

**2-й РОССИЙСКИЙ СИМПОЗИУМ**

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ:  
ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ**

К 50-летию первого лазера

Санкт-Петербург, 10–12 ноября 2010 года

**Программа и тезисы докладов**

Санкт-Петербург, 2010

## **Симпозиум организован**

*Учреждением Российской академии наук Физико-техническим институтом*

*им. А.Ф. Иоффе РАН*

*Санкт-Петербургским академическим университетом –*

*научно-образовательным центром нанотехнологий РАН*

### **при содействии**

ЗАО НТА «Интеллект»

и проводится при финансовой поддержке

Российского фонда фундаментальных исследований

Санкт-Петербургского научного центра РАН

Отделения физических наук РАН

НПК «Инжект»

ЗАО «ФТИ–Оптроник»

ООО «Сигм Плюс»

ООО «Эльфолюм»

Группы компаний МИЛОН

Председатель симпозиума

Ж. И. Алферов

### **Программный комитет**

**И. С. Тарасов**, *председатель*

**А. Е. Жуков**, *сопредседатель (молодежная сессия)*

**З. Н. Соколова**, *секретарь*

ФТИ им. Иоффе

СПб АУ НОЦНТ РАН

ФТИ им. Иоффе

Л.Е. Воробьев	СПб ГПУ	А.А. Горбачевич	СПб АУ НОЦНТ РАН
А.Г. Забродский	ФТИ им. Иоффе	И.Н. Завестовская	ФИАН
П.С. Копьев	ФТИ им. Иоффе	В.В. Кабанов	ИФ НАН
О.Н. Крохин	ФИАН	В.В. Кочаровский	ИПФ РАН
Г.Т. Микаелян	НПК «Инжект»	А.А. Мармалюк	НИИ «Полюс»
Е.Л. Портной	ФТИ им. Иоффе	Ю.М. Попов	ФИАН
Р.А. Сурис	ФТИ им. Иоффе	В.А. Симаков	НИИ «Полюс»
Ю.П. Яковлев	ФТИ им. Иоффе	Г.П. Яблонский	ИФ НАН

### **Организационный комитет**

**И. Н. Арсентьев**, *председатель*

ФТИ им. Иоффе

**З. Н. Соколова**, *секретарь*

ФТИ им. Иоффе

Н.С. Аверкиев	ФТИ им. Иоффе	М.Н. Баранов	СПб АУ НОЦНТ РАН
А.Д. Бондарев	ФТИ им. Иоффе	М.Г. Растегаева	ФТИ им. Иоффе
С.О. Слипченко	ФТИ им. Иоффе	Ю.В. Трушин	СПб АУ НОЦНТ РАН

## Спонсоры



Российский фонд фундаментальных исследований



Санкт-Петербургский научный центр РАН



Российская академия наук

Отделение физических наук РАН



НПК «Инжект», Саратов



ЗАО «ФТИ-Оптроник»



ООО «Сигм Плюс»



ООО «Эльфолюм»



Группа компаний МИЛОН:  
ООО «МИЛОН лазер» Санкт-Петербург,  
ООО «Квалитек» Москва

# Окрестности ФТИ им. А.Ф. Иоффе



## **Программа симпозиума**

**10 ноября, среда**

**Санкт-Петербургский академический университет.**

**Актальный зал.**

**9:00 – 10.30** *Регистрация*

**10:30** Ж.И. Алферов.

*Открытие симпозиума*

**11:00** О.Н. Крохин.

*Полупроводниковые лазеры: история.*

### **Секция «Квантово-каскадные лазеры»**

**11:20** А.А. Богданов, Р.А. Сурис

*Модовая структура каскадных лазеров.*

**11:40** Ю.А. Алещенко, В.В. Капаев, Ю.В. Копаев.

*Многoperиодные структуры с асимметричными барьерами как прототип активного элемента униполярного лазера.*

**12:00** Д.Г. Ревин, J.P. Commin, S.Y. Zhang, K. Kennedy, А.Б. Крыса, J.W. Cockburn

*Коротковолновые  $\lambda \sim 3\text{-}4$  мкм квантово каскадные лазеры, работающие при температурах до 400 К.*

**12:20** *Coffee break*

### **Секция «Мощные полупроводниковые лазеры и лазерные линейки».**

**12:40** Г.Т. Микаелян.

*Полупроводниковые лазерные линейки и их наборы для накачки активных сред и обработки материалов*

**13:00** В.А. Щукин, Н.Н. Леденцов, D. Vimberg

*Новые концепции мощных полупроводниковых лазеров высокой яркости.*

**13:20** Н.А. Пихтин, В.В. Васильева, Д.А. Винокуров, А.В. Лютецкий, А.В. Рожков,

Н.А. Рудова, З.Н. Соколова, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов.

*Мощные импульсные полупроводниковые лазеры.*

**13:40** В.К. Кононенко, В.В. Парашук, С.С. Поликарпов, В.М. Стецик.

*Спектральные и мощностные характеристики ширококонтактных квантоворазмерных гетеролазеров в системе AlGaInAs-AlGaAs.*

**14:00** А.Ф. Иванов, Е.В. Смирнов, А.В. Фомин.

*Разработка и создание полупроводниковых лазерных излучателей в РФЯЦ-ВНИИТФ.*

**14:20** *Обед*

### **Секция «Лазеры на квантовых точках».**

**15:20** Л.В. Асрян, Р.А. Сурис.

*Максимально возможная полоса частот токовой модуляции лазера на квантовых точках.*

**15:40** А.Б. Крыса.

*Лазеры на основе InP квантовых точек в AlGaInP, излучающие в диапазоне 700-800 нм.*

**16:00** И.О. Бакшаев, И.М. Гаджиев, Е.Л. Портной.  
*Интегрально-оптическая дифференциальная абсорбционная спектроскопия наногетероструктур.*

**16:20** *Coffee break*

**Секция «Применение полупроводниковых излучателей».**

**16:40** М.Л. Гельфонд, Д.М. Демидов, Р.В. Леус, С.Н. Родин, А.Л. Тер-Мартirosян.  
*Мощные непрерывные диодные лазеры красного диапазона спектра для лечения онкологических заболеваний методом фотодинамической терапии.*

**17:00** И.Н. Завестовская, В.В. Безотосный, А.П. Канавин, Н.А. Козловская, О.Н. Крохин, В.А. Олещенко, Ю.М. Попов, Е.А. Чешев.

*Использование твердотельных лазеров с диодной накачкой для нано- и микроструктурирования поверхности металлов.*

**17:20** А.А. Мармалюк, А.В. Иванов, В.Д. Курносов, К.В. Курносов, Р.В. Чернов, В.И. Романцевич, А.Ю. Андреев, К.Ю. Телегин, Н.А. Волков, А.Н. Беседина, В.С. Жолнеров.

*Лазерные излучатели для квантовых стандартов частоты.*

**17:40** В.А. Овсянников.

*Полупроводниковые лазеры в медицине: итоги за 30 лет применения и задачи на будущее.*

---

**11 ноября, четверг**

**Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе. Большой актовый зал.**

**Секция «Новые конструкции полупроводниковых лазеров».**

**10:00** А.А. Андронов, Д.Е. Святошенко.

*Возможен ли спазер на квантовых точках или ямах?*

**10:20** Н.Ю. Гордеев, И.Г. Савенко, И.В. Иорш, М.А. Калитеевский

*Новые конструкции торцевых пространственно-одномодовых лазеров.*

**10:40** Б.С. Рывкин, Е.А. Аврутин, J.T. Kostamovaara.

*Лазеры на КЯ с экстремально большим «эквивалентным размером моды» для генерации пикосекундных импульсов излучения с большой энергией методом модуляции усиления.*

**11:00** В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов, В.И. Рыжий.

*Лазерные перспективы графена.*

**11:20** Е.А. Гребенщикова, В.В. Шерстнев, А.М. Монахов, А.Н. Баранов, Ю.П. Яковлев.

*Эффект шепчущей галереи в инфракрасных лазерах: технология резонатора.*

**11:40** *Coffee break*

**Секция «Физические процессы в полупроводниковых лазерных структурах».**

**12:00** В.Я. Алешкин, Т.С. Бабушкина, А.А. Бирюков, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, М.Н. Колесников, С.М. Некоркин.

*Аномальные характеристики лазеров с большим числом квантовых ям.*

**12:20** Л.Е. Воробьёв, L. Sterengas, В.Л. Зерова, М.Я. Винниченко, G. Kipshidze, T. Hosoda, Д.А. Фирсов, G. Belenky.  
*Разогрев и поглощение света носителями заряда в лазерных Sb-содержащих наноструктурах в режиме генерации.*

**12:40** Н.В. Дьячков, А.П. Богатов.  
*Параметры Стокса излучения поперечно-одномодовых InGaAs/AlGaAs лазеров с квантоворазмерной активной областью.*

**13:00** Л.А. Кулакова.  
*Ультразвуковое расщепление дырочных уровней в квантовой яме InGaAsP/InP – лазерных гетероструктур.*

**13:20** М.В. Богданович, В.В. Кабанов, Е.В. Лебедев, А.А. Романенко, Г.И. Рябцев, А.Г. Рябцев, М.А. Щемелев.  
*Излучательная и безызлучательная рекомбинация в мощных лазерных диодных линейках.*

**13:40** Обед

### **Секция «Динамические характеристики полупроводниковых лазеров».**

**14:40** С.С. Гаврилов, В.Д. Кулаковский, Д.М. Крижановский, А.С. Бричкин, А.А. Дородный, D. Sarkar, А.В. Ларионов, Н.А. Гиппиус, С.Г. Тиходеев.  
*Мультистабильность оптического отклика в системе экситонных поляритонов в полупроводниковом микрорезонаторе типа III-V.*

**15:00** С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, А.Ю. Лешко, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов.  
*Модовый состав излучения мощных полупроводниковых лазеров и его динамические характеристики.*

**15:20** Л.И. Буров, А.С. Горбацевич, Е.С. Соколов.  
*Динамика поляризационных переключений и динамический отклик полупроводниковых инжекционных лазеров при поляризованной оптической инжекции.*

**15:40** И.А. Андреев, И.М. Гаджиев, Е.А. Гребенщикова, А.Г. Дерягин, В.В. Дюделев, Н.Д. Ильинская, Г.Г. Коновалов, Е.В. Куницына, В.И. Кучинский, М.П. Михайлова, О.В. Серебренникова, Г.С. Соколовский, Ю.П. Яковлев.  
*Регистрация коротких импульсов лазерного излучения в спектральном диапазоне 1.3-2.4 мкм с помощью быстродействующих p-i-n фотодиодов.*

**16:00** Coffee break

### **Секция «Полупроводниковые лазеры с дифракционной решеткой».**

**16:20** В.В. Кочаровский.  
*Брэгговская селекция мод в сверхизлучающих гетеролазерах.*

**16:40** М.В. Максимов, Н.Ю. Гордеев, И.И. Новиков, А.М. Кузнецов, Ю.М. Шерняков, А.Е. Жуков, А.В. Чунарева, А.С. Паюсов, Д.А. Лившиц, А.Р. Ковш.  
*Полупроводниковые лазеры с дифракционным фильтром оптических мод.*

**17:00** Е.Л. Портной.  
*Интерференционный лазерный отжиг – современная технология формирования фотонных кристаллов.*

**19:00** Конференционный ужин.

**12 ноября, пятница**  
**Санкт-Петербургский академический университет.**  
**Актальный зал.**

**Секция «Туннельно- связанные эпитаксиально-интегрированные полупроводниковые лазеры».**

- 10:00** В.А. Симаков.  
*Перспективные источники накачки твердотельных лазеров на основе интегрированных наногетероструктур.*
- 10:20** М.В. Зверков, В.В. Кричевский, В.П. Коняев, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, В.А. Симаков, С.М. Сапожников.  
*Лазерные диоды с несколькими излучающими областями и импульсные излучатели повышенной мощности на основе эпитаксиально-интегрированных гетероструктур.*
- 10:40** М.А. Ладугин, М.В. Зверков, В.П. Коняев, В.В. Кричевский, А.А. Мармалюк, В.А. Симаков, А.В. Соловьева, И.В. Яроцкая.  
*Влияние режима работы на выходные характеристики лазерных диодов с несколькими излучающими областями (In,Al)GaAs/AlGaAs.*

**Секция «Полупроводниковые излучатели и приемники терагерцового излучения».**

- 11:00** Д.Р. Хохлов.  
*Чувствительные приемники терагерцового излучения на основе полупроводников IV-VI.*
- 11:20** С.Ю. Саркисов, М.М. Назаров, О.П. Толбанов, А.П. Шкуринов.  
*Генерация импульсного терагерцового излучения в полупроводниковых кристаллах GaSe и GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>.*
- 11:40** *Coffee break*

**Секция «Диагностика полупроводниковых лазерных структур».**

- 12:00** Б.Я. Бер.  
*Вторично-ионная масс спектроскопия низкоразмерных гетероструктур. Возможности и приложения.*
- 12:20** П.В. Середин, А.В. Глотов, Э.П. Домашевская, В.Е. Руднева, И.Н. Арсентьев, Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов.  
*Структурные и оптические исследования мос-гидридных Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As: Si/GaAs (100) гетероструктур.*
- 12:40** М.В. Заморянская, А.Л. Бакалейников, Я.В. Кузнецова, Т.Б. Попова, А.Н. Трофимов, А.А. Шахмин, Е.Ю. Флегантова.  
*Исследование лазерных гетероструктур локальными методами.*

**13:00 – 15:00 – Стендовая секция**

**13:00** *Обед*

**Секция «Полупроводниковые лазеры видимого и УФ диапазонов».**

- 15:00** Е.В. Луценко, Н.П. Тарасюк, Н.В. Ржеуцкий, А.В. Данильчик, Г.П. Яблонский, В.Н. Жмерик, А.М. Мизеров, Т.В. Шубина, П.С. Копьев, С.В. Иванов.



- Оптические и лазерные свойства гетероструктур с активной областью на основе AlGaIn квантовых ям, излучающих в глубокой УФ области спектра.*
- 15:20** В.Н. Жмерик, А.М. Мизеров, А.А. Ситникова, М.А. Яговкина, П.С. Копьев, Е.В. Луценко, Н.П. Тарасюк, Н.В. Ржеуцкий, А.В. Данильчик, Г.П. Яблонский, С.В. Иванов.  
*Молекулярно-пучковая эпитаксия лазерных гетероструктур с квантовыми ямами AlGaIn для ультрафиолетовой области спектра.*
- 15:40** Г.П. Яблонский, В.З. Зубелевич, Е.В. Луценко.  
*Катастрофическая деградация оптически накачиваемых лазеров на основе выращенных на кремнии гетероструктур с квантовыми ямами InGaIn/GaIn.*
- 16:00** К.А. Булашевич, М.С. Рамм, С.Ю. Карпов.  
*Особенности электронного и оптического ограничения в гетеролазерах на основе нитридов III группы.*
- 16:20** М.М. Мездрогина, Ю.В. Жилиев, С.Н. Родин, Ю.В. Кожанова  
*GaN, легированный РЗИ (Tm, Eu, Er, Sm, Yb) - перспективный материал для создания излучающих структур для видимой, ИК-областей спектра.*
- 16:40** Е.В. Луценко, А.Г. Вайнилович, Н.П. Тарасюк, Г.П. Яблонский, С.В. Сорокин, И.В. Седова, С.В. Гронин, С.В. Иванов.  
*Лазерные характеристики гетероструктур с ZnCdSe квантовыми точками и ямами в варизонном волноводе.*
- 17:00** *Coffee break*

### **Секция «Вертикально-излучающие полупроводниковые лазеры».**

- 17:20** Н.А. Малеев, С.А. Блохин, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов.  
*Мощные одномодовые и сверхбыстродействующие вертикально-излучающие лазеры*
- 17:40** С.А. Блохин, Л.Я. Карачинский, А.М. Надточий, М.В. Максимов, А. Мутиг, Г. Фиол, Д. Бимберг, Д.А. Лотт, В.А. Шукин, Н.Н. Леденцов  
*Сверхскоростные оптические линии связи нового поколения на основе вертикально-излучающих лазеров диапазона 850 нм.*
- 18:00** Ж.И. Алферов.  
*Заключительное слово.*

### **Стендовая секция (12 ноября, пятница 13:00-15:00)**

- В.В. Безотосный, В.Ю. Бондарев, О.Н. Крохин, М.С. Кривонос, В.А. Олещенко, В.Ф. Певцов, Ю.М. Попов, Е.А. Чешев.  
*Мощные лазерные диоды и их использование для накачки кристаллов Nd:YAG, Nd:YLF и Nd:YAG керамики.*
- Л.И. Буров, А.С. Горбачевич, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев.  
*Динамика формирования излучения в лазерных диодах на основе гетероструктуры InAsSb/InAsSbP с большой шириной полоскового контакта.*
- В.В. Мамутин, В.М. Устинов, J. Voethcher, H. Kuenzel  
*Получение квантовых каскадных лазеров на длину волны 5 мкм молекулярно-пучковой эпитаксией.*
- С.Ю. Саркисов, С.А. Березная, З.В. Коротченко, А.Г. Ситников, В.Ф. Тарасенко, А.Е. Тельминов, А.Н. Панченко  
*Лучевая стойкость кристаллов GaSe и GaSe<sub>0,71</sub>S<sub>0,29</sub> и ГВГ при накачке излучением импульсного CO<sub>2</sub>-лазера на длине волны 10.6 мкм.*

5. Г.С. Соколовский, С.Н. Лосев, В.В. Дюделев, А.Г. Дерягин, В.И. Кучинский, В. Сиббет, Э.У. Рафаилов.  
*Преодоление теоретического предела при фокусировке излучения полупроводниковых источников.*
6. В.В. Шамахов, Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, Д.Н. Николаев, И.С. Тарасов.  
*Характеристики лазеров с сильнонапряженной квантовой ямой GaInAs, выращенных на подложках GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии.*
7. А.Г. Колмаков, А.Е. Черняков, Е.И. Шабунина, Н.М. Шмидт  
*Возможности мультифрактального анализа в диагностике световых гетероструктур.*

***Молодежная стендовая секция (12 ноября, пятница 13:00-15:00).***

1. А.А. Богданов, Р.А. Сурис.  
*Ленгмюровские моды в полупроводниковых волноводах.*
2. А.В. Глотов, П.В. Середин, Э.П. Домашевская, И.Н. Арсентьев, Д.А. Винокуров, И.С. Тарасов.  
*Исследования структурного упорядочения в эпитаксиальных твердых растворах  $In_xGa_{1-x}As$ .*
3. С.М. Голубенко, М.М. Мездрогина, А.В. Зиминов, Т.А. Юре.  
*Влияние тонких слоев (Au, Eu(q)Pc) на вид спектров ФЛ гетероструктур на основе InGaN.*
4. М.В. Дурнев.  
*Вхождение индия и оптические переходы в напряженных InGaN объемных слоях и квантовых ямах с произвольной ориентацией гексагональной оси кристалла.*
5. М.В. Еременко, С.М. Голубенко, М.М. Мездрогина, Н.К. Полетаев, А.Ю. Маслов, С.Н. Разумов, С.А. Кукушкин, А.В. Осипов.  
*Гетероструктуры n- ZnO/p-GaN< RE> - структуры для создания полупроводниковых излучателей УФ, видимого диапазона спектра.*
6. Я.В. Кузнецова, Т.Б. Попова, М.В. Байдакова, М.В. Заморянская.  
*Электронно-зондовые методы для диагностики полупроводниковых наногетероструктур на основе III-N.*
7. В.В. Шерстнев, М.И. Ларченков, Е.А. Гребенщикова, А.М. Монахов, А.Н. Именков, А.Н. Баранов, Ю.П. Яковлев  
*Перестраиваемые лазеры в средней ИК-области спектра на модах шепчущей галереи.*
8. Д.В. Мокрова, Д.С. Перевозник.  
*Исследование биохимических реакций методом когерентного светорассеяния.*
9. С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, А.Ю. Лешко, И.С. Тарасов.  
*Анализ пороговых условий генерации замкнутой моды в полупроводниковых Фабри-Перо лазерах.*
10. И.А. Словинский, Р.П. Сейсян, М.Э. Сасин.  
*Оптические приборы на основе наноразмерных периодических структур.*
11. Н.С. Аверкиев, А.Л. Закгейм, М.Е. Левинштейн, П.В. Петров, А.Е. Черняков, Е.И. Шабунина, Н.М. Шмидт.  
*Особенности низкочастотного шума световых квантоворазмерных структур InGaN/GaN.*
12. И.С. Шашкин, Н.В. Воронкова, А.Ю. Лешко, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, И.С. Тарасов.  
*Температурная делокализация носителей заряда в мощных непрерывных диодных лазерах.*

# ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ: ИСТОРИЯ

О.Н. Крохин

ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Ленинский проспект, 53  
тел: (499) 135-2157, факс: (499) 135-0350, эл. почта: [krokhin@sci.lebedev.ru](mailto:krokhin@sci.lebedev.ru)

2010 год – год 50<sup>и</sup>-летия создания первого лазера Теодором Мейманом (15 мая 1960 г.). Первый лазер был создан на люминесцентном кристалле синтетического рубина ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,03\% \text{Cr}_2\text{O}_3$ ), облучаемого мощной ксеноновой лампой-вспышкой.

В конце 50-х годов прошлого века активно обсуждалась тема создания лазера и, конечно, велся интенсивный поиск возможных активных сред и методов их возбуждения. Казалось, что найти правильный путь – задача необычайно сложная.

В ряду таких поисков были и полупроводники, предложенные Н.Г.Басовым, Б.М.Вулом и Ю.М.Поповым в 1958 году. Статья на эту тему опубликована в ЖЭТФ [1]. В ней предлагалось в качестве квантового перехода использовать электронные переходы зона-зона, зона-примесь, примесь-примесь, а источником возбуждения – лавинную ионизацию электрическим полем с последующим охлаждением электронов при их взаимодействии с кристаллической решеткой.

Последующий анализ показал, что условие инверсии заселенности выражается простым соотношением  $\mu_c - \mu_v > \Delta$ , где  $\Delta$  - ширина запрещенной зоны, а  $\mu_c$  и  $\mu_v$  - квазиуровни Ферми неравновесных электронов в зоне проводимости и в валентной зоне полупроводника. Записанное таким образом условие инверсии может быть реализовано в *p-n*-переходе (диоде). Оно достаточно жесткое и соответствует вырождению электронов, возникающих при сильном легировании полупроводника. Это было предложено в работе Н.Г.Басова, О.Н.Крохина, Ю.М.Попова [2].

Лазерный диод (инжекционный лазер) обладает уникальными свойствами, которые ясно проявляются при использовании гетероперехода, разработанного Ж.И.Алферовым с сотрудниками [3].

Сегодня уже реализован лазер с КПД преобразования электрической энергии в когерентный свет более 70 % и непрерывной мощностью более 20 Вт.

### *Литература*

- [1] Н.Г. Басов, Б.М. Вул, Ю.М. Попов, ЖЭТФ, 37, 578 (1959).
- [2] Н.Г. Басов, О.Н. Крохин, Ю.М. Попов, ЖЭТФ, 40, 1879 (1961).
- [3] Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, Д.З. Гарбузов и др., ФТП, 4, 1826 (1970).

## МОДОВАЯ СТРУКТУРА КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ

А.А. Богданов<sup>1,2</sup>, Р.А. Сурис<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая, 26

<sup>2</sup> СПбАУ РАН, Санкт-Петербург, 195251, ул. Хлопина, 8/3

тел: (812) 297-2245, факс: (812) 297-1017, эл. почта: [suris@theory.ioffe.ru](mailto:suris@theory.ioffe.ru)

Квантовый каскадный лазер (ККЛ) [1] представляет собой резонатор и помещенную в него активную среду. Резонатор ККЛ может обладать несколькими собственными модами. Их можно разделить на два типа: объемные моды и моды поверхностных плазмонных поляритонов (ППП) [2]. Объемные моды существуют за счет полного отражения волны от стенок волновода. Моды ППП существуют за счет возможности распространения поверхностных волн вдоль границ, отделяющих волноводный слой от обкладок волновода.

В этой работе мы провели подробный анализ дисперсионных зависимостей для собственных мод резонатора ККЛ, варьируя геометрические параметры лазера и параметры материалов, из которых он изготовлен. Анализ модовой структуры ККЛ с учетом анизотропии волноводного слоя показал, что кроме объемных и поверхностных мод в волноводе существуют моды, образующиеся за счет отражения Ленгмюровской волны [3] от стенок волновода.

В работе исследованы частотные зависимости потерь на свободных носителях для объемных, поверхностных и Ленгмюровских мод. Показано, что в длинноволновой части терагерцевого диапазона наименьшими потерями обладают Ленгмюровские моды, в коротковолновой части – поверхностные моды, а в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне – объемные моды.

Установлены параметры волновода, при которых моды ППП могут обладать отрицательной дисперсией. Объяснена природа этого явления. Обсуждается возможность применения отрицательной дисперсии для снижения пороговой плотности тока.

Работа была выполнена в рамках аналитической ведомственной программы «Развитие потенциала высшей школы», проект 988.

Работа была выполнена при финансовой поддержке правительства Санкт-Петербурга, РФФИ(грант №08-0201337-а), фонда Династия (программа поддержки аспирантов и молодых ученых без степени) и Минобрнауки РФ(ГК 2010-1.1-207-061-005, проект 2.1.1/988).

### *Литература*

[1] Р.Ф. Казаринов, Р.А. Сурис, ФТП 5, 797 (1971).

[2] S.A. Maier, *Plasmonics: Fundamentals and Applications*, New York: Springer, 2007.

[3] В.Л. Гинзбург, *Распространение электромагнитных волн в плазме*. М.: Наука, 1967.

# МНОГОПЕРИОДНЫЕ СТРУКТУРЫ С АСИММЕТРИЧНЫМИ БАРЬЕРАМИ КАК ПРОТОТИП АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА УНИПОЛЯРНОГО ЛАЗЕРА

Ю.А. Алещенко, В.В. Капаев, Ю.В. Копаев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Ленинский проспект, 53  
тел: (499) 132-6293, факс: (499) 783-3692, эл. почта: yuriale@sci.lebedev.ru

На основе совместного решения уравнений Шредингера и Пуассона выполнены расчеты потенциального профиля и времен релаксации для предложенного нами [1] активного элемента униполярного лазера с сильно асимметричными по высоте барьерами с целью оптимизации параметров, обеспечивающих подавление межподзонной безызлучательной релаксации между лазерными уровнями. В результате моделирования структур сконструированы и методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращены легированные многопериодные структуры двух типов, предназначенные для исследований методами оптической (I) и ИК (II) спектроскопии. Оба типа структур включают идентичный активный элемент из трех квантовых ям (КЯ), окруженных сильно асимметричными барьерами, повторяющийся 70 раз. Состав каждого периода активного элемента выражается стандартным соотношением  $5.0/8.2/1.4/4.9/3.0/2.5/36.0/15.0$ , где прямым шрифтом указаны толщины (в нм) высоких барьеров  $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ , жирным шрифтом – КЯ GaAs и курсивом – низкого барьера  $Al_{0.09}Ga_{0.91}As$ . Основное различие между структурами I и II состояло в необходимости приблизить квантово-размерную область к поверхности для зондирования ее видимым излучением при оптических исследованиях (поэтому в структуре I толщина поверхностного герметизирующего слоя GaAs составляла всего 20 нм) и сформировать волновод для ИК излучения в структуре II для исследований межподзонных переходов (такой волновод в структуре II формировался нижним обкладочным слоем GaAs толщиной 750 нм и верхним слоем GaAs толщиной 1750 нм). Структура II является структурой униполярного лазера с межподзонной накачкой излучением  $CO_2$  лазера («фонтанный» лазер). По этой причине расстояние между верхним лазерным уровнем  $E_3$  и основным состоянием  $E_1$ , локализованными в КЯ шириной 8.2 нм, близко к энергии кванта излучения  $CO_2$  лазера (121 мэВ).

По данным рентгеновской дифракции угловое расстояние между сателлитными рефлексами на кривых качания исследованных структур соответствует периоду 76 нм, т.е., номинальному периоду структуры. Спектры фотолуминесценции (ФЛ) и возбуждения ФЛ образцов, снятые при температуре 2 К, удается удовлетворительно описать, исходя из расчетов для структур с номинальными параметрами. Методом Фурье-спектроскопии при температуре 300 К с использованием приставки 25-кратного нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) проведены измерения межподзонного ИК поглощения. В спектрах проявились полосы поглощения с энергиями 120.0-179.4 мэВ, которые хорошо коррелируют с результатами расчетов межподзонных переходов в исследуемых структурах. В то же время, при 82.6 мэВ не проявляется полоса, связанная с переходом между рабочими подзонами  $E_2-E_3$ . Это может служить косвенным свидетельством слабой заселенности нижней лазерной подзоны  $E_2$ , чего и добивались при конструировании структур. В исследованиях кинетики ФЛ продемонстрировано отличие времен релаксации с различных подзон.

## Литература

- [1] Yu.A. Aleshchenko, V.V. Kapayev, Yu.V. Kopyayev, N.V. Korniyakov, Nanotechnology 11, 206 (2000).

## КОРОТКОВОЛНОВЫЕ $\lambda \sim 3 - 4$ МКМ КВАНТОВО КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ, РАБОТАЮЩИЕ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ДО 400 К

Д.Г. Ревин<sup>1</sup>, J.P. Commin<sup>1</sup>, S.Y. Zhang<sup>1</sup>, K. Kennedy<sup>1</sup>, А.Б. Крыса<sup>1,2</sup>, J.W. Cockburn<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Университет Шеффилда, Шеффилд, Великобритания

<sup>2</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

тел: +44 (114) 222-3599, факс: +44 (114) 222-3555, эл. почта: [d.revin@sheffield.ac.uk](mailto:d.revin@sheffield.ac.uk)

Средний инфракрасный диапазон длин волн 3 - 4 мкм представляет повышенный интерес для широкого круга приложений. Спектроскопия и детектирование большинства важных углеводородных соединений имеют максимальную чувствительность (вплоть до нескольких молекул на миллиард) именно на длинах волн вблизи 3.3 мкм. Медицина, мониторинг производственных процессов, разведка месторождений нефти и газа – вот тот неполный список областей их возможного применения.

