sublinear light-current characteristic. To suppress parasitic recombination, the addition of two asymmetric barrier layers (ABLs) in the OCL (one on each side of the active region) has been proposed earlier. Ideally, if the ABLs are properly tuned, parasitic recombination should be suppressed in the entire OCL. However, due to material constraints, it may be desirable to first manufacture a laser with only a single ABL that should suppress parasitic recombination only on one side of the OCL. In this work, we study the operating characteristics of quantum dot lasers with a single ABL. We show that, despite the limited improvement to output optical power, the addition of a single ABL significantly improves the temperature-stability of the laser – its characteristic

temperature is much higher than that of the conventional quantum dot laser. Our study thus justifies the concept of using even a single ABL in injections lasers to improve their operating characteristics.

## **ИНЖЕКЦИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ ДЛЯ МОЩНЫХ СУБ-НС ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР**

С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, И.В. Шушканов, Н.А. Пихтин  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, СПб, РФ

В рамках доклада рассмотрены современные подходы по интеграции источников лазерного излучения с фотонными интегральными схемами на основе структур кремний на изоляторе. Представлены достигнутые в мире результаты по созданию, как гибридных источников, когда связь с фотонной интегральной схемой обеспечивается посредством ввода излучения от отдельного лазерного источника, так и интегральные подходы. В рамках интегральных подходов рассмотрены гетерогенно–интегрированные технологии и технологии эпитаксиального роста, для которых также представлены основные конструкции и достигнутые в мире результаты.

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ**

О.В. Коренченко, В.А. Панарин, С.Н. Соколов, М.Ю. Старынин  
НПО «ИНЖЕКТ», Саратов, РФ

В докладе сообщается о новых видах полупроводниковых лазерных диодных (ЛД) модулей, выпускаемых ООО «НПП «ИНЖЕКТ»:

– модуль для биомедицинских и технических применений – красного диапазона спектра излучения  $SW$  6 Вт, модули с длиной волны 638 нм и световодным выводом излучения;

– модуль для спин-обменной оптической накачки благородных газов; модуль перспективен для применения в магнито–резонансной томографии,  $SW$  785 нм,  $\Delta\lambda = 0,1$  нм, 50 Вт;

– коллимированный ЛД модуль с выходной импульсной мощностью  $QCW$  50 кВт, 940 нм, 2 мс, 10 Гц для систем накачки твердотельных лазеров.

Приводится информация о практических результатах применения технологий лазерной обработки материалов излучением серийно выпускаемого мощного полупроводникового лазера: обсуждаются процессы термоупрочнения, наплавки, пайки, сварки пластмасс, автоматизированной сухой выкладки ленты из термопластичного полимерного композиционного материала (ПКМ) с локальным нагревом поверхности полупроводниковым технологическим лазером PLD–6.

## СТАБИЛЬНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ С НАНОРАЗМЕРНОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ

З.Н. Соколова<sup>1</sup>, Н.А. Пихтин<sup>1</sup>, С.О. Слипченко<sup>1</sup>, Л.В. Асрян<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, Россия

<sup>2</sup> Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, USA  
e-mail: zina.sokolova@mail.ioffe.ru

В гетеролазерах с наноразмерной активной и расширенной волноводной областями внутренние оптические потери зависят от тока накачки. Эта зависимость приводит к загибу (ролловеру) ватт-амперной характеристики и срыву лазерной генерации. Она также может привести к появлению дополнительного режима лазерной генерации и, следовательно, второй ветви в лазерных характеристиках.

Зависимость внутренних оптических потерь от тока инжекции обусловлена:  
а) зависимостью концентрации носителей заряда в волноводной области от тока;  
б) конечностью времени процесса захвата носителей заряда из волноводной области в низкоразмерную активную область.

В докладе представлен анализ устойчивости двух режимов генерации в полупроводниковых лазерах на квантовых ямах. Анализ основан на решении системы скоростных уравнений для носителей заряда и фотонов в лазерной структуре. Показано, что, в отличие от всегда устойчивого и, следовательно, наблюдаемого первого («обычного») режима генерации, второй («дополнительный») режим является неустойчивым и, следовательно, не может наблюдаться в стационарных условиях в рассмотренной лазерной структуре. Дополнительный режим может, однако, проявляться при высоких плотностях тока при импульсной накачке, в частности, в флуктуациях мощности излучения.

## ПРЕЦИЗИОННЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА ДЛЯ МОЩНЫХ ЛИНЕЕК ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ

А.А. Рубан, Е.В. Рубан А.Н. Козырев,

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

e-mail: A.Ruban.231@yandex.ru

В работе представлен прецизионный источник тока для мощных линеек лазерных диодов киловаттного диапазона, широко используемых как для накачки твердотельных лазеров, так и для лазерной подсветки непосредственно. Источник обеспечивает мощные линейки лазерных диодов последовательного соединения током с высокой точностью амплитуды, быстрыми фронтами с низким джиттером и произвольной программируемой последовательностью импульсов. Источник имеет два канала, которые могут быть использованы независимо для разных линеек, могут быть объединены для работы на одну линейку. Источник испытан с эквивалентной нагрузкой одного канала током до 6 А при напряжении до 600 В и длительности импульса до 10 мкс. Стабильность амплитуды тока в коротких импульсах не хуже 0.1%, длительность фронта не более 15 нс. Последовательность единичных и цугов импульсов программируется произвольно с шагом 2.5нс, джиттер фронтов в многоканальной системе не более 100 пс RMS. Источник тока лабораторного исполнения выполнен в формате Евромеханика 3U 2M, питание +12В. Оснащён интерфейсами Ethernet, USB, C-Link, LVDS, токовая петля, блокировка. Входит в состав линейки унифицированных электронных блоков управления спектрометрическим оборудованием.

## FOCUSED ION BEAM AS A TOOL FOR PROTOTYPING NEW DESIGNS OF SEMICONDUCTOR LASERS

M.I. Mitrofanov<sup>1,2</sup>, A.A. Beckman<sup>1</sup>, E.S. Kolodeznyi<sup>3</sup>, A.S. Payusov<sup>1</sup>,  
G.V. Voznyuk<sup>1</sup>, V.P. Evtikhiev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia, <sup>2</sup>SHM R&E Center, RAS, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup>ITMO University, St. Petersburg, Russia

e-mail: mitrofanov@mail.ioffe.ru

Development of new designs of semiconductor lasers is often necessary to use optical elements that require the use of submicron lithography for fabrication. Unfortunately, the standard lithography approach at the stage of prototyping is unreasonably expensive. Moreover, it is convenient to have opportunity to make changes to ready-made device. In this case, it is impossible to apply lithographic methods requiring the use of resist and planar surface. For solving above-mentioned problems, the method of direct lithography with a focused ion beam (FIB) is well suited. It allows forming a lithographic pattern with nanometer resolution in both metallic (contact) layer and semiconductor heterostructure without the use of masks. We demonstrate the application of direct focused ion beam lithography for realization of various designs optical elements for the modification of optical parameters of semiconductor laser resonators – distributed Bragg reflectors to the designing of single-mode quantum-cascade lasers (QCL); sub-wavelength textured layers to implement the emission of radiation through the surface in ring resonator QCL; second order grating on top (QCL) ring cavity for the mode selection; laser diodes (~1  $\mu\text{m}$  emission wavelength) with splitted Fabry-Perot resonator for the spectral mode tuning.

## ИМПУЛЬСНЫЙ ИЗЛУЧАЮЩИЙ МОДУЛЬ НА ОСНОВЕ МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ $\lambda = 905 \text{ нм}$ ДЛЯ ЛИДАРНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Д.А. Веселов, Ю.К. Кириченко, А.А. Климов, А.В. Лютецкий,  
С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: dmitriy90@list.ru

Представлена разработка компактного излучающего модуля на основе полупроводниковых лазеров, обеспечивающего генерацию оптических импульсов длительностью 7-9 нс с частотой следования импульсов до 1 МГц и пиковой мощностью более 100 Вт в диапазоне длин волн 905-910 нм. В ходе исследований отработывалась как лазерная часть с точки зрения оптимальной нагрузки электрической схемы, так и схемотехническая часть в виде одного или двух каналов формирования токовых импульсов на основе полевых GaN-транзисторов.

Показано, что предельные характеристики прибора на данный момент ограничены как параметрами используемых полевых транзисторов, так и паразитной индуктивностью контактов лазера. Дальнейшее повышение динамических и мощностных характеристик можно обеспечить за счёт установки кристалла полупроводникового лазера непосредственно на печатную плату, а также увеличения количества последовательно подключённых излучателей. Разработанный прибор может применяться для создания лидаров, дальномеров, систем активного видения и передачи данных по оптическому каналу в свободном пространстве.

## ГЕНЕРАЦИЯ ТОКА В ФОТОДИОДАХ ШОТТКИ Pd/InP В АТМОСФЕРЕ ВОДОРОДА

В.А. Шутаев<sup>1</sup>, В.Г. Сидоров<sup>2</sup>, Е.А. Гребенщикова<sup>1</sup>, Ю. П. Яковлев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ООО «АИБИ», 194021 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: vadimshutaev@mail.ru

Обнаружено новое явление – генерация тока в структурах Pd/InP, помещенных в водородную среду. В данной работе мы использовали диод Шоттки на основе структуры Pd/InP с очень тонким палладиевым слоем толщиной 25 нм. Исследование созданных структур проводилось в условиях короткого замыкания, т.е. без приложения внешнего напряжения. Измерялись токи короткого замыкания при 300 К в воздушной атмосфере, в вакууме и в среде с водородом без освещения и при освещении излучением светодиода с длиной волны в максимуме спектра 0,9 мкм, что соответствует краю поглощения в InP.

В водородной среде в темноте появляется ток величиной 4 мкА, т.е. через электрическую цепь каждую секунду проходит порядка  $3 \cdot 10^{13}$  электронов. Ток существует в электрической цепи и не изменяется по величине до тех пор, пока в окружающей структуре газовой среде имеется водород. Количество электронов, протекающих в электрической цепи, одного порядка с количеством атомов водорода, поглощённых палладием в структуре. Как полагают авторы, генерация тока в структурах Pd/InP вызвана ионизацией атомов водорода при взаимодействии их с палладием. Образующиеся при этом протоны и электроны разделяются полем барьера Шоттки и создают ток в электрической цепи.

На основе структур Pd/InP возможно создание генераторов тока нового типа.

## МИКРОДИСКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКЕ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ HgCdTe/CdHgTe С КВАЗИ-РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЗАКОНОМ ДИСПЕРСИИ ДЛЯ НОСИТЕЛЕЙ

С.В. Морозов

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

e-mail: more@ipmras.ru

Перспективным материалом в среднем ИК диапазоне являются гетероструктуры с квантовыми ямами на основе HgCdTe. На данный момент, вследствие подавления безызлучательной оже-рекомбинации (пороговой и беспороговой), которое реализуется за счёт квазигиперболического закона дисперсии носителей, продемонстрировано стимулированное излучение (СИ) на длинах волн от 2 до 31 мкм.

В данной работе в диапазоне от 4.1 мкм до 3.85 мкм сообщается о получении лазерного излучения (ЛИ) в микродисковых лазерах диаметром 20-50 мкм, используя структуры с КЯ  $\text{Hg}_{0.92}\text{Cd}_{0.08}\text{Te}/\text{Cd}_{0.75}\text{Hg}_{0.25}\text{Te}$ . При 230 К удалось идентифицировать с высокой точностью наблюдаемые пики в спектре ЛИ как моды шепчущей галереи. Анализ пороговой плотности мощности оптической накачки, показал, что порог составляет несколько десятков кВт/см<sup>2</sup>, что для 50 мкм микродиска соответствует интегральной мощности около 1 Вт, обеспечить которую возможно коммерческим лазером. Помимо этого, использование металлических масок при ионном травлении позволило получить микродисковые лазеры, излучение которых при 30 К наблюдалось на длинах волн в окрестности 22 и 25 мкм. Излучение в длинноволновом диапазоне в микродисковых

лазерах на основе структур с КЯ Hg(Cd)Te/CdHgTe продемонстрировано впервые.

Работа выполнена при поддержке НЦМУ «Центр фотоники», при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2022-316.

## **ЭПИТАКСИЯ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА InGaAlN РЕЗОНАНСНЫХ БРЭГГОВСКИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ**

А.В. Сахаров<sup>1,2</sup>, Д.С. Артеев<sup>1,2</sup>, А.А. Иванов<sup>1</sup>, Е.Е.Заварин<sup>1,2</sup>, В.В.Лундин<sup>1</sup>,  
А.Е. Николаев<sup>1</sup>, В.В. Чалдышев<sup>1</sup>, А.Ф. Цацульников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>НТЦ микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН,

Санкт-Петербург, Россия

e-mail: val@beam.ioffe.ru

Резонансные брэгговские отражатели (РБО), представляющие собой систему квази-двумерных экситонов (например, в квантовых ямах) расположенных на расстоянии обеспечивающих интерференцию света представляют интерес как с теоретической, так и практической точек зрения. В РБО на основе InGaAlN данные эффекты могут быть получены при комнатной температуре благодаря энергии связи экситона превышающей  $kT$ . Идеальный РБО предполагает строгую периодичность КЯ и идентичность экситонных состояний в них. В реальности же неизбежно присутствует пространственный беспорядок и неоднородное уширение.

В настоящей работе представлена возможность получения РБО в системе материалов InGaAlN и изучено влияние отклонения реально выращенной структуры от идеального дизайна на резонансное оптическое отражение в структурах с большим числом периодов. Определены параметры радиационного и нерадикационного затухания в КЯ GaN/AlGaIn и InGaIn/GaN. Проведен анализ факторов, ограничивающих количество реально реализуемых КЯ в экспериментальной структуре. Установлено, что существует критическая величина пространственного беспорядка, обратно пропорциональная числу периодов РБО.

## **НИЗКИЕ ТЕПЛОВЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР СО СВЯЗАННЫМИ ВОЛНОВОДАМИ ДЛЯ ДИОДНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ**

А.С. Паюсов<sup>1</sup>, Г.О. Корнышов<sup>1</sup>, А.А. Бекман<sup>1</sup>, Ю.М. Шерняков<sup>1</sup>,  
М.В. Максимов<sup>2</sup>, Н.Ю. Гордеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Академический университет им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: plusov@mail.ioffe.ru

Перегрев активной области полупроводниковых оптоэлектронных приборов является основным фактором, снижающим эффективность преобразования электрического тока в излучение в непрерывном режиме работы. Поэтому стабилизация температуры является одной из основных задач проектирования гетероструктуры для диодных излучателей. Необходимым условием уменьшения перегрева является снижение теплового и последовательного электрического сопротивлений гетероструктуры. В



настоящей работе обсуждаются подходы к уменьшению сопротивлений гетероструктуры на основе связанных волноводов. Показано, что, используя в гетероструктуре дополнительные волноводы без активной области, расположенные с n-стороны и оптически связанные с основным, можно смещать активную область к p-эмиттеру и уменьшить его толщину. Эффективность подхода подтверждена экспериментально для InGaAs/GaAs/AlGaAs гетероструктур. Проведён численный анализ вклада дополнительных волноводов в последовательное сопротивление InGaAs/GaAs/AlGaAs гетероструктуры с двумя дополнительными волноводами. Показано, что несмотря на увеличение толщины и количество гетерограниц за счёт встраивания дополнительных волноводов прирост последовательного сопротивления не превышает 5% от общего сопротивления смонтированного прибора.

Исследование выполнено при частичной поддержке гранта Российского научного фонда № 23-72-00038.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ И МНОГОМОДОВЫХ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ В РАМАНОВСКИХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРАХ**

Д.В. Петров, М.А. Костенко, И.И. Матросов, А.Р. Зарипов  
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
Томск, Россия  
e-mail: dpetrov@imces.ru

В ИМКЭС СО РАН (г. Томск) ведется разработка газоанализаторов, основанных на Рамановском рассеянии. Возможность одновременного определения всех молекулярных компонентов, концентрация которых превышает порог чувствительности спектрометра, задает перспективы применения таких устройств в области диагностики многокомпонентных газовых смеси, например: природный газ, биогаз, водородное топливо, атмосферный воздух, выдыхаемый воздух и многие другие среды.

В данной работе обсуждаются проблемы и варианты достижения высокой чувствительности за счет применения непрерывных твердотельных (вторая гармоника Nd:YAG) и многомодовых диодных лазеров синего диапазона длин волн. Приводятся разработанные оптические схемы для повышения эффективности использования лазерного луча, а также схема возбуждения рассеяния одновременно несколькими источниками излучения. Представлены достигнутые результаты в данном направлении и обозначены пути развития.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 19- 77-10046.

## **СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ДИОДЫ С ПОЛОСКОВЫМ ВОЛНОВОДОМ СКОЛЬЗЯЩЕГО ТИПА**

Н.Ю. Гордеев<sup>1</sup>, А.С. Паюсов<sup>1</sup>, Ю.М. Шерняков<sup>1</sup>, А.А. Бекман<sup>1</sup>,  
Г.О. Корнышов<sup>1</sup>, М.В. Максимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,

<sup>2</sup>Алферовский университет, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: gordeev@switch.ioffe.ru

Суперлюминесцентные диоды (СЛД) представляют большой научный интерес для изучения фундаментальных принципов излучения и усиления света в веществе. Практическое применение СЛД включает оптическую когерентную томографию, волоконные гироскопы, спектроскопию, оптической передачу данных и генерацию случайных чисел. СЛД работают в режиме усиления спонтанного излучения и характеризуются широким спектром излучения и высокой выходной оптической мощностью. Специфический режим работы СЛД обеспечивается использованием гетероструктур, подобных лазерным, в которых накачка превышает тока прозрачности, но лазерная генерация отсутствует за счёт подавления положительной обратной связи. В типичном для СЛД полосковом волноводе это достигается, например, использованием наклонного полоска и просветляющими покрытиями с экстремально малым коэффициентом отражения.

Нами предложена и экспериментально реализована новая простая и технологичная конструкция полоскового волновода, получившего название скользящего, позволяющая устранить формирование резонатора Фабри-Перо в СЛД. В работе обсуждается принцип действия, достоинства и пути оптимизации. Скользящий волновод апробирован и показал свою эффективность для суперлюминесцентных диодов с 5 и 7 слоями чирпированных квантовых яма-точек InGaAs/GaAs, излучающих в спектральном диапазоне 950–1150 нм.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-00038, <https://rscf.ru/project/23-72-00038/>.

