

**5-й Российский симпозиум
с международным участием**

Санкт-Петербург, 15-18 ноября 2016 года

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ:

ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

**ПРОГРАММА И
ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

**Санкт-Петербург
2016**



**5-й Российский симпозиум
с международным участием**

**Полупроводниковые лазеры:
физика и технология**

Санкт-Петербург, 15-18 ноября 2016 года

ПРОГРАММА И ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**Санкт-Петербург
2016**

Симпозиум организован
Физико-техническим институтом им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
и
Санкт-Петербургским национальным исследовательским Академическим
университетом Российской академии наук

ПРИ СОДЕЙСТВИИ
ООО "НПФ "КВАНТ"

И ПРОВОДИТСЯ ПРИ ФИНАНСОВОЙ ПОДДЕРЖКЕ
Российского фонда фундаментальных исследований,

НПК «Инжект»

ООО «Специальные Системы. Фотоника»

Группы компаний МИЛОН

ООО «Сигм плюс»

ООО «Эльфолум»

ЗАО «ФТИ-Оптроник»

Председатель симпозиума Ж.И. Алферов

Организационный комитет		Программный комитет	
И. Н. Арсентьев, <i>председатель</i>	ФТИ им. Иоффе	И.С. Тарасов, <i>председатель</i>	ФТИ им. Иоффе
А. Е. Жуков, <i>сопредседатель</i>	СПбАУ РАН	А.Е. Жуков, <i>сопредседатель</i>	СПбАУ РАН
З. Н. Соколова, <i>секретарь</i>	ФТИ им. Иоффе	З.Н. Соколова, <i>секретарь</i>	ФТИ им. Иоффе
Н.С. Аверкиев (ФТИ им.Иоффе)		Л.Е. Воробьев (СПб ГПУ, СПб)	
А.Д. Бондарев (ФТИ им. Иоффе)		И.Н. Завестовская (ФИАН, Москва)	
В.В. Золотарев (ФТИ им. Иоффе)		С.В. Иванов (ФТИ им. Иоффе, СПб)	
О.И. Симчук (СПбАУ РАН)		П.С. Копьев (ФТИ им.Иоффе, СПб)	
М.В. Судьенкова (СПбАУ РАН)		В.В. Кочаровский (ИПФ РАН, Нижний Новгород)	
А.Н. Петрунов (ФТИ им. Иоффе)		О.Н. Крохин (ФИАН, Москва)	
М.Г. Растегаева (ФТИ им. Иоффе)		А.А. Мармалюк (НИИ «Полюс», Москва)	
И.С. Шашкин (ФТИ им. Иоффе)		Г.Т. Микаелян (ЗАО «Инжект», Саратов)	
		Ю.М. Попов (ФИАН, Москва)	
		Е.Л. Портной (ФТИ им. Иоффе, СПб)	
		В.А. Симаков (НИИ "Полюс", Москва)	
		Р.А. Сурис (ФТИ им. Иоффе, СПб)	
		В.М. Устинов (ФТИ им. Иоффе, СПб)	
		Г.П. Яблонский (Институт физики, Минск)	
		Ю.П. Яковлев (ФТИ им. Иоффе, СПб)	

Спонсоры



Российский фонд фундаментальных исследований



ООО «Специальные Системы. Фотоника»



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



ООО «Сигм Плюс»



ООО «Эльфолюм»



ЗАО «ФТИ-Оптроник»

Окрестности ФТИ им. А.Ф. Иоффе



Программа симпозиума

Вторник, 15 ноября 2016 года

Академический университет. Актовый зал

11:00–12:00	Регистрация, кофе
12:00	Ж.И. Алферов Открытие симпозиума
12:30	Р.А. Сурис <i>Квантовая механика — основа новейших и будущих информационных (и не только) технологий</i>
13:00–14:00	Обед