Квантово каскадные лазеры (ККЛ), как когерентные источники среднего инфракрасного диапазона, в последние годы показали очень быстрое развитие, достигнув высокой эффективности излучения: нескольких Ватт оптической мощности при непрерывном режиме работы при температурах вблизи комнатной. Однако, для работы на длинах волн короче  $\sim 3.7$  мкм «стандартные» ККЛ на основе системы InGaAs/AlInAs имеют ряд фундаментальных ограничений. Это послужило причиной повышенного интереса к гетероструктурам A3B5, содержащим сурьму, таким как InAs/AlSb и InGaAs/AlAsSb/InP, которые имеют более широкий разрыв зон проводимости:  $\sim 2$  и  $\leq 1.6$  эВ, соответственно.

В настоящей презентации будут представлены на обсуждение результаты недавних исследований коротковолновых напряженно компенсированных ККЛ на основе материала InGaAs/AlAs(Sb)/InP. Проведенные работы по оптимизации лазерных дизайнов, ростовых условий и процессинга привели к значительному улучшению характеристик этих лазеров. На длинах волн 3.3 – 3.8 мкм были достигнуты пиковые мощности излучения до 17 Ватт при комнатных температурах, при этом пороговые мощности не превышали 2.5 - 3.5 кА/см<sup>2</sup>. КПД лазеров достигал 9% при 300 К и лазеры продолжали излучать вплоть до температур 400 К.

Введение диффракционной решетки третьего порядка между активным лазерным слоем и верхними волноводными слоями позволило получить одномодовую генерацию на длинах волн 3.36 - 3.49 мкм при температурах 200 – 320 К. Одномодовый лазер с полоском шириной 10 мкм и длиной 3 мм, а также с задней гранью, покрытой высокоотражающим покрытием, имел пиковую оптическую мощность до 400 мВатт при комнатной температуре.

Лазерные характеристики представленных ККЛ демонстрируют высокий потенциал этих лазеров для достижения больших средних уровней мощности излучения или непрерывного режима излучения во всем диапазоне длин волн 3 - 4 мкм.

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ЛИНЕЙКИ И ИХ НАБОРЫ ДЛЯ НАКАЧКИ АКТИВНЫХ СРЕД И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Г.Т. Микаелян

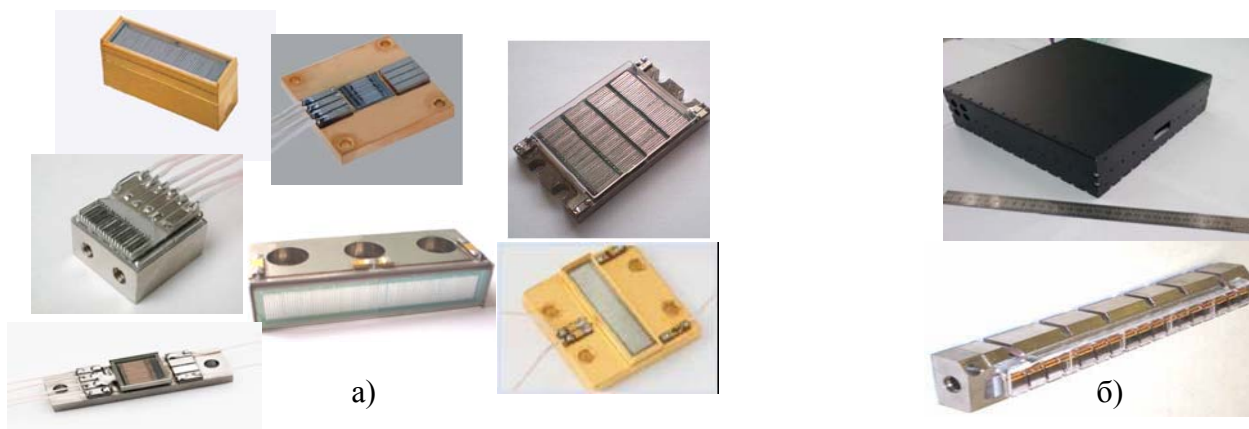
НПК «ИНЖЕКТ», 410052 г. Саратов, пр-т 50 лет Октября, 101

эл. почта: [inject@overta.ru](mailto:inject@overta.ru), веб-сайты [www.injectlaser.ru](http://www.injectlaser.ru), [www.inject-laser.ru](http://www.inject-laser.ru)

Высокоэффективная, селективная оптическая накачка активных сред излучением диодных лазеров, в настоящее время используется, как для лазеров с твердотельными активными элементами, так и для газовых лазеров на парах щелочных металлов.

Наиболее часто используемые в настоящее время активные материалы в лазерах с диодной накачкой имеют полосы селективного поглощения с максимумом ( $\lambda_{\text{номинал}}$ ) расположенным на длинах волн: 792 нм, 780, 808 нм, 852 нм, 940 нм, 980 нм.

Для твердотельных лазеров или усилителей с большим значением коэффициента усиления, в которых необходимо настроится на узкополосную линию ( $\Delta\lambda \leq 6$  нм при  $\lambda_{\text{ном}} \approx 808$  нм), существуют ряд излучателей с соответствующим набором параметров. Для диодной накачки газовых лазеров разработаны узкополосные ( $\Delta\lambda < 1$  нм) полупроводниковые лазеры и их наборы. Требование узкополосной накачки накладывает жесткие требования на спектральные характеристики полупроводниковых лазеров и на условия их применения, тем самым увеличивает их стоимость. Для сверхмощных лазерных систем, например, на стекле с неодимом, предпочтительнее ориентироваться на широкополосную линию ( $\Delta\lambda \sim 30$  нм) на длине волны  $\lambda_{\text{ном}} \approx 870$  нм. В данном случае кардинально упрощаются требования к спектральным характеристикам наборов диодных лазеров, что конечно снижает цену. С появлением мощных наборов линеек диодных лазеров и высококачественной специальной микрооптики, для коррекции расходимости излучения полупроводниковых лазеров, стало возможным использование прямого (без преобразования в излучение других типов лазеров) воздействия излучения диодных лазеров на обрабатываемый объект.



Образцы а) 2-х мерных решеток QCW и б) наборов горизонтально расположенных CW линеек.

# НОВЫЕ КОНЦЕПЦИИ МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ ВЫСОКОЙ ЯРКОСТИ

В.А. Щукин<sup>1,2</sup>, Н.Н. Леденцов<sup>1,2</sup>, D. Bimberg<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technical University of Berlin, Hardenbergstrasse 36, 10623, Berlin, Germany

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

тел.: +49 30 314 23070, факс: +49 30 314 22569, эл. почта: shchukin@sol.physit.tu-berlin.de

Высокая яркость полупроводниковых лазеров (высокая мощность при низкой расходимости пучка) необходима для прямого применения линеек и стеков в обработке материалов. Основой таких приборов может служить расширенный вертикальный волновод, если удастся реализовать генерацию в одной вертикальной моде.

Предложенная концепция лазера на вертикальном фотонном кристалле [1] позволяет осуществить генерацию в фундаментальной вертикальной моде с фильтрацией мод высокого порядка, расходимость пучка  $5^\circ$  [2], мощность непрерывного излучения в латеральном одномодовом режиме 2,2 Вт [3] и максимальную для многомодовых лазеров яркость  $3,5 \times 10^8$  Втсм<sup>-2</sup>стер<sup>-1</sup> [3].

Максимально возможным расширенным вертикальным волноводом является прозрачная подложка. Прежний подход с выходом излучения через подложку, применявшийся в лазерах на “утекающей моде” [4], позволял получать узкий ( $<1^\circ$ ) пучок, однако одновременно ~50% выходной мощности приходилось на излучение из узкого активного волновода с большой расходимостью.

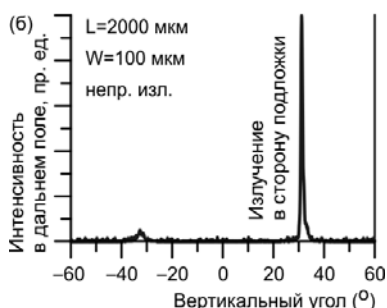
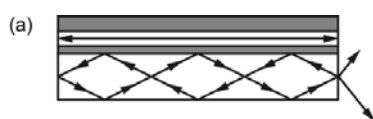


Рис. 1. а) Наклонная мода.  
б) Интенсивность в дальнем поле

Предложенная концепция лазера на наклонной оптической моде [5] включает полировку и покрытие диэлектриком обратной стороны подложки под полоском, что обеспечивает зеркальное отражение света. Свет, вытекающий из активного волновода, распространяется по подложке, отражается от зеркальной обратной стороны, формируя наклонную моду (Рис. 1а). Конструктивная интерференция отраженного света со светом, распространяющимся по активному волноводу, дает стабилизированную по длине волны лазерную генерацию [6]. Оптимизация волновода позволяет полностью подавить излучение из активной области с широким угловым распределением и получить всю выходную мощность, сосредоточенную в двух либо в одном узком вертикальном лепестке. На широком (100 мкм) полоске длиной 2 мм получена дифференциальная эффективность 52%, мощность в непрерывном режиме 2,3 Вт, полностью сконцентрированная в узком лепестке шириной  $0,8^\circ$  (Рис 1б).

## Литература

- [1] N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, SPIE Opt. Engineering 41, 3193 (2002).
- [2] I.I. Novikov, et al., Appl. Phys. Lett. 92, 103515 (2008).
- [3] D. Bimberg, et al. Proc. SPIE 7616, 761654-1 (2010).
- [4] В.А. Геловани и др. *Высокомощные диодные лазеры нового типа*, М.: Эдиториал УРСС, 2005г.
- [5] N.N. Ledentsov, et al., in *Future Trends in Microelectronic: Up the Nano Creek*, eds. S. Luryi, J. Xu, A. Zaslavsky, Wiley, New York, p. 301 (2007).
- [6] N.Yu. Gordeev, et al., Semicond. Sci. Technol. 25, 045003 (2010).



## МОЩНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Н.А. Пихтин, В.В. Васильева, Д.А. Винокуров, А.В. Лютецкий, А.В. Рожков, Н.А. Рудова,  
З.Н. Соколова, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел./факс. (812)292-7379, эл. почта [nike@hpld.ioffe.ru](mailto:nike@hpld.ioffe.ru)

В настоящее время мощные импульсные полупроводниковые излучатели востребованы во многих областях промышленности, в частности в системах оптического мониторинга и медицине. Благодаря своей компактности, высоким значениям оптической мощности, КПД и сроку службы они приходят на замену ламповым излучателям и газовым лазерам.

Ранее нами было показано, что применение асимметричной двойной гетероструктуры отдельного ограничения с низкими внутренними потерями позволяет достичь рекордных мощностей излучения (16 Вт) и КПД (74%) в непрерывном режиме генерации лазерных диодов [1]. При этом доказано, что ограничение оптической мощности в этом случае носит чисто тепловой характер. Для исключения теплового разогрева активной области исследуемых полупроводниковых лазеров применялось импульсное возбуждение длительностью 100 нс, что позволило увеличить уровни накачки до плотностей тока более  $0.1 \text{ MA/cm}^2$ .

Было установлено, что причиной, ограничивающей при сверхвысоких уровнях импульсного возбуждения максимально достижимую мощность оптического излучения в полупроводниковых лазерах, является конечная величина времени рассеяния энергии электронов в квантово-размерной активной области. Обнаружено насыщение максимума интенсивности спектра генерации, расширение спектра стимулированной рекомбинации и рост концентрации носителей тока в активной области за порогом генерации. На основании исследований оптимизирована конструкция лазерной гетероструктуры для импульсных излучателей с целью достижения максимальной импульсной оптической мощности.

Рассмотрен эффект срыва генерации в полупроводниковых лазерах мезополосковой конструкции. Показано, что снижение внутренних оптических потерь в лазерных структурах отдельного ограничения приводит к срыву генерации излучения мод Фабри-Перо резонатора. Срыв генерации наступает в результате просветления активной области лазерной структуры в пассивных областях вне полоска образующего волновод резонатора Фабри-Перо. Просветление активной области происходит с увеличением тока накачки и приводит к выполнению пороговых условий для замкнутой моды кристалла полупроводникового лазера.

Приведены исследования и анализ излучательных характеристик лазеров на основе AlGaAs/GaAs асимметричных гетероструктур отдельного ограничения с расширенным волноводом с различными конструкциями активной области. Показано, что увеличение энергетической глубины и числа квантово-размерных ям активной области позволяет повысить температурную стабильность порогового тока и внешней дифференциальной квантовой эффективности. Стабилизация лазерных характеристик достигается благодаря снижению пороговой плотности тока и пороговой концентрации носителей заряда в квантово-размерных ямах активной области. Независимо от конструктивных особенностей лазерных структур при достижении некоторого значения концентрации носителей заряда в квантово-размерных ямах активной области температурная стабильность пороговой плотности тока и дифференциальной квантовой эффективности резко снижается.

### *Литература*

[1] N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova et al., Electron. Lett. 40, 1413 (2004).

# СПЕКТРАЛЬНЫЕ И МОЩНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШИРОКОКОНТАКТНЫХ КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОЛАЗЕРОВ В СИСТЕМЕ AlGaInAs–AlGaAs

В.К. Кононенко<sup>1</sup>, В.В. Парашук<sup>1</sup>, С.С. Поликарпов<sup>2</sup>, В.М. Стецик<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики им. Б.И. Степанова НАНБ, Минск, 220072, просп. Независимости, 70

<sup>2</sup> НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, 196641, пос. Металлострой, 3

<sup>3</sup> Белорусский государственный университет, Минск, 220030, просп. Независимости, 4  
тел: (375) 17 2840435, факс: (375) 17 2840879, эл. почта: lavik@dragon.bas-net.by

Для получения излучения в спектральной области 0.8–0.9 мкм перспективны гетероструктуры на основе многокомпонентных соединений  $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ . В работе исследованы спектральные, поляризационные, пороговые и ваттамперные характеристики квантоворазмерных гетеролазеров в системе AlGaInAs–AlGaAs. Лазерные элементы изготовлены методом химического осаждения из металлоорганических соединений [1]. Активная область включает квантовые ямы AlGaInAs шириной 10 нм и волноводные слои  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  толщиной 0.15 мкм и градиентным составом  $x = 0.3 \div 0.6$ . При этом слои активной области не легируются, а ширина полоскового контакта составляет  $\approx 150$  мкм.

Для  $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$  ( $x \approx 0.2$ ,  $y \approx 0.6$ ) путем интерполяции по бинарным соединениям находим  $\gamma_1 = 8.94$  и  $\gamma_2 = 3.10$ , получаем  $m_c = 0.075 m_e$  и следующие компоненты эффективных масс дырок:  $m_{vh} = 0.365 m_e$ ,  $m_{vl} = 0.066 m_e$ ,  $m_{vht} = 0.083 m_e$ ,  $m_{vlt} = 0.171 m_e$ . Ширина запрещенной зоны полупроводника (при температуре 300 К) равна  $E_g = 1.525$  эВ (квантовая яма). В барьерах  $E_g$  изменяется от 1.841 эВ ( $x = 0.3$ ) до 2.213 эВ ( $x = 0.6$ ). Скачки зон на границе квантовой ямы и волноводных слоев составляют  $\Delta E_c = 0.212$  эВ и  $\Delta E_v = 0.104$  эВ. Таким образом, энергии начальных переходов между подзонами составляют:  $h\nu_{11} = 1.560$  эВ (0.795 мкм) (переходы электрон-тяжелая дырка) и  $h\nu_{1'1'} = 1.575$  эВ (0.787 мкм) (переходы электрон-легкая дырка). Переходы с участием высоколежащих подзон сильно сдвинуты:  $h\nu_{22} = 1.660$  эВ (0.747 мкм) и  $h\nu_{2'2'} = 1.718$  эВ (0.722 мкм) и заметно ослаблены. Концентрация дырок определяется основной подзоной легких дырок и двумя подзонами тяжелых дырок. Плотность тока инверсии для переходов 11 достигает  $j_{i1} \approx 0.6$  кА/см<sup>2</sup>, а для переходов 1'1' –  $j_{i2} \approx 0.9$  кА/см<sup>2</sup>.

Кроме отдельных элементов, изучены выходные характеристики 30-ваттных лазерных линеек (длиной  $\approx 5$  мм), излучающих в области 0.81 мкм. Измерения при амплитуде токов  $I$  до 60 А, длительности импульсов накачки  $\tau \approx 0.1$  мс и частоте повторения  $f$  до 10 Гц свидетельствуют о высокой эффективности полученных линеек. Наклон ваттамперной характеристики  $P(I)$  составляет  $\approx 1$  Вт/А при КПД более 50 %, что не уступает данным для других излучателей. Линейки обладают достаточно высокой надежностью и практически линейной выходной характеристикой. Их предельные режимы работы соответствуют  $\tau \approx 0.5$  мс при  $f \approx 50$  Гц. Небольшая расходимость излучения (не более  $3^\circ$  с линзовой коррекцией) дает очевидные преимущества для применения данных излучателей.

Локальные измерения в непрерывном режиме показывают практически стабильную устойчивую одночастотную генерацию вблизи порога. Элементы обладают высокими тепловыми параметрами [2]. Однако для получения более однородного распределения интенсивности и поляризации излучения по сечению пучка вдоль полоскового контакта необходимо дополнительно улучшать технологию изготовления подводящих контактов.

## Литература

[1] K.A. Bulashevich, V.F. Mymrin, S.Yu. Karpov et al., *Semicond. Sci. Technol.* **22**, 502 (2007).

[2] Yu.A. Bumai, A.S. Vaskou, V.K. Kononenko, *Metrol. Meas. Syst.* **17**, 39 (2010).

## РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В РФЯЦ-ВНИИТФ

А.Ф. Иванов, **Е.В. Смирнов**, А.В. Фомин

ФГУП РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, 456770, Васильева, 13  
тел: (35146) 51121, факс: (35146) 51101, эл. почта: a.f.Ivanov@vniitf.ru

С 2006 года в РФЯЦ-ВНИИТФ ведутся работы по организации собственного опытно-конструкторского производства лазерных устройств на базе мощных полупроводниковых лазерных диодов (ЛД) и линеек лазерных диодов (ЛЛД). Необходимость создания адаптированных модулей накачки, удовлетворяющих требованиям тематических разработок РФЯЦ-ВНИИТФ по направлениям твердотельных (ТТЛДН) и оптоволоконных (ОВЛДН) лазеров с диодной накачкой, потребовала разработки специализированных конструкций и технологий сборки полупроводниковых лазерных излучателей, обеспечивающих высокую плотность мощности излучения и повышенный срок службы.

Основными задачами, с которыми приходится сталкиваться разработчикам полупроводниковых лазерных излучателей, являются минимизация последовательного теплового сопротивления конструкции и уменьшение контактных механических напряжений, действующих на полупроводниковый кристалл [1, 2]. При этом решение выше указанных задач должно учитывать технологические возможности производства. Проведенные нами исследования по оптимизации технологических параметров механической и химической обработки теплоотводов, осаждения металлических тонких пленок и пайки ЛД и ЛЛД на теплоотводы позволили создать целый ряд полупроводниковых лазерных излучателей с выходными характеристиками, не уступающими зарубежным аналогам (см. таблицу).

Таблица – Перечень и основные характеристики некоторых полупроводниковых лазерных излучателей изготавливаемых в РФЯЦ-ВНИИТФ

Характеристика	ЛД-01	ЛД-02	ЛЛД-01	ЛЛД-02	МЛД-01
Выходная оптическая мощность излучения, Вт	5,5	8,5	40	до 80	370 (в импульсе)
Рабочий ток питания, А	6	9	45	до 90	90
Рабочее напряжение, В	1,8	1,8	1,6	до 1,8	7,8
Длина волны излучения, нм	793, 808	975	980	808, 980	808
Эффективность от потребляемой мощности, %	> 50	> 50	55	> 50	> 50
Тип лазерного излучателя, характеристика питания	ЛД, CW	ЛД, CW	ЛЛД, CW	ЛЛД, CW	ЛЛД, QCW, 100Гц, 200мкс
Классификация теплоотвода (конструкции)	C-mount	Submount on C-mount	CS-mount	МСС	(G-stack)
Область применения	Источники накачки ОВЛДН, микромеханика, медицина			Источники накачки, обр. материалов, военная и аэрокосмическая техника	

### Литература

- [1] В.П. Грибковский, Полупроводниковые лазеры, Минск, 1988, 304 с.
- [2] Xiaoyu Ma, Li Zhong Advances in High Power Semiconductor Diode Lasers, Proc. of SPIE Vol. 6824 pp. 682402-1-16 (2008).

# МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНАЯ ПОЛОСА ЧАСТОТ ТОКОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ЛАЗЕРА НА КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ

Л.В. Асрян<sup>1</sup>, Р.А. Сурис<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia 24061, USA

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

тел: 1 (540) 231-7033, факс: 1 (540) 231-8919, эл. почта: asryan@mse.vt.edu

тел: 7 (812) 292-7367, факс: 7 (812) 297-1017, эл. почта: suris@theory.ioffe.ru

Ввиду возможности прямой модуляции оптического излучения электрическим током полупроводниковые лазеры широко используются в высокоскоростных оптических волоконных системах связи. В лазерах на квантовых точках (КТ) стимулированные излучательные переходы происходят в наноразмерных областях, ограничивающих носители заряда во всех трёх пространственных измерениях [1]. В то время как дискретный энергетический спектр носителей в КТ позволяет получать лазерное излучение с низкими пороговыми токами [2] и высокой температурной стабильностью [3], полоса частот токовой модуляции лазеров на КТ всё ещё нуждается в повышении.

В докладе обсуждается верхний предел полосы частот модуляции излучения полупроводникового инжекционного лазера на КТ. Используется малосигнальный анализ скоростных уравнений для носителей в КТ и области оптического ограничения и фотонов. Показывается, что максимально возможная полоса частот прямо пропорциональна интегралу перекрытия электронной и дырочной волновых функций в КТ, числу слоёв с КТ и поверхностной концентрации КТ в слое, а также обратно пропорциональна неоднородному уширению линии излучения, вызванному разбросом параметров КТ. При 10% флуктуации размеров КТ и 100% перекрытии волновых функций, верхний предел полосы модуляции лазера с одним слоем КТ может достигать 60 ГГц (Рис. 1) [4].

Работа выполнена при поддержке научного отдела армии США и Российского Фонда Фундаментальных Исследований.

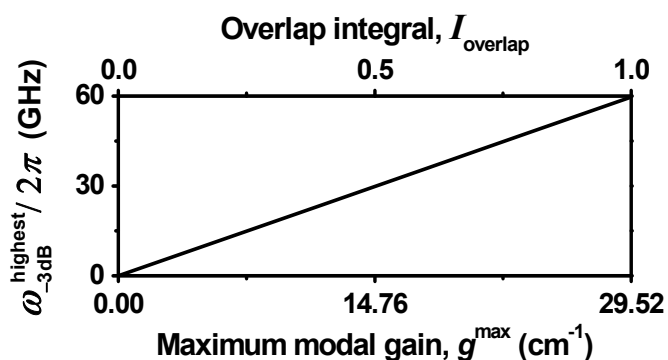


Рис. 1. Верхний предел полосы модуляции лазера с одним слоем КТ в зависимости от максимального модального коэффициента усиления и интеграла перекрытия электронной и дырочной волновых функций в КТ.

## Литература

- [1] Y. Arakawa, H. Sakaki, *Appl. Phys. Lett.* 40, 939 (1982).
- [2] P.G. Eliseev, H. Li, A. Stintz et al., *Appl. Phys. Lett.* 77, 262 (2000).
- [3] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhrin et al., *Phys. E* 17, 589 (2003).
- [4] L.V. Asryan, R.A. Suris, *Appl. Phys. Lett.* 96, Art. no. 221112 (2010).

# ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ InP КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В AlGaInP, ИЗЛУЧАЮЩИЕ В ДИАПАЗОНЕ 700-800 НМ

А.Б. Крыса<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Университет Шеффилда, Шеффилд, Великобритания

<sup>2</sup> Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва

тел: +44 114-222-5819, факс: +44 114-272-6391, эл. почта: a.krysa@sheffield.ac.uk

Самоорганизованные квантовые точки (КТ) InP в матрице AlGaInP на подложках GaAs привлекают значительный интерес в качестве активных сред лазеров. В зависимости от технологических условий приготовления, такие структуры могут излучать в красном и ближнем ИК спектральных диапазонах. Лазерные структуры на основе InP КТ были реализованы несколькими группами как с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии, так и МОС-гидридной эпитаксии. Однако высокие пороговые плотности тока при комнатной температуре первых таких лазеров (выше 2 кА/см<sup>2</sup> [1, 2]) ставили под сомнение практическую ценность материальной системы InP-AlGaInP для лазерных применений.

В наших исследованиях структуры с InP КТ выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии, широко используемой в настоящее время для производства лазерных структур с квантовыми ямами GaInP/AlGaInP. Ростовые условия были также выбраны близкими к тем, которые используются для роста последних. В частности, использовались относительно высокие температуры роста вплоть до 750 °С. Оптимизация ростовых условий лазеров привела к значительному уменьшению плотности порогового тока до 165 А/см<sup>2</sup> при комнатной температуре для структуры с пятью слоями КТ и длиной резонатора 2 мм, излучающей на длине волны 730 нм [3].

Также, нами была предпринята успешная попытка создания оптически возбуждаемых вертикально-излучающих лазеров с внешним резонатором [4]. Структура, рассчитанная для работы на длине волны 740 нм при накачке 532 нм лазером, содержала активную область AlGaInP с 21 слоем InP КТ и AlAs/AlGaAs брегговское зеркало. Подложка GaAs не вращалась во время роста, что привело к градиенту толщин составляющих эпитаксиальных слоев и изменениям соответствующим образом оптической толщины резонатора и спектра отражения брегговского зеркала. В результате, на трех образцах, приготовленных из одной пластины, была достигнута непрерывная лазерная генерация на длинах волн 716 нм, 729 нм и 739 нм.

## Литература

- [1] J. Porsche *et al*, IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electron. 6, 482 (2000).
- [2] Y.M. Mainz *et al*, Appl. Phys. Lett. 76, 3343 (2000).
- [3] P.M. Smowton *et al*, IEEE Photon. Techn. Lett. 22, 88 (2010).
- [4] P.J. Schlosser *et al*, Optics Express 17, 21782 (2009).

# ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ АБСОРБЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР

И.О. Бакшаев, И.М. Гаджиев, Е.Л. Портной

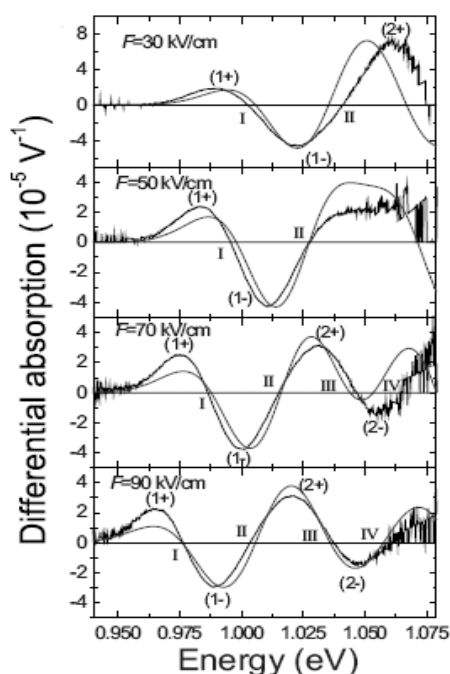
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

тел: (812) 292-7376, эл. почта: [ilya.bakshaev@gmail.com](mailto:ilya.bakshaev@gmail.com)

Исследование особенностей поглощения современных излучающих гетероструктур необходимо для понимания их физических свойств. Но в современных интегрально-оптических устройствах перекрытие оптического поля с активной средой становится все меньше, поэтому задача качественного измерения поглощения становится все более трудоемкой при использовании классических методов исследования, когда просвечивание производится вдоль оси роста.

Существенно повысить точность исследований позволяет метод интегрально-оптической абсорбционной спектроскопии (ИОАС) [1], основанный на использовании двухсекционной конструкции лазера с единым волноводным слоем. В данной конструкции одна секция используется в качестве излучателя, а вторая в качестве поглотителя, свойства которого меняются путем приложения внешнего поля. Использование интегральной конструкции позволяет добиться практически идеальной юстировки перехода между секциями, что существенно повышает точность измерений. В процессе измерения регистрируется излучение, прошедшее через поглотитель, а аппаратная функция в случае использования симметричной конструкции определяется путем простого переключения контактов на секциях.

Предложенным методом проводились исследования поглощающих свойств следующих наногетероструктур: глубокая и мелкая одиночные квантовые ямы, несвязанные КТ, туннельно-связанные КТ.



В качестве примера приводятся результаты исследований гетероструктур с туннельно-связанными InGaAs/GaAs квантовыми точками [2]. Малое расстояние между слоями КТ (3 nm) позволяло электронам туннелировать между точками, что приводило к изменению пространственного распределения носителей и их энергетического спектра. Более точное положение уровней энергии и их изменение с внешним электрическим полем определяется не спектром поглощения, а его производной по напряжению, которая может быть аппаратно определена методом дифференциальной ИОАС.

Было экспериментально обнаружено и теоретически объяснено, что спектр дифференциального поглощения имеет 3 пика при наличии внешнего поля, что обусловлено существованием прямых и двух не прямых переходов, возникающих из-за связывания КТ, в отличие от несвязанных КТ, у которых наблюдается единственный пик в спектрах дифференциального поглощения, обусловленный наличием только прямых переходов.