## **ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОДИСКОВОГО ЛАЗЕРА С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ INAS/INGAAS/GAAS ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКЕ**

А.М. Надточий<sup>1</sup>, А.А. Караборчев<sup>1</sup>, К.А. Иванов<sup>1</sup>, Ю.А. Гусева<sup>2</sup>, М.М. Кулагина<sup>2</sup>,  
С.А. Блохин<sup>1,2</sup>, А.Е. Жуков<sup>1</sup>, Н.В. Крыжановская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
190008 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: al.nadtochy@mail.ioffe.ru

Работа посвящена исследованиям динамических характеристик микродискового лазера диаметром 12 мкм на основе пяти слоев квантовых точек (КТ) InAs/InGaAs/GaAs при оптической накачке. Возбуждение генерации микролазера производилось с использованием комбинации непрерывного лазера YLF:Nd с длиной волны 527 нм и импульсов лазера Ti:Sapphire длительностью 0.12 пс и длиной волны 780 нм. Регистрация люминесценции и генерации микролазера производилась с временным разрешением методом ап-конверсии (оптическое стробирование). Временное и спектральное

разрешение не превышали 0.2 пс и 15 нм соответственно.

Обнаружено, что возбуждение микролазера импульсом с умеренной энергией (менее 0.25 нДж) приводит к появлению импульса лазерной генерации длительностью около 100 пс на основном состоянии КТ и нескольких модах шепчущей галереи. Длительность лазерной генерации микродиска слабо зависит от уровня непрерывного или импульсного возбуждения, однако задержка генерации заметно возрастает (на ~100 пс) при снижении непрерывной накачки ниже порога.

Импульс генерации микролазера при воздействии значительно более короткого импульса накачки можно трактовать как импульсную характеристику лазерной системы. В рамках этой трактовки, с помощью преобразования Фурье рассчитана передаточная функция системы и ее модуль – амплитудно-частотная характеристика. Полоса пропускания системы (по уровню –3 дБ) составила 4.6 ГГц.

Представленный подход позволяет получить передаточную функцию системы в условиях, когда невозможно применить прямое исследование методом малосигнальной модуляции.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 22-72-10002).

### **InGaAs/GaAs МИКРОДИСКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ ИНТЕГРИРОВАННЫЕ С ВОЛНОВОДОМ И ВОЛНОВОДНЫМ ФОТОДЕТЕКТОРОМ**

Н.В. Крыжановская<sup>1</sup>, К.А. Иванов<sup>1</sup>, Н.А. Фоминых<sup>1</sup>, С.Д. Комаров<sup>1</sup>, И.С. Махов<sup>1</sup>,  
Е.И. Моисеев<sup>1</sup>, Ю.А. Гусева<sup>2</sup>, М.М. Кулагина<sup>2</sup>, С.А. Минтаиров<sup>2</sup>, Н.А. Калюжный<sup>2</sup>,  
Р.А. Хабибуллин<sup>3</sup>, Р.Р. Галиев<sup>3</sup>, А.Ю. Павлов<sup>3</sup>, К.Н. Томош<sup>3</sup>, А.Е. Жуков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИУ ВШЭ, г. Санкт-Петербург, 190121, ул. Союза Печатников, 16,

<sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая, 26,

<sup>3</sup>ИСВЧПЭ им. В.Г. Мокерова РАН, г. Москва, 117105, Нагорный проезд, 7

e-mail: nkryzhanovskaya@hse.ru

Исследованы полупроводниковые микродисковые лазеры, сопряженные с планарным волноводом, выполненные из одной эпитаксиальной структуры в едином технологическом процессе. Гетероструктура синтезирована методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений на подложке n<sup>+</sup>-GaAs. Активной областью является многослойный массив InGaAs/GaAs квантовых точек со спектральным максимумом вблизи 1.060 мкм. Исследованы лазеры диаметром 20–40 мкм, сопряженные с волноводом шириной 10 мкм в различных геометриях, что позволило регулировать степень нагружения (добротность) связи. Исследовано влияние эффективности связи мод резонатора лазера с волноводом на пороговые характеристики лазера и выводимую мощность излучения. Исследовано поглощение излучения микролазера в волноводе и его влияние на выходное излучение. Приложение прямого смещения позволило уменьшить поглощение (просветлить) в волноводе и тем самым повысить интенсивность излучения микролазера. Такая схема может использоваться для внешней модуляции лазерного излучения. Исследованы статические и динамические характеристики волноводных фотодетекторов с аналогичной поглощающей областью. Полосковые фотодиоды имели ширину 50 мкм и длину поглощающей области 92–400 мкм, спектральная полоса поглощения 0.9–1.1 мкм. Темновой ток равен 26 и 0.43 мкА/см<sup>2</sup> при смещении –20 и –5 В, соответственно, что является одним из лучших сообщенных значений. Предельное быстродействие ограничено RC и составило 5,6 ГГц. С помощью гибридной интеграции реализована оптопара с источником излучения в виде микродискового лазера, сопряженного с оптическим волноводом и с приемником излучения в виде волноводного фотодетектора.

## **МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВАЯ ЭПИТАКСИЯ МЕТАМОРФНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ InAs/InGaAs, ИЗЛУЧАЮЩИМИ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

С.В. Сорокин, Г.В. Климко, И.В. Седова, А.И. Галимов,  
Ю.В. Серов, Д.А. Кириленко, Н.Д. Прасолов, А.А. Торопов  
<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: sorokin@beam.ioffe.ru

В настоящей работе представлены результаты исследований гетероструктур с квантовыми точками (КТ) InAs/InGaAs, выращенными методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на поверхности метаморфных буферных слоев InGaAs с линейным профилем изменения состава на подложках GaAs(001). Обсуждаются основные подходы к изготовлению и элементы конструкции метаморфных гетероструктур, способствующие увеличению длины волны излучения из КТ при криогенных температурах. Приведены результаты измерений параметров выращенных гетероструктур методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) (при формировании дополнительного слоя КТ на поверхности структур) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в геометрии поперечного сечения. Показано, что в отличие от классической системы КТ InAs/GaAs, в данной системе материалов существует тенденция к формированию квантовых объектов, вытянутых вдоль выделенного направления [1-10] (т.н. квантовых «штрихов»), что обусловлено асимметричной поверхностной миграцией In в различных кристаллографических направлениях. Показано, что поверхностная плотность «мелких» КТ и квантовых «штрихов» составляет  $\sim(2-4)\times 10^{10}$  см<sup>-2</sup>. Тем не менее, в спектрах низкотемпературной (T = 10К) микро-фотолюминесценции (микро-ФЛ) в широком диапазоне длин волн (от 1.3 мкм до 1.5 мкм) наблюдаются тонкие линии, связанные с излучением из отдельных КТ.

На основе данных измерений методами АСМ и ПЭМ проведена оценка размеров и формы КТ и продемонстрировано хорошее соответствие с параметрами, ранее опубликованными в литературе. В работе также обсуждаются перспективы применения метаморфных гетероструктур для создания источников одиночных фотонов телекоммуникационного С-диапазона (1530-1560 нм).

## **ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОМОДОВЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩИЕ ЛАЗЕРЫ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 89X НМ**

М.А. Бобров<sup>1</sup>, С.А. Блохин<sup>1</sup>, Я.Н. Ковач<sup>1</sup>, А.А. Блохин<sup>1</sup>, Н.А. Малеев<sup>1</sup>, А.Г. Кузьменков<sup>1</sup>,  
М.Н. Марчий<sup>1</sup>, А.П. Васильев<sup>2</sup>, В.М. Устинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия,

<sup>2</sup>НТЦ Микроэлектроники и субмикронных гетероструктур, Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: bobrov.mikh@gmail.com

В работе представлены результаты исследований шумовых характеристик одномодовых вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) спектрального диапазона 89X нм. Частотные зависимости амплитудных шумов демонстрируют поведение, характерное для 1/f-шума, с четко-выраженным переходом в белый шум при частотах выше 10 кГц. Характер поведения амплитудных шумов с ростом выходной оптической мощности (тока

накачки) зависит от частоты детектирования: при частотах выше 10 кГц наблюдается ярко-выраженное обратно-пропорциональное падение шумов с насыщением на уровне  $-135$  дБ/Гц, тогда как на меньших частотах реализуется U-образная зависимость. Используя балансную схему детектирования поляризационных шумов, удалось обнаружить, что характер их частотной зависимости близок к поведению амплитудных шумов. Однако, в отличие от последних, резкого увеличения поляризационных шумов вблизи порога генерации не наблюдается, а зависимости шумов от мощности имеют U-образный вид. Тем не менее в диапазоне частот 10-100 кГц поляризационные шумы оказываются ниже  $-120$  дБ/Гц. Исследования фазовых шумов ВИЛ методом преобразования флуктуации частоты лазера в флуктуации интенсивности показали, что характер поведения фазовых шумов в диапазоне частот 1-10000 Гц имеет вид  $1/f$ -шума, тогда как в диапазоне частот 10-100 кГц насыщается на уровне  $0.4 - 1E9$  Гц<sup>2</sup>/Гц в зависимости от превышения тока над пороговым. Результаты исследований важны для создания лазерных излучателей для компактных квантовых сенсоров на основе паров атомов  $^{133}\text{Cs}$ .

### III-N ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ПОДЛОЖКАХ КРЕМНИЯ ДИАМЕТРОМ ДО 200 ММ

А.Ф. Цацульников<sup>2</sup>, В.В. Лундин<sup>1</sup>, А.В. Сахаров<sup>1,2</sup>, А.Е. Николаев<sup>1</sup>, Е.Е. Заварин<sup>1,2</sup>,  
Д.С. Артеев<sup>1,2</sup>, С.Н. Родин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: andrew@beam.ioffe.ru

Разработано семейство установок МОС-гидридной эпитаксии, обеспечивающих выращивание III-N гетероструктур на подложках кремния диаметром до 200 мм для изготовления различных типов приборных гетероструктур, включая СВЧ и силовые транзисторы. Установки позволяют реализовать необходимые технологические возможности для создания III-N гетероструктур различных типов, включая условия роста слоев  $(\text{In}, \text{Al}, \text{Ga})\text{N}$ , возможность создания изолирующего буферного слоя с помощью его легирования атомами углерода и/или железа, нанесение пассивирующего  $\text{Si}_3\text{N}_4$  покрытия на поверхность гетероструктуры. Приведены результаты разработки технологии III-N гетероструктур на подложках максимального диаметра до 200 мм.

Исследован эпитаксиальный рост гетероструктур  $\text{GaN}/\text{AlN}/(\text{Al}, \text{Ga})\text{N}$  методом газофазной эпитаксии на подложках Si(111) с барьерными слоями  $(\text{Al}, \text{Ga})\text{N}$  начиная от сверхтонких барьеров толщиной до 10 нм до структур с барьерными слоями толщиной до 25-27 нм. Исследованы структурные и электрофизические параметры гетероструктур в зависимости от условий выращивания и последовательности слоев.

## ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩИЕ ЛАЗЕРЫ ДЛЯ КОМПАКТНЫХ АТОМНЫХ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ АТОМОВ $^{133}\text{Cs}$

С.А. Блохин<sup>1</sup>, Я.Н. Ковач<sup>1</sup>, М.А. Бобров<sup>1</sup>, А.А. Блохин<sup>1</sup>, Н.А. Малеев<sup>1</sup>, А.Г. Кузьменков<sup>1</sup>,  
М.Н. Марчий<sup>1</sup>, А.П. Васильев<sup>2</sup>, В.М. Устинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>НТЦ Микроэлектроники и субмикронных гетероструктур, Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: blokh@mail.ioffe.ru

В настоящей работе рассмотрены проблемы создания вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) спектрального диапазона 89X нм, которые одновременно должны обеспечивать одномодовый режим генерации, линейно-поляризованное излучение, узкую спектральную линию излучения, возможность прецизионной настройки на длину волны линии D1  $^{133}\text{Cs}$ , высокое быстродействие при малых токах, низкие амплитудные, поляризационные и фазовые шумы. Специальная конструкция ВИЛ с внутрирезонаторными контактами и токовой оксидной апертурой ромбовидной формы способствует фиксации направления поляризации (подавление ортогонально-поляризованной моды более 15 дБ) в одномодовом режиме генерации. Применение низкодобротных композиционных брэгговских решеток позволяет получать ширину линии излучения менее 50 МГц даже при высоких потерях на вывод и одновременно избежать роста внутренних оптических потерь на свободных носителях. С помощью оптического частотного дискриминатора для преобразования флуктуации частоты лазера в флуктуации интенсивности было выявлено, что в диапазоне частот 10-100 кГц фазовые шумы ВИЛ оказываются ниже  $1\text{E}9 \text{ Гц}^2/\text{Гц}$ . Анализ амплитудных и поляризационных шумов показал, что в диапазоне 10-100 кГц и выходной оптической мощности более 0.5 мВт амплитудные шумы не превышают -130 дБ/Гц, поляризационные шумы оказываются ниже -125 дБ/Гц. Быстродействие исследуемых ВИЛ ограничено низкой паразитной частотой отсечки из-за высокой емкости области с оксидно-блокирующим слоем, поэтому уменьшение топологических размеров позволяет уверенно обеспечить частоту эффективной модуляции более 4,6 ГГц при токах ~1-2 мА. Достигнутые характеристики соответствуют передовому мировому уровню.

## ИСТОЧНИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ $\text{A}^3\text{V}^5$ ГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ ФОТОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПб, РФ  
e-mail: serghpl@mail.ioffe.ru

В рамках доклада рассмотрены современные подходы по интеграции источников лазерного излучения с фотонными интегральными схемами на основе структур кремний на изоляторе. Представлены достигнутые в мире результаты по созданию, как гибридных источников, когда связь с фотонной интегральной схемой обеспечивается посредством ввода излучения от отдельного лазерного источника, так и интегральные подходы. В рамках интегральных подходов рассмотрены гетерогенноинтегрированные технологии и технологии эпитаксиального роста, для которых также представлены основные конструкции и достигнутые в мире результаты.

## **ЗАВИСИМОСТЬ ТОКА ПРОЗРАЧНОСТИ ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ СТРУКТУР ПЕРЕХОДНОЙ РАЗМЕРНОСТИ - InGaAs/GaAs КВАНТОВЫХ ЯМА-ТОЧЕК**

Г.О. Корнышов<sup>1</sup>, А.С. Паюсов<sup>1</sup>, А.А. Бекман<sup>1</sup>, Н.Ю. Гордеев<sup>1</sup>, С.А. Минтаиров<sup>1</sup>,  
Н.А. Калужный<sup>1</sup>, М.В. Максимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,

<sup>2</sup>Алферовский университет, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: gk@mail.ioffe.ru

Ток прозрачности является одной из важнейших характеристик оптоэлектронных устройств и достигается в момент, когда расстояние между квазиуровнями Ферми для электронов и дырок становится равным энергии фотона. Поскольку положение квазиуровня Ферми зависит от концентрации носителей и плотности состояний, зависимость тока прозрачности от длины волны излучения зависит от размерности структуры. Недавно был разработан новый тип гетероструктур, получивший название квантовые яма-точки InGaAs (КЯТ). В отличие от квантовых ям (2D) и квантовых точек (0D), КЯТ структуры можно рассматривать как наноструктуры смешанной размерности (0D/2D). В данной работе обсуждается методика измерения спектральной зависимости тока прозрачности и результаты, полученные для гетероструктур с InGaAs/GaAs квантовыми ямами и квантовыми яма-точками спектрального диапазона 1-1.1 мкм. Полученная зависимость демонстрирует процесс заполнения активной области носителями с ростом плотности тока и позволяет оценить инверсию заселенности в активной среде. Экспериментальная методика и результаты могут быть использованы для создания и исследования квантоворазмерных активных областей поливолнового типа, например, чирпированных и туннельно-связанных, для расширения спектра излучения лазеров и суперлюминесцентных диодов.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-72-00038, <https://rscf.ru/project/23-72-00038/>.

## **ДВУХУРОВНЕВАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ЛАЗЕРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМА-ТОЧКАМИ**

А.А. Бекман<sup>1</sup>, Г.О. Корнышов<sup>1</sup>, Ю.М. Шерняков<sup>1</sup>, А.С. Паюсов<sup>1</sup>, А.А. Харченко<sup>2</sup>,  
Н.Ю. Гордеев<sup>1</sup>, М.В. Максимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,

<sup>2</sup>Академический университет им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: spbgate21@gmail.com

Исследование посвящено процессу переключения длины волны лазерной генерации при изменении тока в полупроводниковых лазерах с активной областью на основе наноструктур нового типа - InGaAs/GaAs квантовых яма-точек (КЯТ). После достижения пороговых условий возникает генерация на основном состоянии и фундаментальной оптической моде. При увеличении тока существует область одновременной генерации на основном и возбужденном состояниях. При дальнейшем росте тока генерация на основном состоянии прекращается и наблюдается генерация только на возбужденном состоянии, при этом дальнейшее поле излучения соответствует второй вертикальной моде. Данный эффект обусловлен ограниченной скоростью релаксации носителей с основного на возбужденное состояние.

Показано, что в лазерах с КЯТ порог генерации на возбужденном состоянии выше, чем в лазерах с квантовыми ямами, и генерация на возбужденном не наблюдается вплоть до плотностей тока инжекции  $48 \text{ кА/см}^2$ . Уменьшение коэффициента оптического ограничения приводит к снижению порога генерации на возбужденном состоянии. В лазерах с узким гребневым волноводом шириной 4 мкм генерация на возбужденном состоянии наблюдается в более длинных резонаторах и при меньших пороговых плотностях тока, чем в лазерах с широким полоском. Данный эффект объясняется особенностью оптических мод, обусловленной двумерным оптическим ограничением в гребневом волноводе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ № 24-12-00358.

## **ГИБРИДНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО НАГРЕВА И КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВАТЕЛЕЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

А.В. Поволоцкий<sup>1</sup>, Д.А. Солдатова<sup>2</sup>, А.А. Тыщенко<sup>1</sup>, А.В. Шмакова<sup>1</sup>,  
Д.А. Лукьянов<sup>1</sup>, А.С. Конев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

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

e-mail: alexey.povolotskiy@spbu.ru

Настоящая работа посвящена разработке молекулярно-плазмонных гибридных наноструктур на основе наночастиц золота и порфиринов. Наночастицы формируются методом лазерной абляции в воде, что обеспечивает их высокую химическую чистоту, и демонстрируют эффективное поглощение света в видимом диапазоне за счет поверхностных плазмонов. Таким образом обеспечивается эффективная передача энергии оптического излучения в нагрев наночастиц и, как следствие, нагрев окружающей среды. Все современные работы по использованию оптических нано-нагревателей основаны на регистрации средней по объему температуры материалов, в которые помещены наночастицы. Температура же самих наночастиц никак не измеряется. Это приводит к локальному перегреву материалов в ближайшем окружении наночастиц, что неприемлемо в таких областях, как фотомедицина. Поэтому в настоящей работе для измерения температуры непосредственно наночастиц предлагается использовать люминесцентные термометры на основе порфиринов, входящих в состав гибридных наноструктур. Таким образом, получены гибридные наносистемы, которые при накачке одним оптическим источником осуществляют локальный нагрев и измерение температуры наноагревателей с точностью не менее  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ .



## УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ ШОТТКИ НА ОСНОВЕ НЕМТ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaN/GaN

Б.Д. Урманов<sup>1</sup>, А.В. Нагорный<sup>1</sup>, Е.В. Луценко<sup>1</sup>, Т.Б. Сахарова<sup>2,3</sup>, Г.Г. Перадзе<sup>3</sup>,  
Л.П. Саникидзе<sup>3</sup>, Т.Ю. Абашидзе<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68-2, Минск, Беларусь

<sup>2</sup> Тбилисский Государственный Университет им. И. Джавахишвили, Институт  
Прикладной Полупроводниковой Технологии, пр. Чавчавадзе 13, Тбилиси, Грузия

<sup>3</sup> Институт Микро и Наноэлектроники, пр. Чавчавадзе 13, Тбилиси, Грузия  
e-mail: b.urmanov@ifanbel.bas-net.by

На основе  $Al_{0.27}Ga_{0.73}N(30 \text{ нм})/GaN(2 \text{ мкм})$  гетероструктур, выращенных на подложках  $Al_2O_3$ , созданы ультрафиолетовые (УФ) фотодиоды различного диаметра с полупрозрачным контактом Шоттки с внутренним или внешним контактом. Металлизация омических контактов Ti/Al/Ni/Au и полупрозрачного барьера Шоттки Ni/Au была получена методом электронно-лучевого напыления. Формирование Омических контактов осуществлялось отжигом в диффузионной печи (780 – 900 °С, 30 мин) в атмосфере азота при давлении 40 – 375 мм рт. ст. Барьеры Шоттки отжигались в тех же условиях при 400°С.

Исследование fotocувствительности, ВАХ и темнового тока проводились на стенде с зондовой станцией, перестраиваемым по длине волны источником излучения и источником-измерителем. Показано, что при низких напряжениях обратного смещения (до 1 В) фотодиоды имеют классическую ВАХ, зависящую от интенсивности облучения. Спектр fotocувствительности представляет собой полосу 245 - 295 нм по максимуму (225 – 305 нм по полувысоте) с медленно растущей с увеличением длины волны чувствительностью до 23 - 25 мА/Вт в максимуме. Дальнейшее повышение напряжения обратного смещения (более 2 В) приводит к резкому увеличению как темнового тока, так и фототока до напряжения обратного смещения 7 В. Далее идет медленное повышение значений темнового и фототока вплоть до напряжений пробоя. При этом, величина и спектр фототока трансформируются. Появляется полоса, обусловленная поглощением в GaN излучения, прошедшего AlGaN. Появляется и доминирует полоса фототока, обусловленная поглощением на хвосте плотности состояний GaN. Обсуждаются причины наблюдаемого поведения спектральной чувствительности.

## ВОЛНОВОДНЫЕ ИК ЛАЗЕРЫ С ВОЛОКОННЫМ ВЫВОДОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Б.А. Кузяков

Лазерная Ассоциация РФ, РТУ МИРЭА, г. Москва, РФ

boris.kuzyakov@yandex.ru

Отличие волноводных газоразрядных лазеров состоит в наличии полого диэлектрического волновода между зеркалами, который выполняет несколько функций. С одной стороны, его внутренняя поверхность ограничивает объем, заполненный активной средой, с другой стороны, он служит каналом, по которому распространяется лазерное излучение, является составной частью волноводного резонатора и определяет модовый состав излучения. Среди преимуществ  $CO_2$  – ВЛ, выделяются главные: компактность; высокое качество выходного излучения; высокая надежность; большой ресурс работоспособности. Наряду с этим, теоретически и экспериментально были исследованы частотные зависимости интенсивности спонтанного и вынужденного

излучений молекулы  $\text{CO}_2$  в компактном волноводном лазере при модуляции плотности тока накачки активной среды. Рассматривалось влияние компонентов газовой смеси  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}$  на эффективное время жизни верхнего лазерного уровня  $\tau_{\text{эф}}$  молекулы  $\text{CO}_2$ . Измеренные модуляционные характеристики позволили определить частотный диапазон модуляции мощности выходного излучения.

Волноводная трубка  $\text{CO}_2$ -ВЛ может быть изготовлена из различных конструкционных материалов, таких как молибденовое стекло, кварц, керамика  $\text{BeO}$ , керамика  $\text{BN}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также на основе структуры «металл – диэлектрик», в которой в качестве подложки могут использоваться медь, алюминий, бронза, нержавеющая сталь, алюминий и другие металлы и сплавы, а в качестве диэлектрика - слой селективного материала. В настоящее время, разработаны волоконные световоды среднего ИК диапазона высокого качества, используя халькогенидные стекла. Комбинирование волноводного лазера с волоконными световодами среднего ИК диапазона привело к созданию высокоэффективной системы, находящей применение в решении широкого спектра научных задач как в технике, так и в медицине.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИЛЬНОГО СВЕТОИНДУЦИРОВАННОГО ДИХРОИЗМА В ПАРАХ РУБИДИЯ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ МАГНИТНЫХ РЕЗОНАНСОВ МЕТОДАМИ ХАНЛЕ И БЕЛЛА-БЛУМА**

А.О. Макаров<sup>1,2</sup>, В.И. Вишняков<sup>1</sup>, К.С. Козлова<sup>1,2</sup>,  
Д.В. Бражников<sup>1,2</sup>, А.Н. Гончаров<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия,

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия,

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет,

Новосибирск, Россия

e-mail: werklora@mail.ru

Атомные магнитометры с оптической накачкой (МОН) являются высокочувствительными квантовыми сенсорами магнитного поля, представляющими большой интерес для медицинской диагностики (магнитная энцефало- и кардиография), поиска полезных ископаемых, проведения прецизионных экспериментов из области фундаментальной физики. Для ряда приложений миниатюризация, снижение энергопотребления и тепловыделения сенсорной головки МОН имеет принципиальное значение.

В работе предложены методы регистрации магнитооптических резонансов (МОР) в миниатюрных ( $\sim 0.1 \text{ см}^3$ ) ячейках с парами  $^{87}\text{Rb}$ , резонансно взаимодействующих с излучением диодного лазера (795 нм). Первый метод представляет собой развитие метода Белла-Блума для скалярных измерений магнитного поля с оптической накачкой атомов амплитудно-модулированным светом эллиптической поляризации в комбинации с поляриметрической техникой регистрации МОР.

Второй метод основан на эффекте Ханле – резонансы пересечения уровней в нулевом магнитном поле, – с использованием дифференциальной техники регистрации резонансов в изменении поляризации излучения. Оба метода позволяют наблюдать высококачественные МОР при температуре не более  $80^\circ\text{C}$ . Оценка предельно достижимой чувствительности МОН находится в диапазоне  $10 - 100 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ .

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-12-00195).

## **МОЩНЫЙ 532 НМ СУБНАНОСЕКУНДНЫЙ Nd:YAG/Cr:YAG МИКРОЧИП-ЛАЗЕР**

М.Д. Яковин<sup>1</sup>, Д.В. Яковин<sup>1</sup>, А.В. Грибанов<sup>1</sup>, П.Д. Кораблин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматки и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия  
e-mail: m.d.yakovin@mail.ru

Разработан компактный микрочип-лазер с высокой пиковой мощностью и энергией в импульсе, работающий в широком температурном диапазоне для предприятий электронной промышленности. Благодаря использованию в качестве источника накачки мультиволновой лазерной диодной линейки, лазер не требует сложных схем термостабилизации. Система коллимации по быстрой оси, разработанная для всех линеек лазерных диодов, обеспечивает эффективную и стабильную работу. Продемонстрирована возможность применения массива мультиволновых лазерных диодов в качестве источника накачки микрочипового Nd:YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности на основе насыщающегося поглотителя Cr:YAG. При частоте следования импульсов лазерной диодной матрицы накачки 20 Гц и длительности 300 мкс средняя выходная мощность лазера составляет более 120 мВт на длине волны 1064 нм. Энергия в импульсе генерации более 6 мДж на  $\lambda=1064$  нм и 1,5 мДж на  $\lambda=532$  нм после преобразования в нелинейном кристалле LBO при о-е-о синхронизме ( $\theta=21.5^\circ$ ,  $\phi=90^\circ$ ). Длительность импульса на  $\lambda=1064$  нм составила 200 пс, что соответствует пиковой мощности 30 МВт.

## **ГИБРИДНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ В ОПТИКЕ, СЕНСОРИКЕ И БИОМЕДИЦИНЕ**

М. Артемьев, Д. Муравский, П. Малаховский, Р. Власовец, В. Грибовская

Учреждение Белорусского государственного университета

«Научно-исследовательский институт физико-химических проблем»

e-mail: m\_artemyev@yahoo.com

В докладе рассматриваются различные типы оптически активных гибридных материалов на основе коллоидных квантовых точек соединений АІВVI и др. в составе комплексов с плазмонными наночастицами, диэлектрическими микросферами, органическими красителями и биомолекулами, в полимерных пленках и коллоидных растворах. Обсуждается влияние структуры гибридных материалов и комплексов на люминесцентные свойства квантовых точек и коллективные эффекты в гибридных ансамблях, а также различные аспекты практического использования гибридных материалов и комплексов на основе коллоидных люминесцентных квантовых точек.

## ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХЦЕНТРОВЫХ НАНОЧАСТИЦ $Gd_2O_3:Tb^{3+}/Eu^{3+}$ ДЛЯ ЗАДАЧ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

М.А. Курочкин<sup>1</sup>, Д.В. Мамонова<sup>1</sup>, В.А. Медведев<sup>1</sup>, И.Е. Колесников<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7/9,  
Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: ilya-kolesnikov@mail.ru

Люминесцентная термометрия является одним из наиболее перспективных методов дистанционного определения температуры благодаря своей неинвазивности, быстрому времени отклика, хорошему пространственному и температурному разрешению. Люминесцентные термометры позволяют измерять температуру как в сложных условиях окружающей среды (коррозионные среды, высокие электромагнитные поля, быстро движущиеся объекты), так и работать с миниатюрными объектами (микроэлектроника, интегральная оптика, микрофлюидика). Данное исследование посвящено реализации люминесцентной термометрии на основе оксидных наночастиц, содержащих два типа ионов редкоземельных металлов –  $Tb^{3+}$  и  $Eu^{3+}$ .

В качестве температурно-чувствительного люминесцентного параметра было использовано соотношение интенсивностей переходов в ионах  $Tb^{3+}$  ( $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ ) и  $Eu^{3+}$  ( $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$ ). В работе рассмотрено две дисперсных системы: солегирированные частицы ( $Gd_2O_3:Tb^{3+}$ ,  $Eu^{3+}$ ) и механическая смесь частиц ( $Gd_2O_3:Tb^{3+} + Gd_2O_3:Eu^{3+}$ ). Изучен механизм взаимодействия ионов  $Tb^{3+}$  и  $Eu^{3+}$  и вероятность передачи энергии между ними в различных дисперсных системах. В качестве демонстрации возможности использования предложенных люминесцентных термометров для задач микроэлектроники проведено измерение температуры модельных объектов: резистора на печатной плате и микрочипа ATmega328P на плате Arduino Uno.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-79-10018. Экспериментальные исследования проведены в РЦ ОЛМИВ, РДМИ, МРЦ-НТ, ТИКМИ (Научный Парк СПбГУ).

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ АЗВ5

И.В. Седова, Т.В. Львова, С.В. Сорокин, М.В. Лебедев  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе  
e-mail: irina@beam.ioffe.ru

Рассматриваются процессы взаимодействия поверхностей различных полупроводниковых соединений АЗВ5 с растворами сульфидов натрия и аммония. Показано, что практически во всех сульфидных растворах происходит не только эффективное удаление оксидного слоя с поверхности полупроводников, но и, как правило, формирование сульфидного пассивирующего слоя, модифицирующего электронную структуру поверхности полупроводника так, что происходит перезакрепление (pinning) уровня Ферми относительно краев зон полупроводника, снижение скорости поверхностной безызлучательной рекомбинации, а также изменение энергии ионизации/электронного сродства. Изменение электронной структуры поверхности происходит за счет модификации спектра поверхностных состояний и дипольного момента поверхности. Установлено, что механизм химических реакций, происходящих на границе

полупроводник/раствор, определяется составом сульфидного раствора, давая тем самым возможность управлять электронной структурой формирующейся поверхности. Данная технология может использоваться для улучшения характеристик полупроводниковых лазеров, фотоприемников, а также для изменения структуры полупроводниковых интерфейсов.

## **ВЛИЯНИЕ СОСТАВА МАТРИЧНОГО СЛОЯ НА ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК InGaP(As), СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПЯТОЙ ГРУППЫ**

В.В. Андриушкин<sup>1,2</sup>, И.И. Новиков<sup>1,2</sup>, А.Г. Гладышев<sup>1,2</sup>, А.В. Бабичев<sup>1,2</sup>, Д.С. Папылев<sup>1</sup>,  
В.Н. Неведомский<sup>3</sup>, Е.С. Колодезный<sup>1</sup>, Л.Я. Карачинский<sup>1,2</sup>, А.Ю. Егоров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия,

<sup>2</sup> ООО «Коннектор Оптикс», Санкт-Петербург, Россия,

<sup>3</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: vvandriushkin@itmo.ru

В настоящей работе представлены результаты исследований влияния состава матричного слоя в гетероструктурах GaAs/AlGaAs/InGaP/InGaAs на оптические свойства квантовых точек (КТ) InGaP(As), сформированных методом замещения фосфора на мышьяк в процессе эпитаксиального роста методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Максимум спектров ФЛ сформированных массивов КТ лежит в диапазоне 1027–1195 нм при комнатной температуре в зависимости от конструкции гетероструктуры. Проведен анализ влияния на спектры фотолюминесценции (ФЛ), сформированных в гетероструктурах массивов КТ, состава слоев InGaAs толщиной 5 нм использованных в качестве прикрывающего КТ слоя, а также состава слоя - поверхности осаждения трансформируемого в КТ слоя InGaP. Показано, что использование слоя  $\text{In}_{0,17}\text{Ga}_{0,83}\text{As}$  в качестве прикрывающего КТ слоя приводит к длинноволновому сдвигу максимума ФЛ на 59 нм, при этом использование данного слоя в качестве поверхности осаждения трансформируемого в КТ слоя InGaP не оказывает существенного влияния на длину волны излучения КТ. Увеличение мольной доли InAs до 0,23 в прикрывающем слое InGaAs приводит к длинноволновому сдвигу максимума спектра ФЛ КТ на 108 нм. Поверхностная плотность КТ, сформированных в матричном слое GaAs, полученная методом просвечивающей электронной микроскопии, составляет  $1,3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект тематики научных исследований №2019-1442 (код научной темы FSER-2020-0013).

## **СПЕЦИФИКА ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СИНЕЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА НА РАКОВЫЕ И НЕТРАНСФОРМИРОВАННЫЕ КЛЕТКИ В УСЛОВИЯХ IN VITRO**

В.Ю. Плавский, А.И. Третьякова, Л.Г. Плавская, О.Н. Дудинова, А.Д. Свечко,  
Р.К. Нагорный, А.В. Микулич, А.Н. Собчук, Т.С. Ананич, Н.Д. Прокопенко,  
С.В. Якимчук, И.А. Леусенко

Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68-2, Минск, Беларусь  
e-mail: v.plavskii@ifanbel.bas-net.by

Способность оптического излучения синей области спектра низкой интенсивности ( $0.5-100 \text{ мВт/см}^2$ ) ингибировать рост раковых клеток в настоящее время практически не вызывает сомнения. При этом в подавляющем числе исследований констатируется, что инактивирующее действие синего света более выражено в отношении раковых клеток по сравнению с нормальными. Однако причины наблюдаемых различий в реакции раковых и нормальных клеток на воздействие синего света не выяснены. В настоящей работе впервые показано, что причиной повышенной чувствительности раковых клеток к действию синего света являются более высокие концентрации содержащихся в них эндогенных порфириновых сенсбилизаторов, что подтверждено методами флуоресцентного анализа. Это приводит к более высоким уровням светоиндуцированного образования в раковых клетках активных форм кислорода, регистрируемых с помощью хемилюминесценции, и более высокой скорости светоиндуцированного снижения метаболической активности раковых клеток по сравнению с нормальными. Об определяющей роли эндогенных порфиринов в эффектах сенсбилизации свидетельствуют более высокая скорость фотоинактивации клеток и более интенсивный хемилюминесцентный сигнал при воздействии на клетки лазерного излучения с длиной волны  $\lambda=405 \text{ нм}$ , соответствующей максимуму спектра поглощения порфиринов и локальному минимуму в спектре поглощения флавинов, по сравнению с  $\lambda=445 \text{ нм}$ , соответствующей максимуму спектра поглощения флавинов.

## **СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ Al-СОДЕРЖАЩИХ И БЕЗАЛЮМИНИЕВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР**

Н.В. Гультиков, С.Ю. Гаврилов, А.Ю. Андреев, И.В. Яроцкая,  
К.Ю. Телегин, А.А. Мармалюк, М.А. Ладугин  
АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, Россия  
e-mail: nikita.gultickov@yandex.ru

В настоящей работе представлены результаты сравнительного анализа спектров фотолюминесценции и внутреннего квантового выхода люминесценции квантовых ям полупроводниковых гетероструктур для мощных лазерных источников спектрального диапазона 780-980 нм на основе систем материалов, содержащей и не содержащей Al. Исследуемые полупроводниковые гетероструктуры были сформированы методом МОС-гидридной эпитаксии. В процессе изготовления образцов проводилась оптимизация таких технологических режимов, как температура и скорость роста, отношение исходных компонентов, для получения максимума интенсивности фотолюминесценции. Обнаружено, что для спектрального диапазона 780-850 нм ширина спектра для Al-содержащих гетероструктур составляла около 20 нм, в то время как для безалюминиевых – около 30 нм. Данное отличие обусловлено тем, что получение квантовых ям

безалюминиевых гетероструктур осложнено такими физико-химическими процессами, как, например, сегрегация атомов In и протекание обменных реакций между As и P. Несмотря на это более высокую интенсивность фотолюминесценции показывают именно безалюминиевые гетероструктуры. Интенсивности отличаются примерно в 10-30 раз. Однако для спектрального диапазона 880-980 нм, более высокую интенсивность фотолюминесценции и внутренний квантовый выход люминесценции имеют Al-содержащие гетероструктуры. Отличие не столь значительно, как для предыдущего спектрального диапазона. Интенсивности фотолюминесценции отличаются в 1.5-2 раза.