Мощные полупроводниковые лазеры

14:00	Н.А. Пихтин , Д.А. Веселов, К.Р. Аюшева, К.В. Бахвалов, Л.С. Вавилова, В.В. Васильева, А.В. Лютецкий, А.В. Рожков, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, И.С. Шашкин, М.А. Ладугин, А.А. Падалица, Ю.А. Рябоштан, А.А. Мармалюк, И.С. Тарасов <i>Высокоэффективные мощные непрерывные и импульсные лазерные диоды спектрального диапазона 1400–1600 нм</i>
14:20	А.А. Мармалюк , П.В. Горлачук, М.А. Ладугин, А.А. Падалица, Ю.Л. Рябоштан, Д.А. Веселов, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, И.С. Тарасов <i>Полупроводниковые лазеры со сверхузким волноводом</i>
14:40	В.А. Симаков <i>Современное состояние разработки полупроводниковых источников излучения для перспективных лазерных информационных систем</i>
15:00	С.О. Слипченко , А.А. Подоскин, О.С. Соболева, Н.А. Пихтин, В.В. Васильева, Д.Н. Романович, Т.А. Багаев, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, В.А. Симаков, И.С. Тарасов <i>Лазеры-тиристоры, как интегральные источники мощного импульсного лазерного излучения</i>
15:20	М.А. Ладугин , А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, А.В. Лобинцов, Ю.В. Курнявко, М.Б. Успенский, С.М. Сапожников, А.И. Данилов, А.В. Подкопаев <i>Решетки лазерных диодов на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs с КПД выше 60%</i>
15:40	Ю.Л. Копылов , В.В. Безотосный, А.Ю. Канаев, А.Л. Коромыслов, В.Б. Кравченко, О.Н. Крохин, К.В. Лопухин, С.Л. Лысенко, М.А. Панков, Ю.М. Попов, И.М. Тупицын, Е.А. Чешев <i>Эффективный лазерный материал на основе керамики YAG:(Nd,Yb) с системой диодной лазерной накачки</i>
16:00	Кофе

Квантово-каскадные лазеры

16:20	Ф.И. Зубов , А.В. Иконников, С.В. Морозов, Р.А. Хабибуллин, Г.Э. Цырлин, А.Е. Жуков <i>Разработка и исследование терагерцового (3 ТГц) квантово-каскадного лазера на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур</i>
16:40	Л.А. Скворцов , П.И. Абрамов, Е.В. Кузнецов, Е.М. Максимов, А.П. Шкуринов <i>Квантово-каскадные лазеры в досмотровых системах</i>
17:00	Л.А. Скворцов , П.И. Абрамов, Е.В. Кузнецов <i>Применение квантово-каскадных лазеров в системах инфракрасного противодействия.</i>

Среда, 16 ноября 2016 года

Академический университет. Актовый зал

Новые конструкции полупроводниковых лазеров

11:00	А.Е. Жуков , А.Ф. Зубов, Ю.М. Шерняков, М. В. Максимов, А.А. Липовский, А.С. Паюсов, Э.И. Моисеев, Ю.В. Полубавкина, Г.Э. Цырлин, Л.В. Асрян, Е.С. Семенова <i>Подавление волноводной рекомбинации и улучшение лазерных характеристик с помощью асимметричных барьерных слоев</i>
11:20	А.А. Дубинов , В.Я. Алешкин, Н.В. Байдусь, З.Ф. Красильник, К.Е. Кудрявцев, С.М. Некоркин, А.В. Новиков, Д.А. Павлов, И.В. Самарцев, Е.В. Скороходов, А.А. Сушков, А.Г. Фелелов, М.В. Шалеев, П.А. Юнин, Д.В. Юрасов, А.Н. Яблонский <i>Лазерный диод GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами InGaAs, выращенный на неотклоненной подложке Ge/Si(001)</i>
11:40	А.А. Дубинов , Н.В. Байдусь, Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин, А.В. Рыков, В.Я. Алешкин, Д.А. Колпаков, И.В. Самарцев, А.А. Афоненко <i>Метод уменьшения расходимости излучения GaAs/AlGaAs лазера с InGaAs квантовыми ямами</i>
12:00	Н.Ю. Гордеев , А.С. Паюсов, Ю.М. Шерняков, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, А.А. Серин, М.В. Максимов, А.Е. Жуков <i>Эффективная пространственная селекция поперечных мод в торцевых полупроводниковых лазерах</i>
12:20	Кофе

Применение полупроводниковых лазеров

12:40	В.Е. Бугров , Е.С. Колодезный, А.Ю. Егоров, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, Ю.В. Соловьев, М.А. Одноблюдов <i>Нанопотонные компоненты для создания полностью оптических аналогово-цифровых преобразователей</i>
13:00	В.В. Кабанов <i>Полупроводниковые модули в основе высокоскоростных активно-импульсных систем</i>
13:20	Компания ООО «Специальные Системы. Фотоника»