## Литература

- [1] V.V. Nikolaev, N.S. Averkiev, M.M. Sobolev et al., Phys. Rev. B 80, 205304 (2009).
- [2] И.М. Гаджиев, М.С. Буяло, И.О. Бакшаев и др., ПЖТФ 36, 22 (2010).

# **МОЩНЫЕ НЕПРЕРЫВНЫЕ ДИОДНЫЕ ЛАЗЕРЫ КРАСНОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ МЕТОДОМ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ**

М.Л. Гельфонд<sup>1</sup>, Д.М. Демидов<sup>2</sup>, Р.В. Леус<sup>2</sup>, С.Н. Родин<sup>2</sup>, **А.Л. Тер-Мартirosян<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ФГУ «НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова Росмедтехнологий»

<sup>2</sup> ЗАО «Полупроводниковые приборы»

*тел: (812) 294-2532, факс: (812) 703-1526, e-mail: ter@atcsd.ru*

Мощные непрерывные диодные лазеры с длиной волны  $665\pm 5$  нм являются перспективными источниками света для лечения онкологических заболеваний методом фотодинамической терапии.

В настоящей работе на основе AlGaInP/GaInP/GaAs квантоворазмерных гетероструктур были разработаны высокоомощные (до 2 Вт) непрерывные лазерные диоды (ЛД). Такие ЛД имеют высокую эффективность (до 50%) и способны надежно работать более 5000 часов.

На основе ЛД созданы и серийно выпускаются лазерные модули (ЛМ) с мощностью излучения 0,5-5,0 Вт с выводом излучения через оптическое волокно с диаметром сердцевины 200 или 400 мкм.

На основе ЛД и ЛМ разработаны и серийно выпускаются медицинские лазерные аппараты серии «ЛАТУС» и «АТКУС». Аппараты прошли клинические испытания в ведущих медицинских центрах РФ и имеют Европейский сертификат качества.

В настоящее время имеется более 10 утвержденных Росздравнадзором медицинских технологий для оказания высокотехнологичной медицинской помощи с использованием лазерной фотодинамической терапии с новейшими фотосенсибилизаторами на основе хлорина  $e_6$ . Эти технологии используются для лечения бронхолегочного рака, базальноклеточного рака кожи, гнойно-воспалительных процессов в ранах и трофических язв, псориаза кожи, угревой сыпи, пародонтоза, ринитов и синуситов, дисплазии шейки матки и др. В настоящее время сотни медицинских лазерных аппаратов, выпущенных нашей фирмой, успешно работают в российских и зарубежных клиниках.

## ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

И.Н. Завестовская, В.В. Безотосный, А.П. Канавин, Н.А. Козловская, О.Н. Крохин,  
В.А. Олещенко, Ю.М. Попов, Е.А. Чешев

ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Ленинский проспект, 53  
тел: (499) 132-6159, факс: (499) 135-0350, эл. почта: zavest@sci.lebedev.ru

Стимулом к развитию лазерных технологий обработки материалов, таких как лазерное наноструктурирование, лазерное травление и т.п. в последнее время является прогресс в развитии лазерной техники, генерирующей импульсы излучения короткой и ультракороткой длительности. Активно идет процесс усовершенствования и удешевления фемтосекундной лазерной техники, которая зарекомендовала себя как эффективный инструмент в области лазерных применений [1]. Кроме того, в последние годы в лазерной технологии все шире используются твердотельные лазеры с диодной накачкой, генерирующие излучение с длительностью импульсов в наносекундном диапазоне [2]. Преимущества этих лазеров связаны с их малыми размерами, хорошим качеством пучка и высокой эффективностью.

Настоящая работа представляет результаты экспериментального и теоретического исследований процессов технологии обработки материалов с использованием таких лазеров. Использование компактного и эффективного лазера с диодной накачкой позволило провести эксперименты по лазерной модификации индиевого припоя для повышения эффективности отвода тепла от кристаллов мощных лазерных диодов [2]. Плотность энергии в импульсе составила  $0,1 \text{ Дж/см}^2$  и длительность импульса - 6,5 нс. После облучения In пленка приобретает признаки аморфной структуры (лазерное стеклование). При этом типичный размер наблюдаемых дефектов составляет величину от 100 нм до 1 мкм. Лазерно-модифицированные In припои позволили воспроизводимо получать высокие излучательные параметры мощных лазерных диодов на длине волны 808 нм [2].

Теоретически исследован режим образования наноразмерных и аморфных структур при лазерном проплавлении и быстрой кристаллизации поверхности металлов. Исследована кинетика процессов модификации поверхности металлов, реализуемых при рекристаллизации после воздействия лазерных импульсов. Исследование проведено на основе аналитического решения кинетического уравнения для функции распределения числа кристаллитов по размерам в условиях сверхбыстрых скоростей охлаждения. Определены относительный объем закристаллизовавшейся фазы и средний размер образующихся кристаллических зерен (структур) в зависимости от параметров режима лазерного воздействия и термодинамических характеристик. Определен критерий аморфизации. Полученные результаты позволяют осуществить выбор параметров лазерного воздействия с целью контролируемого наноструктурирования поверхности металлов.

### *Литература*

- [1] О.Б. Ананьин, Ю.В. Афанасьев, Ю.А. Быковский, О.Н. Крохин *Лазерная плазма. Физика и применения* М.: МИФИ, 2003.
- [2] И.Н. Завестовская, В.В. Безотосный, А.П. Канавин и др. В сб. *Труды II Симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур* М.: РИИС ФИАН, 2010, с.152.



## ЛАЗЕРНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

А.А. Мармалюк<sup>1</sup>, А.В. Иванов<sup>1</sup>, В.Д. Курносов<sup>1</sup>, К.В. Курносов<sup>1</sup>, Р.В. Чернов<sup>1</sup>,  
В.И. Романцевич<sup>1</sup>, А.Ю. Андреев<sup>1</sup>, К.Ю. Телегин<sup>1</sup>, Н.А. Волков<sup>1</sup>, А.Н. Беседина<sup>2</sup>,  
В.С. Жолнеров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха, Москва, 117342, ул. Введенского, 3

<sup>2</sup> ОАО «РИРВ», Санкт-Петербург, 191124, пл. Растрелли, 2

тел: (495) 333-3325, факс: (495) 334-4810, эл. почта: A.Marmalyuk@splus.ru

Использование оптической накачки и детектирования в квантовых стандартах частоты позволяет значительно улучшить их параметры. Перспективным источником оптической накачки являются полупроводниковые одночастотные лазеры. Среди возможных конструкций таких лазеров в данной работе рассмотрен вариант лазера с дифракционной решеткой в волоконном световоде. Такое техническое решение совместно с термостабилизацией, как лазерного чипа, так и световода с решеткой, позволяет получить одночастотную лазерную генерацию и осуществить точную настройку на  $D_2$  линию излучения цезия и на  $D_1$  и  $D_2$  линии излучения рубидия, с соответствующими длинами волн излучения 852.1 нм, 794.7 нм, 780 нм. В основе рассматриваемого излучателя лежит одномодовый мезаполосковый лазер с резонатором Фабри-Перо. Для реализации указанных длин волн возможно использование гетероструктур в двух системах материалов AlGaAs/GaAs и InGaAsP/GaInP. Причем считается, что последняя из них, так называемая Al-free система, может обеспечить более высокие параметры, особенно в части срока службы, что очень востребовано для рассматриваемого применения. В данной работе предпринята попытка определить предпочтительную конструкцию гетероструктуры для одномодовых лазеров указанного применения.

Лазерные гетероструктуры AlGaAs/GaAs и InGaAsP/GaInP формировались методом МОС-гидридной эпитаксии. На их основе изготавливались лазеры с шириной мезаполоски 2.5-3.0 мкм и длиной резонатора 600-1000 мкм. На одну грань резонатора наносилось защитное покрытие ( $R_1 \sim 0.3$ ), а вторая грань просветлялась ( $R_2 \rightarrow 0$ ) и рядом устанавливался волоконный световод с дифракционной решеткой. Коэффициент отражения волоконной брегговской решетки составлял  $\sim 0.9$ . Эта решетка совместно с выходной гранью лазерного чипа ( $R_1$ ) образовывала резонатор, который определял основные параметры излучателя. Тонкая подстройка длины волны излучения осуществлялась путем изменения температуры волоконной решетки.

Лазеры в системе материалов AlGaAs/GaAs изготавливали двумя способами с использованием ионно-химического травления («сухая» меза) и жидкостного травления («мокрая» меза). Первый способ более универсален, но сопряжен с образованием радиационных дефектов, снижающих выходные характеристики. В свою очередь «мокрая» меза потребовала введения специального стоп-слоя в состав гетероструктуры и отработки селективного травления. Оба типа приборов продемонстрировали близкие параметры, даже первый из них имел более низкие пороговые токи (20 и 25 мА, соответственно). Лазеры в системе материалов InGaAsP/GaInP создавались с использованием жидкостного травления. Установлены трудности с формированием высококачественных квантовых ям, связанные со значительными обменными процессами, протекающими на гетерограницах As/P, и сегрегацией атомов индия в процессе роста. Выходные характеристики таких лазеров приближались к параметрам AlGaAs/GaAs лазеров. При этом ресурсные испытания не продемонстрировали ожидаемого преимущества Al-free системы.

Лазерные излучатели на основе AlGaAs/GaAs лазеров характеризовались шириной линии порядка 2 МГц при выходной мощности 10 мВт ( $\lambda=852.1$  нм, 794.7 нм, 780 нм).

# ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ В МЕДИЦИНЕ: ИТОГИ ЗА 30 ЛЕТ, ПРИМЕНЕНИЯ И ЗАДАЧИ НА БУДУЩЕЕ

**В.А. Овсянников**

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

Лазерное излучение в медицине сначала было использовано в хирургии. Целый ряд свойств лазерного излучения оказались уникальными для хирургии; так ИК излучение позволило проводить бесшовное сваривание сосудов. В последнее время лазеры стали использоваться в медицинских микророботах, что уже используется в кардиохирургии. В этом направлении полупроводниковые лазеры являются не заменимы.

Низкоинтенсивная лазерная терапия (НИЛИ) за 25 лет применения сейчас используется почти во всех направлениях медицины. Для иллюстрации приведём лишь некоторые результаты.

В онкологии лечение первичных и отдалённых осложнений лучевой терапии повысило выживаемость пациентов в ЦНИРРИ почти на 5 %.

НИЛИ позволило излечивать больных вирусными гепатитами «В» и «С» в ранее безнадежных стадиях; ВИЧ (СПИД) пациенты, прошедшие курс лазерной терапии, продолжают жить и работать более 10 лет.

В офтальмологии зарегистрированы случаи частичного восстановления зрения после полной его утраты.

При лечении больных сахарным диабетом НИЛИ позволило лечить целый ряд осложнений и, таким образом, существенно облегчать состояние пациентов.

В травматологии уже реализовано восстановление подвижности конечностей у ранее много лет парализованных пациентов.

В нейрохирургии зарегистрированы случаи рассасывания субдуральных гематом головного мозга диаметром до 3 см (ранее требовалась трепанация черепа).

У больных рассеянным склерозом НИЛИ позволило восстановить ряд жизненно важных функций, например, ликвидировать анурез.

В дерматологии лечение трофических язв с помощью НИЛИ стало рутинной технологией.

Разработан механизм взаимодействия лазерного излучения с живыми тканями.

Созданы компьютерные программы для расчётов дозировок лазерных воздействий для различных заболеваний, учитывающие индивидуальные различия пациентов.

Выпускаются легко транспортабельные лазерные терапевтические аппараты. Лазерные матричные полупроводниковые излучатели способны доставлять необходимые дозы лазерной энергии к внутренним тканям и органам через кожу на глубину до 2-х см.

Стали понятными основные терапевтические эффекты от воздействия НИЛИ на живые ткани:

существенное стимулирование микроциркуляции;

ускорение регенерационных и репарационных процессов – для реабилитации пациентов после травм и ряда операций, ускорения сращивания костных повреждений;

нормализация нарушений клеточного метаболизма и восстановление функций клеток крови - для лечения трофических заболеваний тканей и некоторых внутренних органов;

восстановление проводимости сигналов по нервным тканям – для лечения различных нейропатий и невралгий, частичного восстановления утраченных двигательных функций конечностей;

В докладе будут также рассмотрены некоторые задачи, которые современная медицина ставит перед наукой и техникой.

## ВОЗМОЖЕН ЛИ СПАЗЕР НА КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ ИЛИ ЯМАХ?

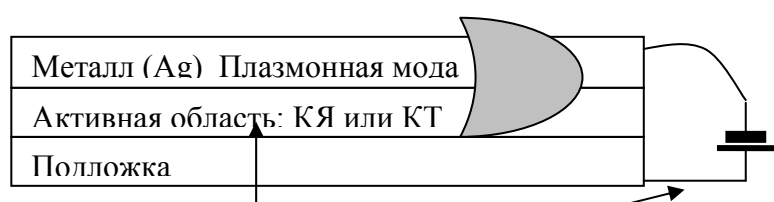
А.А. Андронов<sup>1,2</sup>, Д.Е. Святошенко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ИФМ РАН, Нижний Новгород, 603950 ГСП 105

<sup>2</sup> ННГУ, Нижний Новгород, 603950, пр. Гагарина 29

тел: (831) 438-5062, факс: (831) 438-5553, эл. почта: andron@ipm.sci-nnov.ru

Если иметь в оптическом диапазоне волны с ОЧЕНЬ большим (скажем 300) показателем преломления, то можно надеяться, оптическими методами получить изображения с нм разрешением, что чрезвычайно интересно для нано физики и биологии. Такими, медленными, волна являются плазмоны, фазовая скорость которых может быть близка к фермиевской скорости электронов. К сожалению, плазмоны сильно затухают, что препятствует их применению для указанных целей, хотя, все равно, работы по получению высокого разрешения на плазмонах развиваются (см., например, [1,2]). Чтобы получить на таких плазмонах широкие возможности для исследований и разработок надо скомпенсировать потери плазмонов за счет активной системы, связанной с плазмоном. Или, попросту говоря, создать плазмонный лазер. Предложено даже название для такого лазера – СПАЗЕР [3] (SPASER - surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation). Предложения и попытки сделать плазмонный лазер в оптическом диапазоне имеются [4,5]. Прimitивная возможная схема СПАЗЕРА представлена на рисунке (не в масштабе). Медленные плазмоны имеют малый поперечный к металлу размер и, следовательно, близкий к единице коэффициент оптического ограничения в активной системе, что облегчает преодоление затухания плазмонов.



Накачки: оптическая

В докладе дано общее обсуждение возможности создания спазера на основе гетероструктур с квантовыми ямами и квантовыми точками (что до сих пор не обсуждалось), приводятся расчеты и даны оценки условий получения

спазерного эффекта на основе гетероструктур, излучающих в диапазоне длин волн оптического излучения около 1 микрона. Дан обзор опубликованных работ по созданию спазеров. Оценки показывают, что на основе совершенных структур с квантовыми ямами, где монослойные флюктуации ширины ям малы, при пониженных температурах (78К) в структурах с несколькими ямами, можно ожидать усиление плазмонов раза в два больше, чем их затухание. Для структур с квантовыми точками оценки приводят к аналогичным выводам, если использовать несколько слоев точек высокого качества [6] и малым спейсером. Оптимальным для спазера представляется оптическая накачка, позволяющая избежать дополнительных потерь в системе.

### Литература

- [1] С.А. Майер *Плазмоника: Теория и приложения*, РХД 2010 г. 296 стр.
- [2] J.A. Schuller et al, Plasmonics for extreme light concentration and manipulation, *Nature Materials* 9, 193, (2010).
- [3] D.J. Bergman, M.I. Stockman, Surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation, *Phys. Rev. Lett.*, v. 90, 027402, (2003).
- [4] M.A. Noginov. et al, Demonstration of a *spaser*-based nanolaser, *Nature*,. 460, No. 7259. 1112, (2009).
- [5] R.F. Oulton et al, Plasmon lasers at deep subwavelength scale, *Nature* 461, 629 (2009).
- [6] N. Kirstaedter et al, Gain and differential gain of single layer InAs/GaAs quantum dot injection laser, *Appl. Phys.Lett.*, v.69, N 9, 1226 (1996).

# НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ТОРЦЕВЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОМОДОВЫХ ЛАЗЕРОВ

Н.Ю. Гордеев<sup>1,2</sup>, И.Г. Савенко<sup>2</sup>, И.В. Иорш<sup>2</sup>, М.А. Калитеевский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

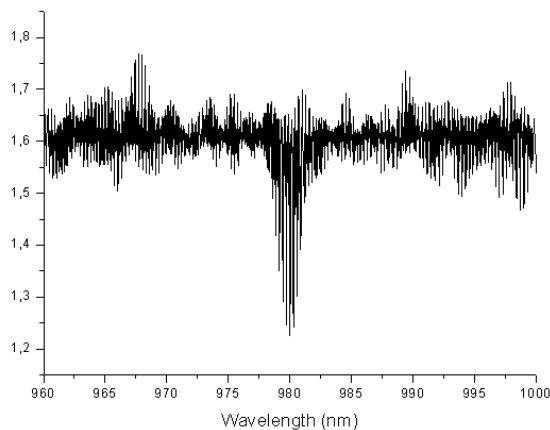
<sup>2</sup> Санкт-Петербургский Академический университет - научно-образовательный центр нанотехнологий РАН, Санкт-Петербург, 195251, Хлопина, 8/3

тел: (812) 297-3620, факс: (812) 297-1017, эл. почта: gordeev@switch.ioffe.ru

Наиболее привлекательным с точки зрения практического применения лазерного диода является сочетание одномодового излучения и высокой оптической мощности. Однако расширение размеров излучающей области, необходимое для увеличения выходной мощности, повышает вероятность возникновения многомодовой лазерной генерации. Одним из способов подавления генерации нежелательных мод является создание пространственно- или спектрально-селективных потерь.

Нами теоретически развит метод управления спектральной селекцией оптических мод за счет формирования поперек лазерного резонатора особых штрихов, вносящих локальные изменения в эффективный показатель преломления волновода [1]. Такой штрих представляет собой вытравленную канавку прямоугольного сечения с шириной, кратной нечётному числу длин четверть-волны. Для аналитического рассмотрения задачи должно выполняться условие  $N\Delta n/n \ll 1$ , где  $N$  – число штрихов,  $n$  – эффективный показатель преломления резонатора,  $\Delta n$  – скачок показателя преломления на границе канавки. Число штрихов при этом должно быть порядка нескольких десятков, а контраст показателя преломления должен быть достаточно малым. При выполнении этого условия становится возможным прямое решение обратной задачи, когда задается желаемая модуляция мод Фабри-Перо и по ней рассчитывается пространственное расположение штрихов, дающее необходимый набег фазы, а, следовательно, и спектральную селекцию.

Нами был проведен численный расчет геометрии штрихов и их влияния на модовый состав излучения в InGaAs/GaAs лазере, излучающем на длине волны 980 нм, с длиной резонатора 2 мм. Ширина штриха составляла 2.1 мкм, количество штрихов - 40, контраст показателя преломления - 0.005, что соответствует скачку показателя преломления при травлении стандартной мезы полупроводникового лазера. Такая конструкция достаточно легко реализуема технологически. Для расчетной длины волны потери резонансно



уменьшаются. Численный анализ устойчивости показал, что при отклонении ширины штриха от номинального расчетного значения изменяется контраст резонансных потерь, а погрешность во взаимном расположении штрихов приводит к спектральному смещению резонансной длины волны.

Таким образом, разрабатываемый подход может быть использован для создания торцевых инжекционных лазеров с predetermined модовым составом излучения.

## Литература

[1] S. Osborne, et.al, IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. 13(5), 1157 (2007).

# ЛАЗЕРЫ НА КЯ С ЭКСТРЕМАЛЬНО БОЛЬШИМ «ЭКВИВАЛЕНТНЫМ РАЗМЕРОМ МОДЫ» ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ С БОЛЬШОЙ ЭНЕРГИЕЙ МЕТОДОМ МОДУЛЯЦИИ УСИЛЕНИЯ

Б.С. Рывкин<sup>1</sup>, Е.А. Аврутин<sup>2</sup>, J.T. Kostamovaara<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел: (812) 297-2369, факс: (812) 297-1017, эл. почта: ryvkin@switch.ioffe.ru

<sup>2</sup> Dept. Of Electronics, University of York, York YO10 5DD, UK

<sup>3</sup> Dept. of Electrical & Information Engineering, University of Oulu, FIN-90014, Oulu, Finland

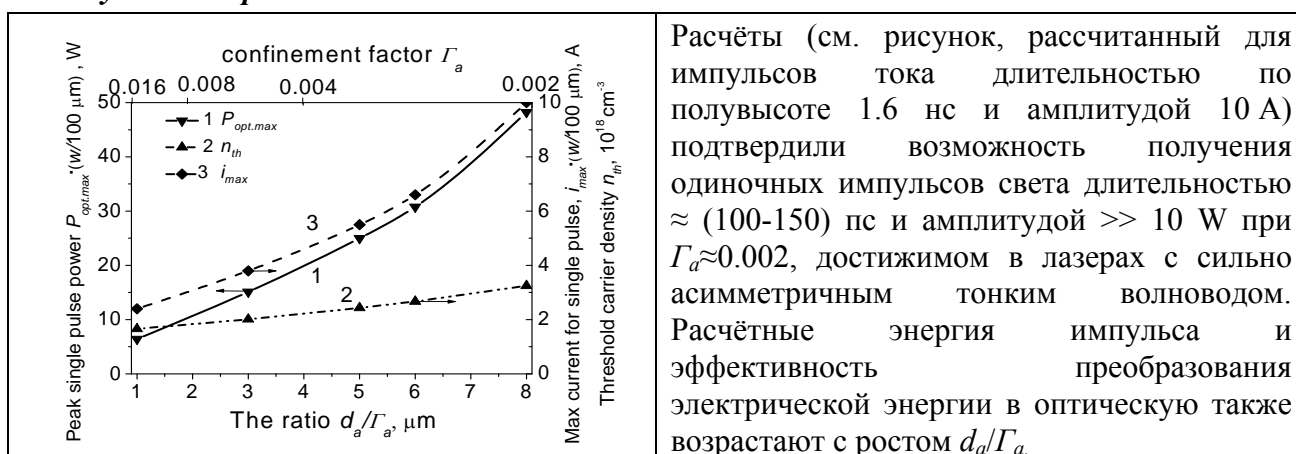
## **Постановка задачи.**

Одиночные оптические импульсы длительностью  $\sim 100$  пс с высокой энергией ( $\gg 1$  нДж) находят ряд применений, для которых большое значение имеют высокая эффективность преобразования электрической энергии в оптическую и возможность работы с импульсами тока амплитудой  $\sim 10$  А и длительностью  $\sim 1.5$  нс. Нами было теоретически показано [1], что эффективным источником таких импульсов могут служить лазерные диоды, сочетающие относительно большую толщину активного слоя  $d_a$  с малым коэффициентом оптического ограничения  $\Gamma_a$ , что даёт большое отношение  $(d_a/\Gamma_a) \gg 1$  мкм. Первые эксперименты [2,3] на основе сильно асимметричных волноводов с объёмным активным слоем ( $\Gamma_a \sim 0.03$ ,  $d_a \sim 0.1$  мкм), излучающих на длине волны  $\lambda = 0.85$  мкм, показали перспективность таких приборов. Однако для  $\lambda \sim 1$  мкм, использование объёмной активной области технологически затруднено. В данном сообщении, мы показываем, что эффективная генерация импульсов с требуемыми параметрами на  $\lambda = 0.98$  мкм возможна при использовании тонкого сильно асимметричного волновода в InGaAs/AlGaAs лазерах с активным слоем из двух квантовых ям (КЯ).

## **Теоретическая модель и конструкция.**

Расчёты проводились в основном в стандартной модели скоростных уравнений, в которых зависимость усиления и скорости рекомбинации носителей от концентрации была взята из микроскопического расчёта для КЯ данной композиции. Результаты хорошо согласуются с предсказаниями более сложной модели, учитывающей распространение света вдоль резонатора.

## **Результаты расчётов.**



## **Литература**

- [1] B.S. Ryvkin, E.A. Avrutin, J.T. Kostamovaara, J. Lightwave Technol., 27, 2125 (2009).
- [2] L.W. Hallman, B.S. Ryvkin et al., Electronics Letters, 46, 65 (2010).
- [3] S. Ranta et al., Proc. Laser Optics Conference, St. Petersburg, 2010, pp. TuR3-p11.

## ЛАЗЕРНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ГРАФЕНА

В.Я. Алешкин<sup>1</sup>, А.А. Дубинов<sup>1</sup>, В.И. Рыжий<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИФМ РАН, Нижний Новгород, 603950, ГСП-105

<sup>2</sup> University of Aizu, Aizu-Wakamatsu, Fukushima 965-8580, Japan

тел: (831) 438-5037, факс: (831) 438-5553, эл. почта: [aleshkin@ipm.sci-nnov.ru](mailto:aleshkin@ipm.sci-nnov.ru)

Физические свойства графена позволяют рассматривать его как перспективный материал для активных сред лазеров дальнего и среднего ИК диапазонов [1]. Действительно, бесщелевая зонная структура позволяет надеяться на усиление оптического излучения в этих диапазонах благодаря межзонным переходам в условиях инверсной заселенности зон, которая может быть достигнута с помощью оптического возбуждения [2]. Высокая подвижность электронов и дырок в высококачественном графене ( $2 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{Вс}$ ) даже при комнатных температурах [3] обеспечивает относительно низкие потери на свободных носителях. Линейный закон дисперсии электронов и дырок способствует подавлению Оже рекомбинации, а большая энергия оптического фонона (0.2 эВ) – подавлению рекомбинации с участием оптических фононов. Кроме того, создание эпитаксиальных слоев с большим количеством графеновых слоев позволяет рассчитывать на хорошую эффективность оптического возбуждения этого материала.

В данной работе рассмотрены три возможные конструкции лазера с использованием графеновых структур: лазер с диэлектрическим волноводом, лазер с вертикальным резонатором и лазер с полосковой линией. Рассчитана динамическая проводимость графеновой структуры в условиях оптического возбуждения, в которую дают вклад межзонные и внутри зонные электронные переходы. Показано, что при достаточно мощном возбуждении имеется интервал частот, в котором действительная часть проводимости отрицательна и имеет место усиление излучения. С учетом потерь в волноводах вычислены коэффициенты усиления в лазерных структурах и оценены пороговые мощности оптического возбуждения для начала лазерной генерации. Проанализировано влияние числа графеновых слоев на лазерные характеристики. Обсуждаются возможности создания лазера на графене с использованием токового возбуждения.

### *Литература*

- [1] A.K. Geim and K.S. Novoselov: Nat. Mater. 6, 183 (2007).
- [2] V.Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov, V.I. Ryzhii. Письма в ЖЭТФ, 89,70 (2009).
- [3] S.V. Morozov, K.S. Novoselov, M.I. Katsnelson et al., Phys. Rev. Lett. 100, 016602 (2007).

## ЭФФЕКТ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ В ИНФРАКРАСНЫХ ЛАЗЕРАХ: ТЕХНОЛОГИЯ РЕЗОНАТОРА

Е.А. Гребенщикова, В.В. Шерстнев, А.М. Монахов, А.Н. Баранов, Ю.П. Яковлев

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел: (812) 292-7929, факс: (812) 297-0006, эл. почта: eagr.iropt7@mail.ioffe.ru

Полупроводниковые лазеры среднего инфракрасного (ИК) диапазона излучения представляют большой интерес для практического применения. Они используются в системах телекоммуникации, в биомедицине, экологии, диодно-лазерной спектроскопии. [1]. Новым направлением в конструировании лазеров ИК-диапазона является лазер с резонатором в форме диска, рабочей модой которого служит, так называемая, мода шепчущей галереи (whispering gallery mode –WGM). Интерес к WGM-лазерам обусловлен более высокой добротностью дискового резонатора ( $Q$ -фактор  $10^6$  [2]), по сравнению с добротностью полоскового резонатора ( $Q$ -фактор  $=3 \times 10^2$ ). Было установлено, что пороговый ток WGM лазера в 4 раза ниже, чем пороговый ток лазера Фабри-Перо, изготовленного из той же полупроводниковой структуры. Кроме того, в дисковом резонаторе WGM лазера генерируется излучение даже тогда, когда оптическое усиление в активной области невелико. Экспериментально установлено, что WGM лазер может работать при очень больших рабочих токах (в 200 раз превышающих пороговые токи) [3]. Изготовление дисковых резонаторов WGM лазеров значительно дешевле по сравнению с созданием резонаторов квантово-каскадных и вертикально-излучающих лазеров.

Основным элементом лазера является резонатор. В данной работе проводился поиск методов постростовой обработки гетероструктур InAs(Sb)/InAsSbP с целью создания дисковых резонаторов лазеров ( $\lambda=3$ -4мкм). Ключевой момент в технологии дискового резонатора – достижение гладкой, ровной боковой поверхности, без неровностей и шероховатости, с вертикальным профилем в районе активной области.

Для создания дисковых резонаторов была выращена двойная гетероструктура InAs(Sb)/InAsSbP методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ). Для экспериментов по жидкостному химическому (wet-chemical) и электрохимическому травлению были использованы растворы, в которых в качестве основных компонентов выступали такие сильные окислители, как  $\text{CrO}_3$ ;  $\text{HClO}_4$  и  $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ . Изучалась зависимость формы и качества поверхности резонатора от концентрации компонентов в растворе травителя, а также от продолжительности и условий обработки гетероструктуры в травителе – температуры, перемешивания, плотности тока. Показано, что наилучшее качество резонаторов в форме диска диаметром от 50 до 300 мкм было достигнуто с использованием травителя состава  $\text{HBr}/\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7/\text{H}_3\text{PO}_4$ .

Таким образом, была разработана методика химического травления гетероструктур InAs(Sb)/InAsSbP для создания дисковых резонаторов WGM лазеров.