## **ЛАЗЕРНЫЕ ДИОДНЫЕ МОДУЛИ С КИЛОГЕРЦОВОЙ ШИРИНОЙ ЛИНИИ ГЕНЕРАЦИИ В РЕЖИМЕ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ**

В.В. Шестак, К.Б. Микитчук, Н.З. Капуза, А.Л. Чиж  
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,  
пр. Независимости 68-1, г. Минск, Беларусь  
e-mail: chizh@oelt.basnet.by

В работе предлагается метод уменьшения ширины линии генерации лазерного диодного модуля, основанный на использовании режима оптической самосинхронизации лазерного излучения. Режим оптической самосинхронизации реализован с помощью оптической обратной связи на основе волоконно-оптического разветвителя и отрезка одномодового оптического волокна с зеркалом Фарадея. Показано, что главными параметрами, определяющими ширину линии генерации, являются длительность задержки в петле оптической обратной связи и коэффициент самоинжекции, который определяется отношением мощности лазерного излучения, инжектируемого в лазерный резонатор, к выходной мощности генерации лазерного диода. Показано, что при длительности задержки в петле оптической обратной связи не более 40 нс и увеличение коэффициента самоинжекции от  $-40$  до  $-26$  дБ приводит к снижению ширины линии генерации лазерного диодного модуля более чем в 7 раз с 70 до 9 кГц. Для дальнейшего сужения линии генерации необходимо увеличивать длительность задержки в петле оптической обратной связи до величины более 70 нс, что приводит к дополнительному уменьшению ширины линии генерации до 4 кГц. Измерение ширины линии генерации проводилось с помощью метода гомодинирования в волоконно-оптическом интерферометре Майкельсона с разностью плеч 250 мкс.

## **СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ СВЧ-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЛАЗЕРНОГО ДИОДА И ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК С ВЫСОКОЙ ХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИСПЕРСИЕЙ**

Д.Ю. Сидлеров, К.Б. Микитчук, Н.З. Капуза, А.Л. Чиж  
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,  
пр. Независимости 68-1, г. Минск, Беларусь  
e-mail: chizh@oelt.basnet.by

Измерение частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени является одной из важнейших задач анализа сигналов в радиолокации и радиоэлектронной борьбе. В настоящей работе предлагается для измерения частоты СВЧ-сигналов в частотном

диапазоне от 2 до 12 ГГц использовать волоконно-оптическую систему на основе высокоскоростного лазерного диода и брэгговских решеток с высокой хроматической дисперсией. Высокоскоростной лазерный диод преобразует входящий СВЧ-сигнал в оптический модулированный, который затем поступает на вход волоконной брэгговской решетки. Волоконная брэгговская решетка с переменным по длине линейным периодом позволяет реализовать преобразование частоты СВЧ-сигнала в мощность, измеряемую на выходе СВЧ-фотодиодов, на основе которой посредством цифровой обработки можно оценить значение частоты исследуемого СВЧ-сигнала. Определены основные параметры, которым должны соответствовать волоконные брэгговские решетки для достижения разрешения системы менее 100 МГц.

## **МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОГО МОДУЛЯ С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ СТЕРЖНЕВОГО АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА**

К.А. Галюк, Б.Д. Овчаренко, А.А. Ушаков, В.В. Букин  
Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,  
Москва, Россия  
e-mail: karina272001@yandex.ru

В данной работе предлагается математическое моделирование лазерного модуля (квантрона) с поперечной диодной накачкой стержневого активного элемента. Одной из важных задач данной работы является оптимизация конструкции квантрона с целью повышения поглощения излучения накачки в активном элементе. Создание модели и численные эксперименты проводились методом непоследовательной трассировки лучей в программном пакете Zemax. В качестве стержневого активного элемента рассматривается лазерный кристалл алюмоиттриевый гранат с 1 ат. % концентрацией примесных ионов неодима  $Nd^{3+}:YAG$ . Источниками излучения накачки являются лазерные диодные решетки. Проводились измерения пространственного распределения мощности поглощенного излучения в поперечном сечении активного элемента. Это позволило рассчитать основные параметры лазерного модуля: эффективность накачки активного элемента и однородность распределения мощности поглощенного излучения накачки. В модели квантрона проводились изменение расстояния между излучающей областью и активным элементом, сдвиг излучателей, применение цилиндрических линз и отражателей непоглощенного излучения накачки. Второй главной задачей является определение коэффициента усиления и запасенной энергии модели квантрона. Для этого создана численная модель коэффициента усиления при различных амплитудах тока накачки.



# КОМПЕНСАЦИЯ СВЕТОВОГО СДВИГА РЕЗОНАНСОВ КОГЕРЕНТНОГО ПЛЕНЕНИЯ НАСЕЛЁННОСТЕЙ В ПАРАХ ЦЕЗИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДВОЙНОЙ АМ-ЧМ МОДУЛЯЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.И. Вишняков<sup>1</sup>, Д.В. Бражников<sup>1,2</sup>, М.Н. Скворцов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск,  
просп. акад. Лаврентьева 15Б, 630090, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет,  
Новосибирск, ул. Пирогова 1, 630090, Россия

e-mail: vladislav.vishnyakov@gmail.com

В работе исследуется световой (динамический штарковский) сдвиг резонансов когерентного пленения населённости (КПН) в парах атомов цезия при их возбуждении излучением лазера с вертикальным резонатором (ЛВР). Для наблюдения резонансов КПН ток накачки ЛВР модулируется на СВЧ частоте ( $\approx 4.6$  ГГц), что приводит к частотной модуляции (ЧМ) выходного излучения и появлению боковых полос в его спектре, необходимых для возбуждения резонанса КПН.

Основное внимание уделено поведению сдвига сигнала ошибки в КСЧ/КПН от изменения полной оптической мощности ( $P$ ), регулируемой на входе в газовую ячейку с помощью набора нейтральных фильтров. При одной лишь ЧМ зависимость сдвига линейна по  $P$  (Рис.1а). Далее эта же зависимость исследовалась при использовании внешнего амплитудного электрооптического модулятора (ЭОМ), собранного по типу интерферометра Маха-Цендера. ЭОМ производит амплитудную модуляцию (АМ) проходящего через него излучения. Таким образом, при пропускании ЧМ излучения ЛВР через ЭОМ формировался спектр, относительными интенсивностями боковых полос которого можно эффективно управлять как с помощью СВЧ мощности, так и с помощью смещающего постоянного напряжения на ЭОМ. Наличие дополнительных степеней свободы позволило наблюдать нелинейный вид функции сдвига сигнала ошибки от  $P$ , в котором присутствует экстремум (Рис.1б). Положение этого экстремума определяет оптимальную оптическую мощность  $P_{opt}$ , вблизи которой малые вариации  $P$  не будут приводить к существенному сдвигу сигнала ошибки в КСЧ. Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 22-12-00279)

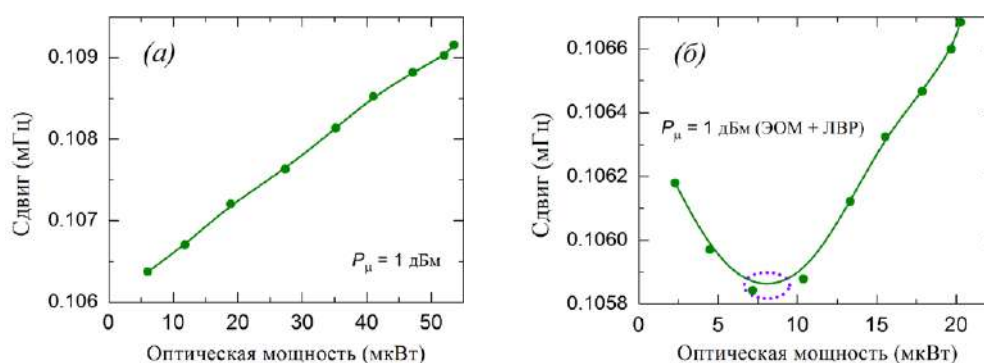


Рис. 1 Сдвиг частоты только при ЧМ излучения ЛВР (а) и при двойной модуляции АМ+ЧМ (б)

## ЭФФЕКТИВНЫЕ ДИЗАЙНЫ ЛАЗЕРНЫХ ПЕРЕХОДОВ КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ С ЧАСТОТОЙ МЕНЕЕ 3 ТГц

Д.В. Ушаков<sup>1</sup>, А.А. Афоненко<sup>1</sup>, Д.С. Пономарёв<sup>2,3</sup>, С.С. Пушкарёв<sup>2,3</sup>,  
В.И. Гавриленко<sup>4</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, РБ,

<sup>2</sup>Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Москва, РФ,

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт  
(Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, РФ,

<sup>4</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, РФ

e-mail: ushakovdv@bsu.by

На основе решения уравнения Шредингера с учетом дефазировки квантовых состояний, а также системы замкнутых балансных уравнений, проведено исследование зонных дизайнов квантово-каскадных лазеров с частотой менее 3 ТГц с активной областью на основе сверхрешетки GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As. Для активного модуля из 4-х квантовых ям предложен дизайн с двухфотонной схемой лазерных переходов. В предложенном дизайне инверсная населенность перераспределяется между двумя оптическими переходами, которые конкурируют между собой и обеспечивают приблизительно в 2 раза более медленное падение нелинейного коэффициента усиления с ростом плотности фотонов и более высокие значения КПД.

## ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ (λ = 1550 нм) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ШИРИНЫ АПЕРТУРЫ

Ю.К. Кириченко<sup>1</sup>, Д.А. Веселов<sup>1</sup>, С.О. Слипченко<sup>1</sup>, Н.А. Пихтин<sup>1</sup>, А.А. Мармалюк<sup>2</sup>,

Ю.Л. Рябоштан<sup>2</sup>, М.А. Ладугин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия,

<sup>2</sup>«Сигм Плюс», Москва, Россия

e-mail: bobretsova@mail.ioffe.ru

Настоящая работа посвящена комплексному исследованию (электрооптических, спектральных и пространственных характеристик) серии полупроводниковых лазеров с длиной волны излучения 1550 нм, изготовленных на основе одной гетероструктуры с разной шириной полоска. Было показано, что с увеличением ширины полоска от 20 до 150 мкм рабочая оптическая мощность увеличивается с 1.4 Вт до 4.3 Вт, однако при этом латеральная яркость излучения снижается с 1.09 Вт/(мм\*мрад) до 0.65 Вт/(мм\*мрад). Для лазеров с шириной полоска 100 мкм был достигнут максимальный КПД 34 %. Особое внимание было уделено лазерам с шириной апертуры 20 мкм: было показано, что существует два диапазона токов накачки, в которых характеристики лазеров ведут себя по-разному. Первый диапазон токов соответствует работе в маломодовом режиме и переключению между модами, особенности каждого отдельного образца оказывают сильное влияние на конкуренцию мод, что приводит к разбросу характеристик между одинаковыми образцами в этой области. Во втором диапазоне разброс характеристик между образцами практически вырождается, ширина ближнего поля стремится к заданным размерам латерального волновода, распределение излучения в дальней зоне имеет более или менее правильную куполообразную форму и расширяется при дальнейшем увеличении тока накачки. Это указывает на генерацию большего числа латеральных мод и работу лазера в многомодовом режиме генерации. Практическое использование таких лазеров возможно, прежде всего, во втором диапазоне токов накачки.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ И ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МОЩНОГО ALINGAN СИНЕГО ЛАЗЕРНОГО ДИОДА МЕТОДАМИ ИНФРАКРАСНОЙ МИКРОСКОПИИ И РЕЛАКСАЦИИ ПРЯМОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

А.В. Аладов<sup>1</sup>, А.Л. Закгейм<sup>1</sup>, А.Е. Иванов<sup>1,2</sup>, А.Е. Черняков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НТЦ микроэлектроники РАН, Политехническая 26, Санкт-Петербург, РФ,

<sup>2</sup>СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, РФ

e-mail: aaladov@mail.ioffe.ru

Температура активной области лазерного диода является критическим параметром, влияющим на порог генерации, эффективность, предельную выходную мощность, ресурс. В данной работе использовались два метода измерения температуры перехода и теплового сопротивления мощного синего ( $\lambda = 450$  нм) AlInGaN лазера NUBM08 (Nichia): непосредственный – на основе инфракрасной тепловизионной микроскопии и косвенный – на основе релаксации температуро-зависимого параметра – прямого напряжения с использованием прибора Thermal Transient Tester (T3Ster).

В работе экспериментально исследованы и проанализированы отдельные составляющие (звенья тепловой цепи) общего теплового сопротивления лазера, а также однородность распределения температуры по площади в зависимости от режимов работы. При определении значений реальных (физических) тепловых сопротивлений из электрических измерений, учитывалось «оптическое охлаждение» за счет выходной оптической мощности при высоком КПД. Полученные разными методами значения тепловых сопротивлений хорошо согласуются и составляют при этом на компоненту р-п-переход – нижняя плоскость кристалла приходится всего 2.8 К/Вт, а полное (до корпуса) ~7 К/Вт. Температура активной области в предельном исследованном режиме работы 3 А и температуре корпуса 25 С не превосходит 70 С. Порог генерации составляет 0.3 А, максимальная мощность излучения 4 Вт. Дифференциальный квантовый выход 55% и не зависит от тока (ватт-амперная характеристика линейна)

Метод инфракрасной микроскопии позволяет получить температурный мэппинг лазерного кристалла, но имеет ограничение по точности, связанное с излучательной способностью материала лазера.

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОПУТНОГО ПИКОСЕКУНДНОГО ВКР В ВОДЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ В НЕЁ ФОКАЛЬНОЙ ПЕРЕТЯЖКИ ВОЗБУЖДАЮЩЕГО ПУЧКА**

А.И. Водчиц<sup>1</sup>, В.А. Орлович<sup>1</sup>, И.А. Ходасевич<sup>1</sup>, С.М. Першин<sup>2</sup>, М.Я. Гришин<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Институт физики НАН Беларуси, Минск, РБ,

<sup>2</sup>Институт общей физики РАН, Москва, РФ

e-mail: a.vodchits@dragon.bas-net.by

Исследована энергетическая эффективность генерации первой стоксовой компоненты попутного вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в легкой воде ( $H_2O$ ) в зависимости от положения фокальной перетяжки возбуждающего пучка в толще воды. ВКР возбуждалось в вертикальной схеме сфокусированным пучком ( $f = 83$  мм) пикосекундных (50-57 пс) импульсов на длине волны 532 нм с частотой следования 15 Гц. Глубина погружения центра фокальной перетяжки в ампульной воде, помещенной в кювету (диаметр 25 мм, длина 75 мм) открытого типа, варьировалась от 64 мм до 0 мм

(граница раздела вода-воздух). В каждом положении фокальной перетяжки измерялась зависимость энергии импульсов первой стоксовой компоненты от энергии импульсов накачки. Показано, что при фокусировке глубже 14 мм эффективность преобразования резко возрастает при малых энергиях импульсов (3 – 5 мДж) и плавно нарастает с их увеличением до 6 мДж, достигая насыщения при 7 – 10 мДж с максимальной величиной эффективности преобразования около 33 % на глубине 64 мм. С уменьшением глубины эффективность уменьшалась до нескольких процентов на глубине 5 мм, возрастая затем до примерно 10 % вблизи границы раздела вода-воздух (0 мм). Поведение изменения эффективности в диапазоне глубин 0 – 5 мм согласуется с обнаруженной нами ранее зависимостью порога ВКР, который в области 2 - 3 мм резко снижается, что может приводить воду в состояние, близкое к пробое, и к увеличению ее турбулентности. Выявленные закономерности, по нашему мнению, могут быть связаны с изменением структуры воды в различных её слоях, а также с особенностями взаимодействия всех энергетических потоков излучения (накачки, попутного и обратного ВКР).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №23-42-10019 и №Ф23РНФ-40 Белорусского Республиканского Фонда Фундаментальных Исследований.

## **СУБНАНОСЕКУНДНЫЙ РОС-ЛАЗЕР НА КРАСИТЕЛЕ СО СТАБИЛЬНОЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ**

В.М. Катаркевич, Т.Ш. Эфендиев  
Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь;  
e-mail: katarkevich@dragon.bas-net.by

В работе приведены результаты исследований генерационных характеристик лазера на красителях со светоиндуцированной распределенной обратной связью (РОС) со стабильной длиной волны излучения, возбуждаемого субнаносекундным твердотельным Nd:LSB микролазером с диодной накачкой ( $\lambda = 532$  нм;  $\tau \sim 0.5$  нс). В отличие от традиционных оптических схем РОС-лазеров на красителях, в таком устройстве длина волны генерации имеет заранее заданное фиксированное значение, практически не зависящее от угла падения пучка накачки на излучатель. В условиях нашего эксперимента при использовании в качестве активной среды этанольного раствора пиридина 1 с концентрацией  $\sim 2$  ммоль/л и мощности импульсов возбуждения  $\sim 36$  кВт РОС-лазер обеспечивал получение генерации на длине волны 673 нм при ширине линии излучения  $< 0,03$  нм. При этом пороговая энергия возбуждения РОС-лазера составляла  $< 3$  мкДж, а КПД генерации превышал  $> 30\%$ . При энергетической стабильности импульсов накачки  $\sim 0,4\%$  энергетическая стабильность импульсов генерации составляла  $\sim 0,7\%$ . РОС-лазер устойчиво работал при частотах следования импульсов накачки вплоть до нескольких сот Гц без прокачки раствора красителя через кювету. Подобные лазерные источники могут быть использованы в качестве высокоинтенсивных спектральных реперов, а также для возбуждения и зондирования объектов на заданных фиксированных частотах.

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОГО ЭМИССИОННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

В.В. Кирис, К.Ю. Кацалап, М.В. Бельков  
Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68, Минск, Беларусь  
e-mail: v.kiris@ifanbel.bas-net.by

На основе набора спектров ЛИЭС низколегированных сталей и чугунов построены многомерные регрессионные модели для анализа марганца, хрома, никеля с использованием регрессии на латентные структуры. Возбуждение лазерной плазмы производилось излучением двухимпульсного Nd:YAG лазера с диодной накачкой (разработка ИФ НАН Беларуси), работающего на основной частоте 1064 нм. Спектры регистрировались в диапазоне 200 – 500 нм посредством малогабаритного спектрометра Firefly4000 со спектральным разрешением 0,5 нм. Для компенсации сдвига положения спектральных линий на ПЗС линейке предложен метод квадратичного преобразования шкалы длин волн вместе с кубической сплайн интерполяцией спектра, позволяющий улучшить стабильность положения спектральных компонент путем максимизации коэффициента корреляции преобразованных спектров с первым спектром калибровочного набора. Компенсация вариации интенсивности спектральных линий осуществлялась путем линейного преобразования, обеспечивающего наименьшее расхождение выбранного участка спектра с соответствующим участком первого спектра калибровочного набора. Для преобразования выбирались участки спектра близкие к участкам, используемым для анализа на которых вклад линии основного элемента (железа) существенно превышает вклад линий примесных элементов.