Полупроводниковые лазеры видимого и УФ диапазонов

13:40	Е.В. Луценко , А.Г. Войнилович, Е.В. Муравицкая, Г.П. Яблонский, А. Alyamani, М. Aljohani, А. Aljariwi, С.В. Сорокин, И.В. Седова, С.В. Гронин, С.В. Иванов <i>Лазерные конвертеры зеленого - желтого диапазона спектра</i>
14:00	В.Н. Жмерик , Д.В. Нечаев, А.А. Торопов, Е.А. Европейцев, Е.В. Луценко, Н.В. Ржеуцкий, С. Рувимов, В.И. Козловский, С.В. Иванов <i>Управление морфологией активных областей в источниках спонтанного и лазерного ультрафиолетового излучения на основе AlGaN гетероструктур</i>
14:20	М.С. Леоненя , Е.В. Луценко, Д.И. Бабуськин, А.У. Alyamani, L.M. Alanazi, Г.П. Яблонский <i>Лазер со случайной генерацией «белого» излучения в системе микропорошков полупроводников ZnCdSSe</i>
14:40	Обед

15:00–17:30

Стендовая секция

18:00	Конференционный ужин
-------	----------------------

Четверг, 17 ноября 2016 года
ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Зал. В.Е. Голанта, корпус «Туман»

10:00–13:00	Экскурсия
Вертикально-излучающие и дисковые лазеры. Фотоприемники.	
13:00	А.Ю. Егоров, А.Г. Гладышев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, А.В.Бабичев, S. Mikhailov, V. Iakovlev, A. Sirbu <i>Быстродействующие вертикально-излучающие лазеры диапазона 1550 нм</i>
13:20	М.А. Калитеевский, К.А. Иванов, А.Р. Губайдуллин, C. Symonds, J. Bellessa <i>Усиление спонтанной эмиссии в лазерах на таммовских плазмонах</i>
13:40	М.А. Ройз, А.Н. Именков, А.Н. Баранов, Ю.П. Яковлев, А.М. Монахов <i>Сдвоенные полупроводниковые дисковые лазеры среднего ИК диапазона ($\lambda \sim 2,28$ мкм) на модах шепчущей галереи</i>
14:00	И.А. Андреев, Н.Д. Ильинская, Г.Г. Коновалов, Е.В. Куницына, В.В. Романов, Ю.П. Яковлев <i>Высокоэффективные быстродействующие фотодиоды для регистрации ИК лазерного излучения</i>
Получение и исследование полупроводниковых лазерных структур	
14:20	Д.А. Веселов, И.С. Шашкин, З.Н. Соколова, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов <i>Сравнительный анализ внутренних оптических потерь в мощных лазерах на основе GaAs (1.0 — 1.1 мкм) и InP (1.4 — 1.6 мкм)</i>
14:40	Л.А. Кулакова, Н.С. Аверкиев, А. Губенко, А.В. Лютецкий, И.С. Тарасов <i>Поляризационные свойства наноразмерных гетеролазеров</i>
15:00	Кофе

15:20	В.А. Соловьев , М.Ю. Чернов, П.Н. Брунков, А.А. Ситникова, Б.Я. Мельцер, А.Н. Семёнов, С.В. Иванов <i>Эффективная комнатная фотолюминесценция в среднем ИК диапазоне</i>
15:40	А.С.Леньшин , П.В. Середин, А.В. Федюкин, Худер Абдульджаббар Рияд Худер, И.Н. Арсентьев, И.С. Тарасов <i>Получение пористого арсенида галлия методом электрохимического травления</i>
16:00	М.Д. Шарков , М.Е. Бойко, А.М. Бойко, С.Г. Конников <i>МУРР-исследования сверхрешетки в фосфиде индия</i>
16:20	Ю.А. Кудрявцев <i>Особенности послойного анализа полупроводниковых квантово-размерных гетероструктур методом ВИМС</i>
16:40	В.Н. Павловский , И.Е.Свитенков, Е.В. Луценко, Г.П. Яблонский, А.В. Мудрый, В.Д. Живулько, О.М. Бородавченко, М.V. Yakushev, R.W. Martin <i>Стимулированное излучение пленок $Cu(In, Ga)Se_2$ и его использование для оценки их структурного совершенства</i>

Пятница, 18 ноября, 2016 года
ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Зал. В.Е. Голанта, корпус «Туман»