На основе созданных резонаторов были построены и исследованы лазеры, излучающие в диапазоне (3-3.5) мкм в непрерывном режиме при 77К, в импульсном режиме при 125 К.

### Литература

- [1] A.P. Astakhov, A.N. Imenkov, T.N. Danilova et al., Spectrochimica Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy 66, Issues 4-5, 824 (2007).
- [2] D.A. Cohen, M. Hossein-Zadeh, A.F.J. Levi, Sol. St. Electron., 45, 1577 (2001).
- [3] Н.С. Аверкиев, А.П. Астахова, Е.А Гребенщикова и др, ФТП 43, 1, 124 (2009).

# АНОМАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРОВ С БОЛЬШИМ ЧИСЛОМ КВАНТОВЫХ ЯМ

В.Я. Алешкин<sup>1</sup>, Т.С. Бабушкина<sup>2</sup>, А.А. Бирюков<sup>2</sup>, А.А. Дубинов<sup>1</sup>, Б.Н. Звонков<sup>2</sup>,  
М.Н. Колесников<sup>2</sup>, С.М. Некоркин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИФМ РАН, Нижний Новгород, 603950, ГСП-105

<sup>2</sup> НИФТИ Нижегородского гос. университета, Нижний Новгород, 603950, пр. Гагарина, 23  
тел: (831) 438-5037, факс: (831) 438-5553, эл. почта: [aleshkin@ipm.sci-nnov.ru](mailto:aleshkin@ipm.sci-nnov.ru)

Одной из основных причин, ограничивающих выходную мощность полупроводникового лазерного диода, является наличие предельно возможного поля световой волны в резонаторе, которое фактически определяется вероятностью испускания оптических фононов [1]. Фактически это ограничение проистекает из требования более короткого времени заполнения верхнего рабочего состояния по сравнению со временем излучательной рекомбинации. Это ограничение весьма существенно при создании мощных полупроводниковых лазеров. Для его преодоления обычно используются сверхширокие лазерные резонаторы [1,2]. Однако существует и другой путь преодоления этого ограничения – создание лазеров с вытекающей в подложку модой [3]. В таких лазерах при использовании большого числа квантовых ям ( $>5$ ) в волноводе ограничение мощности определяется фактически только возможностями токовой накачки. Кроме того, такие лазеры из-за большой апертуры обладают очень узкой диаграммой направленности излучения в плоскости, перпендикулярной  $p$ - $n$  переходу.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование полупроводниковых лазеров с активной областью, содержащих шесть квантовых ям как со сверхшироким волноводом так и с вытеканием излучения в подложку. Исследованы температурные зависимости рабочих характеристик. Обнаружено аномальное поведение температурной зависимости порогового тока и внешней дифференциальной квантовой эффективности, связанное с наличием отрицательной характеристической температуры и падением квантовой эффективности излучения при понижении температуры в лазерах со сверхшироким волноводом без вытекания излучения в подложку. В этих лазерах выявлено обужение диаграммы направленности в плоскости, перпендикулярной  $p$ - $n$  переходу при увеличении температуры. В лазерах с вытеканием излучения в подложку не было обнаружено таких аномалий. Оптимизация такой структуры в сторону вытекания значительной части излучения в подложку позволила получить сверхузкую диаграмму направленности в плоскости, перпендикулярной  $p$ - $n$ -переходу. Лазерные диоды с вытеканием излучения в подложку позволили получить значительный выход излучения (около 84%) в узком угловом интервале (около  $1$ - $2^\circ$ ) по сравнению с лазерными диодами с вытеканием излучения в подложку обычной конструкции (выход излучения в узком пучке 50%). Экспериментальный анализ энергетических параметров полупроводниковых лазеров с выходной апертурой 360 мкм показал возможность достижения энергии излучения 170 мкДж в режиме накачки одиночным импульсом тока величиной 88 А и длительностью 5 мкс.

## Литература

- [1] С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.А. Пихтин и др, ФТП, 40, 1017 (2006).
- [2] В.А. Геловани, А.П. Скороходов, В.И. Швейкин *Высокомощные диодные лазеры нового типа*, Эдиториал УРСС, М. 2005.
- [3] Н.Б. Звонков, Б.Н. Звонков, А.В. Ершов и др., Квантовая электроника, 25, 622. (1998).



# РАЗОГРЕВ И ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА НОСИТЕЛЯМИ ЗАРЯДА В ЛАЗЕРНЫХ Sb-СОДЕРЖАЩИХ НАНОСТРУКТУРАХ В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ

Л.Е. Воробьев<sup>1</sup>, L. Shterengas<sup>2</sup>, В.Л. Зерова<sup>1</sup>, М.Я. Винниченко<sup>1</sup>, G. Kipshidze<sup>2</sup>, Т. Hosoda<sup>2</sup>,  
Д.А. Фирсов<sup>1</sup>, G. Belenky<sup>2</sup>

<sup>1</sup> СПбГПУ, Санкт-Петербург, 195251, Политехническая, 29

<sup>2</sup> Department of ECE, State University of New York at Stony Brook, 11794 New York, USA  
тел: (812) 552-9671, факс: (812) 533-4717, эл. почта: LVor@rphf.spbstu.ru

При высоких уровнях инжекции электронно-дырочных пар в лазерные наноструктуры в режиме стимулированного излучения возможен разогрев носителей заряда в квантовых ямах и поглощение света свободными носителями заряда (главным образом дырками), инжектированными в волновод. Необходимо изучение этих процессов с целью уменьшить их негативное влияние на характеристики лазеров.

Исследовались, главным образом, лазерные наноструктуры с КЯ InGaAsSb/InAlGaAsSb шириной 12-14 нм и шириной барьера 40-50 нм. В первой части работы изучались спектры и интенсивность спонтанной электролюминесценции в направлении, перпендикулярном плоскости структуры в режиме генерации стимулированного излучения в зависимости от тока накачки. Интегральная интенсивность ЭЛ, дающая информацию о концентрации носителей заряда, находилась путем интегрирования спектральной зависимости интенсивности ЭЛ, что позволило исключить вклад рассеянного стимулированного излучения. Оказалось, что после начала генерации концентрация инжектированных носителей заряда не стабилизируется, а растет с током. Одна из возможных причин – это разогрев носителей заряда на нижних уровнях размерного квантования КЯ при  $e-e$ ,  $e-h$  и  $h-h$  столкновениях с высокоэнергичными носителями заряда в барьерах. Это явление и его влияние на характеристики лазеров были отмечены в работе [1].

Концентрация носителей заряда растет с ростом тока также из-за поглощения света свободными носителями заряда при их инжекции в волновод, что увеличивает оптические потери. На основании полученных экспериментальных данных оценена степень разогрева электронов и дырок. Эта оценка сравнивается с расчетом изменения электронной температуры с ростом тока с учетом рассеяния энергии горячих электронов и дырок при взаимодействии с полярными оптическими фононами с учетом их накопления.

Для уменьшения влияния дырок на внутренние оптические потери был сконструирован асимметричный волновод с КЯ, смещенный к  $p$ -слою, что должно уменьшить число дырок в волноводе. Было проведено сравнение характеристик двух типов лазеров: с симметричным и асимметричным волноводами. При больших токах накачки мощность излучения лазера с асимметричным волноводом оказалась больше, а внутренние оптические потери меньше. Результаты исследований частично опубликованы в работах [2,3].

Работа поддержана грантами РФФИ, Минобрнауки РФ, Комитета по науке и высшей школе СПб, а также АВЦП Рособразования "Развитие научного потенциала высшей школы" и ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России".

## Литература

- [1] L.V. Asryan, N.A. Gun'ko, A.S. Polkovnikov et al., Semic. Sci. Technol., 14 (12), 1069 (1999).
- [2] G. Belenky, L. Shterengas, D. Wang et al., Semic. Sci. Technol., 24 (11), 115013 (2009).
- [3] Л.Е. Воробьев, М.Я. Винниченко, Д.А. Фирсов и др., ФТП 44 (11), 1451 (2010).

# ПАРАМЕТРЫ СТОКСА ИЗЛУЧЕНИЯ ПОПЕРЕЧНО-ОДНОМОДОВЫХ InGaAs/AlGaAs ЛАЗЕРОВ С КВАНТОВОРАЗМЕРНОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ

Н.В. Дьячков, А.П. Богатов

ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва, 119991, Ленинский пр., 53

тел: (499) 132-6263, факс: (499) 135-4268, эл. почта: bogatov@sci.lebedev.ru

1. Впервые изучено поведение состояния поляризации излучения поперечно-одномодовых гребневых полупроводниковых лазеров с квантоворазмерными гетероструктурами на языке параметров Стокса [1] в широком диапазоне токов накачки – от 10 до 300 мА – от значений, соответствующих спонтанному режиму до значений, при которых имеют место аномалии ватт-амперной характеристики. При этом использовались образцы лазеров с двумя различными квантоворазмерными гетероструктурами – с ненапряженной GaAs/AlGaAs с длиной волны излучения  $\lambda \approx 0,85$  мкм и напряженной InGaAs/AlGaAs с  $\lambda \approx 0,98$  мкм. Выбор типов образцов для изучения был обусловлен их наилучшей изученностью, простотой устройства и относительной стабильностью работы.
2. В рамках трехзонной модели оптических переходов [2] произведен расчет степени поляризации спонтанного излучения для гетероструктур исследованных образцов с использованием известных в литературе материальных параметров полупроводников [3, 4]. Результаты расчета с учетом точности выбранной модели находятся в хорошем соответствии с экспериментом.
3. Обнаружено, что состояние поляризации излучения полупроводниковых лазеров в лазерном режиме работы может существенно отличаться от линейного. Характер и величина этого отличия зависят от конкретного образца.
4. Установлено свойство аномалий ватт-амперной характеристик (“kink”) отражаться на поляризации излучения в виде существенного падения степени поляризации.
5. В целом зависимость параметров Стокса от тока накачки для образцов с различными гетероструктурами носила схожий характер.
6. Предполагается, что состояние поляризация излучения в режиме генерации при токах накачки, соответствующих регулярным участкам ватт-амперной характеристики, может представлять собой важную характеристику лазерного диода, чувствительную к качеству изготовления его оптического волновода.

## *Литература*

[1] Борн М., Вольф Э. “Основы оптики”. Наука 1970.

[2] Д.В. Батрак, С.А. Богатова, А.В. Бородаенко и др. “Моделирование материального усиления квантоворазмерных слоев InGaAs, используемых в гетеролазерах, работающих в спектральной области 1.06 мкм”. Квантовая электроника 2005.

[3] Properties of Aluminium Gallium Arsenide EMIS Datareviews Ser No. 7 (London INSPEC, 1993).

[4] Properties of Lattice-Matched and Strained Indium Gallium Arsenide EMIS Datareviews Ser. No. 8 (London INSPEC 1993).

# УЛЬТРАЗВУКОВОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ ДЫРОЧНЫХ УРОВНЕЙ В КВАНТОВОЙ ЯМЕ InGaAsP/InP – ЛАЗЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Л.А. Кулакова

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел: (812) 515-9175, факс: (812) 515-6747, эл. почта: L.Kulakva@mail.ioffe.ru

Известно, что диодные лазеры с перестраиваемым спектром излучения являются как основой лазерной спектроскопии с высокой разрешающей способностью, так и многих интерферометрических систем измерения и оптических систем связи. Кроме того, существенно возросли требования к скорости и плавности такой перестройки. Оба эти обстоятельства демонстрируют актуальность поиска новых подходов к управлению спектральными характеристиками лазерного излучения.

Нами впервые были начаты [1 - 3] и проводятся по настоящее время исследования воздействия ультразвуковой деформации на спектральные характеристики генерируемого излучения InGaAsP/InP гетеролазеров. Главными результатами проведенных исследований являются а) демонстрация того, что в исследованных структурах можно управлять быстрой и непрерывной периодической перестройкой спектра гетеролазеров в диапазоне 60 GHz за половину периода звука (50 ns) с сохранением неизменной интенсивности излучения; в) выявление возможностей управления направлением генерируемого излучения.

В данной работе будут представлены первые результаты исследования деформационного воздействия ультразвуковых волн на тонкий спектр квантовых состояний носителей заряда в активной зоне лазерной гетероструктуры. Известно, что в большинстве кубических полупроводников сильное спин-орбитальное взаимодействие формирует валентную зону и обуславливает наличие уровней в квантовой яме, отличающихся проекцией полного момента дырки на ось квантования. Изменение энергии под влиянием переменной деформации должно приводить к модуляции положения уровней, что, в свою очередь, должно проявляться в изменении поляризационных характеристик излучения с периодичностью ультразвуковой деформации. Это явление может быть основой для управляемой модуляции поляризацией излучения в наноразмерных лазерных структурах. Изучение его интересно не только с фундаментальной точки зрения, но и открывает новые возможности использования в устройствах обработки информации.

В литературе известны данные воздействия статического давления на люминесценцию в пассивных структурах. С другой стороны, активное изучение динамики эффекта начато с использованием акустических солитонов при температуре жидкого гелия [4]. Эти исследования носят, довольно, эксклюзивный характер в силу их большой сложности.

Нами начаты исследования воздействия ультразвуковой деформации на поляризационные характеристики излучения InGaAsP/InP гетеролазеров при комнатной температуре. Полученные экспериментальные результаты, помимо подтверждения надежной наблюдаемости ожидаемого эффекта, выявили ряд дополнительных неожиданных эффектов, которые ставят перед теорией ряд вопросов. В частности, обнаружено, что направления поляризаций максимальной интенсивности в присутствии деформации и равновесного лазерного излучения отличаются на 45 градусов.

Работа поддержана грантами РФФИ (№ 07-02-00557, № 09-02-12413-офи\_м).

## Литература

- [1] Л.А. Кулакова, Н.А. Пихтин, С.И. Слипченко, И.С. Тарасов. ЖЭТФ 131, 5, 790 (2007).
- [2] Liudmila A. Kulakova Appl. Optics, 48, 1128 (2009).
- [3] Л.А. Кулакова, А.В. Лютецкий, В.Б. Волошинов, Письма ЖТФ 36, 12, 48 (2010).
- [4] A.V. Scherbakov, et.al Phys. Rev. Lett., 99, 057402 (2007).

## ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ И БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ В МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДНЫХ ЛИНЕЙКАХ

М.В. Богданович<sup>1</sup>, В.В. Кабанов<sup>1</sup>, **Е.В. Лебедок<sup>1</sup>**, А.А. Романенко<sup>1</sup>, Г.И. Рябцев<sup>1</sup>,  
А.Г. Рябцев<sup>2</sup>, М.А. Щемелев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь, 220072, пр-т Независимости, 68

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет, 220030, пр-т Независимости, 4

тел: (+375-17) 294-90-10, факс: (+375-17) 284-08-79,

эл. почта: [y.lebiadok@dragon.bas-net.by](mailto:y.lebiadok@dragon.bas-net.by)

Применительно к мощным лазерным диодным линейкам (ЛДЛ) на основе InGaAs/AlGaAs гетероструктуры, используемых для накачки твердотельных эрбиевых лазеров, проанализировано влияние излучательной и безызлучательной рекомбинации, а также рекомбинации, индуцируемой усиленной люминесценцией (УЛ), на пороговые, мощностные и динамические характеристики ЛДЛ.

Развита модель определения характеристик усиленной люминесценции в активном слое мощных ЛДЛ, включающей в рассмотрение взаимодействие двух потоков усиленной люминесценции  $S_x$  и  $S_y$ , распространяющихся перпендикулярно ( $Ox$ ) и вдоль ( $Oy$ ) оси резонатора ЛДЛ соответственно. На основании данной модели были определены коэффициенты потерь  $\alpha_{lum}^x$  и  $\alpha_{lum}^y$  для потоков  $S_x$  и  $S_y$ . Установлено, что величины  $\alpha_{lum}^x$  и  $\alpha_{lum}^y$  для ЛДЛ на основе InGaAs/AlGaAs гетероструктуры при токах накачки, близких к порогу генерации и при учете эффекта растекания носителей заряда в областях контактного и волноводного слоев [1], обратно пропорциональны корню квадратному от площади активного слоя ЛДЛ с коэффициентами пропорциональности, равными 2,6 и 31 соответственно. Полученные численные значения коэффициентов потерь позволяют значительно упростить определение величин потоков усиленной люминесценции в лазерных диодных линейках с ошибкой, не превышающей 16 %.

Вклад усиленной люминесценции в плотность порогового тока, рассчитанную для области под полосковым контактом, равен 15%, вклад излучательной рекомбинации составляет порядка 75%, безызлучательной – 10%.

Изучено влияние усиленной люминесценции и растекания неравновесных носителей заряда на пороговые, динамические и мощностные характеристики ЛДЛ на основе InGaAs/AlGaAs гетероструктуры. Показано, что в зависимости от величины фактора заполнения излучением ближнего поля вклад рекомбинации, индуцируемой усиленной люминесценцией, в порог генерации ЛДЛ может достигать 13 %. Потери энергии накачки ЛДЛ, связанные с развитием потоков УЛ, продолжают возрастать с ростом тока инжекции выше порогового значения. Причем, основной вклад в эти потери дает поток  $S_x$ . При токе инжекции в 1,5 раза большем, чем пороговое значение, величина  $S_x$  в 2,5 раза превышает значение  $S_x$ , определенное в пороге генерации. Для зависимости потока  $S_y$  от тока инжекции характерно стремление к насыщению. Возрастание потока  $S_x$  с увеличением уровня накачки ЛДЛ является одной из причин уменьшения мощности выходного генерируемого излучения.

### Литература

[1] Х. Кейси, М. Паниш, в кн. *Лазеры на гетероструктурах*, Т.2, Мир, М. 1981, с. 250.

# МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ ОПТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА В СИСТЕМЕ ЭКСИТОННЫХ ПОЛЯРИТОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ ТИПА III-V

С.С. Гаврилов<sup>1,2</sup>, В.Д. Кулаковский<sup>1</sup>, Д.М. Крижановский<sup>3</sup>, А.С. Бричкин<sup>1</sup>,  
А.А. Дородный<sup>1</sup>, D. Sarkar<sup>3</sup>, А.В. Ларионов<sup>1</sup>, Н.А. Гиппиус<sup>2,4</sup>, С.Г. Тиходеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка, 142432, ул. Институтская, 2

<sup>2</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991, ул. Вавилова, 38

<sup>3</sup> Department of Physics and Astronomy, University of Sheffield, Sheffield S3 7RH, UK

<sup>4</sup> LASMEA, Université Blaise Pascal, UMR 6602 CNRS, 63177 Aubière, France

тел: (49652) 2-25-10, эл. почта: gavr\_ss@issp.ac.ru

Квазидвумерные экситонные поляритоны — элементарные возбуждения, возникающие в активном слое плоского полупроводникового микрорезонатора в режиме сильной экситон-фотонной связи. Система квазидвумерных поляритонов обнаруживает свойства слабонеидеального газа бозе-частиц. В работе [1] было предсказано, что в условиях эллиптически поляризованной резонансной стационарной накачки с частотой выше поляритонного уровня отклик такой системы оказывается существенно мультстабильным. В частности, неравновесные переходы, осуществляющиеся по достижении критических плотностей возбуждения, могут приводить к резким изменениям как интенсивности, так и оптической поляризации поля в активном слое резонатора, а общее число ветвей стационарного отклика такой системы может достигать четырех [2]. В недавнее время эффект мультстабильности отклика системы квазидвумерных поляритонов был подтверждён экспериментально [3]; при этом было установлено [4], что поведение такой системы не может быть описано в рамках моделей, принимающих во внимание лишь макрозаполненные когерентные моды с определённой оптической поляризацией.

В настоящем докладе рассматривается теоретическая модель, позволяющая описать динамику неравновесных переходов в мультстабильной поляритонной системе [4, 5]. В частности, показано, что резонансная накачка приводит к возбуждению неполяризованного резервуара долгоживущих экситонных состояний, влияющего как на величины пороговых плотностей возбуждения, так и на характерные времена переходов. Результаты расчётов сравниваются с данными экспериментов [5], в которых динамика поля в микрорезонаторе под действием наносекундных оптических импульсов непосредственно измерялась с временным и спектральным разрешениями.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ, программ РАН, а также Министерства образования и науки РФ (программа «Кадры», контракт № П1236).

## Литература

[1] N.A. Gippius, I. Shelykh, D.D. Solnyshkov, S.S. Gavrilov *et al.*, Phys. Rev. Lett. 98, 236401 (2007).

[2] С.С. Гаврилов, Н.А. Гиппиус, С.Г. Тиходеев, В.Д. Кулаковский, ЖЭТФ 137, 943 (2010).

[3] T.K. Paraïso, M. Wouters, Y. Léger *et al.*, Nat. Mater. 9, 655 (2010).

[4] D. Sarkar, S.S. Gavrilov, M. Sich *et al.*, <http://arxiv.org/abs/1007.3592> (submitted, 2010).

[5] С.С. Гаврилов, А.С. Бричкин, А.А. Дородный и др., Письма в ЖЭТФ 92, 194, (2010).

# МОДОВЫЙ СОСТАВ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ И ЕГО ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, А.Ю. Лешко, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел: (812) 292-7379, факс: (812) 292-7379, эл. почта: serghpl@mail.ioffe.ru

Достижения в области физики мощных полупроводниковых лазеров позволили создать излучатели, сохраняющие более чем 80% эффективность преобразования тока инжекции в оптическое излучение, для уровней возбуждения более 10 кА/см<sup>2</sup> [1- 4]. Однако в ряде экспериментальных работ был установлен факт обратимого падения выходной оптической мощности [5-7] и излучательной эффективности [2, 4] не связанный с температурным перегревом.

В рамках доклада представлены результаты экспериментальных исследований, посвященные явлению генерации замкнутой моды (ЗМ) в мощных Фабри-Перо полупроводниковых лазерах. Рассмотрены фундаментальные механизмы, объясняющие выполнение пороговых условий генерации ЗМ на основании экспериментальных спектров усиления и внутренних оптических потерь. Показано, что есть существенная разница в условиях распространения излучения ЗМ и мод Фабри-Перо резонатора (ФПМ) для области полоскового контакта и пассивных областей кристалла лазерного диода. Рассмотрена модель, описывающая падение излучательной эффективности и выходной оптической мощности полупроводникового лазера за порогом генерации ФПМ. В предложенной модели механизм ухудшения выходных мощностных характеристик описан через выполнение пороговых условий для замкнутой моды. С использованием скоростных уравнений проведен анализ выполнения пороговых условий генерации замкнутой моды в полупроводниковых лазерах.

Экспериментально исследована динамика излучательных характеристик в режиме генерации с участием ЗМ и ФПМ. Продемонстрирован эффект управления модовым составом излучения мощных Фабри-Перо полупроводниковых лазеров. Показана возможность модуляции выходной оптической мощности Фабри-Перо полупроводниковых лазеров путем управления добротностью резонатора ЗМ.

## *Литература*

- [1] С.О.Слипченко, Д.А.Винокуров, Н.А.Пихтин и др., ФТП, 38, 1477 (2004).
- [2] С.О.Слипченко, З.Н.Соколова, Н.А.Пихтин и др., ФТП, 40, 1017 (2006).
- [3] G. Erbert, F. Bugge, J. Fricke et al., IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, vol.11, 1217 (2005).
- [4] A Pietrzak, P Crump, H Wenzel et al., Semicond. Sci. Technol. 24, 035020 (2009)
- [5] А.Ю.Лешко, А.В.Лютецкий, Н.А.Пихтин и др., ФТП, 36, 1393 (2002).
- [6] G.I. Ryabtsev, T.V. Bezyazychnaya, M.V. Bogdanovich et al., Appl. Phys. B 90, 471 (2008).
- [7] С.О.Слипченко, Д.А.Винокуров, А.В.Лютецкий и др., ФТП, 43, 1409 (2009).

# ДИНАМИКА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ ПРИ ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ИНЖЕКЦИИ

Л.И. Буров, А.С. Горбацевич, Е.С. Соколов

Белорусский государственный университет, Беларусь, Минск, 220050,  
пр. Независимости 4.

тел: +375 17 209-5503; +375 29 628-7685; эл. почта: [burov@bsu.by](mailto:burov@bsu.by)

На основе оригинального метода описания формирования поляризованного излучения в лазерах с быстрой фазовой релаксацией детально рассмотрен эффект переключения поляризации для модели одномодового полупроводникового инжекционного лазера. Метод использует представление излучения в виде некогерентной суперпозиции полного набора компонент различных линейных поляризаций и основан на описании формирования выходного поляризованного излучения как процесса последовательного усиления отдельных компонент с учетом ориентационной анизотропии коэффициентов усиления и/или потерь.

Данный метод позволил описать все основные особенности поляризационных переключений в полупроводниковых инжекционных лазерах в одномодовом режиме, которые наблюдаются экспериментально, однако интерпретация природы наблюдаемых явлений отличается от обычно принятой трактовки. Основные отличия можно сформулировать следующим образом:

- устойчивые стационарные состояния не являются чистыми поляризационными состояниями, хотя значение степени поляризации может быть очень близким к единице, т.е. эти состояния не являются, строго говоря, поляризационными модами;
- характеристическое время формирования устойчивого поляризационного состояния значительно превышает время формирования выходной интенсивности лазера, что, в конечном итоге, приводит к различным гистерезисным явлениям в области переключения поляризации;
- скорость переключения поляризации выходного излучения в области неустойчивости определяется длительностью импульса возбуждения и/или временем жизни фотона в резонаторе лазерной системы;
- антифазная динамика ортогональных поляризованных мод является естественным следствием механизма формирования поляризационных состояний.

Детально исследован случай поляризационных переключений в условиях внешней оптической инжекции, когда поляризация инжектируемого сигнала выступает в качестве управляющего параметра. Показана возможность наблюдения целого ряда новых эффектов динамической поляризационной мультистабильности. В частности, показана возможность существования в области критической точки переключения, соответствующей нулевому значению степени поляризации, либо плато (три относительно устойчивых поляризационных состояния), либо узкого промежуточного поляризационного гистерезиса.

Проведен анализ когерентных свойств выходного излучения в области поляризационных переключений, в том числе влияния величины частотного сдвига ортогональных поляризационных мод на величину полной степени поляризации, определяемой через параметры Стокса.

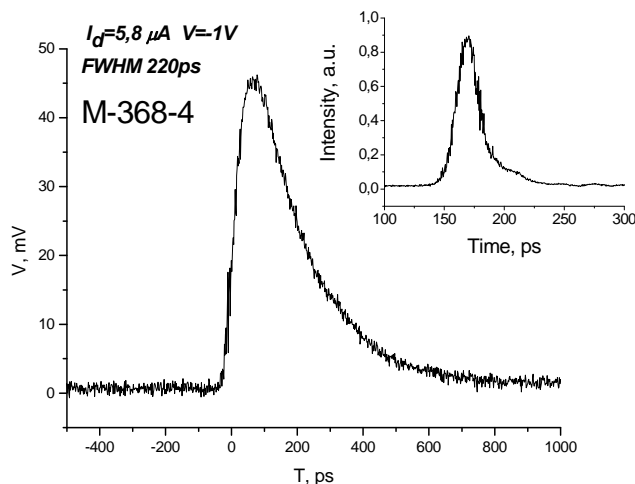
# РЕГИСТРАЦИЯ КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 1.3-2.4 МКМ С ПОМОЩЬЮ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ P-I-N ФОТОДИОДОВ

И.А. Андреев, И.М. Гаджиев, Е.А. Гребенщикова, А.Г. Дерягин, В.В. Дюделев, Н.Д. Ильинская, Г.Г. Коновалов, Е.В. Куницына, В.И. Кучинский, М.П. Михайлова, О.В. Серебренникова, Г.С. Соколовский, Ю.П. Яковлев

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел: (812) 292-7929, факс: (812) 297-0006, эл. почта: igor@iropt9.ioffe.ru

Созданы и исследованы неохлаждаемые быстродействующие p-i-n фотодиоды для регистрации коротких импульсов лазерного излучения в спектральном диапазоне 1.3–2.4 мкм. Данные фотодиоды позволяют изучать быстропротекающие процессы в физике лазеров, ядерной физике, физике космических лучей, а также могут использоваться в дальнометрии и локации в безопасном для глаза человека окне прозрачности атмосферы, в системах СВЧ коммуникаций по каналам ВОЛС и в открытом пространстве, в системах диодно-лазерной спектроскопии газов и молекул, в медицине и т.д.

Разработан и оптимизирован технологический цикл создания быстродействующих фотодиодов, включающий выращивание на подложке GaSb(100) изопериодных гетероструктур GaSb/GaInAsSb/ GaAlAsSb методом жидкофазной эпитаксии, постростовую технологию, корпусирование фотодиодов в специальные СВЧ разъемы для исследования кинетики фотоотклика и измерения полосы пропускания. Благодаря применению технологии выращивания активной области GaInAsSb фотодиодных гетероструктур с использованием редкоземельного элемента гольмия (Ho)



достигнуто рекордно низкое значение собственной емкости фотодиодов:  $C = 2.0-3.0$  пФ без обратного смещения и  $C = 0.8-1.0$  пФ при обратном смещении  $U = -1$  В при диаметре чувствительной площадки 100 мкм. Осциллограмма фотоответа приведена на Рис. Быстродействие GaInAsSb/GaAlAsSb фотодиодов, определяемое по времени нарастания импульса фотоотклика на уровне 0.1-0.9, составляет величину  $t_{0.1-0.9} = 130-150$  пс. Ширина полосы пропускания достигает 2 ГГц. Фотодиоды характеризуются низкой величиной обратных

темновых токов  $I = 300-900$  нА при обратном смещении  $U = -(0.5-3.0)$  В, высокими значениями токовой монохроматической чувствительности  $S_I = 1.10-1.15$  А/Вт и обнаружительной способности  $D^*(\lambda_{max}, 1000, 1) = 9.0 \times 10^{10}$  Вт<sup>-1</sup>×см\*Гц<sup>1/2</sup> на длинах волн 2.0–2.2 мкм.