Использование данных методов обработки спектра позволило несколько улучшить стабильность получаемых в течение месяца результатов анализа хрома, марганца и никеля в низколегированных сталях.

## АНАЛИЗ ШИРИНЫ ЛИНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩИХ ЛАЗЕРОВ С СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 85X/89X НМ

Я.Н. Ковач<sup>1</sup>, С.А. Блохин<sup>1</sup>, М.А. Бобров<sup>1</sup>, А.А. Блохин<sup>1</sup>, Н.А. Малеев<sup>1</sup>, А.Г. Кузьменков<sup>1</sup>,  
М.Н. Марчий<sup>1</sup>, А.П. Васильев<sup>2</sup>, В.М. Устинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, РФ,  
<sup>2</sup>НТЦ Микроэлектроники и субмикронных гетероструктур, Санкт-Петербург, РФ  
e-mail: j-n-kovach@mail.ioffe.ru

В работе представлены результаты исследований ширины спектральной линии излучения вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) спектрального диапазона 85x/89x нм в зависимости от конструктивных особенностей лазера. В ВИЛ реализуется режим микрорезонатора, поэтому для получения ширины линии менее 100 МГц требуется либо повышать выходную оптическую мощность  $P_{\text{out}}$ , либо увеличивать время жизни фотонов в резонаторе  $t_p$ . Для реализации одномодового режима генерации требуются малые размеры токовой оксидной апертуры, поэтому сильный эффект саморазогрева ведет к аномальному уширению линии на нелинейном участке ватт-амперной характеристики лазера. Увеличение размера апертуры позволяет уменьшить тепловое сопротивление лазера и ослабить негативное влияние эффекта саморазогрева. Повышение времени  $t_p$  вследствие уменьшения потерь на вывод излучения позволяет дополнительно снизить

ширину линии, однако такой подход сопряжен с нестабильностью поляризации излучения и падением мощности  $P_{out}$ . Альтернативное решение за счет увеличения геометрической длины оптического резонатора сопряжено с риском увеличения внутренних оптических потерь  $\rho_{int}$ . Применение конструкции ВИЛ с инжекцией носителей через внутррезонаторные контакты и композиционные брэгговские решетки позволяет не только сохранить низкий уровень потерь  $\rho_{int}$  и эффективно уменьшить ширину линии до уровня 30-50 МГц (в зависимости от размера апертуры), но и обеспечить возможность достижения мощности  $P_{out} \sim 1-2$  мВт.

Результаты исследований важны для создания лазерных излучателей для компактных квантовых сенсоров на основе паров атомов щелочных металлов.

## **АКТИВНО-ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ВИДЕОСИСТЕМА ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ НАЛИЧИИ МЕТЕОПОМЕХ**

Б.Ф. Кунцевич

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь  
e-mail: bkun@ifanbel.bas-net.by

В работе приведены результаты исследования возможности использования активно-импульсной лазерной видеосистемы для обеспечения безопасной навигации транспортных средств в ночное время. Для этого впервые выделяются режимы движения транспортных средств с ближним (ДБС; освещаемая дистанция до 50 м) и дальним (ДДС; дистанция 40 – 150 м) светом. Для решения поставленной задачи используется метод автоматического сканирования зоны видимости в пределах всей дистанции в режиме ДБС или ДДС за время регистрации одного кадра ( $1/25$  с). В результате происходит «наложение» изображений от всех последовательных зон и на экране видеомонитора формируется «суммарное» изображение со всей дистанции. При моделировании соответствующая дистанция разбивается на  $n$  зон видимости, для каждой из которых можно варьировать число импульсов  $k$  лазерной подсветки. Для определенности принято, что длительность лазерного импульса в три раза меньше, чем время распространения света до ближайшего объекта на дистанции и обратно.

Установлено, что в режиме ДДС для реализации квазиравномерной яркости изображения в пределах всей дистанции достаточно выделение 9 зон видимости. В режиме ДБС даже 10 зон не достаточно.

## **ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ПРОТИВОГРИБКОВОГО ПРЕПАРАТА АМФОТЕРИЦИН В**

А.В. Микулич<sup>1</sup>, В.Ю. Плавский<sup>1</sup>, А.И. Третьякова<sup>1</sup>, Л.Г. Плавская<sup>1</sup>,  
А.Н. Собчук<sup>1</sup>, И.А. Леусенко<sup>1</sup>, Т.С. Ананич<sup>1</sup>, Р.К. Нагорный<sup>1</sup>, С.В. Якимчук<sup>1</sup>,  
А.Д. Свечко<sup>1</sup>, И.Л. Морозова<sup>2</sup>, Т.Е. Кузнецова<sup>2</sup>, А.Э. Пыж<sup>2</sup>, Н.И. Счастливая<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68-2, Минск, РБ,

<sup>2</sup>Институт физиологии НАН Беларуси, ул. Академическая 28, Минск, РБ  
e-mail: a.mikulich@ifanbel.bas-net.by

В работе показано, что оптическое излучение способно усиливать фунгицидное действие противогрибкового препарата амфотерицин В за счет фотодинамического

эффекта. Исследованы спектрально-люминесцентные характеристики амфотерицина В, способность к генерации активных форм кислорода и механизм его фотосенсибилизирующего действия.

С помощью спектральных методов установлено, что амфотерицин В в водных растворах присутствует в виде мономерных, димерных и олигомерных форм. При этом фотохимической активностью обладают мономерные формы. При использовании непрямых методов (флуоресцентные зонды) и прямых методов регистрации люминесценции синглетного кислорода показано, что указанный препарат при фотовозбуждении способен генерировать синглетный кислород. При этом квантовый выход генерации синглетного кислорода амфотерицином В составляет в 2-пропанол- $d_8$  -  $\gamma_{\Delta} \sim 0,04 \pm 0,008$ . С использованием фермента гликолитического ряда – лактатдегидрогеназы продемонстрировано, что в механизме фотодинамического повреждения фермента в присутствии амфотерицина В превалируют радикальные процессы, о чем свидетельствует выраженное снижение ферментативной активности при добавлении доноров/акцепторов электронов, а также отсутствие усиления фотобиологического эффекта при переходе от водных растворов к дейтерированным растворителям (тяжелая вода), где время жизни синглетного кислорода на порядок выше.

Повышение эффективности действия амфотерицина В за счет оптического излучения также продемонстрировано на клеточном уровне (клетки почки африканской зеленой мартышки BGM) и при моделировании контактного дерматита на депилированных участках кожи крыс.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ МИКРОЛАЗЕРОВ С НАРУШЕННОЙ ВРАЩАТЕЛЬНОЙ СИММЕТРИЕЙ

Э.И. Моисеев<sup>1</sup>, Н.В. Крыжановская<sup>1</sup>, С.Д. Комаров<sup>1</sup>, К.А. Иванов<sup>1</sup>, Н.А. Афанасьев<sup>1</sup>,  
С.А. Минтаиров<sup>2</sup>, Н.А. Калужный<sup>2</sup>, М.М. Кулагина<sup>2</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>3</sup>, Р.Р. Галиев<sup>3</sup>,  
А.Ю. Павлов<sup>3</sup>, К.Н. Томош<sup>3</sup>, А.Е. Жуков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИУ ВШЭ, Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 3, корп. 1, лит. А, РФ,

<sup>2</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, РФ,

<sup>3</sup> ИСВЧПЭ РАН, Москва, Россия

e-mail: emoiseev@hse.ru

В работе проведено исследование микролазеров с квантовыми точками InGaAs/GaAs в активной области и кольцевым резонатором с нарушенной вращательной симметрией. Гетероструктура синтезирована методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложке GaAs. Методами электронной литографии и плазмохимического травления сформированы микрорезонаторы радиусом 15 мкм. Нарушение вращательной симметрии резонатора достигнуто за счет формирования отверстия в резонаторе, расположенного со смещением относительно оси вращения. Проведено экспериментальное исследование оптических и электрических свойств излучателей при комнатной и повышенных температурах. Максимальная температура, при которой наблюдается лазерная генерация, в непрерывном режиме составила 75 °С. Показано, что профиль латеральной проекции диаграммы направленности характеризуется двумя широкими лепестками излучения, расположенными со стороны отверстия. Формирование направленности излучения происходит при сохранении добротности не менее  $10^5$ . Профили измеренных картин излучения в дальней зоне хорошо согласуются с результатами численного моделирования.

## **МЕТОД ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ МАССИВОВ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ БИАКСИАЛЬНЫХ ОДНОВОЛНОВЫХ ЛИДАРОВ**

П.Н. Назаренко

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», г. Минск, Беларусь,  
e-mail: npn05@mail.ru

В работе обсуждается метод предварительной обработки массива данных измерений мощности обратно рассеянного зондирующего излучения одноволновых биаксиальных лидаров. Предлагаемый метод основан на определении нормируемого профиля атмосферного обратного рассеяния, как отношения амплитуд измеряемого и опорного профилей регистрируемых на одинаковых высотах эхосигналов с учетом ослабления атмосферой зондирующего излучения лидара для измеряемого и опорного сигналов. В качестве опорного профиля используется профиль эхосигнала, полученный в условиях ясной атмосферы при отсутствии облачности и других атмосферных образований. Применение метода позволяет исключить влияние на измеряемые профили коэффициента обратного рассеяния таких факторов как геометрический фактор, неопределенность начала отсчета высоты трассы, аппаратную функцию, другие аппаратные амплитудные и временные параметры прибора. Для калибровки прибора требуются только предварительное измерение амплитудного опорного профиля в условиях ясной и чистой атмосферы и данные измерения метеорологической оптической дальности на момент измерения опорного и регистрируемых профилей. Приведены результаты применения данного метода для предварительной обработки массива данных измерений, полученных на нескольких одновременно работающих лидарах. Проводится обсуждение полученных результатов.

## **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВКР В ВОДОРОДЕ ДВУХИМПУЛЬСНЫМ РАЗНОЧАСТОТНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Р.В. Чулков<sup>1</sup>, Ж. Даваасамбуу<sup>2</sup>, Г. Шилагарди<sup>2</sup>, Л.Е. Батай<sup>1</sup>, А.С. Грабчиков<sup>1</sup>,  
О.П. Корожан<sup>1</sup>, В.А. Орлович<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68, Минск, Беларусь  
e-mail: v.orlovich@dragon.bas-net.by

<sup>2</sup>Лазерный исследовательский центр Национального университета Монголии,  
Улан-Батор, Монголия

Разработана теоретическая модель, описывающая генерацию первых стоксовых компонент вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в поле бигармонической накачки с учетом эффектов дифракции, волновой расстройки и неколлинеарного распространения потоков возбуждающего излучения. С использованием разработанной модели выполнено численное моделирование энергетических и пространственных характеристик ВКР преобразованного излучения для условий возбуждения ВКР в сжатом водороде бигармоническим излучением основной и второй гармоник моноимпульсного Nd:АИГ – лазера.

Установлено, что при накачке только импульсами излучения второй гармоники (давление водорода 12 атм, длина кюветы с водородом 120 см, фокальная длина фокусирующей излучение накачки линзы 100 см, длительность импульсов возбуждающего излучения 10 нс) порог возбуждения ВКР достигается при энергии лазерных импульсов 10 мДж. При накачке только излучением основной гармоники порог возбуждения ВКР



достигается при энергии импульсов около 100 мДж. При бигармонической накачке в условиях, когда инкремент усиления ВКР на длине волны второй гармоники достигает значения  $\geq 9$ , порог возбуждения ВКР излучением основной гармоники уменьшается в десятки раз. Причина такого падения порога возбуждения ВКР объясняется тем, что излучение основной гармоники параметрически (беспорогово) рассеивается на динамической нелинейной решетке, создаваемой мощным излучением второй гармоники Nd:АИГ – лазера. Описанный подход может быть использован для низкопороговой генерации методом ВКР излучения, перестраиваемого в широкой области частот инфракрасного диапазона спектра.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта БРФФИ №Ф23МН-008.

## **ОПТИМИЗАЦИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ ГОЛЬМИЯ И ИТТЕРБИЯ ВО ФТОРФОСФАТНОМ СТЕКЛЕ ДЛЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ ТЕРМОМЕТРИИ**

А.С. Пиотух, И.А. Ходасевич

Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68, Минск, Беларусь

e-mail: apiotukh@bk.ru

В докладе обсуждается применение метода FIR (fluorescence intensity ratio) для определения термочувствительности (ТЧ) фторфосфатных стекол, активированных редкоземельными ионами (РЗИ)  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Ho}^{3+}$  и являющихся ап-конверсионными материалами с низкими фонными потерями. Цель работы состояла в исследовании влияния температуры на ап-конверсионную флуоресценцию (АКФ) ионов  $\text{Ho}^{3+}$  и в оптимизации концентрации РЗИ для применения в датчиках температуры. Измерение спектров АКФ выполнялось в диапазоне температур от + 25 °С до + 200 °С для разных мощностей непрерывного излучения диодного лазера (ДЛ) с длиной волны генерации  $\lambda=950 - 965$  нм. По измеренным спектрам АКФ в зеленой и красной областях рассчитывались FIR-зависимости. Более чувствительными к изменению температуры оказались отношения интенсивностей суб-полос около длин волн 543 нм / 657 нм, а также диапазонов длин волн в пределах полос зеленой и красной флуоресценции. Линейность и коэффициент корреляции при аппроксимации у последних зависимостей увеличивались с ростом мощности излучения ДЛ от 0,4 до 1 Вт.

Отработанная нами методика измерения спектров и калибровки позволяет выбирать сенсорные элементы с FIR-зависимостями, приемлемыми в качестве калибровочных кривых, и с высокими значениями ТЧ. При оптимизации концентрации  $\text{Yb}^{3+}$  в стеклах с постоянным содержанием  $\text{HoF}_3$  (0,1 моль%) показано, что наилучшей калибровочной прямой и ТЧ 0,38%  $\text{K}^{-1}$  (298 К) обладает стекло с 5 моль%  $\text{YbF}_3$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке мероприятия 3.1 НТП СГ «Компонент Ф».

## **ДЕТЕКТИРОВАНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ПРИ ПОМОЩИ ОДНОМОДОВОГО ЛАЗЕРНОГО ДИОДА**

А.Л. Уласевич, А.А. Кузьмук

Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68-2, Минск, Беларусь

e-mail: a.ulasevich@dragon.bas-net.by

В работе представлен лазерный сенсор углекислого газа, предназначенный для работы в составе комплекса измерения газовых потоков методом турбулентных

пульсаций (eddy covariance method). Этот метод считается одним из наиболее точных и теоретически обоснованных, и заключается в расчете переноса целевого вещества воздушными течениями в турбулентной атмосфере на основе высокочастотных измерений в режиме реального времени. Данный метод требует измерительное оборудование с определенными характеристиками чувствительности, временного разрешения, габаритов области измерений, отсутствия влияния на воздушный поток. Принцип работы разработанного сенсора основан на методе инфракрасной абсорбционной спектроскопии. В качестве источника излучения используется одномодовый лазерный диод с распределённой обратной связью, чья длина волны модулируется вблизи одной из спектральных линий поглощения углекислого газа в области приблизительно 1,6 мкм. Представленная разработка предназначена для замены существующего импортного оборудования по оценке баланса потоков парниковых газов антропогенного или биогенного происхождения в приземном слое атмосферы, изучение источников их эмиссии, оценка эффективности мер по сокращению их выбросов для экосистем различных типов и размеров.

## **НАВЕДЕННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ И НЕЛИНЕЙНОСТЬ АКТИВИРОВАННОГО КРАСИТЕЛЕМ НАНОКОМПОЗИТА ПРИ ПИКОСЕКУНДНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ**

В.Ю. Курстак, С.С. Ануфрик

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь  
vkurstak@tut.by, anufrick@grsu.by

В работе представлены результаты экспериментальных исследований нелинейно-оптических свойств образца нанопористого стекла с полимером (НПСП), активированного красителем порфирина Zn, при импульсном пикосекундном возбуждении излучением второй гармоники Nd<sup>3+</sup>:YAG лазера. Исследования проводились методом Z-сканирования, позволяющим определить, как наведенное поглощение, так и величину нелинейной рефракции исследуемого образца.

Длина волны возбуждения смещена в область больших длин волн относительно максимума поглощения красителя в видимой области спектра ( $\lambda_{\max} = 427$  нм). Спектр флуоресценции композита по уровню 0,5 расположен в диапазоне 432 – 449 нм, что соответствует более коротким длинам волн по отношению к накачке. Однофотонная флуоресценция в данном случае наблюдаться не может.

В результате выполненных исследований была измерена зависимость пропускания образца  $T(z)$  при изменении интенсивности лазерного излучения, путём сканирования вдоль направления падающего на образец излучения в режимах с широкой и узкой диафрагмой. Все полученные данные усреднялись по пяти измерениям.

Полученная зависимость величины пропускания  $T(z)$  от  $z$ -координаты позволяет определить величину максимального контраста  $R$ , а также критическую интенсивность  $I_{cr}$ . Данные величины лежат в основе определения соответствующего сечения наведенного поглощения  $\sigma_{s1}$  и изменения показателя преломления нанокompозита. В основу расчёта указанных величин положена пятиуровневая энергетическая схема.

## **ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ АНСАМБЛЯ NV-ЦЕНТРОВ В АЛМАЗЕ**

Д.С. Филимоненко, А.П. Низовцев, С.Я. Килин  
Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68-2, Минск, Беларусь  
e-mail: demonr@tut.by

В настоящее время основным способом магнитометрии с использованием NV-центров в алмазе является метод оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР), при этом при проведении измерений необходимо обеспечить доставку СВЧ-излучения к алмазному образцу. В настоящей работе представлен полностью оптический способ магнитометрии (без приложения СВЧ поля), основанный на использовании резонансов в зависимости интенсивности фотолюминесценции ансамбля NV-центров от напряженности магнитного поля, в частности резонанса в области нулевого магнитного поля (РНП). Экспериментально исследовано влияние концентрации NV-центров в алмазном образце, температуры и ориентации образца, мощности и поляризации лазерного излучения накачки, а также направления приложенного магнитного поля на амплитуду и ширину РНП. Сделан вывод, что за возникновение РНП ответственно кросс-релаксационное взаимодействие между различным образом ориентированными группами NV-центров в кристаллической решетке алмаза. Предложены простые варианты полностью оптического магниточувствительного сенсора на основе ансамбля NV-центров в алмазе.