Теоретические аспекты полупроводниковых лазеров

11:00	Вл.В. Кочаровский , Е.Р. Кочаровская, В.В. Кочаровский <i>Конкуренция однонаправленного и модового сверхизлучения при импульсной и непрерывной накачке брэгговских гетероструктур</i>
11:20	Е.А. Аврутин , Б.С. Рывкин <i>Механизмы потерь в полупроводниковых лазерах при высоких уровнях импульсной накачки: двухфотонное поглощение и накопление носителей за счёт протекания тока</i>
11:40	А.В. Савельев , С.С. Коноплев, В.В. Коренев, Ю.М. Шерняков, М.В. Максимов, А.Е. Жуков <i>Распределение носителей заряда в активной области лазера с квантовыми точками</i>
12:00	А.А. Афоненко , Д.В. Ушаков <i>Увеличение мощности излучения лазерных гетероструктур на основе GaAs/AlGaAs за счет введения дополнительной КЯ</i>
12:20	Н.В. Павлов , А.Г. Зегря, А.Е. Романов, Г.Г. Зегря <i>Влияние внутризонного поглощения излучения на пороговые характеристики InGaAsP/InP гетеролазеров ($\lambda=1,3 - 1,55$ мкм)</i>
12:40	В.П. Дзюба , А.В. Амосов, Ю.Н. Кульчин <i>Квантовые состояния экситонов и спектры фотolumинесценции наночастиц SiO₂ при различных спектрах возбуждения</i>
13:00	Кофе

Различные конструкции полупроводниковых лазеров

13:20	В.П. Дураев , С.В. Медведев <i>Перестраиваемые одночастотные полупроводниковые лазеры на основе двухпроходного усилителя</i>
13:40	М.С. Буяло , И.М. Гаджиев, А.Ю. Егоров, Н.Д. Ильинская, А.А. Усикова, А.В. Лютецкий, И.О. Бакшаев, Е.Л. Портной <i>Генерация пикосекундных импульсов в двухсекционных лазерах на КЯ: влияние свойств насыщающегося поглотителя</i>
14:00	В.В. Золотарев , В.А. Капитонов, А.Ю. Лешко, Я.В. Лубянский, А.Н. Петрунов, З.Н. Соколова, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов <i>Полупроводниковые лазеры с выходным поверхностным распределенным брэгговским зеркалом высокого порядка дифракции</i>
14:20	Заккрытие симпозиума

Стендовая секция

1	А.А. Афоненко , М.С. Головчак, А.А. Маковский, В.М. Стецки, Д.В. Ушаков, Н.В. Дикарева, С.М. Некоркин, И.И. Чунин, Б.Н. Звонков <i>Ближнее поле излучения InGaAs/GaAs лазеров с вытекающей модой</i>
2	К.Р. Аюшева , Д.А. Веселов, Н.В. Воронкова, В.А.Стрелец, С.О.Слипченко, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов <i>Исследование генерации с двух уровней размерного квантования в лазерах на квантовой яме InGaAs</i>
3	В.В. Безотосный , О.Н. Крохин, В.А. Олещенко, В.Ф. Певцов, Ю.М. Попов, Е.А. Чешев <i>Влияние типа теплоотводящего элемента на тепловое сопротивление мощных лазерных диодов</i>
4	Ю.К. Бобрецова , Д.А. Веселов, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов <i>Исследование рабочих характеристик мощных полупроводниковых лазеров при низких температурах</i>
5	Л.И.Буров , А.С. Горбацевич, П.М. Лобацевич <i>Вклад спонтанного излучения в формирование основной моды излучения поверхностно излучающих полупроводниковых лазеров</i>
6	Л.И. Буров , А.С. Горбацевич, А.Н. Мигуцкий <i>Поляризационные характеристики неодимового лазера с неоднородной поперечной диодной накачкой</i>
7	Л.В. Данилов , А.Г. Зегря, В.Е. Бугров, Г.Г. Зегря <i>Влияние кулоновского взаимодействия на время жизни электронов и дырок в лазерных гетероструктурах с квантовыми ямами</i>
8	Н.В. Дикарева , С.М. Некоркин, И.И. Чунин, Б.Н. Звонков, А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков <i>Влияние длины резонатора на энергетические характеристики GaAs лазеров с увеличенной активной областью и выходом излучения через подложку</i>
9	А.В. Жаботинский , П.В. Середин, А.В. Федюкин, И.Н. Арсентьев, И.С. Тарасов, Tatiana Prutskij, Harald Leiste, Monika Rinke <i>Исследования структурных особенностей и оптических свойств разноориентированных подложек GaAs(100) для лазерных гетероструктур</i>
10	А.Л. Коромыслов , В.В. Безотосный, М.В. Горбунков, В.Г. Тункин, Е.А. Чешев <i>Механизм двухволновой генерации в Nd:YLF-лазере с пассивным затвором Cr⁺⁴:YAG при продольной диодной накачке</i>
11	Я.В. Левицкий , М.И. Митрофанов, В.П. Евтихийев <i>Управление селекцией мод кольцевых микролазеров</i>
12	Я.В. Лубянский , А.Д. Бондарев, И.П. Сошников, В.В. Золотарев, К.Р. Аюшева, К.П. Котляр, Н.А. Берт, И.С. Тарасов <i>Синтез пленок нитрида алюминия в качестве просветляющих покрытий мощных полупроводниковых лазеров 808-1060нм</i>
13	А.Н. Лукин , П.В. Середин, В.Е. Терновая, А.В. Федюкин, И.Н.. Арсентьев, А.Д. Бондарев,, Я.В. Лубянский, И.С.Тарасов <i>Исследования тонких пленок AlN, выращенных методом ионно-плазменного напыления на подложках GaAs с различной ориентацией</i>