Работа частично поддержана грантом РФФИ N 09-08-91224 СТ-а.



## БРЭГГОВСКАЯ СЕЛЕКЦИЯ МОД В СВЕРХИЗЛУЧАЮЩИХ ГЕТЕРОЛАЗЕРАХ

**Вл.В. Кочаровский**

ИПФ РАН, Нижний Новгород, 603950, ул. Ульянова, 46

*тел: (831) 416-48945, факс: (831) 416-0616, эл. почта: kochar@appl.sci-nnov.ru*

В докладе рассмотрена проблема брэгговской селекции мод в сверхизлучающих гетеролазерах, имеющих низкобродотные комбинированные резонаторы типа Фабри-Перо с распределённой обратной связью, а также исследованы возможные режимы генерации когерентных импульсов излучения в подобных лазерах с постоянной накачкой.

С этой целью на основе интегро-дифференциальных уравнений Максвелла-Блоха развита аналитическая теория и проведён численный анализ условий возбуждения мод в указанных резонаторах с активной средой, обладающей большим неоднородным уширением спектральной линии. Дано качественное описание нелинейной динамики и спонтанной синхронизации мод, обусловленной процессами сверхизлучения. Выявлены особенности выжигания спектральных провалов в неоднородно уширенной линии генерации в процессе перерасеяния, усиления, дисперсионного расплывания и нелинейного взаимодействия встречных электромагнитных волн, образующих сверхизлучающие и/или самосинхронизирующиеся моды. Изучены динамические спектры ожидаемых импульсов сверхизлучения, установлены необходимые для их получения параметры лазерных гетероструктур и предельные параметры генерируемых импульсов.

Обсуждаются перспективы создания сверхизлучающих гетеролазеров.

# ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕР С ДИФРАКЦИОННЫМ ФИЛЬТРОМ ОПТИЧЕСКИХ МОД

М.В. Максимов<sup>1,2</sup>, Н.Ю. Гордеев<sup>1,2</sup>, И.И. Новиков<sup>1,2</sup>, А.М. Кузнецов<sup>2</sup>, Ю.М. Шерняков<sup>1,2</sup>,  
А.Е. Жуков<sup>1,2</sup>, А.В. Чунарева<sup>1,2</sup>, А.С. Паюсов<sup>2</sup>, Д.А. Лившиц<sup>3</sup> и А.Р. Ковш<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая 26.

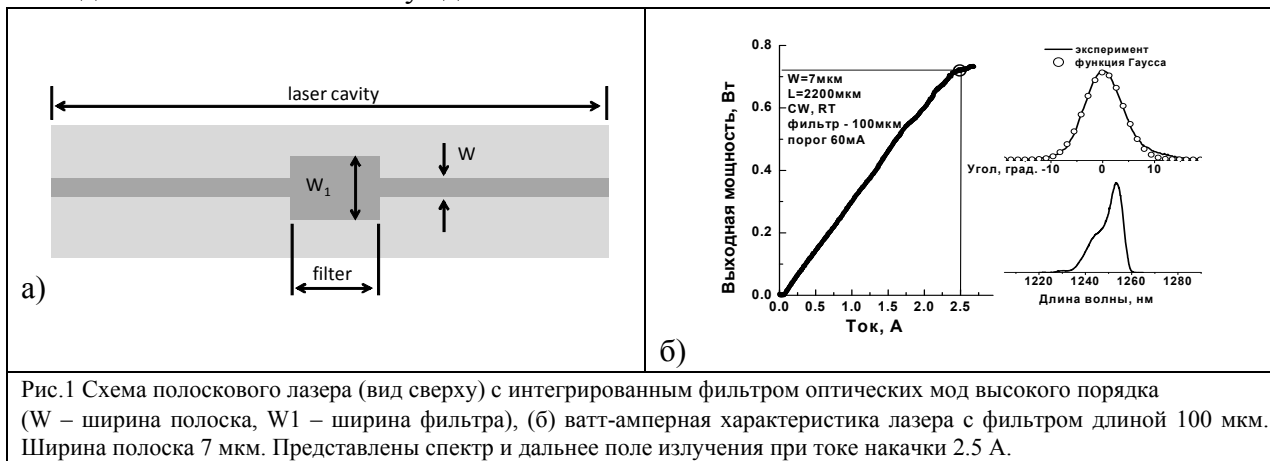
<sup>2</sup> СПб АУ-НОЦ НТ РАН, Санкт-Петербург, 195220, ул. Хлопина, 8/3.

<sup>3</sup> Innolume GmbH, Konrad-Adenauer-Allee 11, 44263, Dortmund, Germany

эл. почта: maximov@beam.ioffe.ru

Для ряда практических применений полупроводниковых лазеров чрезвычайно важным является получение максимальной световой мощности при устойчивом режиме генерации в фундаментальной поперечной моде. Максимальная мощность излучения торцевого лазера обычно возрастает при увеличении ширины его полоска. В то же время, увеличение ширины полоска лазера с гребневым волноводом приводит к повышению вероятности возгорания мод более высоких порядков и тем самым ограничивает максимальную мощность лазера в пространственно-одномодовом режиме. Таким образом, расширение полоска с целью увеличения оптической мощности должно сопровождаться мерами по подавлению возгорания мод высоких порядков.

В рамках данных исследований была разработана конструкция дифракционного оптического фильтра, позволяющего эффективно подавлять генерацию мод высокого порядка. Фильтр представлял собой часть волновода с шириной, в несколько раз превышающей ширину полоска в основной части (Рис. 1а). В широкой фильтрующей секции моды могли свободно дифрагировать в горизонтальном направлении. Фундаментальная мода имеет наименьшую расходимость по сравнению с модами высоких порядков, поэтому она имеет наименьшие дифракционные потери при прохождении фильтрующей секции. Потери мод более высоких порядков в несколько раз выше, вследствие чего они не возбуждаются.



В лазерах с InGaAs/GaAs квантовыми точками с длиной резонатора 2.2 мм, не содержащих фильтрующего элемента, излучение носит существенно неодномодовый характер уже при малых токах накачки. Максимальная мощность излучения такого лазерного диода в одномодовом режиме не превысила 40 мВт. В лазерах аналогичной конструкции, содержащих одну фильтрующую секцию длиной 100 мкм, вплоть до максимального тока накачки 2.5 А излучение имеет одномодовый характер (Рис. 1б). Распределение интенсивности излучения в дальнем поле с высокой точностью описывается функцией Гаусса. Максимальная мощность излучения в пространственно-одномодовом режиме составила величину более 0.7 Вт.

# ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ОТЖИГ – СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Е.Л. Портной

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел: (812) 292-7376, факс: (812) 297-1017, эл. почта: portnoyef@mail.ru

7 мая 2010 года на глобальном информационном сайте «The A to Z of Nanotechnology» (www.azonano.com) появилось сообщение о прорыве в технологии фотонных кристаллов – «**New Laser Interference Lithography Helps to Fabricate 2D and 3D Nano-Structures**».

ФТИ им. А.Ф. Иоффе имеет многолетний задел в этом направлении, получившем в свое время название - интерференционный лазерный отжиг (ИЛО) [1]. Под ИЛО понимают модификацию полупроводникового материала мощным лазерным излучением, являющимся когерентной суперпозицией двух и более световых пучков, интерферирующих между собой на поверхности и (или) внутри полупроводника. Было показано, что с помощью ИЛО можно изготавливать фотонные кристаллы, представляющие собой как периодическое распределение дефектов в кристаллической структуре [2], так и периодическое распределение кристаллических включений в аморфном материале [3]. Фотонные кристаллы в [2,3] были получены при облучении световыми моно импульсами нано- и пикосекундной длительности. В этом случае приходилось решать сложную задачу создания высококонтрастной интерференционной картины при длине когерентности не превышающей нескольких миллиметров. Эта задача существенно упрощается при облучении через фазовую маску, позволяющую получать высокую контрастность на повторяющихся импульсах [4].

Кардинальные преимущества обеспечиваются при использовании ИЛО для создания фотонных кристаллов в гетероструктурах, содержащих квантовые ямы и квантовые точки. Благодаря эффекту “интермиксинга” в квантоворазмерных слоях, вместо периодического распределения дефектов [2], удалось получить классические фотонные кристаллы с периодическим изменением показателя преломления [5]. Таким образом, с помощью ИЛО можно осуществить монолитную интеграцию фотонных кристаллов с оптоэлектронными элементами на основе наногетероструктур, улучшить тем самым параметры гетеролазеров, светодиодов и фотоприемников, а также создать принципиально новые приборы.

В докладе будут рассмотрены новые конструкции гетеролазеров с фотонными кристаллами, сформированными интерференционным лазерным отжигом.

## Литература

- [1] В.Н. Абакумов, Ю.В. Ковальчук, Е.Л. Портной, Препринт ФТИ № 925, РТП ЛИЯФ, Ленинград, 1985.
- [2] Ж.И. Алферов, К.Г. Каландаришвили, Ю.В. Ковальчук и др., Письма в ЖТФ, 8, 769 (1982).
- [3] Е.Л. Портной, Ю.В. Ковальчук, Г.В. Островская и др., Письма в ЖТФ 8, 462 (1982)
- [4] E.L. Portnoi, Czech. J. Phys. B 34, 469 (1984).
- [5] B.S. Ooi, E.L. Portnoi, C.J. McLean et al., 8th Int. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials, IPRM '96, 21-25 April 1996, 252.

# ЛАЗЕРНЫЕ ДИОДЫ С НЕСКОЛЬКИМИ ИЗЛУЧАЮЩИМИ ОБЛАСТЯМИ И ИМПУЛЬСНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНО-ИНТЕГРИРОВАННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

М.В. Зверков, В.В. Кричевский, **В.П. Коняев**, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк,

В.А. Симаков, С.М. Сапожников

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

тел.: 8-495-333-02-24, факс: 8-495-333-00-03, эл.почта: [vrkonyaev@mail.ru](mailto:vrkonyaev@mail.ru)

Одним из перспективных способов увеличения выходной мощности лазерных диодов (ЛД) является использование многослойных эпитаксиально-интегрированных лазерных структур InGaAs-GaAlAs, выращенных в едином эпитаксиальном процессе и содержащих несколько активных (излучающих) областей. Принцип работы приборов данного типа ранее обсуждался нами в [1 - 2].

Накачка исследуемых образцов проводилась импульсами тока длительностью 100 нс с частотой повторения  $F = 1 - 50$  кГц. Сравнительные исследования показали, что тепловые и частотные характеристики излучения интегрированных ЛД с длинами волн излучения  $\lambda = 900$  нм и  $\lambda = 1060$  нм не зависят от состава активного слоя. Установлено, что интеграция в одном кристалле 3-х активных областей позволяет обеспечить работу ЛД на частотах до 50 кГц. При амплитуде импульса тока накачки  $I = 30 - 35$  А и  $F = 20$  кГц мощность импульса излучения была 60 - 65 Вт в ЛД с тремя активными областями и длиной волны излучения 900 нм и 40-45 Вт в ЛД с двумя активными областями и длиной волны излучения 1060 нм

Одним из способов дальнейшего повышения мощности источников лазерного излучения является сборка ЛД в виде линеек или решеток. Нами были исследованы излучательные характеристики решеток лазерных диодов (РЛД) на основе ЛД с тремя активными областями и длинами волн излучения  $\sim 900$  нм. Ширина области накачки (ширина мезаполоскового р-контакта) ЛД была 200 мкм, шаг РЛД по горизонтали (ширина ЛД) составлял 400 мкм. Во всех исследованных РЛД количество элементов по горизонтали равнялось  $N=3$ . Расстояние между излучающими областями по вертикали было 90 - 110 мкм и определялось толщиной подложки, на которой была сформирована лазерная гетероструктура. Количество элементов по вертикали изменялось от  $M=2$  до  $M=9$ . Накачка РЛД производилась импульсами тока длительностью 100 нс и с частотой повторения  $F = 1 - 20$  кГц. Показано, что увеличение количества элементов по вертикали приводит к уменьшению диапазона  $F$  из-за нагрева РЛД протекающим током.

Мощность излучения РЛД с  $NM=6$  (размер излучающей поверхности  $S = 1 \times 0.1$  мм<sup>2</sup>) при амплитуде импульса тока накачки  $I \sim 70$  А и частотах повторения импульсов  $F=1 - 20$  кГц была 280 - 300 Вт. Увеличение количества элементов РЛД до  $NM=27$  ( $S=1 \times 1$  мм<sup>2</sup>) позволило реализовать мощность излучения 1100 Вт при токе накачки 75 А и частотах повторения импульсов  $F = 1 - 5$  кГц. При увеличении  $F$  до 20 кГц мощность излучения РЛД снижалась до 730 Вт.

Таким образом, показано, что использование ЛД с несколькими активными областями на основе эпитаксиально-интегрированных гетероструктур позволяет создавать излучатели импульсного режима работы с малым размером тела свечения и повышенной средней мощностью импульса излучения.

## Литература

- [1] М.В. Зверков и др., Квантовая электроника, 38, 989, (2008).
- [2] Е.И. Давыдова и др., Квантовая электроника, 39, 723, (2009).

# ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ НА ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ С НЕСКОЛЬКИМИ ИЗЛУЧАЮЩИМИ ОБЛАСТЯМИ (In,Al)GaAs/AlGaAs

М.А. Ладугин, М.В. Зверков, В.П. Коняев, В.В. Кричевский, А.А. Мармалюк,  
В.А. Симаков, А.В. Соловьева, И.В. Яроцкая

ФГУП НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха, 117342, г. Москва, ул. Введенского, 3  
тел: (495) 333-3325, факс: (495) 334-4393, эл. почта: m.ladugin@splus.ru

В настоящей работе исследовано влияние режима токовой накачки на излучательные характеристики лазерных диодов (ЛД) на основе эпитаксиально-интегрированных гетероструктур (In,Al)GaAs/AlGaAs с двумя излучающими областями спектрального диапазона 1040 – 1060 нм.

Ввиду особенности конструкции интегрированных лазеров активные области (АО) находятся на разном расстоянии от теплоотводящей подложки. Это может приводить к разнице температур между активными слоями вследствие нагрева образца протекающим электрическим током.

В импульсном режиме накачки (длительность  $\tau$  и частота повторения  $F$  импульсов тока соответственно  $\tau = 100$  нс,  $F = 1 - 20$  кГц) спектр излучения ЛД содержал один максимум, что свидетельствовало об отсутствии перегрева обеих АО. Наклон ватт-амперной характеристики (ВтАХ) двойного ЛД составлял 1.67 Вт/А.

При накачке ЛД длинными импульсами тока с фиксированной амплитудой 2.5 – 2.6 А и частотой повторения 1.5 кГц (квазинепрерывный режим) в спектре излучения возникало два ярко выраженных максимума, спектральное расстояние между которыми  $\Delta\lambda$  монотонно увеличивалось с 1 нм до 5,5 нм при увеличении  $\tau$  от 100 мкс до 600 мкс.

Для определения величины перегрева  $\Delta T$  были использованы экспериментально полученные значения  $\partial\lambda/\partial T$ , составившие  $\sim 0,33 - 0,34$  нм/К. Оценки показали, что при  $\tau = 600$  мкс температура наиболее удаленной от теплоотвода АО достигала  $\sim 60$  °С. А температура АО, расположенной вблизи теплоотводящей подложки, составляла  $\sim 40$  °С.

При работе двойного интегрированного ЛД в непрерывном режиме линейность ВтАХ сохранялась до уровня  $\sim 4$  Вт. При этом наклон ВтАХ составлял 1.64 Вт/А. Однако при дальнейшем увеличении тока накачки наблюдался значительный перегрев АО интегрированного ЛД, достигавший 100 – 120 °С. Это приводило к появлению нелинейности ВтАХ, что ограничивало уровень максимально достижимой мощности излучения.

Таким образом, наряду с очевидным преимуществом эпитаксиально-интегрированных ЛД – увеличением выходной оптической мощности [1, 2] – они обладают и существенным ограничением, заключающимся в увеличении количества выделяемого тепла. Выявленные в настоящей работе особенности функционирования интегрированных ЛД в зависимости от режимов токовой накачки необходимо учитывать при выборе областей их применения.

## Литература

- [1] М.В. Зверков, В.П. Коняев, В.В. Кричевский и др., Квантовая электроника 38, 989 (2008).
- [2] Е.И. Давыдова, В.П. Коняев, М.А. Ладугин и др., Квантовая электроника 40, 697 (2010).

# ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПРИЕМНИКИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ IV-VI

Д.Р. Хохлов

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Ленинские горы 1, стр.2

тел: (495) 939-1151, факс: (495) 932-8876, эл. почта: [khokhlov@mig.phys.msu.ru](mailto:khokhlov@mig.phys.msu.ru)

Уникальные свойства узкозонных полупроводниковых материалов класса IV-VI, легированных элементами третьей группы – индием и галлием, предоставляют весьма перспективную альтернативную возможность для создания высокочувствительных фотоприемных систем терагерцового диапазона.

Основные преимущества предлагаемых материалов и подхода к созданию высокочувствительных матричных фотоприемных систем терагерцового спектрального диапазона сводятся к следующему [1,2].

- Широкая спектральная область фотоотклика, как минимум, от 1 до 500 мкм
- Внутреннее интегрирование падающего светового потока,
- Возможность эффективного быстрого гашения накопленного сигнала
- СВЧ-стимуляция квантовой эффективности до  $10^2$
- Возможность реализации «непрерывной» фокальной матрицы
- Возможность реализации простого способа считывания
- Высокая радиационная стойкость

Сравнение параметров “state of the art” фотоприемников на основе Si(Sb) и Ge(Ga) с фотоприемниками  $Pb_{0.75}Sn_{0.25}Te(In)$ , проведенное в работах [3,4] с использованием одной и той же криогеники и считывающей электроники, показало, что токовая чувствительность фотоприемников на основе  $Pb_{0.75}Sn_{0.25}Te(In)$  на 3-7 порядков величины выше в зависимости от режима измерения и длины волны. Помимо этого, прямым экспериментом была продемонстрирована высокая фоточувствительность приемников  $Pb_{0.75}Sn_{0.25}Te(In)$  на длинах волн 90, 116, 176 и 241 микрон. Результаты этого и ряда других [5,6] экспериментов дают основание полагать, что спектр чувствительности фотоприемников на основе  $Pb_{0.75}Sn_{0.25}Te(In)$  простирается на весь терагерцовый диапазон.

Спектр и величина токовой чувствительности являются важнейшими характеристиками приемников излучения, использующихся в составе спектроскопических систем. Из вышеприведенных данных очевидно, что фотоприемники на основе  $Pb_{0.75}Sn_{0.25}Te(In)$  обладают явными преимуществами по сравнению с традиционно использующимися. Этот факт в совокупности с относительной дешевизной производства таких приемников излучения позволяет с оптимизмом отнестись к перспективам использования данного класса фотоприемных систем в самых различных областях.

## Литература

- [1] Б.А. Волков, Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов, УФН 172, 875 (2002).
- [2] Д.Р. Хохлов, А.В. Галеева, Д.Е. Долженко, Л.И. Рябова, Оптика и Спектроскопия 107, 546 (2009).
- [3] D.R. Khokhlov, I.I. Ivanchik, S.N. Raines et al., Appl. Phys. Lett. 76, 2835 (2000).
- [4] К.Г. Кристовский, А.Е. Кожанов, Д.Е. Долженко и др., ФТТ 46, 123 (2004).
- [5] D. Khokhlov, L. Ryabova, A. Nicorich, et al, Appl. Phys. Lett. 93, 264103 (2008)
- [6] А.В. Галеева, Л.И. Рябова, А.В. Никорич и др., Письма в ЖЭТФ 91, 37 (2010).

# ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛАХ GaSe И GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>

С.Ю. Саркисов<sup>1,3</sup>, М.М. Назаров<sup>2</sup>, О.П. Толбанов<sup>1,3</sup>, А.П. Шкуринов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОСП «Сибирский физико-технический институт им. акад. В. Д. Кузнецова Томского государственного университета», Томск, 634034, ул. Ф. Лыткина, 28

<sup>2</sup> Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119992 ГСП-2, Ленинские горы

<sup>3</sup> ТГУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

тел./факс: (3822) 41-36-36, эл. почта: sarkisov@elefot.tsu.ru

Кристаллы GaSe применяются в нелинейной оптике ИК- и терагерцового диапазонов. Вместе с тем, GaSe обладает высокими концентрациями собственных дефектов, а также устойчивой высокой концентрацией свободных дырок [1]. Вследствие слоистой структуры данные кристаллы сложно поддаются механической обработке, что, в частности, не позволяет вырезать их под необходимые углы синхронизма. К настоящему времени установлено, что легирование кристаллов GaSe серой приводит к существенному повышению твердости и ухудшению спайности этих кристаллов. При этом существует непрерывный ряд твердых растворов GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>, которые возможно выращивать при сохранении уровня оптического поглощения нелегированного GaSe. В этой связи исследование нелинейных свойств кристаллов GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> в терагерцовом диапазоне спектра представляет интерес.

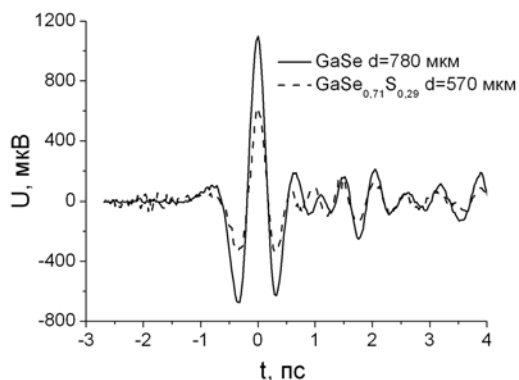


Рис. 1. Временные формы терагерцовых импульсов, генерированных в кристаллах GaSe и GaSe<sub>0,71</sub>S<sub>0,29</sub>.

кристаллах GaSe<sub>0,71</sub>S<sub>0,29</sub> на 15-20 % ниже по сравнению с GaSe. Тем не менее, с учетом пригодности данного материала для механической резки, невысокого оптического поглощения и низкой дисперсии в терагерцовой области, данные кристаллы перспективны для практических применений.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" г/к № 02.740.11.0444 и Гранта Президента РФ НШ-4297.2010.2, а также грантов РФФИ № 09-02-99036-р\_офи и №10-02-00864\_а.

## Литература

[1] В.Н. Брудный, А.В. Кособуцкий, С.Ю. Саркисов, ФТП 44, 1194 (2010).

[2] М.М. Nazarov, S.A. Makarova, A.P. Shkurinov, O.G. Okhotnikov, Appl. Phys. Lett. 92, 021114-1 (2008).

# ВТОРИЧНО-ИОННАЯ МАСС СПЕКТРОМЕТРИЯ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР. ВОЗМОЖНОСТИ И ПРИЛОЖЕНИЯ

**Б.Я. Бер**

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН и ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях», Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

тел: (812) 297-7362, факс: (812) 297-1017, эл. почта: [boris.ber@mail.ioffe.ru](mailto:boris.ber@mail.ioffe.ru)

Развитие молекулярно-пучковой и МОС-гидридной эпитаксиальных технологий позволяют формировать микро- и оптоэлектронные приборные структуры с наноразмерными активными областями, резкими гетерограницами и контролируемые профилями распределения легирующих примесей. Разработка новых типов наногетероструктур и технологических подходов к их формированию требует постоянного использования целого комплекса тонких взаимодополняющих методов характеристики.

Вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС) является одним из таких методов. Так наз. динамическая ВИМС характеризуется высокой чувствительностью и может определять содержание атомов в структуре в диапазоне концентраций от  $\sim 10^{22}$  ат/см<sup>3</sup> до  $\sim 10^{16}$  ат/см<sup>3</sup> и менее. Будучи поверхностно-чувствительным методом, динамическая ВИМС в сочетании с послойным ионным травлением позволяет анализировать строение гетероструктуры на глубины вплоть до нескольких микрон, изучать процессы формирования гетерограниц, внедрения легирующих и фоновых примесей, диффузию атомных компонентов в многослойных полиатомных гетероструктурах, изучать строение, причины деградации и отказов приборных структур (реинжиниринг).

В то же время метод динамического ВИМС профилирования имеет и ограничения, связанные в первую очередь с тем, что 1) чувствительность метода зависит от площади анализируемой области и 2) процесс ионного травления структуры инициирует не только послойное удаление ее материала, но и вносит в приповерхностный слой радиационные повреждения и вызывает там атомное перемешивание.

Обсуждаются физические основы динамической ВИМС [1], ее приложения к количественному анализу строения наноразмерных полупроводниковых гетероструктур [2], методические подходы, ограничения метода и пути их преодоления.

## ***Литература***

[1] John C. Vickerman and Ian S. Gilmore (eds), *Surface Analysis – The Principal Techniques*, 2<sup>nd</sup> edition (John Wiley & Sons Ltd 2009), Ch. 5.

[2] Jae Cheol Lee, Jeongyeon Won, Youngsu Chung et al., Investigations of semiconductor devices using SIMS; diffusion, contamination, process control, *Applied Surface Science* 255 (2008) 1395–1399.



## СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОС-ГИДРИДНЫХ $Al_xGa_{1-x}As: Si/GaAs(100)$ ГЕТЕРОСТРУКТУР

П.В. Середин<sup>1</sup>, А.В. Глогов<sup>1</sup>, Э.П. Домашевская<sup>1</sup>, В.Е. Руднева<sup>1</sup>, И.Н. Арсентьев<sup>2</sup>,  
Д.А. Винокуров<sup>2</sup>, А.Л. Станкевич<sup>2</sup>, И.С. Тарасов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет, Воронеж, 394006, Университетская пл.1  
тел: (4732) 208-363, факс: (4732) 208-363, эл. почта: paul@phys.vsu.ru

<sup>2</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел: (812) 292-7134, факс: (812) 292-7134, эл. почта: arsentyev@mail.ioffe.ru

Глубокие уровни в полупроводниках, такие как DX-центры, в наши дни вызывают большой интерес у исследователей, так как они приводят к устойчивой фотопроводимости или захвату горячих электронов. Микроскопические конфигурации релаксированного состояния и вопрос релаксации параметра решетки в системах с DX-центрами все еще является спорным, тем более при разном уровне легирования исходного эпитаксиального материала, и в тоже время, как нам кажется, он остается ключевым в понимании природы и свойств материалов с DX-центрами поскольку релаксация решетки в несколько раз медленнее релаксации электронной плотности.

Тестируемые в работе образцы, представляющие собой гомоэпитаксиальные структуры  $GaAs:Si/GaAs(100)$  и гетероструктуры  $Al_xGa_{1-x}As:Si/GaAs(100)$ , выращивались для создания туннельного перехода на установке МОС-гидридной эпитаксии «EMCORE GS 3/100» в вертикальном реакторе с высокой скоростью вращения подложкодержателя. Температура подложкодержателя варьировалась в пределах 650 - 750 °С давление в реакторе 77Торр, скорость вращения подложкодержателя 1000 об/мин. В качестве исходных реагентов использовались триметил галлия  $Ga(CH_3)_3$ , триметил алюминия  $Al(CH_3)_3$  и арсин  $AsH_3$ . Источником легирующего элемента кремния служил дисилан  $Si_2H_6$ .

Детальный анализ экспериментальных и расчетных результатов, полученных методами рентгеновской дифракции, ИК-спектроскопии на отражение, элементного анализа, Холловских измерений позволил сделать заключения об изменении стехиометрии твердых растворов  $Al_xGa_{1-x}As:Si$ , которое может происходить в случае образования DX – центров в твердом растворе  $Al_xGa_{1-x}As:Si$ , сопровождающимся разрывом связи донор-кристалл и смещением атома донора, изменением длин связей в кристаллической решетке, уменьшением ее параметра.

Зафиксированные в проведенных нами экспериментах вышеперечисленные изменения микроструктуры, происходящие в высоколегированных твердых растворах  $Al_xGa_{1-x}As$ , не только ведут к перестройке электронной плотности и образованию глубоких уровней с последующей релаксацией кристаллической решетки твердого раствора, но и как главное следствие указывают на образование четверного раствора замещения типа  $Al_xGa_{1-x-y}Si_{y+z}As_{1-z}$ , выращенного на подложке  $GaAs(100)$ .

Учитывая, что в среднем в  $1\text{ см}^3$  алмазоподобного полупроводника  $A_3B_3$  содержится  $10^{22}$  атомов, то легирование до уровня долей ат.% должно привести к тому, что концентрация свободных носителей должна быть на уровне  $\sim 10^{19}\text{ см}^{-3}$ . Из-за образования глубоких уровней количество носителей падает на два порядка от предполагаемой при легировании величины. Таким образом, лишь один электрон из ста не связан с DX-центрами или амфотерным поведением Si. Поэтому вопрос об активации связанных носителей остается открытым и авторы работы предполагают продолжение исследований.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР ЛОКАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ

**М.В. Заморянская**, А.Л. Бакалейников, Я.В. Кузнецова, Т.Б. Попова, А.Н. Трофимов,  
А.А. Шахмин, Е.Ю. Флегантова.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел: (812) 292-7382, факс: (812) 297-1017, эл. почта: zam@mail.ioffe.ru

Разработка новых многослойных гетероструктур с наноразмерными элементами для создания диодов, лазеров, транзисторов и других приборов микроэлектроники требует развития новых методов их исследования. Особое значение имеют неразрушающие методы, позволяющие получать информацию не только о структуре, но и характеризовать готовые элементы микроэлектроники. Одним из таких методов является локальная катодолюминесценция и рентгеноспектральный микроанализ. Эти методы давно используются в растровой электронной микроскопии для получения информации о распределении примесей и дефектов по поверхности образца в латеральном направлении (локальная катодолюминесценция) и определение состава в микрообъемах (рентгеноспектральный микроанализ). В связи с тем, что область генерации обоих методов зависит от энергии электронного пучка, этот метод исследования дает возможность изучать изменение люминесцентных свойств по глубине образца. На основе метода вариации энергии первичного электронного пучка была разработана методика анализа состава тонких слоев на поверхности образца и анализ состава наноразмерных слоев, залегающих на некоторой глубине от поверхности структуры.