Продемонстрирована принципиальная возможность использования такого сенсора для магнитных измерений как в области слабых магнитных полей, так и в более широком диапазоне.

## **ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЮЩИЙ В ДВУХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНАХ**

С.С. Шавель, В.А. Горобец, С.Б. Бушук  
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь  
e-mail: shavel\_s07@mail.ru

Спектральные области 1-4 мкм и 9-11 мкм, принадлежащих ближнему и среднему ИК диапазонам, где существуют достаточно широкие окна прозрачности атмосферы, свободные от поглощения парами воды представляют интерес для получения эффективной одновременной генерации с целью создания лазерных газоанализаторов. Такие источники позволят обеспечить при проведении измерений выполнения условия «замороженной» атмосферы. Одним из путей решения этой проблемы является использование электронных переходов инертных газов (например Хе, Кг, Аг, Не) в дополнение к генерации на колебательно-вращательных переходах молекул  $\text{CO}_2$ . В настоящей работе рассматривается лазер с селективным резонатором, организованным с помощью дифракционной решетки, работающей в неавтоколлимационном режиме и дополнительных зеркал. Генерация для каждой из линий формируется в своем резонаторе, а на выходе присутствует многоволновое излучение.

Влазереиспользуетсякомбинированнаягазоваясмесь,содержащаяпомимомолекул  $\text{CO}_2$  инертные газы, например, Хе: $\text{CO}_2$ :Не. Была получена генерация одновременного излучения в диапазонах 1-4 мкм и 9-11 мкм с качеством, соответствующим газовым лазерам (высокая выходная мощность, низкая расходимость и спектрально узкие линии).

Применение созданного многоволнового лазера позволит детектировать такие важные загрязнители атмосфера как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{NH}_3$ .

### **ВИЗУАЛИЗАТОРЫ ЛАЗЕРНОГО ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ**

Н.В. Гапоненко<sup>1</sup>, Е.И. Лашковская<sup>1</sup>, Ю.Д. Корнилова<sup>1</sup>, К.В. Шустикова<sup>1</sup>,  
Н.В. Насонова<sup>1</sup>, В.А. Лабунов<sup>1</sup>, Л.В. Судник<sup>2</sup>, А.Р. Лученок<sup>2</sup>, П.А. Витязь<sup>2</sup>,  
Т.Ф. Райченко<sup>3</sup>, В.Д. Живулько<sup>4</sup>, А.В. Мудрый<sup>4</sup>, Ю.В. Радюш<sup>4</sup>, И.Л. Мартынов<sup>5</sup>,  
А.А. Чистяков<sup>5</sup>, Н.И. Каргин<sup>5</sup>, В.Ю. Тимошенко<sup>3</sup>, М.В. Степихова<sup>6</sup>, А.Н. Яблонский<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь,

<sup>2</sup>Институт порошковой металлургии НАН Беларуси, Минск, Беларусь,

<sup>3</sup>Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь,

<sup>4</sup>Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь,

<sup>5</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия,

<sup>6</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижегородская обл., Россия

e-mail: garonenko@bsuir.by

Разработаны пленкообразующие золи, содержащие лантаноиды, и получены золь-гель методом экспериментальные образцы пленочных структур и мишеней, демонстрирующих ап-конверсионную люминесценцию трехвалентных ионов эрбия для длины волны возбуждения 980 и 1540 нм. Мишени получены методом взрывного прессования порошка ксерогеля  $\text{BaTiO}_3$ , легированного эрбием, а также эрбием и иттербием. Пленочные структуры, содержащие легированный лантаноидами ксерогель титаната бария, выполнены в виде многослойных покрытий - брэгговских отражателей, микрорезонаторов, макропористых и мезопористых слоев, а также слоев, полученных из суспензии с порошком ксерогеля. Мишени и пленочные структуры являются визуализаторами лазерного ИК-излучения с длиной волны 980 и 1540 нм, демонстрируя видимую антистоксовую люминесценцию трехвалентных ионов эрбия в диапазоне температур от комнатной до +160 °С.

### **МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ КРИОГЕННАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ СЛОЕВ $\text{ZnTe/CdTe}$**

Е.В. Борисов, А.А. Калинин, И.Е. Колесников

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: eugene.borisov@spbu.ru

Измерение температуры в криогенном диапазоне крайне востребовано во многих научных приложениях. Люминесцентная термометрия обеспечивает дистанционное детектирование температуры посредством мониторинга выбранных оптических параметров. К таким параметрам относятся могут быть интенсивность излучения (или соотношение интенсивностей люминесценции (LIR) между двумя полосами), положение спектральной линии, ширина спектральной линии, время жизни возбужденного состояния, поляризация. Однако для расширения границ использования люминесцентных термометров необходимо улучшить их характеристики. В настоящей

работе была предложена многопараметрическая люминесцентная термометрия с использованием множественной линейной регрессии. Температурные исследования проводились с образцами эпитаксиальных слоев ZnTe с субмонослойными включениями CdTe в диапазоне температур 20–100 К. Одновременное использование соотношения интенсивностей люминесценции, спектрального положения и ширины люминесцентной полосы приводит к увеличению относительной чувствительности более чем в 10 раз по сравнению с традиционной однопараметрической термометрией, что делает такую стратегию перспективной для дальнейшего улучшения термометрических показателей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФ № 23-72-01028. Экспериментальные исследования проведены в РЦ ОЛМИВ (СПбГУ).

## **ЖИДКОФАЗНЫЙ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ КОМПОЗИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ Si-Sn НАНОСТРУКТУР**

В. Корнев, Н. Босак, С. Коломыцкий, Н. Тарасенко

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, 220072 Минск, Беларусь

e-mail: v.kornev@dragon.bas-net.by

Композитные наночастицы, состоящие из кремния и олова вызывают в последние годы большой практический интерес, связанный с тем, что легирование кремния атомами олова или германия позволяет изменять тип проводимости и регулировать ширину запрещенной зоны кремниевых структур, что важно для дальнейшего прогресса в таких областях, как опто- и микроэлектроника, фотовольтаика и термоэлектрические приложения, опирающиеся на использование кремния. Получение Si-сплавов с контролем их свойств требует разработки новых эффективных технологий синтеза. В данной работе предложен метод формирования металл-полупроводниковых наноструктур SiSn на основе лазерной обработки под слоем этанола кремниевой пластинки с нанесенной на ее поверхность тонкой пленки олова. Сфокусированное излучение Nd:YAG-лазера сканировали по поверхности двухслойной Si-Sn мишени. Лазер работал в режиме сдвоенных импульсов при длительности отдельных импульсов 10 нс, временной задержке между импульсами 10 мкс и частоте повторения импульсов 10 Гц. Продемонстрировано, что успешное формирование нанокристаллических слоев SiSn может быть достигнута при оптимизированных параметрах лазера (скорость сканирования 2,5-3 мм/с, диаметр лазерного пятна 1,5-1,8 мм, шаг сканирования 0,3 мм, мощность лазерного излучения 60 мДж/импульс), что подтверждено результатами анализа полученных наноструктур методами XRD, TEM, SEM, Raman и FTIR. Для количественной оценки содержания Sn в образце после лазерной обработки был проведен анализ состава синтезированных образцов, который показал достаточно однородное распределение обоих элементов в приготовленных образцах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта БРФФИ № Ф23РНФ-156.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ GaPNAs/Si

Е.В.Никитина<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: Никитина Екатерина Викторовна mail.nikitina@mail.ru

Солнечные элементы с несколькими переходами на основе системы материалов GaPNAs/Si могут быть эпитаксиально изготовлены решеточно согласованными и обладать высокой эффективностью при низкой стоимости подложки.

В нашей работе с помощью численного моделирования определены конструкции двухпереходных солнечных элементов в которых верхний переход выполнен на основе решеточно-согласованного с кремнием объемным слоем GaPN(As) в комбинации с кремнием в качестве нижнего перехода. Также было проведено моделирование трехпереходных солнечных элементов, в которых верхние переходы были выполнены на основе решеточно-согласованного с кремнием объемным слоем GaPN(As) с шириной запрещенной зоны около 2 эВ и GaPNAs с шириной запрещенной зоны около 1,5 эВ. В качестве нижнего перехода для трехпереходных солнечных элементов также использовался кремний. Для достижения наибольшей эффективности преобразования солнечной энергии определен диапазон оптимальных значений толщин и состава слоев.

В работе использовано программное обеспечение AFORS-HET v2.4.1., разработанное для моделирования многослойных фотопреобразовательных гетероструктур.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-79-00032 (<https://rscf.ru/project/23-79-00032/>).

## ГЕТТЕРИРОВАНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ГОЛЬМИЕМ В ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

А.А. Пивоварова, Е.В. Куницына, Я.А. Пархоменко, И.А. Андреев, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,

Санкт-Петербург, Россия

e-mail: pivovarova.antonina@gmail.com

Арсенид индия и узкозонные материалы на его основе широко применяются в оптоэлектронике для создания ИК излучателей и фотоприемников, работающих при комнатной температуре и неглубоком охлаждении. В данной работе исследовано влияние редкоземельного элемента Но на гальваномагнитные свойства эпитаксиальных слоев InAs. Показано, что использование гольмия позволяет снизить концентрацию электронов в InAs на два порядка до  $n = 2.1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 77$  за счет геттерирования мелких фоновых примесей путем образования их соединений в растворе-расплаве. В образцах, полученных из слабо легированной гольмием жидкой фазы, отсутствует продольное магнитосопротивление  $(\Delta\rho/\rho)^{\parallel}$ , что подтверждает их однородность. При увеличении содержания гольмия в жидкой фазе более 0.12 мол. % концентрация носителей тока в материале начинает возрастать, при этом наблюдается снижение подвижности, что предположительно связано с влиянием дополнительных центров рассеяния. Полученные результаты показали, что данный способ геттерирования перспективен для получения гетероструктур на основе InAs, востребованных в оптоэлектронной промышленности.

## ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ КОМПОНЕНТЫ РАДИОФОТОНИКИ ПРОИЗВОДСТВА АО «НИИ «ПОЛЮС» им. М.Ф. Стельмаха» (г. Москва)

Иванов А.В., начальник отдела АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

Ладугин М.А., начальник НПК АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

Доклад посвящен мощному 1550 нм одночастотному РОС-лазеру для волоконно-оптических систем передачи данных с внешней модуляцией и мощному InGaAs однозарядному фотоприемнику СВЧ-диапазона, разработанным АО «НИИ «Полюс» им.М.Ф. Стельмаха». В настоящее время наиболее перспективным решением задачи получения одночастотного режима излучения является использование лазеров с распределенной обратной связью (РОС-лазеров). В РОС-лазерах обеспечивается режим одночастотной генерации, сохраняющийся в широком диапазоне выходной мощности излучения.

В системах передачи и обработки больших объемов данных в настоящее время широко применяется многоканальный режим передачи данных с использованием спектрального уплотнения каналов (технология WDM), позволяющий многократно повысить скорость передачи информации и реализовать независимый многоканальный режим применения. Также, за счет одночастотного спектра излучения и лучшей линейности ватт-амперной характеристики по сравнению с традиционными лазерными диодами использование РОС-лазеров снижает шумы в линиях передачи информации, увеличивает отношение сигнал/шум и расширяет динамический диапазон.

РОС-лазер ИЛПН-249 изготавливается в 14-выводном корпусе типа «батерфляй», снабжен выходным одномодовым изотропным волокном (типа SMF-28) или волокном с поддержанием поляризации (PANDA) с оптическим разъёмом типа FC, APC. В состав ИЛПН-249 входят терморезистор, фотодиод обратной связи и термоохладитель Пельтье. Основные оптические параметры РОС-лазера:

- |  |                     |
|--|---------------------|
| – длина волны излучения, нм                | от 1540 до 1560;    |
| – оптическая выходная мощность, мВт        | не менее 50;        |
| – коэффициент подавления побочной моды, дБ | не менее 30;        |
| – относительная интенсивность шума, дБ/Гц  | не более минус 150; |
| – рабочий ток, мА (тип)                    | 350.                |

Основные требования, предъявляемые к фотодиодам СВЧ-диапазона:

- высокая эффективность О/Е преобразования,
- широкая рабочая полоса частот,
- широкий динамический диапазон.

Мотивацией увеличения уровня оптической мощности в волоконно-оптической линии передачи являются:

- увеличение коэффициента передачи (усиления) линии
- расширение динамического диапазона (SFDR), линейности
- снижения коэффициента шума линии передачи
- отсутствие электронного постусилителя выходного сигнала, ограничивающего полосу пропускания всей системы.

Продемонстрирована новая конструкция фотодиодной гетероструктуры, впервые созданная в Японии для мощных СВЧ-фотодиодов – UTC («UniTraveling Carrier») или однозарядный фотодиод, принципиально отличающаяся от традиционной конструкции PIN фотодиода тем, что при поглощении излучения и формировании внешнего выходного сигнала доминирующую роль играют быстрые носители – электроны, а влияние сравнительно медленных дырок, приводящая в конечном итоге к возникновению эффекта насыщения фотодиода, сведена к минимуму.

В АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» завершена ОКР и разработан приемный

оптический модуль ПрОМ-17 на основе СВЧ-фотодиода с УТС-гетероструктурой собственного производства. Граничная частота диапазона частот по уровню -3 дБ модуля ПрОМ-17 не менее 12 ГГц, выходной фототок 1-дБ компрессии не менее 27 мА, входная мощность без насыщения не менее 40 мВт.

Представлены планируемые «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха» в ближайшее время разработки СВЧ-фотодиодов, в частности:

- разработка мощного 18 ГГц фотоприемника на базе УТС гетероструктур с вертикальным вводом излучения для систем радиофотоники (мощность насыщения не менее 100 мВт);
- разработка мощного до 40 ГГц волноводного фотоприемника с торцевым вводом излучения;
- разработка 18 ГГц балансного фотоприемника СВЧ-диапазона на базе УТС гетероструктуры.

### **РАДИОФОТОННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ И РЕГИСТРАЦИИ СВЧ РАДИОГОЛОГРАММ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА ПРИХОДА СИГНАЛА**

В.В. Валуев<sup>1</sup>, Д. Буркитбаев<sup>1,2</sup>, Н.И. Каргин<sup>1</sup>, В.В. Кулагин<sup>1,2</sup>, Р.В. Рыжук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва, Россия,

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

e-mail: valuevsu@rambler.ru

С помощью радиофотонных технологий формируется и регистрируется радиоголограмма отраженной от объекта СВЧ волны, что позволяет определить угол прихода сигнала. Опорная волна добавляется в радиофотонном блоке обработки, состоящем из СВ-лазеров, двойных параллельных электрооптических модуляторов и фотодетекторов. Численно исследована работа блока и с помощью построения Фурье спектра радиоголограммы найдена минимальная (для плоской отраженной волны) ошибка оценки угла прихода, которая определяется размерами антенны. Создан макет одного канала системы и экспериментально измерена мощность на выходе фотодетектора в зависимости от положения приемника (фазы отраженной волны).

Исследования проводились на частоте 7,5 ГГц для двух различных углов падения отраженной волны на линейную антенную решетку длиной 1,4 м (эффективное число приемников было равно 70). Показано, что вследствие сферичности отраженной волны период радиоголограммы варьируется от 10 см до 20 см вдоль антенной решетки. В этом случае ширина спектра и ошибка определения угла прихода сигнала увеличиваются. Предложен приближенный метод определения координат источника и обсуждается процедура их уточнения.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА ПРИХОДА СИГНАЛА ПУТЕМ РАДИОФОТОННОГО ФОРМИРОВАНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ СВЧ РАДИОГОЛОГРАММ

В.В. Валуев<sup>1</sup>, Н.И. Каргин<sup>1</sup>, В.В. Кулагин<sup>1,2</sup>, Р.В. Рыжук<sup>1</sup>, Д.Е. Буркитбаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

e-mail: valuevsu@rambler.ru

Проводится определение угла прихода сигнала по регистрации радиоголограммы, формируемой при интерференции отраженной от объекта СВЧ волны и опорной волны в радиофотонном блоке обработки, состоящем из СВ-лазера, двойного параллельного электрооптического модулятора и фотодетектора. Экспериментально измерена мощность на выходе фотодетектора в зависимости от фазы падающей волны. Исследования проводились на частоте 7,5 ГГц для двух различных углов падения принимаемой волны на линейную антенную решетку длиной 1,4 м (эффективное число приемников равно 70). Показано, что период радиоголограммы варьируется от 10 см до 20 см вдоль антенной решетки, что связано с нелинейным изменением разности фаз между принимаемой сферической и плоской опорной волнами при изменении координаты приемника. При значительном увеличении расстояния между объектом и антенной решеткой период радиоголограммы не будет изменяться, что позволит с минимальной ошибкой определить значение угла прихода волны от объекта с помощью Фурье спектра радиоголограммы. Для варьируемого периода радиоголограммы ширина спектра и ошибка определения угла прихода сигнала увеличиваются, что приводит к необходимости компенсировать сферичность принимаемой волны или удалять антенную решетку от объекта.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИХРОИЧНЫХ ЗЕРКАЛ НА ОСНОВЕ Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>

Е.С. Слюнько, В.С. Кузнецов, М.М. Зиновьев, Н.Н. Юдин, С.Н. Подзывалов,  
А.Б. Лысенко, А.Ю. Кальсин, А.Ш. Габдрахманов

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Томск, Россия

e-mail: elenohka266@mail.ru

Анализ характеристик материалов подложек, подходящих для создания узкополосных фильтров инфракрасного диапазона показал, что наиболее подходящим материалом является оксид кремния, который оптически прозрачен в ближнем ИК диапазоне и обладает высокими значениями пропускания (~93%). На основе оксидных материалов Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и SiO<sub>2</sub> разработано эффективное дихроичное зеркало с рабочими диапазонами 1600 – 1750 нм и 2050 – 2100 нм. Оба зеркала показали оптические характеристики, более чем удовлетворяющие исходным требованиям. Нанесение интерференционного покрытия на подложку показало, что существует некоторое различие между измеренным спектром и моделированным. Это отличие вызвано отсутствием кварцевого датчика контроля физической толщины слоя. Однако, эти различия не существенны.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10193, <https://rscf.ru/project/23-79-10193>.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ ( $\lambda = 405$ НМ) В АНТИМИКРОБНОЙ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУРАЗИДИНА И НИТРОФУРАЛА В КАЧЕСТВЕ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРОВ

Р.К. Нагорный, Н.Д. Прокопенко, А.В. Микулич, А.И. Третьякова, Т.С. Ананич,  
И.А. Леусенко, Л.Г. Плавская, В.Ю. Плавский, С.В. Якимчук, А.Д. Свечко  
Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68-2, Минск, Беларусь  
e-mail: r.nagorny@dragon.bas-net.by

В работе представлены результаты исследования фотодинамической инактивации штамма бактерий *Escherichia coli* М-17 с использованием светодиодов с максимумом испускания на длине волны  $\lambda = 405$  нм и медицинских препаратов «Фурасол» (действующее вещество фуразидин) и «Фурацилин» (действующее вещество нитрофурал) в качестве фотосенсибилизаторов. Спектры поглощения водных растворов препаратов «Фурасол» и «Фурацилин» характеризуется наличием максимумов при  $\lambda = 395$  нм и  $\lambda = 375$  нм, соответственно. Установлено, что культура *E. coli* М-17 с исходным титром  $2 \times 10^5$  КОЕ/мл подвергается полной инактивации в присутствии препарата «Фурацилин» в концентрации 1,827 г/л (концентрация нитрофурала 0,045 г/л) при дозе облучения 60 Дж/см<sup>2</sup> (время облучения – 20 мин, плотность мощности 50 мВт/см<sup>2</sup>), в то время как облучение без препарата приводит лишь к двукратному снижению числа КОЕ. Использование препарата «Фурасол» в концентрации 0,139 г/л (концентрация фуразидина 0,012 г/л) обеспечивает полную инактивацию исследуемого микроорганизма при аналогичной дозе облучения. Показано, что фотосенсибилизирующее действие фуразидина на штамм бактерий *E. coli* М-17 более выражено в сравнении с нитрофуралом. Таким образом, совместное использование светодиодов с максимумом испускания на длине волны  $\lambda = 405$  нм и препаратов «Фурасол» и «Фурацилин» в качестве фотосенсибилизаторов для инактивации грамотрицательных бактерий существенно превосходит по эффективности применение каждого из факторов по отдельности.