14	М.И. Митрофанов , С.Н. Родин, Я.В. Левицкий, С.И. Трошков, А.В. Сахаров, В.В. Лундин, В.П. Евтихийев <i>Травление сфокусированным ионным пучком Ga подложек Si₃N₄/GaN для субмикронной селективной эпитаксии</i>
15	Е.А. Михайлюк <i>Электрофизические свойства полупроводниковых гетероструктур In₂Te₃/InAs и In₂xGa_{2(1-x)}Te₃/InAs</i>
16	А.А. Подоскин , О.С. Соболева, Н.А. Пихтин, Д.А. Веселов, В.В. Золотарев, К.В. Бахвалов, В.В. Васильева, Т.А. Багаев, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, В.А.Симаков, И.С. Тарасов, С.О. Слипченко <i>Генерация субнаносекундных лазерных импульсов AlGaAs/GaAs лазерами-тиристорами</i>
17	Г.И. Рябцев , М.В. Богданович, А.П. Войтович, В.С. Калинов, Т.В. Безъязычная, К.И. Ланцов, К.В. Лепченков, А.Л. Пушкарчук, А.Г. Рябцев <i>Коррекция профилей пучков мощных твердотельных лазеров и усилителей с поперечной диодной накачкой</i>
18	П.В. Середин , И.Н. Арсентьев, Tatiana Prutskij <i>Структурные и оптические исследования гетероструктур на основе твердых растворов GaInP₂ с упорядочением</i>
19	О.С. Соболева , А.А. Подоскин, С.О. Слипченко, В.С. Юферев, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов <i>Численное 2D моделирование динамики электро-оптических процессов в гетероструктурах лазера-тиристора</i>
20	З.Н. Соколова , Л.В. Асрян, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов <i>Обобщённая теоретическая модель для полупроводниковых лазеров на квантовых ямах</i>
21	Н.П. Тарасюк , Е.В. Луценко, А.А. Гладышук <i>Фактор оптического ограничения гетероструктур на основе квантовых ям AlGaIn с варизонным волноводом для оптически накачиваемых лазеров</i>
22	В.Е. Терновaя , П.В. Середин, И.Н. Арсентьев, А.В. Жаботинский, И.С. Тарасов, Tatiana Prutskij, Harald Leiste, Monika Rinke <i>Эпитаксиальные твердые растворы Al_xGa_{1-x}As:Mg с различным типом проводимости</i>
23	Ю.Ю. Худяков , П.В. Середин, А.С. Леньшин, А.М. Мизеров, Д.С. Золотухин, В.Е. Терновaя <i>Гетероструктуры GaN-por-Si/Si полученные методом молекулярно-пучковой эпитаксии</i>
24	И.С. Шашкин , Д.А. Веселов, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, И.С. Тарасов <i>Одномодовый полупроводниковый лазер ($\lambda = 1.06$ мкм). Моделирование и эксперимент</i>