Применение метода локальной катодолюминесценции при исследовании многослойных гетероструктур также позволяет исследовать спектры излучения структуры с различной глубины. Если диффузионная длина носителей заряда меньше, чем толщина слоя, то исследование спектров катодолюминесценции полученные при различной энергии первичного электронного пучка позволяет не только получать информацию о слоях, находящихся на некоторой глубине от поверхности образца, но и оценивать толщину слоев и глубину их залегания в гетероструктурах. Для этого необходимо оценить глубину области торможения электронов в данном материале для различных энергий первичного пучка. Если толщина слоев сравнима или меньше диффузионной длины носителей заряда, то необходимо учитывать вероятность диффузии электронно-дырочных пар из слоя, в котором они образовались, в другой слой. Этот механизм играет заметную роль при наличии в структурах квантовых ям или слоев с квантовыми точками.

Оба эти метода использовались при исследовании структур на основе АІВVI и АІІВV.

# ЛАЗЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУР С ZnCdSe КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ И ЯМАМИ В ВАРИЗОННОМ ВОЛНОВОДЕ

Е.В. Луценко<sup>1</sup>, А.Г. Вайнилович<sup>1</sup>, Н.П. Тарасюк<sup>1</sup>, Г.П. Яблонский<sup>1</sup>, С.В. Сорокин<sup>2</sup>,  
И.В. Седова<sup>2</sup>, С.В. Гронин<sup>2</sup>, С.В. Иванов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Беларусь, Минск, 220072, пр. Независимости 68

<sup>2</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел: +375 17 2840419, факс: +375 17 2840879, эл. почта: e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by

Повышение внутренней квантовой эффективности и характеристического оптического усиления гетероструктур с множественными квантоворазмерными вставками ZnCdSe позволило получить около 60 мВт лазерного излучения в зеленой области спектра, с квантовой эффективностью конверсии около 8%, при накачке излучением импульсного InGaN лазерного диода [1,2]. Данное направление исследований перспективно для создания компактных источников лазерного излучения для широкого спектра приложений. Дальнейшее понижение порога и повышение эффективности генерации оптически накачиваемых лазеров на основе ZnCdSe гетероструктур, особенно при низких уровнях накачки, связывается нами с привлечением дрейфового механизма движения неравновесных носителей заряда в активную область.

Исследованы фотолюминесцентные и генерационные свойства гетероструктур, выращенных молекулярно-пучковой эпитаксией, с активной областью из пяти, одной квантовых ям и одной вставки квантовых точек ZnCdSe, в симметричном варизонном волноводе из ZnSe/ZnMgSSe сверхрешетки с переменным шагом. Необходимо отметить, что варизонный волновод не оптимизировался по фактору оптического усиления.

Показано, что при низких уровнях возбуждения непрерывным излучением HeCd лазера ( $\lambda=315$  нм), эффективность фотолюминесценции гетероструктур с варизонным волноводом превышает эффективность гетероструктур с оптимизированным несимметричным волноводом. Причем, интенсивность излучения из варизонной волноводной сверхрешетки меньше. Увеличение интенсивности возбуждения до  $4$  кВт/см<sup>2</sup> (N<sub>2</sub> лазер,  $\lambda=337.5$  нм  $\tau=8$  нс,  $\nu=1000$  Гц) приводит к обратной ситуации, что по-видимому обусловлено меньшей подвижностью носителей заряда в варизонной сверхрешетке.

Из измерений зависимости порога и дифференциальной внешней квантовой эффективности генерации от длины резонатора установлено, что применение варизонного волновода позволяет для гетероструктуры с одной ZnCdSe квантовой ямой существенно до 60% поднять внутреннюю квантовую эффективность, а для гетероструктур с 5 квантовыми ямами ZnCdSe увеличить ее с 65% [3] до 70%. Для гетероструктуры с одной квантовой ямой ZnCdSe наблюдалось значительное до  $0.6$  кВт/см<sup>2</sup> понижение порога прозрачности, что позволяет существенно понизить порог генерации при применении резонатора с высокой добротностью.

Таким образом, показано, что применение варизонного волновода позволяет улучшить внутренние лазерные характеристики гетероструктур с активной областью на основе квантоворазмерных вставок ZnCdSe. Дальнейшая оптимизация транспортных и оптических свойств варизонного волновода позволит создать лазерный конвертор, работающий в непрерывном режиме.

## Литература

- [1] E.V. Lutsenko et al, Phys. Stat. Sol. B. 247, 1557 (2010).
- [2] G.P. Yablonskii et al, Journal of Non-Crystalline Solids. 356, 1928 (2010).
- [3] A.G. Vainilovich et al, Phys. Stat. Sol. C. 7, 1691 (2010).

# МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВАЯ ЭПИТАКСИЯ ЛАЗЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ AlGaN ДЛЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

В.Н. Жмерик<sup>1</sup>, А.М. Мизеров<sup>1</sup>, А.А. Ситникова<sup>1</sup>, М.А. Яговкина<sup>1</sup>, П.С. Копьев<sup>1</sup>,  
Е.В. Луценко<sup>2</sup>, Н.П. Тарасюк<sup>2</sup>, Н.В. Ржеуцкий<sup>2</sup>, А.В. Данильчик<sup>2</sup>,  
Г.П. Яблонский<sup>2</sup>, С.В. Иванов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

<sup>2</sup> Институт общей физики им.Б.Я.Степанова, Минск, 220072, пр.Независимости, 68  
тел: (812) 292-7124, факс: (812) 297-3620, эл. почта: jmerik@pls.ioffe.ru

В последние годы на основе AlGaN гетероструктур (ГС) интенсивно разрабатываются источники стимулированного ультрафиолетового (УФ) излучения, которые необходимы для решения широкого круга задач в медицине, биологии, материаловедении и др. Недавно продемонстрированы лазерные диоды с минимальной длиной волны 336 nm, а возбуждение УФ стимулированного излучения с меньшей длиной волны в ГС на основе  $Al_xGa_{1-x}N$  (вплоть до 214 nm при  $x=1$ ) возможно лишь с помощью оптической накачки [1,2]. В докладе сообщается о разработке технологии молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией (МПЭ ПА) для роста ГС  $Al_xGa_{1-x}N$  с высоким содержанием Al ( $x>0.3$ ) для источников стимулированного УФ-излучения.

В первую очередь описываются способы снижения плотности прорастающих дислокаций в ГС AlGaN на подложках  $c-Al_2O_3$  до уровня  $10^9-10^{10}cm^{-2}$  за счет роста буферных слоев при различных стехиометрических условиях, введения в структуру сверхрешеток и в результате самоорганизации локальных дефектных областей. Демонстрируется, что рост ГС AlGaN в металлообогащенных условиях обеспечивает не только атомарно-гладкую поверхность слоев при относительно низких температурах

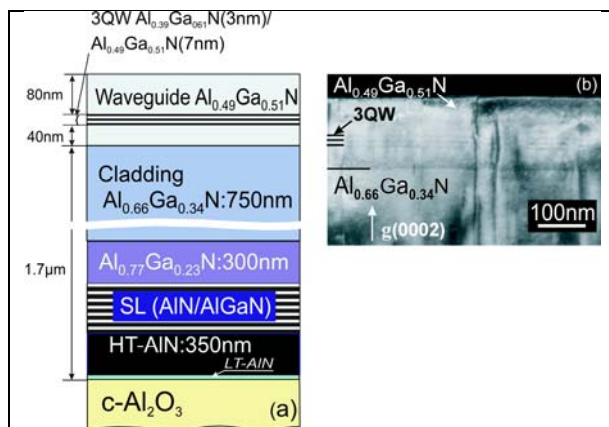


Рис.1. Схема структуры с тремя КЯ в волноводе, использовавшейся для оптического возбуждения лазерного излучения (а) и ПЭМ-изображение ее верхней (активной) части (b).

роста ( $700-800^{\circ}C$ ), но и позволяет точно контролировать в них содержание Al. Особое внимание уделяется методу формирования активной области структур в виде трех квантовых ям (КЯ) с помощью т.н. дискретной субмонослойной эпитаксии [3]. В этом методе каждая КЯ толщиной 3 nm представляет собой сверхрешетку, состоящей из AlGaN слоя с шестью вставками GaN с номинальной толщиной менее 1 монослоя (0.16nm). В результате оптимизации дизайна структур и параметров их роста было получено стимулированное излучение с длиной волны 303 nm при относительно небольшой пороговой оптической мощности с плотностью  $\sim 0.8MBWt\cdot cm^{-2}$ .

Таким образом, в работе демонстрируется перспективность применения МПЭ ПА широкозонных соединений AlGaN для развития полупроводниковых лазеров, работающих в УФ спектральной области.

## Литература

- [1] H. Yoshida et al., Appl. Phys. Lett. 93, 241106 (2008).
- [2] M. Shatalov et al., Jpn. J. Appl. Phys. 45, L1286 (2006).
- [3] V.N. Jmerik et al., Appl.Phys.Lett. 96, 141112 (2010).

# КАТАСТРОФИЧЕСКАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ОПТИЧЕСКИ НАКАЧИВАЕМЫХ ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ ВЫРАЩЕННЫХ НА КРЕМНИИ ГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ InGaN/GaN

Г.П. Яблонский, В.З. Зубелевич, Е.В. Луценко

ИФ НАН Беларуси, Минск, 220072, пр. Независимости, 68,

тел: (37517) 284-0428, факс: (37517) 284-0879, эл. почта: g.yablonskii@ifanbel.bas-net.by

Ранее [1] было показано, что при превышении выходной импульсной (8 нс) мощности генерации некоторого критического значения (15-25 Вт) в оптически накачиваемых лазерах на основе выращенных на кремнии гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/GaN, происходит катастрофическая деградация (рис. 1, кривая *A*), скорее всего, под действием собственного лазерного излучения. Возбуждающее излучение не приводит к деградации, если генерация не возникает (фокусировка «в точку», рис. 1, кривая *B*) или если мощность собственного лазерного излучения не достигает критического значения (лазер с более низкой дифференциальной эффективностью генерации, рис. 1, кривая *B*). Деградация лазеров сопровождается образованием в их активных областях дефектных участков с низкой эффективностью люминесценции, наблюдающихся в форме темных пятен. Спектры и эффективность ФЛ, измеряемые в допорогового режиме ( $I_{\text{возб}} < I_{\text{пор}}$ ), остаются постоянными до начала деградации, затем спектры смещаются в коротковолновую сторону, а интенсивность резко падает (рис. 2). Скорее всего, это связано с тем, что сильнее разрушаются более узкозонные участки активной области с повышенной концентрацией индия, поглощающие собственное лазерное излучение.

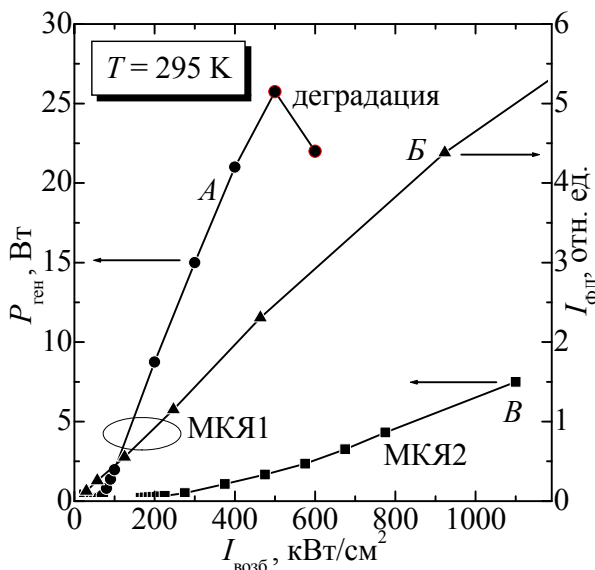


Рис. 1. – Мощность генерации (*A*, *B*) и интегральная интенсивность ФЛ (*B*) в зависимости от уровня возбуждения

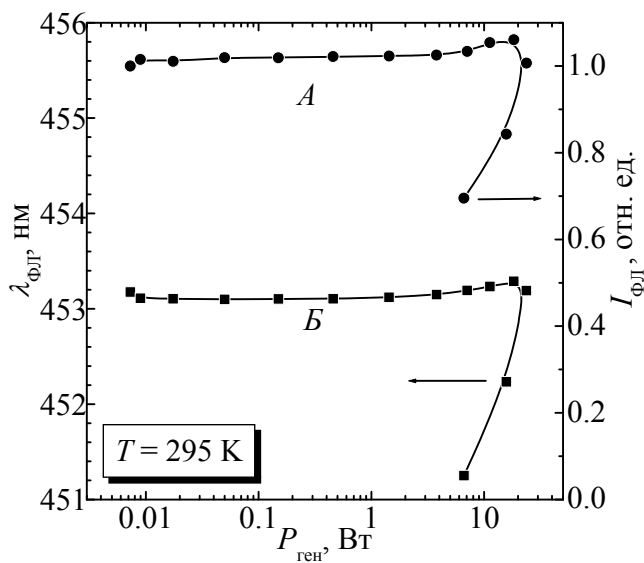


Рис. 2. – Измеренные при  $I_{\text{возб}} < I_{\text{пор}}$  интегральная интенсивность (*A*) и положение спектра ФЛ (*B*) активной области лазера в зависимости от его выходной мощности

Показано, таким образом, что деградация InGaN/GaN-лазеров с оптической накачкой происходит под воздействием собственного излучения высокой плотности мощности.

## Литература

[1] В.З. Зубелевич, Изв. НАНБ. Сер. физ.-мат. наук №5, 75 (2006).

# ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО И ОПТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ В ГЕТЕРОЛАЗЕРАХ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ III ГРУППЫ

С.Ю. Карпов, К.А. Булашевич, М.С. Рамм

Группа СТР – ООО «Софт-Импакт», а/я 83, пр. Энгельса 27, 194156 Санкт-Петербург  
тел: (812) 554-4570, факс: (812) 326-6194, эл. почта: sergey.karpov@str-soft.com

Лазерные гетероструктуры на основе нитридов III группы считаются наиболее перспективными для создания источников когерентного излучения в сине-зелёном, фиолетовом и ультрафиолетовом диапазонах спектра. Такие структуры обладают рядом особенностей, существенно влияющих на приборные характеристики: технологическими трудностями получения толстых эмиттерных и *p*-контактных слоёв и, как следствие, близостью металлического контакта к волноводным слоям структуры, необходимостью использования тонких InGaN квантовых ям в качестве активной области лазерных диодов, низким контрастом показателя преломления и двулучепреломлением в нитридных полупроводниках, наличием спонтанной электрической поляризации и сильного пьезоэффекта, индуцирующих гигантские поляризационные заряды на интерфейсах гетероструктуры, сильной зависимостью внутреннего квантового выхода излучения от тока накачки и др. Следствием этих особенностей являются специфические проблемы работы нитридных гетероструктур, рассмотренные на примере ультрафиолетовых лазерных диодов из работы [1].

Одной из таких проблем является подавление утечки электронов в *p*-область лазерного диода, связанной с высокими пороговыми токами нитридных лазеров и наличием поляризационных зарядов на интерфейсах гетероструктуры. В докладе рассматриваются пути подавления утечки, используемые на практике, и обсуждаются потенциальные возможности распределённого поляризационного легирования в слоях многокомпонентных нитридных соединений переменного состава для решения этой задачи.

Другая общая проблема – создание эффективного оптического ограничения в нитридных лазерных структурах. Из-за низкого контраста показателя преломления в нитридных лазерах часто возбуждается большое число поперечных мод, утекающих из волновода в контактные слои и подложку. Кроме вносимых, тем самым, оптических потерь и искажения дальнего поля излучения лазера, это приводит к переключению поперечных мод либо при изменении тока накачки, либо при незначительном варьировании элементов конструкции гетероструктуры. Такой эффект переключения мод оказывает существенное влияние на фактор оптического ограничения и, в конечном счёте, на пороговую плотность тока лазера [2].

Пороговый ток нитридных лазеров во многом определяется и квантовым выходом излучательной рекомбинации, зависящим, в том числе, от плотности дислокаций, проникающих через активную область. Установленная экспериментально сильная зависимость квантового выхода от плотности тока, протекающего через диод, всё ещё не нашла своего однозначного объяснения. В докладе обсуждается влияние локализованных состояний носителей, связанных с флуктуациями состава/толщины InGaN квантовых ям, служащих активной областью нитридных лазеров, а также Оже рекомбинации на квантовый выход излучения. Рассмотрены различные пути повышения квантового выхода в нитридных гетероструктурах.

## *Литература*

- [1] M. Kneissl, D.W. Treat, M. Teep et al., Appl. Phys. Lett. 82, 2386 (2003).
- [2] K.A. Bulashevich, M.S. Ramm, and S.Yu. Karpov, Phys. Status Solidi (c) 6, 603 (2009).

# GaN, ЛЕГИРОВАННЫЙ РЗИ (Tm, Eu, Er, Sm, Yb) ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИЗЛУЧАЮЩИХ СТРУКТУР ДЛЯ ВИДИМОЙ И ИК- ОБЛАСТЕЙ СПЕКТРА

М.М. Мездрогина<sup>1</sup>, Ю.В. Жилиев<sup>1</sup>, С.Н. Родин<sup>1</sup>, Ю.В. Кожанова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

<sup>2</sup> СПбГПУ, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 29

тел. 297-92-41 эл. почта *Margaret.M@mail.ioffe.ru*

Исследования широкозонных кристаллов нитрида галлия (GaN), легированных редкоземельными ионами (РЗИ), привлекают внимание по следующим причинам: 1 - возможность создания светоизлучающих приборов для различных областей спектра, принципиально новых устройств обработки информации; 2 - использование РЗИ в качестве прецизионного “пробного тела” при исследовании пространственного распределения заряда в полупроводниковой матрице; 3 - использование редкоземельных элементов для геттерирования дефектов в полупроводниковой матрице; 4 - наличие широкозонной полупроводниковой матрицы GaN дает возможность р - i - n структурам с РЗИ работать при температурах равных или выше комнатной. Наиболее интенсивные работы ведутся по легированию Eu и Er кристаллов GaN вследствие того, что длина волны излучения внутрицентрового 4f перехода у Eu  $\lambda=0,622\text{мкм}$ , а у Er  $\lambda= 1,54\text{мкм}$ . Лазерный эффект наблюдался в GaN< Eu>.

Обнаружена сенсбилизация излучения внутрицентровых 4f переходов во вюрцитных кристаллах GaN, легированных Eu и дополнительно введенной мелкой примесью-Zn, наличие процесса пространственного упорядочения дефектов в кристаллах GaN, легированных Eu, Sm, Er, Tm.

Исследовано влияние ряда РЗИ: Eu, Er, Sm на вид спектров фотолюминесценции(ФЛ) структур с множественными квантовыми ямами(MQW) на основе GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (0.1<x<0.4), Результаты измерений электролюминесценции структур коррелируют с полученными ранее данными по ФЛ и Мессбауэровской спектроскопии. В структурах с MQW на основе InGaN/GaN(при большой концентрации дефектов), легированных Eu, с помощью Мессбауэровской спектроскопии, была обнаружена реализация различных зарядовых состояний примесного иона- Eu<sup>2+</sup> и Eu<sup>3+</sup>. При низкой концентрации примесно-дефектных комплексов в исходных структурах реализуется только одно зарядовое состояние Eu<sup>3+</sup>, что коррелирует с видом спектра ФЛ, с наличием излучения с  $\lambda= 6320\text{А}$ , т.е. с наличием излучения, характерного для 4f переходов Eu<sup>3+</sup> Показано, что в MQW GaN/InGaN, легированных двумя примесями: Eu и Sm, важную роль в процессах возбуждения внутрицентровых состояний играет примесная «желтая» (500 – 600 nm) полоса GaN. Eu, по всей видимости, является сенсбилизатором для Sm. Исследовано влияние введения Eu, Er, Sm на вид спектра ФЛ сверхструктур: p-GaN<Mg>/n-GaN и p-AlGaIn/n-GaN. Дополнительное введение 3d-металла (Fe<sup>57</sup>) в p-GaN<Mg>/n-GaN<Eu> привело к реализации внутрицентровых переходов Eu<sup>3+</sup>: <sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>1</sub> (6006 Å), <sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>2</sub> (6195 Å), <sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>3</sub> (6627 Å), <sup>5</sup>D<sub>1</sub>→<sup>7</sup>F<sub>4</sub> (6327 Å), вследствие появления новых эффективных каналов передачи возбуждения к внутрицентровым 4f состояниям Eu и влияния Fe на локальное окружение РЗИ. Показано, что GaN, а также структуры на основе 111- нитридов, легированные РЗИ (Eu, Sm, Er, Tm, Yb), а также 3d-металлом- Fe являются перспективным материалом для создания светоизлучающих приборов для видимой, ИК-областей спектра.

# ЛАЗЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУР С ZnCdSe КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ И ЯМАМИ В ВАРИЗОННОМ ВОЛНОВОДЕ

Е.В. Луценко<sup>1</sup>, А.Г. Вайнилович<sup>1</sup>, Н.П. Тарасюк<sup>1</sup>, Г.П. Яблонский<sup>1</sup>, С.В. Сорокин<sup>2</sup>,  
И.В. Седова<sup>2</sup>, С.В. Гронин<sup>2</sup>, С.В. Иванов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Беларусь, Минск, 220072, пр. Независимости 68

<sup>2</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел: +375 17 2840419, факс: +375 17 2840879, эл. почта: e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by

Повышение внутренней квантовой эффективности и характеристического оптического усиления гетероструктур с множественными квантоворазмерными вставками ZnCdSe позволило получить около 60 мВт лазерного излучения в зеленой области спектра, с квантовой эффективностью конверсии около 8%, при накачке излучением импульсного InGaN лазерного диода [1,2]. Данное направление исследований перспективно для создания компактных источников лазерного излучения для широкого спектра приложений. Дальнейшее понижение порога и повышение эффективности генерации оптически накачиваемых лазеров на основе ZnCdSe гетероструктур, особенно при низких уровнях накачки, связывается нами с привлечением дрейфового механизма движения неравновесных носителей заряда в активную область.

Исследованы фотолюминесцентные и генерационные свойства гетероструктур, выращенных молекулярно-пучковой эпитаксией, с активной областью из пяти, одной квантовых ям и одной вставки квантовых точек ZnCdSe, в симметричном варизонном волноводе из ZnSe/ZnMgSSe сверхрешетки с переменным шагом. Необходимо отметить, что варизонный волновод не оптимизировался по фактору оптического усиления.

Показано, что при низких уровнях возбуждения непрерывным излучением HeCd лазера ( $\lambda=315$  нм), эффективность фотолюминесценции гетероструктур с варизонным волноводом превышает эффективность гетероструктур с оптимизированным несимметричным волноводом. Причем, интенсивность излучения из варизонной волноводной сверхрешетки меньше. Увеличение интенсивности возбуждения до 4 кВт/см<sup>2</sup> (N<sub>2</sub> лазер,  $\lambda=337.5$  нм  $\tau=8$  нс,  $\nu=1000$  Гц) приводит к обратной ситуации, что по-видимому обусловлено меньшей подвижностью носителей заряда в варизонной сверхрешетке.

Из измерений зависимости порога и дифференциальной внешней квантовой эффективности генерации от длины резонатора установлено, что применение варизонного волновода позволяет для гетероструктуры с одной ZnCdSe квантовой ямой существенно до 60% поднять внутреннюю квантовую эффективность, а для гетероструктур с 5 квантовыми ямами ZnCdSe увеличить ее с 65% [3] до 70%. Для гетероструктуры с одной квантовой ямой ZnCdSe наблюдалось значительное до 0.6 кВт/см<sup>2</sup> понижение порога прозрачности, что позволяет существенно понизить порог генерации при применении резонатора с высокой добротностью.

Таким образом, показано, что применение варизонного волновода позволяет улучшить внутренние лазерные характеристики гетероструктур с активной областью на основе квантоворазмерных вставок ZnCdSe. Дальнейшая оптимизация транспортных и оптических свойств варизонного волновода позволит создать лазерный конвертор, работающий в непрерывном режиме.

## Литература

- [1] E.V. Lutsenko et al, Phys. Stat. Sol. B. 247, 1557 (2010).
- [2] G.P. Yablonskii et al, Journal of Non-Crystalline Solids. 356, 1928 (2010).
- [3] A.G. Vainilovich et al, Phys. Stat. Sol. C. 7, 1691 (2010).



# МОЩНЫЕ ОДНОМОДОВЫЕ И СВЕРХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩИЕ ЛАЗЕРЫ

Н.А. Малеев<sup>1,2</sup>, С.А. Блохин<sup>2</sup>, Н.Н. Леденцов<sup>1,3</sup>, В.М. Устинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

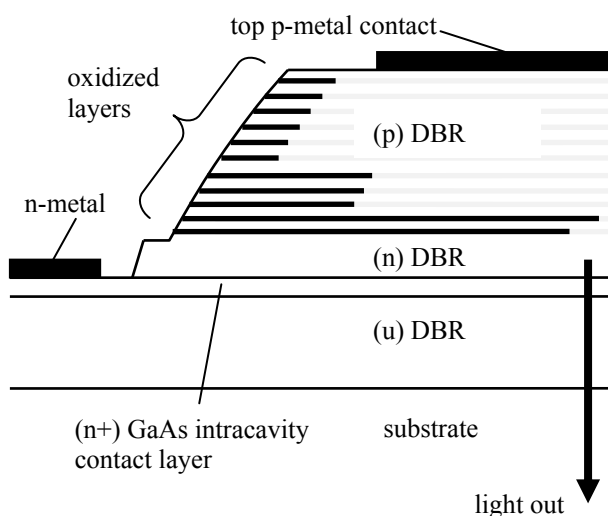
<sup>2</sup> ООО «Коннектор Оптикс», Санкт-Петербург, 194292, ул. Домостроительная, 16 литер Б

<sup>3</sup> VI Systems GmbH, Hardenbergstrasse 7, 10623, Berlin, Germany

тел: (812) 297-3178, факс: (812) 297-3178, эл. почта: maleev@beam.ioffe.ru

Поиск эффективных методов реализации вертикально излучающих лазеров (ВИЛ) с высокой (5-10 мВт) выходной мощностью в пространственно-одномодовом режиме и создание быстродействующих ВИЛ со скоростью передачи более 10 Гбит/с относятся к числу актуальных проблем современной технологии полупроводниковых лазеров. Как было показано ранее, оптимизация конструкции эпитаксиальной гетероструктуры в системе материалов AlInGaAs в сочетании с минимизацией паразитных параметров лазерного кристалла позволяет достичь рекордного (до 40 Гбит/с) быстродействия для многомодовых ВИЛ спектрального диапазона 850 нм с прямой токовой модуляцией [1].

В настоящей работе исследовалась возможность получения одномодовой генерации для ВИЛ спектрального диапазона 960-980 нм в системе материалов AlInGaAs со специальной конструкцией эпитаксиальной структуры, обеспечивающей вывод излучения через подложку и возможность монтажа методом перевернутого кристалла.



В предложенной конструкции прибора использован р-легированный верхний брэгговский отражатель, две селективно-окисленные токовые апертуры и двухсекционный нижний брэгговский отражатель (рис.1). Изготовленные образцы приборов с диаметром мезы 28-32 мкм и селективно-окисленной апертурой 6-10 мкм демонстрируют квази-одномодовую генерацию с фактором подавления боковых мод от 20 до 30 дБ. Максимальная одномодовая мощность в непрерывном режиме при комнатной температуре составляет 15 мВт (при рабочем токе 25 мА и напряжении питания 2.5В), что является наивысшим значением, достигнутом для ВИЛ монолитной конструкции.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что предложенная конструкция обеспечивает сравнительно низкое тепловое сопротивление ВИЛ (около 1300 К/Вт) и является перспективной для создания массивов мощных одномодовых излучателей для высокоскоростных оптических систем передачи данных.

Данная работы была поддержана в различных частях Программой Президиума РАН №27, РФФИ и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» Министерства образования и науки РФ

## Литература

[1] S.A. Blokhin, J.A. Lott, A. Mutig et al., Oxide-confined 850 nm VCSELs operating at bit rates up to 40Gbit/s, Electronic Letters 45, 501 (2009).

## СВЕРХСКОРОСТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩИХ ЛАЗЕРОВ ДИАПАЗОНА 850 НМ

С.А. Блохин<sup>1,2,3</sup>, Л.Я. Карачинский<sup>1,2,3</sup>, А.М. Надточий<sup>1,3</sup>, М.В. Максимов<sup>1,2</sup>, А. Мутиг<sup>4</sup>,  
Г. Фиол<sup>4</sup>, Д. Бимберг<sup>4</sup>, Д.А. Лотт<sup>5</sup>, В.А. Щукин<sup>5</sup>, Н.Н. Леденцов<sup>1,3,5</sup>

<sup>1</sup> СПб АУ НОЦНТ РАН, Санкт-Петербург, 194021, Хлопина 8/3

<sup>2</sup> ООО «Коннектор-Оптикс», Санкт-Петербург, 194021, Шателена 26А

<sup>3</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

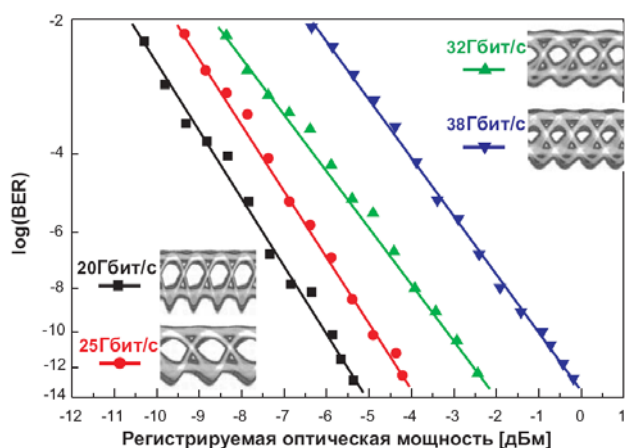
<sup>4</sup> Институт Физики Твердого Тела ТУБ, Берлин, 10623, Харденбергштрассе 36

<sup>5</sup> VI Systems GmbH, Берлин, 10623, Харденбергштрассе 7

тел: (812) 327-5055, факс: (812) 534-5850, эл. почта: blokh@mail.ioffe.ru

Оптическая технология передачи информации прочно заняла ведущие позиции в мире телекоммуникаций, и повсеместно вытесняет медные межсоединения. Все телекоммуникационные системы связи на короткие расстояния (до 300 м) используют вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) диапазона 850 нм, обеспечивающие скорость передачи данных до 10 Гб/с. Однако гигантский рост суммарного трафика (в 10 раз за 5 лет) требует дальнейшего повышения пропускной способности оптических соединений межсоединений, и разработка нового поколения экономичных и эффективных быстродействующих оптических передатчиков становится актуальной задачей.