## WHISPERING-GALLERY MODE MICROLASERS FOR RESERVOIR COMPUTING

A. Babichev<sup>1</sup>, I. Makhov<sup>2</sup>, N. Kryzhanovskaya<sup>2</sup>, Y. Zadiranov<sup>1</sup>, Y. Salii<sup>1</sup>, M. Kulagina<sup>1</sup>,  
M. Bobrov<sup>1</sup>, A. Vasil'ev<sup>1</sup>, S. Blokhin<sup>1</sup>, N. Maleev<sup>1</sup>, L. Karachinsky<sup>3</sup>,  
I. Novikov<sup>3</sup> and A. Egorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute, Politekhnikeskaya str, 26, Saint Petersburg, Russia,

<sup>2</sup>HSE University, Kantemirovskaya str., 3A/1, Saint Petersburg, Russia,

<sup>3</sup>ITMO University, Kronverkskiy str., 49, Saint Petersburg, Russia

e-mail: a.babichev@mail.ioffe.ru

In this work we present the first results on the study of microlaser with lasing on whispering-gallery mode suitable for optical reservoir computing. Previously, vertical GaAs-based microcavity with InGaAs quantum dots as gain region and GaAs/Al(Ga)As distributed Bragg reflectors have demonstrated whispering-gallery mode lasing with pumping and collection of emission from the pillars sidewalls. The main drawback of this approach was that just small fraction of pumping light was absorbed by the gain region. Moreover, this pumping scheme does not allow to use this type of microlasers for reservoir computing where the dense spectrally homogeneous low threshold laser array is required. Although the surface-emitting

whispering-gallery mode microlasers was demonstrated, the lasing was demonstrated at 14 K and with drastically large laser threshold pumping power (~100 mW) due to pumping through the pillar sidewalls. Herein, we are firstly demonstrating the surface-emitting whispering-gallery mode lasing (at 950 nm line) at elevated temperatures (~130 K) with extremely low (~240  $\mu$ W) threshold pumping power due to high quality-factor of fabricated micropillars (achieved by optimization of dry etching process) and the usage of  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  distributed Bragg reflectors that do not absorb the pumping emission wavelength (at 808 nm).

The authors from Ioffe Institute acknowledge support in part by the grant of the Russian Science Foundation No. 22-19-00221, <https://rscf.ru/project/22-19-00221/> for the structure design, MBE epitaxy, and the study of photoluminescence and lasing spectra of MBE-grown structures.

## **ПЕРСПЕКТИВЫ МОДИФИКАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИФОСФИДА ЦИНКА-ГЕРМАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЛЕГИРОВАНИЯ ПРИМЕСНЫМИ АТОМАМИ**

А.Б. Лысенко, Н.Н. Юдин, С.Н. Подзывалов, Е.С. Слюнько,  
А.Ю. Кальсин, А.Ш. Габдрахманов

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский Государственный Университет,  
Томск, Россия  
e-mail: festality@yandex.ru

В работе обсуждаются способы модификации оптических и электрофизических свойств дифосфида цинка-германия с помощью введения в структуру монокристалла определенного количества примесей, таких как – Mg, Ca, Se, которые были внедрены в структуру монокристалла с помощью высокотемпературного диффузионного легирования при температурах 650 и 750 °С. Атомы Te были внедрены в монокристалл с помощью объемного легирования на стадии синтеза тройного соединения. Для образцов, модифицированных с помощью диффузионного легирования, были измерены оптические характеристики, такие как коэффициент поглощения, величина пропускания в диапазоне от 0 до 13 мкм, порог оптического пробоя на длине волны падающего излучения равной 2,1 мкм.

Для образца, легированного теллуrom была измерена величина пропускания в диапазоне прозрачности  $\text{ZnGeP}_2$ , а так же вероятность оптического пробоя.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что некоторые примеси благотворно влияют на оптические характеристики дифосфида цинка-германия и необходимо продолжить исследования по легированию монокристаллов дифосфида цинка-германия с помощью элементов 16 группы периодической системы, а именно – серы, селена и теллура.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10193, <https://rscf.ru/project/23-79-10193>.

## QUANTUM-CASCADE LASERS WITH LOW SENSITIVITY TO LAYERS-THICKNESS FLUCTUATIONS

A. Babichev<sup>1</sup>, E. Kolodeznyi<sup>1</sup>, D. Mikhailov<sup>2</sup>, V. Dudelev<sup>2</sup>, A. Gladyshev<sup>1</sup>, S. Slipchenko<sup>2</sup>,  
A. Lyutetskii<sup>1</sup>, L. Karachinsky<sup>1</sup>, I. Novikov<sup>1</sup>, G. Sokolovskii<sup>2</sup>, N. Pikhtin<sup>2</sup> and A. Egorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, Kronverkskiy str., 49, Saint Petersburg, Russia,

<sup>2</sup>Ioffe Institute, Politekhnicheskaya str, 26, Saint Petersburg, Russia

e-mail: evgenii\_kolodeznyi@itmo.ru

The first results on the high-performance 8  $\mu\text{m}$  range quantum-cascade lasers (QCL) based on lattice-matched InGaAs/InAlAs heteropair will be presented. Active region (AR) with 35 stages was designed on adopted single phonon-continuum (SPC) depopulation scheme with high injector doping level. The QCL structure was fully grown by molecular-beam epitaxy on highly-doped InP substrate. 3.5  $\mu\text{m}$  thick InP layers with  $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  average doping level was used as the bottom and top cladding layers. The AR was sandwiched between two 250 nm thick  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  layers aimed to increase the confinement factor ( $\sim 68\%$ ). 200 nm n-doped  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  layer finalized the structure. Double-channel structures with 50  $\mu\text{m}$  ridges width were fabricated by wet etching, substrate lapping and lift-off metallization. The cleaved lasers with uncoated facets were epi-down mounted on cooper submounts. The threshold current density for 5 mm-long samples was  $\sim 2.5 \text{ kA/cm}^2$ . The peak front facet output power was 5.7 W ( $P_{\text{total}} = 11.4 \text{ W}$ ). The total slope efficiency was about 1.4 W/A and the total wall-plug efficiency was up to 6.9%. As a result, optical output characteristics exceed the previous data for MOVPE-grown QCLs based on SPC depopulation scheme and for 50-stages QCLs based on double-phonon resonance design with moderate injector doping level.

The authors from ITMO University acknowledge support in part by the grant of the Russian Science Foundation No. 20-79-10285-П, <https://rscf.ru/project/20-79-10285/> for the laser fabrication and optical characterization.

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ МИКРОПОРОШКОВ СОЕДИНЕНИЯ Ca В $\text{Ga}_2\text{S}_4$ :Nd, Yb В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ УРОВНЕЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ

П.П. Першукевич<sup>1</sup>, О.Б. Тагиев<sup>2,3</sup>, Т.Ш. Ибрагимова<sup>2</sup>, Ф.А. Казимова<sup>2</sup>, М.В. Бельков<sup>1</sup>,  
А. А. Таболич<sup>1</sup>, Е.В. Луценко<sup>1</sup>, А.В. Мудрый<sup>4</sup>, В.Н. Павловский<sup>1</sup>, Г.П. Яблонский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: p.persh@ifanbel.bas-net.by,

<sup>2</sup>Институт физики Министерства науки и образования Азербайджана, Баку,  
Азербайджан; e-mail: azhep@physics.ab.az

<sup>3</sup>Филиал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в Баку,  
Баку, Азербайджан; e-mail: oktay58@mail.ru

<sup>4</sup>Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, Беларусь

В работе приведены результаты исследования технологии синтеза, стоксовой и антистоксовой фотолюминесценции (ФЛ) соединений  $\text{CaGa}_2\text{S}_4$ :3%Nd,5%Yb;  $\text{CaGa}_2\text{S}_4$ :5%Yb;  $\text{CaGa}_2\text{S}_4$ :3%Nd в широком интервале длин волн возбуждения. Исследование влияния уровня возбуждения на структуру спектров люминесценции, легированных ионами неодайма и иттербия кристаллов  $\text{CaGa}_2\text{S}_4$  проведено с использованием светодиодных и лазерных излучателей в широком интервале интенсивностей этих излучателей (от  $\text{mВт/см}^2$  до  $\text{МВт/см}^2$ ). Показано, что в кристаллах  $\text{CaGa}_2\text{S}_4$ :3%Nd, соактивированных ионами  $\text{Yb}^{3+}$ , эффективность ФЛ при стоксовом возбуждении возрастает

на 1-2 порядка по сравнению с неактивированными ионами  $\text{Yb}^{3+}$ . Предполагается, что причиной возникновения этого эффекта является образование состояний с переносом заряда (СПЗ) иона  $\text{Yb}^{3+}$  к матрице, что способствует передаче энергии, поглощенной ионами иттербия, ионам неодима. Изучена кинетика свечения на длинах волн ФЛ 900 и 1075 нм при различных длинах волн возбуждения в диапазоне от 400 до 805 нм. При возбуждении на длине волны 805 нм затухание люминесценции является моноэкспоненциальным, а при возбуждении в области 532 нм – немоноэкспоненциальным. Предполагается, что фотовозбужденные электроны проходят многоступенчатую внутриионную релаксацию и сложную миграцию энергии между уровнями СПЗ  $\text{Yb}^{3+}$  и уровнями иона  $\text{Nd}^{3+}$ . Показана определяющая роль ионов иттербия в возникновении антистоксовой люминесценции в кристаллах  $\text{CaGa}_2\text{S}_4$ , легированных ионами иттербия и неодима. Зависимость интенсивности антистоксовой ФЛ от плотности мощности возбуждения в области от 250 до 1650  $\text{mW/cm}^2$  является нелинейной и свидетельствует об участии в возбуждении двухфотонных и двухступенчатых процессов поглощения.

### УНИПОЛЯРНЫЙ ИНЖЕКЦИОННЫЙ ЛАЗЕР СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С 2-МЯ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

А.А. Афоненко<sup>1</sup>, Д.В. Ушаков<sup>1</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>2,3</sup>, А.А. Дубинов<sup>4</sup>, С.В. Морозов<sup>4</sup>,  
В. И. Гавриленко<sup>4</sup>, Н.Н. Михайлов<sup>5</sup>, С.А. Дворецкий<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск 220030, Беларусь,

<sup>2</sup>Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Москва,

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт

(Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия,

<sup>4</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия,

<sup>5</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения  
Российской академии наук, Новосибирск, Россия

e-mail: afonenko@bsu.by

В работе проанализирована возможность создания некаскадного межподзонного инжекционного лазера среднего ИК диапазона на основе  $\text{HgCdTe}$  с минимальным количеством квантовых ям. Расчеты волновых функций, матричных элементов дипольных переходов и энергий состояний проводились с использованием 3-х зонного к.р-метода на основе самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона. Населенность подзон находилась путем численного решения системы балансных уравнений. Предложена толерантная к ошибкам в толщинах квантовых ям и барьеров структура лазера с двумя квантовыми ямами (КЯ). В качестве инжектора выступает слой объемного материала, с одной стороны, ограниченный барьерным слоем. Основной уровень инжектора объемного слоя туннельно связан с основным уровнем примыкающей КЯ 1, что обеспечивает возрастающую вольтамперную характеристику на рабочем участке. Уровень в КЯ 1 является верхним лазерным уровнем. Основной уровень КЯ 2 является нижним лазерным уровнем и туннельно связан с состояниями объемного материала экстрактора. Расчеты показывают, что при температуре 77 К в структуре достигается модовое усиление около  $30 \text{ см}^{-1}$  на длине волны около 8 мкм.

## МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ, ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК $\text{LaMn}_4\text{O}_3+1\%\text{Er}_2\text{O}_3$

Н.А. Босак<sup>1</sup>, Л.В. Баран<sup>2</sup>, В.В. Малютин-Бронская<sup>3</sup>, А.А. Шевченко<sup>6</sup>,  
Н.В. Подвицкий<sup>5</sup>, А.В. Бука<sup>4</sup>, А. С. Кузьмицкая<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики НАН Беларуси, Минск; <sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск; <sup>3</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск;

<sup>4</sup>Белорусский государственный технологический университет, Минск;

<sup>5</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск;

<sup>6</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, РБ  
e-mail: n.bosak@ifanbel.bas-net.by

Тонкие пленки оксида лантана, легированных эрбием,  $\text{LaMn}_4\text{O}_3+1\%\text{Er}_2\text{O}_3$  осаждались методом высокочастотного лазерного распыления керамических мишеней в вакууме ( $p = 2,2 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.) на экспериментальной лазерной установке на неодимовом стекле (длина волны  $\lambda = 1,06$  мкм, длительность лазерных импульсов на полувысоте  $\sim 85$  нс). Осаждение макроскопически однородных тонких пленок достигалось при плотности мощности лазерного излучения  $q = 77$  МВт/см<sup>2</sup> и частоте повторения импульсов  $f \sim 10$ -12 кГц. Получены тонкие пленки оксида лантана, легированные эрбием, на кремниевой и стеклянной подложках с развитой структурой поверхности. Средняя высота рельефа поверхности пленок на кремнии составляет 65 нм. Наблюдается значительное количество образований в виде капель диаметром 0,2-5,0 мкм и высотой до 800 нм. Максимальное значение пропускания лазерно-осажденной пленки оксида лантана, легированных эрбием, на кремнии наблюдается в ближней ИК – области спектра и достигает величины  $T = 58\%$  на длине волны  $\lambda = 1227$  нм. Спектр коэффициента отражения наноструктурированной пленки на кремниевой подложке носит осциллирующий характер. Вольт-амперная характеристика имеет зависимость, характерную для диода Шоттки.

## КАЛИБРОВКА СОСТАВА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ИНТЕРВАЛЬНЫМ МЕТОДОМ ЧАСТИЧНЫХ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ ПО ЭМИССИОННЫМ СПЕКТРАМ НИЗКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

М. В. Бельков, К.Ю. Кацалап, Д.А. Королько, М.А. Ходасевич  
Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68-2, Минск, Беларусь  
e-mail: d.korolko@ifanbel.bas-net.by

Разработаны количественные многопараметрические модели калибровок концентраций набора химических элементов, достаточного для проведения идентификации низколегированных сталей по эмиссионным спектрам низкого разрешения. Для построения калибровок применялся многопараметрический метод частичных наименьших квадратов. Уменьшение влияния избыточности широкополосных эмиссионных спектров на результаты количественного анализа достигалось с помощью поиска комбинации движущихся окон оптимальной ширины. Для повышения точности калибровок использовалась коррекция базовой линии адаптивным методом наименьших квадратов со штрафом и итеративным пересчётом весов. По лазерным эмиссионным спектрам эталонных образцов низколегированных сталей получены калибровки концентрации углерода со среднеквадратичным отклонением не хуже 0.06 % в диапазоне до 0.8 %, марганца – 0.02 % и 2.0 %, соответственно, хрома – 0.01 % и 1.0 %, кремния – 0.02 % и 1.2 %, никеля – 0.04 % и 0.8 %, меди – 0.02 % и 0.5 %, ванадия и титана –

0.005 % без ограничения диапазона.

Полученные многопараметрические модели являются количественными для указанных элементов, что позволяет определять сорт исследуемых сталей экспрессным образом на производстве или при их вторичной переработке.

## **ПИКОСЕКУНДНАЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СТРУКТУРА ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ НА КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ**

Е.В. Тимошенко<sup>1</sup>, В.А. Юревич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Могилевский государственный университет имени А.А. Кулешова, Могилев, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий,

Могилев, Беларусь

e-mail: timoshchenko@msu.by

В компактных источниках лазерного излучения для схемы устройств передачи и обработки информации в качестве материалов для активных элементов предпочтительны полупроводниковые структуры с квантоворазмерными эффектами. Субмикронные и нанометровые слои структур, формируемых из квантовых точек (КТ) с относительно высокой концентрацией, при выраженном резонансном отклике на поле могут обладать сильной нелинейностью. В этих объектах возможно наблюдение когерентных оптических явлений и нелинейной фазовой перестройки действующего поля, которая способна обусловить эффективную амплитудно-фазовую связь.

К характерным следствиям проявления нелинейности резонансного отклика структур КТ на поле когерентного излучения относят факторы, обуславливающие перенормировку фазового соотношения действующего поля и поляризационного отклика вещества. Среди них – резонансная нелинейная рефракция, влияние диполь-дипольного взаимодействия на резонансную частоту слоя КТ и квадратичный (оптический) эффект Штарка. В работе, положенной в основу сообщения, представлена нестационарная модель динамики излучения с учетом упомянутых взаимосвязанных фазовых эффектов.

Оригинальность подхода в оценке динамики излучения состоит в том, что нелинейная модель явления формулируется с использованием обобщённого представления двухуровневой схемы взаимодействия светового поля с массивом КТ. Результаты расчётов динамики выходного излучения, основанные на качественном анализе устойчивости стационарных состояний модели, показали, что решающим фактором самопроизвольного образования регулярных субпикосекундных пульсаций с пикосекундным периодом является именно оптический эффект Штарка. Смещение резонансной частоты, обусловленное нелинейным эффектом, способно стимулировать действенную амплитудно-фазовую связь, приводящую к автоколебательному процессу.