Прорыв в данном направлении связан с разработкой In(Ga,Al)As квантово-размерной активной области, обеспечивающей высокое дифференциальное усиление, и с комплексной оптимизацией эпитаксиальной структуры и конструкции прибора, направленной на повышение быстродействия ВИЛ-лазера (минимизация паразитной емкости и последовательного сопротивления, уменьшение время жизни фотонов в резонаторе при обеспечении высокой плотности фотонов и т.д.). Анализ амплитудно-частотных характеристики разработанных ВИЛ-лазеров показал, что ширина полосы частот модуляции по уровню -3 дБ достигает 20 ГГц для приборов с диаметром токовой апертуры 5-10 мкм и не лимитирована паразитной частотой отсечки (>22 ГГц).



Характерное время нарастания сигнала ВИЛ-лазера, восстановленное методом деконволюции, не превышает 8-10 пс вплоть до температур порядка 100°C при достаточно низких плотностях тока (~10 кА/см<sup>2</sup>). В результате, в режиме прямой модуляции по NRZ-формату и PRBS (2<sup>7</sup>-1) были получены открытые глазограммы на частотах вплоть до 40 ГГц. Анализ уровня ошибок при оптической передаче данных в режиме прямой модуляции выявил принципиальную возможность реализации безошибочной

(коэффициент ошибок BER < 10<sup>-12</sup>) оптической передачи данных вплоть до скоростей 39 Гбит/с при температуре 25°C и 30 Гбит/с при температуре 85°C. Данные разработки удовлетворяют требованиям новых стандартов 16G FC (17 Гб/с) и Infiniband (26 Гб/с).

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009-2013», РФФИ, гранта Правительства Санкт-Петербурга и Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

## СТЕНДОВАЯ СЕКЦИЯ

### ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАЗЕРНЫХ ДИОДАХ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ InAsSb/InAsSbP С БОЛЬШОЙ ШИРИНОЙ ПОЛОСКОВОГО КОНТАКТА

Л.И. Буров<sup>1</sup>, А.С. Горбацевич<sup>1</sup>, В.В. Шерстнев<sup>2</sup>, Ю.П. Яковлев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет, Беларусь, Минск, 220050,  
пр. Независимости 4.

<sup>2</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел: +375 17 209-5503; +375 29 628-7685; эл. почта: burou@bsu.by

Численное моделирование [1], проведенное для описания формирования излучения в лазерных диодах на основе InAsSb/InAsSbP, показало, что при увеличении ширины полоскового контакта в активном слое формируется своеобразная структура, состоящая из двух или более «жгутов», в которых и происходит собственно формирование излучения генерации. Именно такая пространственная структура распределения энергии генерации в пределах активного слоя и приводит к сложной форме углового распределения выходной интенсивности в дальней зоне, которая наблюдалась экспериментально [2]. Однако расчеты в работе [1] проводились без учета процессов диффузии неравновесных носителей в активном слое и анализа устойчивости образующихся структур к вариации параметров, определяющих волноводные эффекты.

Проведенное в данной работе численное моделирование на основе модели, принятой в работе [1], показало, что процессы диффузии существенно сглаживают «жгую» структуру в пространственном распределении неравновесных носителей. Такой эффект естественно отражается в сглаживании и функции углового распределения выходной интенсивности в дальней зоне, что, в принципе, согласуется с известным методом подавления эффекта филоментации за счет стимулированного растекания неравновесных носителей [3]. Однако, при определенных соотношениях параметров лазерного диода процессы диффузии приводят к разрывам «жгутов» и образованию «островковой» структуры, которая весьма чувствительна к вариациям и флуктуациям параметров лазерного диода.

Методами имитационного моделирования исследовано влияние флуктуаций пространственного распределения неравновесных носителей и вариаций зависимости показателя преломления от концентрации неравновесных носителей. На основе численных расчетов следует, что наличие флуктуаций может являться одним из основных механизмов формирования функции углового распределения выходной интенсивности, позволяющей объяснить экспериментально наблюдаемые эффекты [2,4] зависимости этой функции от ширины полоскового контакта.

#### *Литература*

- [1] Л.И. Буров, А.С. Горбацевич, А.Г. Рябцев и др., ЖПС 75, 804 (2008).
- [2] А.П. Данилова, Т.Н. Данилова, А.Н. Именков и др., ФТП 33, 1014 (1999).
- [3] V. Voigner, J. Houlihan, J.R. O'Callaghan et al., Phys. Rev. 65, 053807 (2002).
- [4] А.П. Астахова, Т.Н. Данилова, А.Н. Именков и др., ФТП 34, 1142 (2000).

# ПОЛУЧЕНИЕ КВАНТОВЫХ КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ НА ДЛИНУ ВОЛНЫ 5 МКМ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИЕЙ

В.В. Мамутин<sup>1</sup>, В.М. Устинов<sup>1</sup>, J. Boettcher<sup>2</sup> and H. Kuenzel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, ул. Политехническая 26

<sup>2</sup> Fraunhofer Institut Nachrichtentechnik, Heinrich Hertz Institut, Berlin, Einsteinufer 37, Germany  
тел: (812) 297-31-78, факс: (812) 297-31-78, эл. почта: mamutin@mail.ru

В работе сообщается о получении квантового каскадного лазера на длину волны  $\sim 5 \mu\text{m}$  на основе  $\text{AlInAs}/\text{GaInAs}$  напряженно-компенсированных сверхрешеток с четырехъямной схемой активной области, выращенного молекулярно – пучковой эпитаксией (МПЭ) на подложках  $\text{InP}$ . Такой дизайн активной области позволяет достичь минимального времени жизни основного состояния, необходимого для достижения инверсной населенности ( $\sim 0.4 \text{ ps}$  [1]), и высокой эффективности инжекции [2]. Лазерные гетероструктуры были выращены молекулярно-пучковой эпитаксией на установке RIBER-32. Ростовые температуры активных областей лазерных структур составляли  $500^\circ\text{C}$ , и при росте использовались слабо  $\text{As}$ -стабилизированные условия. Структура активной области была разработана согласно [2], и наносилась на подложку  $n\text{-InP:Sn}$  легированную до  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Активные области  $\text{GaIn}_x\text{As}/\text{AlIn}_y\text{As}$  гетероструктур выращивались в напряженно-компенсированном варианте для увеличения разрыва зон на гетерограницах, чтобы подавить потери свободных носителей в континуум. Напряженно-сжатые ямные области с содержанием индия  $x=0.6$  и напряженно-растянутые барьеры с содержанием индия  $y=0.44$  приводили к общему напряжению в структурах ниже  $10^{-3}$ . Активная область ККЛ состояла из 25 периодов. Вся структура от подложки до верха (последовательность по направлению роста) состояла из следующих слоев: 30 nm градиентный слой ( $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), 300 nm волноводный слой  $\text{InGaAs}$  ( $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), 1130 nm (25 периодов) активная зона, 300 nm волноводный слой  $\text{GaInAs}$  ( $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), 30 nm градиентный слой ( $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), 2500 nm эмиттерный (покрывающий-cladding) слой  $\text{AlInAs}$  ( $2 \times 10^{17}$ ,  $3 \times 10^{17}$ ,  $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), 30 nm градиентный слой ( $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), и верхний подконтактный 10 nm слой  $\text{InGaAs}$  ( $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ). Один период активной области содержал следующую последовательность из 20 чередующихся слоев  $\text{AlInAs}/\text{GaInAs}$  (в Ангстремах): 42/13/14/50/14/44/15/39/24/29/19/26/20/23/21/22/23/21/30/21 с подчеркнутыми слоями  $\text{GaInAs}$  и выделенными (**bold**) - легированными слоями.

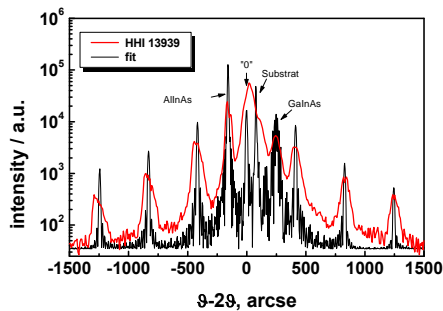


Рис.1. Спектр рентгеновской дифракции.

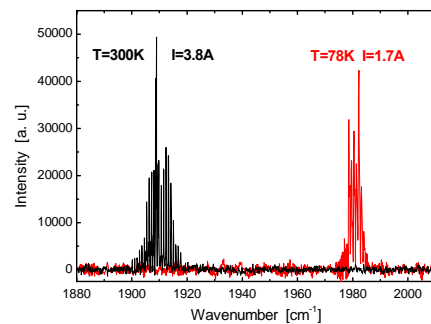


Рис.2. Спектры лазерной генерации.

## Литература

- [1] J.Faist, F.Capasso, C.Sirtori et al., Appl.Phys.Lett. 68, 3680 (1996).
- [2] D.Hofstetter, M.Beck, T.Aellen, and J.Faist. Appl.Phys.Lett.78, 396 (2001).

# ЛУЧЕВАЯ СТОЙКОСТЬ КРИСТАЛЛОВ GaSe И GaSe<sub>0,71</sub>S<sub>0,29</sub> И ГВГ ПРИ НАКАЧКЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 10,6 МКМ

С.Ю. Саркисов<sup>1,3</sup>, С.А. Березная<sup>1</sup>, З.В. Коротченко<sup>1</sup>, А.Г. Ситников<sup>2,3</sup>, В.Ф. Тарасенко<sup>2</sup>,  
А.Е. Тельминов<sup>2</sup>, А.Н. Панченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОСП «СФТИ им. акад. В. Д. Кузнецова ТГУ», Томск, 634034, ул. Ф. Лыткина, 28

<sup>2</sup> ИСЭ СО РАН, 634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3

<sup>3</sup> ТГУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

тел./факс: (3822) 41-36-36, эл. почта: sarkisov@elefot.tsu.ru

Перед проведением экспериментов по генерации второй гармоники (ГВГ) в кристаллах GaSe и GaSe<sub>0,7</sub>S<sub>0,3</sub> были проведены расчеты углов фазового синхронизма  $\theta$  и проведен выбор типа взаимодействия. При проведении расчетов использованы дисперсионные соотношения из [1] для GaSe и [2] для GaSeS. В соответствии с расчетами, первый тип взаимодействия в обоих кристаллах требует меньших углов синхронизма. Эффективные нелинейности выражаются как  $d_{eff} = -d_{22} \cos \theta \sin 3\varphi$  и  $d_{eff} = d_{22} \cos^2 \theta \cos 3\varphi$  для первого и второго типов ГВГ в GaSe соответственно. При расчетах было принято, что  $d_{22}$  обоих типов кристаллов составляет 54 пм/В. Так как по расчетам I тип взаимодействия является более эффективным, наши эксперименты проводились в этой конфигурации. Поляризация лазерного излучения была вертикальной, а нелинейный кристалл вращался вокруг вертикальной оси для подстройки под углы синхронизма.

В наших экспериментах использовался мощный импульсный СО<sub>2</sub>-лазер с накачкой от генератора с индуктивным накопителем энергии и прерывателем тока на основе SOS – диодов. Лазер был настроен на основную моду TEM<sub>00</sub> на длине волны 10,6 мкм [3]. Индуктивный накопитель позволял формировать импульс с коротким передним пиком около 50 нс длительностью и микросекундным хвостом. Выходная энергия лазерного и преобразованного излучения измерялась калориметром ОРНИР с измерительными головками FL-250А, РЕ-50ВВ. Ошибка в измерениях энергии была не больше 20 %. Временные формы импульсов регистрировались Ge-Au фоторезистором ФСГ-22-3А1. Для отсечения излучения СО<sub>2</sub>-лазера, проходящего через кристалл, использовалась сапфировая пластинка с коэффициентом пропускания 43 % на длине волны  $\lambda = 5,3$  мкм. В экспериментах по ГВГ энергия генерации лазера составляла 180 мДж.

Измеренная максимальная мощность излучения на второй гармонике и эффективность преобразования по мощности для кристалла GaSe составили 8 кВт и 0,51 % соответственно. Порогом пробоя считалось появление на поверхности кристалла едва различимых глазом изменений, которые затем наблюдались через оптический микроскоп Altami SM1065-T. Полученные величины порога разрушения составили  $I_d = 16$  МВт/см<sup>2</sup> и  $I_d = 26$  МВт/см<sup>2</sup> для кристаллов GaSe и GaSe<sub>0,7</sub>S<sub>0,3</sub> соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" г/к № 02.740.11.0444 и Гранта Президента РФ НШ-4297.2010.2, а также грантов РФФИ № 09-02-99036-р\_офи и №10-02-00864\_а.

## Литература

- [1] K.L. Vodopyanov, L.A. Kulevskii, Opt. Commun., 118, 375 (1995).
- [2] К.Р. Аллахвердиев, Р.И. Гулиев, Е.Ю. Салаев, В.В. Смирнов, Квантовая электроника, 9, 1483 (1982).
- [3] В.М. Орловский, А.Н. Панченко, В.Ф. Тарасенко, 40, 192 (2010).

# ПРЕОДОЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА ПРИ ФОКУСИРОВКЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ

Г.С. Соколовский<sup>1</sup>, С.Н. Лосев<sup>1</sup>, В.В. Дюделев<sup>1</sup>, А.Г. Дерягин<sup>1</sup>,  
В.И. Кучинский<sup>1</sup>, В. Сиббет<sup>2</sup>, Э.У. Рафаилов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

<sup>2</sup> University of St Andrews, North Haugh, St Andrews, KY16 9SS, UK

<sup>3</sup> University of Dundee, Nethergate, Dundee, DD1 4HN, UK

тел: (812) 292-7914, факс: (812) 297-1017, эл. почта: [gs@mail.ioffe.ru](mailto:gs@mail.ioffe.ru)

Фокусировка многомодового излучения является одной из наиболее существенных проблем, стоящих на пути расширения круга применений мощных полупроводниковых лазеров и светодиодов. Традиционно мерой качества многомодового (квази-Гауссова) светового пучка принимается параметр  $M^2$ , определяющий увеличение достижимого размера фокусного пятна по сравнению с его размером для идеального Гауссова луча. Для широкополосковых полупроводниковых лазеров значение  $M^2$  составляет от 20 до 50 и выше, а для светодиодов превышает 200, что соответствует теоретическому пределу размера фокусного пятна, на два и более порядка превышающему дифракционный предел.

Для преодоления этого ограничения, нами предложена фокусировка многомодового излучения за счет использования интерференции, а не преломления света на поверхности фокусирующей оптики, применяемого для традиционной фокусировки. Ранее нами была продемонстрирована генерация пространственно-инвариантных (Бесселевых) пучков, являющихся продуктом интерференции конически сходящихся лучей [1-3], при помощи мощных полупроводниковых лазеров и светодиодов и определены параметры, ограничивающие мощность в центральном луче и предельную длину распространения Бесселевых пучков, полученных из многомодового излучения с высоким параметром  $M^2$  [4,5].

В настоящей работе экспериментально продемонстрирована фокусировка светового пучка с параметром  $M^2$ , превышающим 200, и длиной волны около 0.6 мкм, в Бесселев пучок с диаметром центрального луча 6 мкм. Это почти на порядок меньше теоретического предела размера фокусного пятна при фокусировке такого пучка идеальной оптической системой с единичной числовой апертурой, составляющего около 40 мкм.

## *Литература*

- [1] J. Durnin, J. Opt. Soc. Am., A4, 651 (1987).
- [2] Б.Я. Зельдович, Т.А. Пилипецкий, Известия ВУЗов. Радиофизика, 9(1), 95 (1966).
- [3] J.H. McLeod, J. Opt. Soc. Am., 44, 592 (1954).
- [4] Г.С. Соколовский, В.В. Дюделев, С.Н. Лосев и др., Письма в ЖТФ, 34(24), 75 (2008).
- [5] Г.С. Соколовский, В.В. Дюделев, С.Н. Лосев и др., Письма в ЖТФ, 36(1), 22 (2010).

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРОВ С СИЛЬНОНАПРЯЖЕННОЙ КВАНТОВОЙ ЯМОЙ GaInAs, ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОДЛОЖКАХ GaAs МЕТОДОМ МОС-ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИИ.

**В.В. Шамахов**, Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, Д.Н. Николаев, И.С. Тарасов

ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, С.-Петербург, 194021, ул. Политехническая 26

тел: (812) 292-73-46, факс: (812)297-71-34, эл. почта: [dmitry.vinokurov@mail.ioffe.ru](mailto:dmitry.vinokurov@mail.ioffe.ru)

В настоящее время повышенный интерес проявляется к диапазону длин волн 1.2 – 1.25 мкм для накачки висмутовых волоконных лазеров [1]. Данный диапазон является трудно доступным как для лазеров, выращенных на подложках InP, так и для GaAs. При этом лазеры на подложках GaAs по сравнению с лазерами на InP должны обладать более высокой температурной стабильностью благодаря более сильному ограничению носителей заряда в активной области, а также увеличения оптического ограничения из-за большего скачка показателя преломления на гетерогранице волновод-эмиттер. Однако, достижение длинноволновой генерации структур, выращенных на подложках GaAs, ограничено процессом образования дислокаций вследствие больших напряжений, возникающих из-за значительного рассогласования параметров кристаллических решеток между подложкой и слоем активной области.

В данной работе представлены результаты исследований возможностей по получению максимальной волны излучения лазера при использовании сильнонапряженной квантовой ямы (КЯ) GaInAs. Асимметричные лазерные гетероструктуры выращивались на подложках GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии при температуре роста 625°C. Структуры состояли из эмиттерных слоев AlGaAs, волноводных слоев GaAs и активной области GaInAs.

Нами были проведены исследования лазеров с сильнонапряженной КЯ Ga<sub>0.65</sub>In<sub>0.35</sub>As от толщины КЯ. В зависимости от толщины КЯ (30-80Å) длина волны излучения варьировалась в диапазоне 1.01-1.15 мкм. Было показано, что пороговый ток, температурная чувствительность пороговой плотности тока, стимулированный квантовый выход и дифференциальная квантовая эффективность улучшаются с увеличением толщины КЯ. Продемонстрировано, что максимально достижимая мощность оптического излучения полупроводникового лазера и внутренний квантовый выход фотолюминесценции наиболее чувствительны к возникновению дефектов в гетероструктуре и снижаются при превышении критической толщины напряженного слоя GaInAs активной области.

Для уменьшения числа дефектов в структуре использовался низкотемпературный режим роста, что позволило получить более напряженную КЯ. При пониженной температуре эпитаксии 600°C была выращена лазерная гетероструктура с КЯ Ga<sub>0.6</sub>In<sub>0.4</sub>As толщиной 80Å. В лазерах с такой активной областью удалось достичь длины волны генерации 1.19 мкм. Показано, что в данных лазерах активная область является релаксированной, что проявляется в разбросе достигаемой максимальной мощности выходного оптического излучения (2.5 – 5.5 Вт на зеркало) для различных лазеров, полученных из одной гетероструктуры. Максимальная мощность излучения в непрерывном режиме генерации для таких лазеров составила 5.5 Вт на зеркало.

Дальнейшее продвижение в длинноволновую область возможно при использовании компенсирующих барьеров.

### **Литература**

- [1] Е.М. Дианов, И.А. Буфетов, М.М. Бубнов и др, Квантовая электроника, 29 (2), 97 (1999).

# ВОЗМОЖНОСТИ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА В ДИАГНОСТИКЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

А.Г. Колмаков<sup>2</sup>, А.Е. Черняков<sup>1</sup>, Е.И. Шабунина<sup>1</sup>, **Н.М. Шмидт<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

<sup>2</sup> ИМЕТ, Москва, 107996, Ленинский пр., 49

тел: (812) 292-7193, факс: (812) 297-1017, эл. почта: [Natalia.shmidt@mail.ioffe.ru](mailto:Natalia.shmidt@mail.ioffe.ru)

Современные технологии выращивания светоизлучающих гетероструктур на основе InGaN/GaN, AlGaAs/GaAs, InGaAs/GaAs, в том числе с квантовыми точками (КТ) InAs, сопровождаются процессом самоорганизации, т.е. формированием стохастически самоподобных пространственных структур на наноразмерном уровне, порождая многообразие форм организации наноматериала. Такие материалы, с позиций современного материаловедения, рассматриваются как нелинейные системы с фрактальной размерностью, свойства которых во многом определяются особенностями связи образовавшихся пространственных неоднородностей в целом [1]. Методы мультифрактального анализа (МА) позволяют количественно охарактеризовать эти особенности с помощью мультифрактальных параметров (МП): уровень самоорганизации и степень упорядоченности. Эти параметры могут быть получены путем обработки методами МА математического множества, соответствующего изображению поверхности слоев и приборных структур в атомно-силовом микроскопе [2]. Применение МА в исследовании светоизлучающих InGaN/GaN структур позволило выявить взаимосвязь процессов излучательной и безызлучательной рекомбинации с характером организации наноматериала и выяснить пути повышения значений внешней квантовой эффективности [3]. Контроль значений МП светоизлучающих InGaAs/GaAs структур с КТ InAs позволил проследить эволюцию ансамбля КТ, вызванную кооперативными явлениями в системе КТ-матрица, происходящими при выращивании приборных структур, а также изменения оптических свойств приборных структур, связанных с этими явлениями [4]. Контроль МП многослойных гетероструктур, выращенных на буферных слоях разного состава и при различных режимах, а также при изменении режима формирования квантовых точек, позволяет количественно определить изменения организации наноматериала. При этом по величине уровня самоорганизации и степени упорядоченности можно прогнозировать более благоприятный выбор режимов роста буферного слоя и формирования квантовых точек, а также дизайна многослойной гетероструктуры. Кроме того, применение мультифрактального анализа в диагностике гетероструктур, позволяет контролировать воспроизводимость характера организации наноматериала на всех стадиях технологического процесса. Таким образом, методы, основанные на мультифрактальном анализе предоставляют новые возможности, как в изучении свойств светоизлучающих гетероструктур, так и в совершенствовании технологии их получения.

## *Литература*

- [1] В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев, в кн. *Синергетика и фракталы в материаловедении*, Наука, М. 1994, с.383.
- [2] N.M. Shmidt, V.V. Emtsev, A.G. Kolmakov, *Nanotechnology*, 12, 471 (2001).
- [3] S.V. Ivanov, A.G. Gladyshev, A.G. Kolmakov et al., *Phys.stat.sol.(c)* 2, 1912 (2005).
- [4] А.Г. Гладышев, Н.В. Крыжановская, А.Е. Жуков, Н.М. Шмидт, *Письма в ЖТФ* 33, 10 (2007).



## МОЛОДЕЖНАЯ СТЕНДОВАЯ СЕКЦИЯ

### ЛЕНГМЮРОВСКИЕ МОДЫ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВОЛНОВОДАХ

А.А. Богданов<sup>1,2</sup>, Р.А. Сурис<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая, 26

<sup>2</sup> СПбАУ РАН, Санкт-Петербург, 195251, ул. Хлопина, 8/3

тел: (812) 297-2245, факс: (812) 297-1017, эл. почта: bogdanff@mail.ru

Собственные электромагнитные моды в полупроводниковом волноводе можно разделить на два типа. Моды первого типа (объемные моды) образуются за счет полного внутреннего отражения от обкладок волновода [1]. Моды второго типа (поверхностные моды) образуются за счет интерференции волн поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся вдоль границ, отделяющих волноводный слой от обкладок [2].

Для обоих типов мод есть частоты отсечки, т.е. частоты, ниже которой эти моды не могут распространяться. Для объемных мод частоты отсечки определяется толщиной волновода. Для поверхностных мод частоты отсечки не зависят от толщины волновода и определяется только плазменной частотой свободных электронов в волноводном слое.

В этой работе мы показали, что если волноводный слой анизотропный, например, представляет собой слоистый полупроводник, то в волноводе может распространяться еще один тип мод. Эти моды образуются за счет отражения Ленгмюровской волны [3] от обкладок волновода.

В работе проанализированы дисперсионные зависимости и оптические потери на свободных носителях для Ленгмюровских мод. Показано, что отсечка частоты для этих мод отсутствует, то есть Ленгмюровские моды могут быть возбуждены при сколь угодно низких частотах.

Работа была выполнена при финансовой поддержке правительства Санкт-Петербурга, РФФИ(грант №08-0201337-а), фонда Династия (программа поддержки аспирантов и молодых ученых без степени) и Минобрнауки РФ(ГК 2010-1.1-207-061-005, проект 2.1.1/988).

#### *Литература*

- [1] Д. Маркузе, *Оптические волноводы*, М.: Мир, 1974.
- [2] S.A. Maier, *Plasmonics: Fundamentals and Applications*, New York: Springer, 2007.
- [3] В.Л. Гинзбург, *Распространение электромагнитных волн в плазме*. М.: Наука, 1967.

# ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

А.В. Глогов<sup>1</sup>, П.В. Середин<sup>1</sup>, Э.П. Домашевская<sup>1</sup>, И.Н. Арсентьев<sup>2</sup>, Д.А. Винокуров<sup>2</sup>,  
И.С. Тарасов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1, 394006, Воронеж

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

тел: (4732) 208-363, факс: (4732) 208-363, эл. почта: paul@phys.vsu.ru

В настоящее время технология роста высококачественных гетероструктур из материалов со значительно рассогласованными параметрами решетки активно развивается. Такие гетероструктуры могут существовать либо в состоянии, когда напряжение решеток полностью или частично ослабляется, либо в состоянии, когда напряжение не ослабляется вовсе. А потому возможность управления величиной шероховатости эпитаксиального слоя или его кластеризацией за счет изменения величины напряжений рассогласования кристаллических решеток – есть один из важнейших и удобнейших механизмов формирования самоорганизующихся квантовых точек. Особый интерес в этом плане представляет собой система  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs}$ , поэтому целью данной работы является исследование структурных свойств, биаксиальной деформации кристаллической решетки твердого раствора  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , а также морфологии поверхности эпитаксиальных гетероструктур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As/GaAs}(100)$ .

Все исследуемые структуры выращивались в идентичных условиях методом МОС гидридной эпитаксии на установке EMCORE GS 3100. Структурное качество образцов и определение параметров решеток твердых растворов проводили с использованием рентгеновской дифракции на дифрактометре ARL X'TRA Thermo Techno с высоким угловым разрешением на  $\text{Cu}_{K\alpha 1,2}$  излучении. Изучение морфологии поверхности было проведено на растровом электронном микроскопе JOEL.

Анализ экспериментальных данных, полученных методами рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии, а также расчеты параметра кристаллической решетки твердого раствора с учетом упругих напряжений  $\mathbf{a}^V$  и коэффициента релаксации кристаллической решетки твердого раствора позволяют сделать ряд заключений о структуре эпитаксиальных слоев  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ .

Показано, что твердые растворы  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , полученные из различных источников галлия, не только испытывают напряжения деформации кристаллических решеток, но и обладают дифференцированным составом относительно технологически заданной величины. Как показали расчетные данные, релаксация твердых растворов к монокристаллической подложке GaAs тем выше, чем меньше концентрация атомов индия. Анализ (511) дифракции от эпитаксиальной гетероструктуры с  $x \sim 0.50$  позволил сделать заключение о том, что помимо основного дифракционного максимума от твердого раствора  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , экспериментальный спектр содержит еще один неразрешенный  $K\alpha_{1,2}$ -дублет от неизвестной фазы, смещенный относительно основного пика в сторону больших углов. Кроме того, кристаллы на поверхности данного твердого раствора имеют неправильную геометрическую форму, причем поверхностные блоки вытянуты в плоскости роста.

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно сделать предположение, что неизвестная сверхструктурная фаза, образовавшаяся на поверхности эпитаксиального твердого раствора  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , представляет собой соединение  $\text{InGaAs}_2$  с кристаллической решеткой типа Layered Tetragonal и упорядоченным расположением атомов металлической подрешетки в плоскости роста эпитаксиальной пленки.

# ВЛИЯНИЕ ТОНКИХ СЛОЕВ (Au, Eu(q)Pc) НА ВИД СПЕКТРОВ ФЛ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ InGaN

С.М. Голубенко<sup>1</sup>, М.М. Мездрогина<sup>2</sup>, А.В. Зиминов<sup>3</sup>, Т.А. Юрре<sup>3</sup>

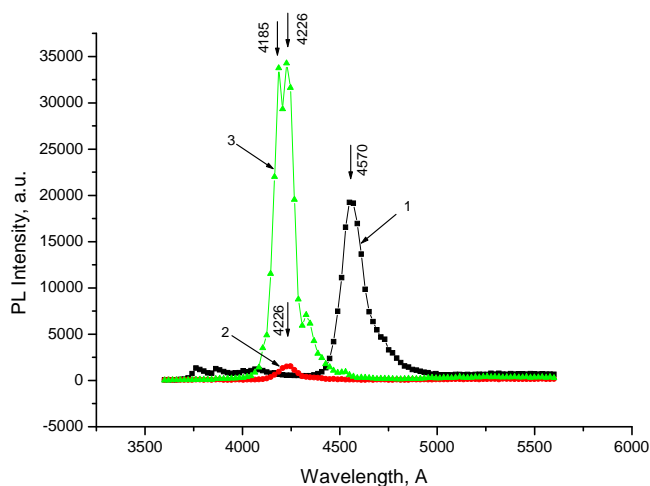
<sup>1</sup> СПбГПУ, Санкт-Петербург, 195251 Политехническая, 29

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

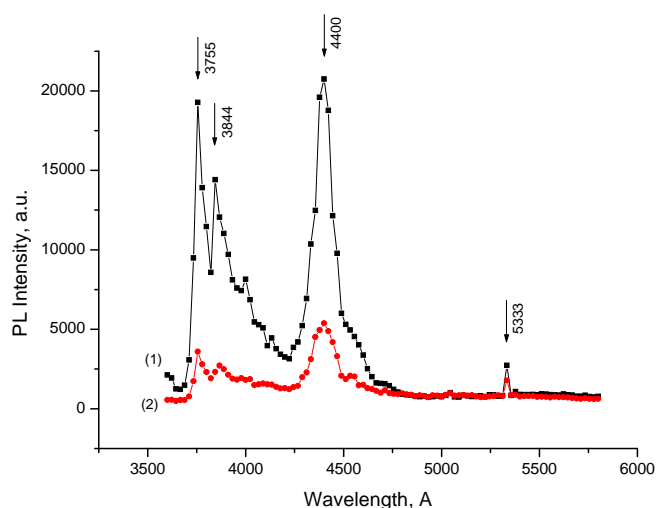
<sup>3</sup> СПбТУ, Санкт-Петербург, Московский проспект, д.31

тел. 297-92-41 эл. почта Margaret.M@mail.ioffe.ru

Интенсивные исследования влияния тонких пленок на увеличение эффективности светоизлучающих диодов [1] показали, что о влияние металлических наночастиц, обусловлено наличием поверхностных плазмонов. Основные результаты были получены при нанесении пленок благородных металлов: Ag, Au, Pt, имеются работы с использованием тонких пленок металлов 3d группы, таких как Al, Cu. Полученные данные связаны наличием хорошей проводимости тонких пленок металлов, перечисленных выше. На рис.1 (1-спектр ФЛ исходной структуры, 2-пленка Au, 3-спектр ФЛ структуры с нанесенной пленкой) представлены спектры фотолюминесценции(ФЛ) структур с MQW на основе InGaN/GaN с пленкой Au. Видно, что полученный в данной работе результат аналогичен литературным данным.



Исследования спектров ФЛ органических соединений, в частности, фталоцианинов европия- EuPc позволили обнаружить полосы излучения в коротковолновой ( $\lambda=450-500$  nm) и ( $\lambda=670-730$  nm)[2]. Пленки EuPc (непроводящие) были нанесены на такие же структуры, как и пленки Au. Как видно из рис.2 (1 – тонкая пленка, 2-толстая) получены подобные результаты (рис.1). Предлагается ряд моделей для объяснения влияния пленок EuPc и Au.



## Литература

[1] J-Ho Sung, Y-Su Yang, B-NO; Appl. Phys. Let. v.96 p.261, 105.

[2] А.В. Зиминов, Ю.А. Полевая, Т.А. Юрре и др, ФТП 44, 8 (2010).

# ВХОЖДЕНИЕ ИНДИЯ И ОПТИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ В НАПРЯЖЕННЫХ InGaN ОБЪЕМНЫХ СЛОЯХ И КВАНТОВЫХ ЯМАХ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ ОСИ КРИСТАЛЛА

М.В. Дурнев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> СПб АУ НОЦНТ РАН, Санкт-Петербург, 194021, ул. Хлопина, 8 к. 3

<sup>2</sup> ООО «Софт-Импакт», Санкт-Петербург, 194156, пр. Энгельса 27

тел: (921) 327-8308, эл. почта: mickedeff@gmail.com

С помощью численного моделирования ростовых процессов в МОС-гидридной эпитаксии исследована эффективность встраивания атомов индия в напряженный InGaN слой, псевдоморфно выращенный на GaN подложке с произвольным углом наклона гексагональной оси кристалла относительно плоскости эпитаксиальных слоёв. Предсказано увеличение эффективности встраивания с ростом угла наклона гексагональной оси и наличие ярко выраженного максимума этой зависимости, соответствующего полуполярной ориентации кристалла. Природа этого эффекта состоит в сильном влиянии упругой энергии, запасённой в напряжённом InGaN слое, на скорость десорбции индия с ростовой поверхности кристалла.

Для анализа влияния упругих напряжений на зонную структуру объемных InGaN/GaN слоёв и GaN/InGaN/GaN квантовых ям, излучающих свет в синем и зеленом спектральных диапазонах, использовался 6×6 гамильтониан Бира-Пикуса. В расчётах учитывалась зависимость эффективности вхождения индия от угла наклона гексагональной оси кристалла, полученная в результате моделирования эпитаксиального роста.

Обнаружено, что объемные InGaN/GaN материалы с полуполярной ориентацией способны излучать свет в более длинноволновом спектральном диапазоне, несмотря на увеличение ширины запрещенной зоны полупроводника с углом наклона гексагональной оси. Это связано с более эффективным вхождением индия в InGaN слои на полуполярной грани. Длины же волн излучения кристаллов с полярной (гексагональная ось перпендикулярна плоскости эпитаксиальных слоёв) и неполярной (гексагональная ось лежит в плоскости эпитаксиальных слоёв) ориентацией оказываются сравнимыми друг с другом.

В случае GaN/InGaN/GaN квантовых ям на оптические переходы влияет не только увеличение ширины запрещенной зоны материала, но и изменение разрывов энергетических зон в гетероструктуре, связанное с упругими напряжениями в InGaN активной области, а также наличие характерных для нитридов III группы поляризационных зарядов, индуцированных на границах эпитаксиальных слоёв. Энергия оптических переходов при этом практически не изменяется при переходе от полярной к полуполярной ориентации кристалла, но значительно возрастает в случае неполярной ориентации. Полученные теоретические результаты касаются квантовых ям, излучающих свет как в синем, так и в зеленом спектральном диапазоне, и качественно согласуются с имеющимися экспериментальными данными, полученными для синей области спектра.

Результаты моделирования показывают, что упругие напряжения являются основным фактором, препятствующим получению максимально длинноволнового излучения в нитридных структурах. В докладе рассмотрен возможный путь решения этой проблемы, основанный на выращивании InGaN активной области не на GaN, а на релаксированном InGaN меньшего состава. В этом случае уменьшение упругих напряжений приводит к существенному уменьшению энергии оптических переходов в InGaN квантовых ямах, что является многообещающим для разработки длинноволновых источников света на основе нитридов III группы.

# ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ n- ZnO/p-GaN< RE> - СТРУКТУРЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ УФ, ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

М.В. Еременко<sup>1</sup>, С.М. Голубенко<sup>1</sup>, М.М. Мездрогина<sup>2</sup>, Н.К. Полетаев<sup>2</sup>, А.Ю. Маслов<sup>2</sup>,  
С.Н. Разумов<sup>3</sup>, С.А. Кукушкин<sup>3</sup>, А.В. Осипов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> СПбГПУ, Санкт-Петербург, 195251 Политехническая, 29

<sup>2</sup> ФТИ им.А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, 194 021, Политехническая, 26

<sup>3</sup> Институт машиноведения РАН, Санкт-Петербург, В.О. Большой пр., 57  
тел. 297-92-41 эл. почта Margaret.M@mail.ioffe.ru

ZnO - широкозонный прямозонный полупроводник ( $E_g=3,34$  eV). Известно, что состояние пленок ZnO с дырочной проводимостью нестабильно, тип проводимости после некоторого времени становится электронным. Все это имеет место при легировании одной легирующей примесью-N, P, As в анионной подрешетке, на месте O.

Решением проблемы создания эффективных светоизлучающих структур на основе ZnO является использование гетероструктур, содержащих наряду с n-ZnO полупроводниковые материалы, которые легче легируются примесями р- типа. Весьма перспективным выглядит применение в качестве такого полупроводника GaN ( $E_g=3,43$  eV), так как ZnO и GaN имеют рассогласование постоянных решетки  $\sim 1,9\%$ .

Однако внутренняя квантовая эффективность излучательной рекомбинации гетероструктур n-ZnO/p-GaN и n-ZnO/p-Al<sub>0,12</sub>Ga<sub>0,88</sub>N невелика. Одним из возможных решений проблемы увеличения эффективности структур является модификация одного из слоев гетероструктуры: легирование слоя р-GaN редкоземельными ионами (РЗИ). Главным результатом работы является получение экспериментальной структуры n-ZnO/p-GaN<Er+Zn>. Она представляет собой слой р-GaN<Mg>, выращенный методом МOCVD с концентрацией дырок  $p \approx 1,5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. В качестве подложки использовался сапфир. При введении Er (концентрация  $\leq 10^{18}$  см<sup>-3</sup>), интенсивность ФЛ возросла в 2,5 раза, появилась интенсивная полоса, соответствующая ДАР (370-410 нм), с характерными особенностями при  $\lambda=3797$  Å и  $\lambda=3906$  Å ( $E=3,26$  эВ и  $E=3,17$  эВ соответственно), эти линии излучения наблюдались на образцах GaN<Eu,Er> в независимости от метода их получения. Увеличение интенсивности объясняется в литературе эффектом геттерирования дефектов и уменьшения количества центров безызлучательной рекомбинации.

При дополнительном введении Zn отмечалось появление эффекта сенсбилизации при в р-GaN<Mg+ Eu>. В случае р- GaN< Mg+Er > дополнительное введение Zn привело к уменьшению интенсивности излучения, что может свидетельствовать о появлении комплексов Er-Zn с большим сечением захвата электронов, т.е. должно улучшить дырочные свойства р-слоя, столь важные при создании гетероструктуры. Далее на полученный слой р-GaN<Mg+Er+Zn> методом магнетронного распыления был нанесен слой ZnO, получена гетероструктура, в которой резко ( $\approx$  в 30 раз) возросла интенсивность полосы излучения донорно-акцепторной рекомбинации (ДАР), причем структура самой полосы осталась неизменной, характерной для GaN<РЗИ>. Проявился также пик излучения с  $E=2,76$  эВ, наблюдаемый ранее на всех (объемных и пленочных) образцах ZnO. Важным результатом является то, что был получен р-п переход, что дает возможность в дальнейшем изучать электрооптические свойства данной структуры с возможной перспективой создания действующих светоизлучающих приборов на ее основе.

## **ЭЛЕКТРОННО-ЗОНДОВЫЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ III-N**

**Я.В. Кузнецова<sup>1</sup>, Т.Б. Попова<sup>1</sup>, М.В. Байдакова<sup>1</sup>, М.В. Заморянская<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
*тел: (812) 292-7382, факс: (812) 297-1017, эл. почта: yana@mail.ioffe.ru*

Для успешного производства коммерческих светодиодов на основе нитридов необходимо развивать методы диагностики, позволяющие изучать ключевые особенности материала, влияющие на оптические свойства структур.

В данной работе были изучены полупроводниковые структуры с одиночной и множественными квантовыми ямами (КЯ). В ходе исследования был предложен неразрушающий метод анализа состава КЯ с помощью рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), основанный на использовании математического моделирования для обработки экспериментальных данных [1]. Авторами продемонстрирована возможность определять состав одиночной КЯ толщиной 3 - 5 нм. Для структуры с множественными КЯ данные РСМА и рентгеновской дифракции позволили определить состав с погрешностью не хуже 10 % относительных.

Совместное использование методов РСМА и локальной катодolumинесценции (КЛ) позволило оценить величину пьезополя в структуре. Для этого был рассчитан спектр люминесценции и получены спектры КЛ при различных плотностях возбуждения. Для расчета спектра использовались данные о составе квантовых ям, полученные методом РСМА.

Таким образом, в работе показана возможность определять состав квантовых ям и величину пьезополей в наноразмерных гетероструктурах неразрушающим образом.

Работа выполнена на базе ЦКП "Материаловедения и диагностика в передовых технологиях" при поддержке Правительства Санкт-Петербурга (грант для молодых ученых). Авторы благодарят В.Н. Жмерика за предоставленные структуры.

### ***Литература***

[1] Л.А. Бакалейников, Я.В. Домрачева, М.В. Заморянская и др., ФТП 43, 4, 568 (2009).

## ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ЛАЗЕРЫ В СРЕДНЕЙ ИК-ОБЛАСТИ СПЕКТРА НА МОДАХ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ

В.В. Шерстнев<sup>1</sup>, М.И. Ларченков<sup>1</sup>, Е.А. Гребенщикова<sup>1</sup>, А.М. Монахов<sup>1</sup>, А.Н. Именков<sup>1</sup>,  
А.Н. Баранов<sup>2</sup> и Ю.П. Яковлев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им.А. Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, 194021,  
Политехническая, 26

<sup>2</sup>Institut d'Electronique du Sud (IES), Universite Montpellier 2, 34095 Montpellier, France

Моды шепчущей галереи (WGM) являются универсальными линейными возбуждениями дисковых и кольцевых резонаторов. Впервые они наблюдались в 1910 году как звуковые волны, распространяющейся вдоль наружной стены галереи для посетителей, в круглом зале собора Св. Павла в Лондоне и были исследованы лордом Релеем [1]. Придуманное для этого акустического явления название "моды шепчущей галереи" - whispering gallery modes (WGM) было использовано для обозначения собственных мод дисковых резонаторов. Мы использовали это явление для создания нового типа WGM-лазера в средней ИК-области спектра [2,3].

Интерес к дисковым лазерам обусловлен тем, что добротность их резонатора очень высока  $10^6$ , что должно позволить получить лазерную генерацию при существенно более низких пороговых токах и высоких температурах.

Главной физической особенностью данных лазеров является то, что они работают на так называемых «модах шепчущей галереи». Этот режим особенно привлекателен именно для лазеров среднего ИК диапазона, поскольку оптическое усиление активной среды таких лазеров невелико, а длина волны достаточно большая, что позволяет использовать простые методы изготовления такого лазера.

Нами были созданы дисковые лазеры для спектрального диапазона 2.0-2.4 мкм, работающие при комнатной температуре, и для диапазона 3-4 мкм, работающие при температурах, близких к температуре жидкого азота.

Исследована частотная перестройка при комнатной температуре WGM-лазера с полудисковым резонатором (2.35  $\mu\text{m}$ ) при импульсном питании в интервале токов 200-600 мА в зависимости от длительности импульса (0.1-1.2  $\mu\text{s}$ ). Показано, что с увеличением длительности импульса от 0.1 до 1.2  $\mu\text{s}$  наблюдается перестройка длины волны излучения коротковолновой моды в длинноволновую сторону на 30  $\text{\AA}$ , что больше межмодового расстояния в 1.4 раза.

Созданы перестраиваемые инфракрасные полупроводниковые WGM-лазеры с дисковым резонатором, работающий на длине волны 3.5  $\mu\text{m}$  при температуре 79 К. Изучены спектры излучения. Зарегистрирована плавная перестройка длины волны излучения основной моды в коротковолновую сторону на 11  $\text{\AA}$ , обусловленная нелинейными оптическими эффектами.

Работа частично поддержана программой Президиума РАН №27 «Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов», грантами РФФИ 10-02-93110-НЦНИЛ\_а, 10-02-00548-а и 09-08-91224-СТ\_а, а также государственным контрактом № 02.740.11.0445.

### Литература

- [1] Lord Rayleigh, Phyl. Mag. 20, 1001 (1910).
- [2] V.V. Sherstnev, A. Krier, A.M. Monakhov, G.Hil, Electron. Lett. 39(12), 916 (2003).
- [3] A.M. Monakhov, V.V. Sherstnev, A.P. Astakhova et al., Appl. Phys. Lett 94, 051102 (2009).

# ИССЛЕДОВАНИЕ БИОХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ МЕТОДОМ КОГЕРЕНТНОГО СВЕТОРАССЕЯНИЯ

Д.В. Мокрова, Д.С. Перевозник

СПб ГПУ, Санкт-Петербург, 195251, Политехническая, 29

тел: (812) 552-63-14, эл. почта [levisor@mail.ru](mailto:levisor@mail.ru)

Одно из самых эффективных направлений применения лазеров, включая полупроводниковые, в биомедицине – лазерная медицинская диагностика и исследование биохимических и биофизических параметров биообъектов.

Большое разнообразие и структурная сложность биологических систем, требует разработки адекватных биофизических моделей рассеяния и поглощения света для достоверного выявления диагностической информации.

Традиционные методы макро- и микродиагностики, широко применяющиеся как в исследовательских, так и в клинических условиях, могут получить дальнейшее развитие за счет применения методик на основе рассеяния когерентного света. Все это требует создания и развития новых измерительных подходов в том числе базирующихся на принципах статистической оптики: лазерной корреляционной спектроскопии, лазерной оптики спеклов и спекл-интерферометрии, спектроскопии оптического смещения и корреляции фотонов.

Одной из проблем современной биохимии является выявление механизма лизиса чужеродных клеток комплементом крови. Система комплемента – это совокупность белков биологических жидкостей, а именно плазмы крови, лимфы, молока, осуществляющая реализацию иммунного ответа организма. Лизис – разрушение чужеродной клетки; лизис эритроцита – гемолиз. Задача данной работы состоит в выявлении динамики белков в смеси: сыворотка крови человека – эритроциты кролика и ряда добавок, методом когерентного светорассеяния. На первом этапе решения этой задачи было необходимо определить спектральную область светового поглощения исследуемой смеси, в которой динамика комплемента будет выражена наиболее отчетливо.

В работе было проведено исследование реакция системы комплемента на чужеродный объект (в нашем случае – эритроциты кролика).

Ввиду того что, белки и гемоглобин поглощают соответственно в УФ и видимом диапазоне (500-600 нм), представляет интерес отойти от традиционных методов измерения на одной длине волны (800 нм) и провести измерения в большем диапазоне длин волн (200-1100 нм).

После выполнения серии экспериментов стало очевидным, что наиболее информативным является УФ диапазон, который соответствует преимущественно поглощению белков. Для выявления деталей процесса эритролиза (ранняя стадия гемолиза), перспективно применять методики когерентного светорассеяния дисперсными биологическими средами, методы корреляционной спектроскопии, в том числе корреляции интенсивности оптических спекл-полей, методы турбидиметрии.

В дальнейшем предполагается продолжить исследования в этих направлениях.

## **Литература**

[1] Л.В. Галевская, Е.В. Рюмина – Санкт-Петербург, издательство СПбГМУ, 1999.



## АНАЛИЗ ПОРОГОВЫХ УСЛОВИЙ ГЕНЕРАЦИИ ЗАМКНУТОЙ МОДЫ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФАБРИ-ПЕРО ЛАЗЕРАХ

С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, А.Ю. Лешко, И.С. Тарасов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел: (812)292-73-79, факс: (812) 292-73-79, эл. почта: podoskin\_s\_s@mail.ru

В современных высокоомощных полупроводниковых лазерах благодаря использованию гетероструктур со сверхнизкими внутренними оптическими потерями и высокой квантовой эффективностью достигаются высокие уровни токовой накачки и оптической мощности. Однако при столь высоких уровнях накачки начинают проявляться эффекты, приводящие к ограничению максимальной выходной мощности [1, 2, 3]. Так, в некоторых случаях, как в непрерывном, так и в импульсном режимах генерации наступает насыщение ватт-амперной характеристики и обратимое падение оптической мощности, обусловленное наступлением и развитием срыва генерации моды Фабри-Перо (ФПМ). Эффекты насыщения и обратимого падения выходной мощности оптического излучения наблюдались как в многомодовых [3,4], так и одномодовых полосковых Фабри-Перо лазерах с узким полоском [5].

В рамках проведенной работы экспериментально установлено, что причиной срыва генерации является выполнение пороговых условий для замкнутой моды (ЗМ) при достижении токов накачки, превышающих порог генерации ФПМ, при этом ЗМ может распространяться во всем объеме кристалла, усиливаясь в активной секции, ограниченной полосковым омическим контактом, и поглощаясь в пассивных областях кристалла, лежащих вне токопроводящего полоска. В работе проведен анализ пороговых условий генерации замкнутой моды в полупроводниковых Фабри-Перо лазерных диодах полосковой конструкции. На основании экспериментальных данных получено выражение, связывающее пороговые условия генерации замкнутой моды с оптическими и геометрическими характеристиками лазерного диода. Определены основные параметры, влияющие на значение порога генерации ЗМ для выбранной лазерной гетероструктуры: фактор оптического ограничения для ЗМ, величины поглощения в пассивной области для ЗМ и ФПМ, и различия в материальном усилении в активной области под полосковым контактом для линий генерации ЗМ и ФПМ. Показано, что верхняя граница пороговых условий ЗМ определяется соотношением внутренних оптических потерь и потерь на выход излучения из резонатора Фабри-Перо. Установлено, что вследствие рассогласования спектров усиления и поглощения активной и пассивных областей существует диапазон длин волн, для которого потери в пассивной области близки к нулю при положительном значении величины усиления в активной секции, что, вследствие нулевых потерь на выход для ЗМ, приводит к выполнению пороговых условий ЗМ при меньшем значении материального усиления по сравнению с ФПМ.

### *Литература*

- [1] С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.А. Пихтин и др., ФТП, 40, 1017 (2006).
- [2] H. Wenzel, P. Crump, A. Petrzak et al., IEEE J. Quantum Electron, vol. 41, 645, (2009).
- [3] С.О. Слипченко, Д.А. Винокуров, А.В. Лютецкий и др., ФТП, 43, 1409 (2009).
- [4] G.I. Ryabtsev, T.V. Bezyazychnaya, M.V. Bogdanovich et al., Appl. Phys. B 90, 471 (2008).
- [5] А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин и др., ФТП, 36, 1393 (2002).

# ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ НА ОСНОВЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

И.А. Словинский, Р.П. Сейсян, М.Э. Сасин

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел: (812) 292-79-94, эл. почта: [ilya@slovinsky.ru](mailto:ilya@slovinsky.ru)

Сегодня происходит активное развитие такой области как нанофотоника. В ее рамках изучается взаимодействие электромагнитных волн с наноструктурами, которые представляют собой сформированные в объеме материала или на его поверхности неоднородности с характерными размерами сравнимыми или меньшими длины волны света. Одним из видов таких структур являются структуры с тонкой пленкой металла на поверхности. В таких структурах наблюдаются ряд интересных эффектов, связанных с взаимодействием света с электронами проводимости в металлах. Их исследования демонстрируют интересные результаты, возникающие в достаточно хорошо изученной области - физика металлов.

В работе исследовалось взаимодействие поляризованного света и периодических наноструктур, которые представляли собой решетку, сформированную на поверхности полупроводниковой подложки и покрытых тонкой пленкой золота. Структура формировалась при помощи интерференционной литографии с использованием гелий-кадмиевого лазера и последующим реактивно-ионным травлением и нанесением пленки золота методом вакуумного напыления. Измерительный комплекс представляет собой спектрографическую установку, которая позволяет регистрировать спектры отражения образца в условиях приближенных к лазерной засветке.

При обработке полученных спектров были получены зависимости величины поляризационного контраста от длины волны, угла между векторами поляризации света и решетки и другие. Поляризационный контраст - это отношение интенсивности отраженного света при угле между вектором поляризации и решетки, равным нулю, к интенсивности при угле отличным от нуля (10, 20, ..., 90). Для некоторых образцов эта величина достигала значения в несколько десятков раз.

Плазмоника является очень перспективным направлением и, как следствие, предлагается большое количество возможных реализаций приборов, основанных на новых принципах: плазмонные волноводы и коммутаторы [1], нанолинзы [2], наноинтерферометр и другие оптические наноприборы [3]. Описанные в работе зависимости поляризационного контраста могут применяться для увеличения плотности записи на оптических носителях [4], работающих на излучении одномодового полупроводникового лазера. На основе того, что поляризационный контраст меняется в разы при изменении угла между поляризацией света и вектором решетки, то можно построить систему в высокой степени дискретизации по углу, что и ложиться в основу повышения плотности записи оптических носителей.

## *Литература*

- [1] H.A. Atwater Sci. Am. Inc. 58 (2007).
- [2] Z. Sun, H.K. Kim Appl. Phys. Lett. 85, 642 (2004).
- [3] Plasmonics: Fundamentals and Applications. Stefan A. Maier. Springer Verlag (2007).
- [4] Р.П. Сейсян Патент №2195026 (2002).

# ОСОБЕННОСТИ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР InGaN/GaN

Н.С. Аверкиев, А.Л. Закгейм, М.Е. Левинштейн, П.В. Петров, А.Е. Черняков,  
**Е.И. Шабунина, Н.М. Шмидт**

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел: (812) 297-7155, факс: (812) 297-1017, эл. почта: jenni-85@mail.ioffe.ru

Низкочастотный шум, несущий информацию о состоянии дефектной системы и механизмах рекомбинации, в InGaN/GaN светодиодах изучается сравнительно недавно.

В связи с этим, важно выяснить, в какой мере, закономерности поведения спектральной плотности шума от плотности тока, известные для других материалов, типичны для синих светодиодов на основе InGaN/GaN с квантовой эффективностью 30 – 40 %, полученные методом эпитаксии из металлоорганических соединений в диапазоне частот 1 Гц – 10 кГц в плоть до токов 50 мА по ранее описанной методике [1].

Сравнительные исследования зависимости плотности низкочастотного шума от плотности тока светодиодов на основе InGaN/GaN и AlGaAs/GaAs, а также кремниевых диодов, были проведены в диапазоне частот 1 Гц – 10 кГц по ранее описанной методике [1]. Выявлена более сложная зависимость спектральной плотности шума от плотности тока для InGaN/GaN светодиодов. На этих светодиодах кроме, характерного для всех исследованных диодов, участка квадратичной зависимости плотности шума от тока, связанного с определяющим вкладом в шум генерационно – рекомбинационных процессов через локальные центры в запрещенной зоне, наблюдается линейная зависимость. Причем она наиболее ярко выражена для диодов с избыточными токами туннельной рекомбинации в системе протяженных дефектов и вносит вклад в низкочастотный шум во всем диапазоне плотностей токов.

Выяснено, что наблюдаемая сильная зависимость плотности шума от тока  $\sim I^4$  на деградировавших синих светодиодах, ранее наблюдавшаяся на металлах [3], вызвана, той же причиной – локальным перегревом. Эта связь была установлена благодаря применению метода инфракрасной тепловизионной микроскопии, позволяющего локально измерять температуру в заданной точке кристалла по интенсивности теплового излучения [2], и исследованию низкочастотного шума на светодиодах с выявленными областями локального перегрева.

Выявленные особенности поведения низкочастотного шума InGaN/GaN светодиодов могут быть использованы для развития моделей безызлучательной рекомбинации и деградации.

## *Литература*

- [1] S. Sawyer, S.L. Romyantsev and M. S. Shur, Journal of Applied Physics 100, 034504 (2006).
- [2] А.Л. Закгейм, Г.Л. Курышев, М.Н. Мизеров и др., ФТП 44, 390 (2010).
- [3] Г.П. Жигальский УФН, 173, 465 ( 2003).

# ТЕМПЕРАТУРНАЯ ДЕЛОКАЛИЗАЦИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В МОЩНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРАХ

И.С. Шашкин, Н.В. Воронкова, А.Ю. Лешко, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко,  
А.А. Подоскин, И.С. Тарасов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26  
тел: (812) 292-73-79, эл. почта: Tarasov@hpld.ioffe.ru

Увеличение оптической мощности полупроводниковых лазеров является одной из основных задач на пути к расширению областей их применения. Наибольший уровень сложности эта проблема приобретает при непрерывном режиме работы полупроводниковых лазеров [1]. Насыщение ватт-амперной характеристики, ограничивающее излучаемую оптическую мощность в непрерывном режиме генерации, связано с ростом температуры активной области.

Для температурных исследований были выбраны три типа лазерных асимметричных гетероструктур раздельного ограничения на основе системы твердых растворов InGaAs(QW)/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As(WG)/Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As(CL). В первом типе лазерной гетероструктуры InGaAs активная область (10нм) расположена между промежуточными слоями GaAs (7нм). Во втором типе лазерной гетероструктуры InGaAs активная область (5нм) расположена непосредственно между волноводными слоями Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As. И в третьем типе лазерной гетероструктуры число InGaAs активных областей (5нм), расположенных непосредственно между слоями волновода, увеличено до четырех. Лазерные гетероструктуры были изготовлены методом МОС-гидридной эпитаксии. Из лазерных гетероструктур по стандартной технологии изготовлены мезаполосковые лазеры с апертурой излучения 100 мкм и различной длиной резонатора.

В докладе будут приведены экспериментальные температурные зависимости обратной величины внешней дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора, расчётные температурные зависимости концентрации носителей заряда в волноводных слоях, суммарных внутренних оптических потерь полупроводниковых лазеров исследованных типов структур.

Будет сделан важный вывод о том, что величина внутреннего квантового выхода стимулированного излучения для всех трёх типов лазерных гетероструктур не зависит от температуры и составляет величину, близкую к 100%, а насыщение ватт-амперных характеристик исследуемых полупроводниковых лазеров обусловлено температурным ростом внутренних оптических потерь в волноводных слоях лазерной гетероструктуры.

Будут приведены спектры спонтанного излучения лазерных диодов при температуре теплоотвода 140°C, из которых следует, что температурный рост внутренних оптических потерь в волноводных слоях лазерной гетероструктуры связан с температурной делокализацией носителей заряда, т.е. при высокой температуре коротковолновый край спектра спонтанного излучения активной области перекрывается с полосой излучения волновода, квантовая яма не локализует все носители заряда, необходимые для достижения пороговой концентрации, и волноводный слой заполняется делокализованными носителями заряда. Температурная делокализация приводит к снижению дифференциальной квантовой эффективности и, как следствие, к насыщению ватт-амперной характеристики полупроводниковых лазеров в непрерывном режиме генерации.

## Литература

[1] N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova et al., Electron. Lett. 40, 1413 (2004).