## ДЖИТТЕР КОМПАКТНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ С ПАССИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ

М.В. Богданович<sup>1,2</sup>, А.В. Григорьев<sup>2</sup>, В.Н. Дудиков<sup>1,2</sup>, А.Г. Рябцев<sup>1,2</sup>, Г.И. Рябцев<sup>2</sup>,  
П.О. Татура<sup>1,2</sup>, И.В. Савинка<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, РБ,

<sup>2</sup>Институт физики НАН Беларуси, Минск, РБ

e-mail: gennadii.ryabtsev@dragon.bas-net.by

Работа посвящена изучению взаимосвязи параметров джиттера диоднонакачиваемых твердотельных лазеров, добротность резонаторов которых модулируется пассивными затворами/фильтрами, с базовыми характеристиками излучателей. Экспериментально исследовались иттербий-эрбиевые (длина волны 1,54 мкм) и неодимовые (длина волны 1,06 мкм) лазеры с поперечной диодной накачкой, а также параметрические генераторы света с задающим диоднонакачиваемым Nd:YAG лазером, излучающие на длине волны 1,57 мкм. В качестве пассивных затворов использовались кристаллы  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  (Yb,Er- лазеры) и  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  (Nd:YAG лазеры и параметрические генераторы света).

В интервале температур от минус 40° С до плюс 60° С изучены зависимости пропускания пассивных затворов  $S$  от плотности потока энергии  $E$  импульсов падающего излучения. Показано, что с уменьшением температуры окружающей среды эффект просветления затворов регистрируется при более низких значениях  $E$ . Установлено, что величины  $E$ , при которых происходит просветление затвора, и соответствующие им значения  $S$  коррелируют с параметрами временного и пространственного джиттера излучения изученных лазеров.

Полученные данные следует учитывать при необходимости достижения устойчивого режима синхронизации работы импульсных диоднонакачиваемых твердотельных лазеров, модуляция генерируемого излучения которых обеспечивается пассивными затворами/фильтрами, с внешними управляющими устройствами.

## ВЧ РОЗЖИГ ЛАМПЫ $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ ЛАЗЕРА: КРАТНОЕ СНИЖЕНИЕ ПОРОГА И УВЕЛИЧЕНИЕ КПД ГЕНЕРАЦИИ

А.М. Вальшин<sup>1\*</sup>, академик НАН Беларуси В.А. Орлович<sup>2</sup>, С.А. Бельков<sup>3</sup>,  
С.М. Першин<sup>4\*\*</sup>, М.Я. Гришин, В.И. Пузыревский<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, 450076, Уфа, Россия

<sup>2</sup>Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики, Саров, Россия,

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

<sup>5</sup>ООО «Зенит Трейдинг», 124460, г. Москва, Зеленоград, Россия

\*e-mail: Amvals@mail.ru, \*\* e-mail: pershin@kapella.gpi.ru

Впервые, насколько нам известно, достигнуто 3-кратное снижение порога генерации и 2-кратное повышение КПД  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  лазера при двухступенчатом питании лампы вспышки по сравнению с общепринятым разрядом емкости [1]. Так, высокочастотный (ВЧ, 3 МГц) розжиг лампы в течение 300-400 мкс после ее ВЧ поджига обеспечивает заполнение возбужденными атомами газа всего объема лампы по сравнению с разрядом емкости в виде шнура разряда в приосевой области без ВЧ розжига. Повышение концентрации возбужденных атомов накачки проявляется в увеличении энергоклада в активный элемент лазера. Лазер собран на коммерческом квантроне К301 с  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$



активным элементом ( $\varnothing 6 \times 60$  мм) и коммерческой лампой ДНП  $\varnothing 6 \times 90$  с криптоном в резонаторе (400 мм) с плоскими зеркалами (100% и 55 % на длине волны 1064 нм). Порог генерации лазера регистрировали по второй гармонике (532 нм) с помощью стандартного люминофора из прессованного кристалла  $\text{LiNbO}_3$ . Обсуждается использование режима повышения КПД и стабильности генерации задающих каскадов больших лазерных комплексов из-за уменьшения тепловой нагрузки на активные элементы [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ №23-42-10019 и №Ф23Р-НФ-40 Белорусского Республиканского Фонда Фундаментальных Исследований.

1. А.М. Вальшин, академик НАН Беларуси В.А. Орлович, С.А. Бельков, С.М. Першин, В.И. Пузыревский, 3-кратное снижение порога генерации и 2-кратное увеличение КПД  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  лазера при ВЧ раскочке поджига лампы//Инженерная физика, 2023, №12, 3-10.
2. S. Yu. Gus'kov, Laser Thermonuclear Fusion and High Energy Density Physics, Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2023, Vol. 50, Suppl. 4, pp. S395–S404

## **ЗАПУСК КОМПЛЕКСА МОС-ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИИ НА ОСНОВЕ УСТАНОВКИ AIXTRON CCS 6X2, РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ GaN С НИЗКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ДИСЛОКАЦИЙ**

И.И. Марончук, М.В. Меженный, А.А. Чельный, П.С. Рыбин  
АО «Оптрон», Москва, РФ  
e-mail: mvmezh@gmail.com

**Ключевые слова:** МОС-гидридная эпитаксия, установка AIXTRON CCS 6X2, нитрид галлия, сапфировая подложка, триметилгаллия, аммиак, эпитаксиальный слой, фотоотклик, электронная микроскопия, оптическая микроскопия, рентгенодифракционный анализ.

Отражены этапы монтажа и запуска комплекса оборудования МОС-гидридной эпитаксии AIXTRON CCS 6X2. Осуществлен комплекс наладки контрольных систем роста структур *in situ*. Авторами разработана технологическая схема получения гетероструктур на основе GaN, проведен цикл экспериментальных работ по отработке технологических режимов получения эпитаксиальных пленок GaN на сапфировой подложке, подготовлен программа реализации экспериментов. Отработаны процессы отжига в диапазоне температур от 950 до 1100 °С и нитридации подложки при низких температурах от 500 до 550 °С. Выращивание низкотемпературного зародышевого слоя осуществляли по трем структурным схемам в рамках разработанной технологии: импульсная подача триметилгаллия при непрерывной подаче аммиака, импульсная поочередная подача реагентов, одновременная подача. Процессы осуществляли при низких температурах от 500 до 550 °С, проводя до 15 серий импульсов с временным ограничением до 160 секунд. Для всех перечисленных вариантов отработан режим отжига зародышевого слоя при временном интервале от 400 до 800 секунд. Коалесцентный слой формировали, изменяя потоки аммиака от 2,0 до 3,5 л/мин и/или поднимая температуру от 950 до 1050 °С. Авторами продемонстрировано, что уменьшение потока аммиака и/или снижение температуры коалесценции сказывается на времени формирования слоя и качества его структуры. Выращивание буферного слоя заканчивали выдержкой при температурах от 950 до 1050 °С и временных интервалах от 600 до 3600 секунд. Исследования структурных характеристик проводили методами оптической и электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии.



# Lasers & Laser Systems



## EXCEEDING CUSTOMER'S EXPECTATIONS

For more than 30 years SOLAR LS has been developing and producing unique individual laser solutions meeting specific requirements of our customers. Being an expert in the field of solid-state lasers, our company also takes part in research projects for science, medicine and industry.

## Lasers & Laser Systems

SOLAR LS laser equipment features excellent specifications along with minimum requirements to operating conditions and extended service intervals. This combination of user-specific features makes our products the ideal tools for solving diversified tasks:

- Laser ablation
- Ultrafast spectroscopy
- Nonlinear spectroscopy
- Scribing, cutting and marking
- LIDAR, DIAL
- PIV measurements
- LIBS and plasma research
- Holography and optical measurements
- Laser ranging
- Detecting explosives, toxic and narcotic agents

01

### FEMTOSECOND LASERS



- Pulswidth up to 120 fs
- Output power up to 8 W
- VIS and UV harmonic generators
- Diode pumping

02

### PICOSECOND LASERS



- Pulswidth less than 30 ps
- Output power up to 6 W
- VIS and UV harmonic generators
- Diode pumping

03

## NANOSECOND LASERS

- Pulsed energy up to 1.5 J
- PRR up to 100 Hz
- VIS and UV harmonic generators
- Gaussian or flat-top beam profile



04

## DPSS LASERS

- Output power up to 10 W @ 30 kHz
- Pulsed energy up to 150 mJ @ 20 Hz
- Air cooling
- 7/24 operation mode



05

## TUNABLE LASERS

- Ti:Sapphire lasers, OPO and DFG systems
- Nanosecond and picosecond lasers
- 0.2 ... 20  $\mu\text{m}$  tuning range
- Pulse energy up to 150 mJ
- Linewidth up to 0.1  $\text{cm}^{-1}$



## CUSTOMIZED LASER SYSTEMS

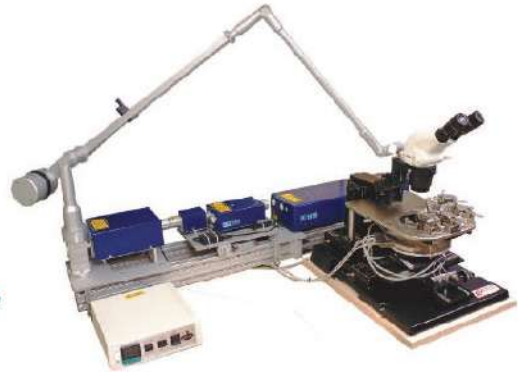
As the expert in solid-state lasers, SOLAR LS successfully designs and manufactures customized laser systems, both for private companies and for government institutes.

Highly qualified staff, wide development experience and dedicated production allow to create products that meet the specific customer requirements, with the design and reliability intrinsic for serial products.

Here are some examples of our custom-designed laser systems, just to name a few

### Laser system for modeling the effect of ionizing radiation on semiconductor microstructures

- Output wavelength 1064 nm and 532 nm,
- Mirror articulated arm is user as a beam delivery system,
- Output energy 350 mJ @ 20 Hz.



### IR Laser system for DIAL applications

- Tuning range: 3...4  $\mu\text{m}$
- Linewidth  $< 1 \text{ cm}^{-1}$
- Output energy 10 mJ @ 20 Hz



### Laser system for remote probing and location of various objects

- Output wavelength 1064 nm, 532 nm, 355 nm, 266 nm
- Beam pointing stability at changing output wavelength 0.2 mrad
- Output energy 100 mJ @ 20 Hz



You can find more information on our web-site:

[www.solar-laser.com](http://www.solar-laser.com)

You are welcome to cooperate with us!

SOLAR Laser Systems

Address: 4 Stebenev lane, Minsk 220024, BELARUS

Fax: 375 (17) 2019596

Phone: +375 (17) 2019490

Email: [info@solarls.eu](mailto:info@solarls.eu), [sales@solarls.eu](mailto:sales@solarls.eu)

# SPECTRAL INSTRUMENTS



## EXCEEDING EXPECTATIONS

SOLAR LS develops and produces unique spectral instruments for the fields of science, production and technology. Due to close cooperation with our customers, we have a possibility not only to trace the prospective trends in spectral instruments development, but also to create products that meet the Users' requirements in the best way.

## 01

### MONOCHROMATORS/SPECTROGRAPHS

A comprehensive product range of monochromators-spectrographs with focal length 140mm to 830mm and 30x10mm flat field, along with short-focal-length monochromators-illuminators and double monochromators with low stray light.

- Automated Monochromator/Spectrograph M150
- Automated Monochromator/Spectrograph M266
- Automated Monochromator/Spectrograph M522
- Double Additive/Subtractive Monochromator MSA-130
- High-aperture compact monochromator ML44



## 02

### COMPACT SPECTROMETERS

A wide product range of compact spectrometers for the range of 190nm to 2600nm, including high-sensitive instruments based on back-illuminated sensors as well as spectrometers with high spatial resolution across the entire focal plane ideal for imaging multiple optical fibers, etc.

- High Sensitivity Compact Spectrometer SC125
- Compact Wide-Range Spectrometer S100
- Compact NIR-Spectrometer S90-IR
- Multichannel Imaging Spectrometer S200-MF
- High-Aperture Multipurpose Spectrometers SDH



## 03

### HIGH-RESOLUTION WAVELENGTH METERS FOR LASERS/DIODES

Wavelength meters for lasers and diodes, covering 190 to 1800nm spectral range and featuring high precision and the ability of spectra demonstrating and analyzing. The convenient input of radiation into a MM-fiber.

- Precise wide-range wavelength meter SHR
- Wide-range IR wavelength meter SHR-IR



04

**Tunable Light Source model XWS**

Tunable in range 190-2500 nm

Optical power – milliwatts of energy in 6-10 nm bandwidth



05

**Multichannel Imaging-spectrograph S200-MF with full astigmatism compensation**

For multichannel spectroscopy. Synchronous spectra imaging from two up to dozens optical fibers. High spectral and spatial resolution. Integrated CCD-array and custom software for multi-channel optical spectroscopy. Adapter for your CCD-array as an option.



06

**DOUBLE MONOCHROMATOR-SPECTROGRAPH BASED ON THE M266**

Dispersion additive. Due to larger focal length and dispersion addition, the twice-better spectral resolution and lower stray light are achieved.





## CUSTOM-MADE SPECTRAL INSTRUMENTS

SOLAR LS, an expert in the sphere of laser and spectral equipment, has been working in the world photonics market for over 30 years.

Among others, our company carries out development of unique optical schemes and full-scale production of OEM monochromators-spectrographs upon orders of analytical equipment manufacturers.

### SOLAR LS also supplies:

- Multichannel detectors and PMTs,
- Light collections and fiber coupling systems,
- Spectra processing software,
- Irradiance calibrated spectrometers,
- Colorimetry software modules.

### More than 3500 satisfied customers all over the world!

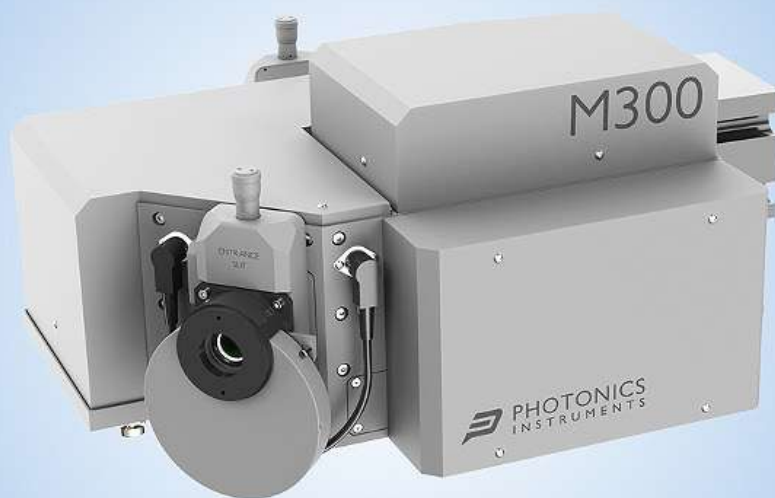


You are welcome to cooperate with us!

You can find more information on our web-site: [www.solar-laser.com](http://www.solar-laser.com)

# 20-ЛЕТНИЙ ОПЫТ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

ООО «Фотоникс инструментс» г. Минск



- Спектрометры
- Монохроматоры
- Высокоточные измерители  
длины волны лазеров и диодов



[www.photonics.by](http://www.photonics.by)

[info@photonics.by](mailto:info@photonics.by)

ph.+375(17)235-16-32

# СОЗДАНЫ ПО ПЕРЕДОВЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ ИМПУЛЬСНЫЕ Nd:YAG ЛАЗЕРЫ GRAPHITE И CORUNDUM



Импульсные Nd:YAG лазеры серий Graphite и Corundum идеально подходят для решения научно-исследовательских и промышленных задач

- Длины волн 1064, 532, 355 и 266 нм
- Энергия импульса до 1500 мДж
- Частота повторения импульсов до 100 Гц
- Режим пачек импульсов *Burst mode*
- Встроенный измеритель энергии
- Компактный корпус
- Производство Республика Беларусь



Простота эксплуатации · Высокая надёжность

Компания «СЛС Прайм Технолоджи» объединила ведущих специалистов в области разработки и производства лазеров и лазерных систем, с целью обеспечить отечественные рынки необходимым оборудованием, созданным по передовым технологиям.

Лазеры серий Graphite и Corundum это обновлённая версия импульсных Nd:YAG лазеров. Лазеры Graphite и Corundum построены на одной платформе, обладают повышенной надёжностью и предлагают широкий спектр сочетаний энергии импульса (до 1,5 Дж) и их частоты повторения (до 100 Гц).

Новая линейка компактных и надежных лазеров с отличным качеством излучения может использоваться, как для научных исследований, так и в качестве OEM-модулей в промышленном оборудовании.

*Более подробную информацию Вы можете получить у наших специалистов по e-mail или телефону:*

+375 (740) 740-95-55  
sales@sls-prime.com  
www.sls-prime.com

**SLS**  
PRIME TECHNOLOGY

Программа и тезисы докладов

2-ой Международной конференции  
**ЛАЗЕРЫ, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ И  
СИСТЕМЫ НА ИХ ОСНОВЕ**  
(LSES Minsk 2024)  
20 - 24 мая 2024 г., Минск, Беларусь

Лазеры, полупроводниковые излучатели и системы на их основе : прогр. и тез. докл. 2-ой Междунар. конф., Минск, 20 - 24 мая 2024 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.] ; под ред. Г.И. Рябцева, З.Н. Соколовой, Е.А. Невар. – Минск : Институт физики НАН Беларуси, 2024. – 82 с.

Lasers, semiconductor emitters and systems: program and book of abstracts of 2nd Int. conf., Minsk, May 20 - 24, 2024 / Nat. Acad. of Sciences of Belarus [and others]; edited by G.I. Ryabtsev, Z.N. Sokolova, E.A. Nevar. – Minsk: Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 2024. – 82 p.

---

Подписано к печати 10.05.2024 г.  
Тип бумаги: офисная.  
Объём: 10.25 печ. л  
Заказ №5

Формат 60x90 1/8.  
Печать: ризография.  
Тираж: 100 экз.

---

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ НАН Беларуси  
220072 Минск, пр. Независимости, 68-2  
Отпечатано на ризографе ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси

---



### Контакты:



[lses2024@ifanbel.bas-net.by](mailto:lses2024@ifanbel.bas-net.by)



+ 375 (17) 270-83-98  
+ 375 (17) 270-80-19