Тезисы докладов

Высокоэффективные мощные непрерывные и импульсные лазерные диоды спектрального диапазона 1400-1600 нм

Н.А.Пихтин¹, Д.А.Веселов¹, К.Р.Аюшева¹, К.В.Бахвалов¹, Л.С.Вавилова¹, В.В.Васильева¹,
А.В.Лютецкий¹, А.В.Рожков¹, С.О.Слипченко¹, З.Н.Соколова¹, И.С.Шашкин¹,
М.А.Ладугин², А.А.Падалица², Ю.А.Рябоштан², А.А.Мармалюк², И.С.Тарасов¹

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

² ООО «Сигм плюс», 117342, г. Москва, ул. Введенского, 3

эл. почта: nike@hpld.ioffe.ru

Лазеры безопасного для глаз спектрального диапазона 1400-1600 нм становятся все более востребованными для широкого круга важных задач, таких как дальнометрия, телекоммуникации, накачка твердотельных лазеров, медицинские и специальные применения. В этой работе мы провели исследования по оптимизации конструкции лазерной наногетероструктуры для достижения максимальной оптической мощности и эффективности лазерных диодов на её основе.

В качестве основного направления оптимизации была выбрана концепция мощных полупроводниковых лазеров с расширенным асимметричным волноводом, которая уже хорошо зарекомендовала себя для лазеров диапазона 900-1100 нм. Одним из широко известных решений [1] для повышения внутреннего квантового выхода является изготовление волновода из материала AlGaInAs, обеспечивающего лучшее ограничение электронов и использование напряжённых квантовых ям в активной области с большим фактором оптического ограничения (1-2%) для снижения Оже-рекомбинации.

В связи с особенностями системы твердых растворов AlGaInAs/InP в гетероструктуре лазера отсутствует энергетический барьер для электронов на границе волновод – р-эмиттер. Подробные исследования [2], в особенности спектров спонтанного излучения, различных слоёв гетероструктуры позволили зарегистрировать спектральную линию спонтанного излучения эмиттеров. По-видимому, в таком лазере электроны, делокализованные из активной области, свободно утекают через р-волновод в р-эмиттер.

Для борьбы с этим явлением был использован известный метод [3,4]: установить широкозонный слой AlInAs для создания энергетического барьера на пути носителей заряда. Для исследований были изготовлены несколько лазерных гетероструктур, отличающихся положением и количеством энергетических барьеров.

Наилучшие результаты продемонстрировала гетероструктура, содержащая один барьер на границе волновод – р-эмиттер. Лазеры на основе гетероструктуры с классическим [3,4] подходом к размещению барьеров (вплотную к активной области) продемонстрировали сравнительно низкие характеристики.

В результате проведенного комплекса работ в изготовленных мезаполосковых лазерах с апертурой 100 мкм при температуре теплоотвода 25⁰С достигнуты оптические мощности 4 Вт и 12 Вт в непрерывном и импульсном (100 нс / 1 кГц) режимах генерации соответственно, и максимальный КПД 40% в непрерывном режиме.

Литература

- [1] Piprek J., White J.K., SpringThorpe A.J. IEEE J. Quantum Electron., 38 (9), 1253 (2002).
- [2] Д.А. Веселов, И.С. Шашкин, К.В. Бахвалов, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, М.Г. Растегаева, С.О. Слипченко, Е.А. Бечвай, В.А. Стрелец, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов, ФТП, 50 (9), с.1247 (2016).
- [3] A.E. Zhukov, N.V. Kryzhanovskaya, F.I. Zubov, Y.M. Shernyakov, M.V. Maximov, E.S. Semenova, K. Yvind, L.V. Asryan. Appl. Phys. Lett., 100, 021 107 (2012).
- [4] T.Garrod, D.Olson, M.Klaus, C.Zenner, C.Galstad, L.Mawst, D.Botez. Appl.Phys.Lett., 105, 071 101 (2014).

Полупроводниковые лазеры со сверхузким волноводом

А.А. Мармалюк¹, П.В. Горлачук¹, М.А. Ладугин¹, А.А. Падалица¹, Ю.Л. Рябоштан¹,
Д.А.Веселов², Н.А.Пихтин², С.О.Слипченко², И.С.Тарасов²

¹ АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, 117342, ул. Введенского, 3, корп. 1
² ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26
эл. почта: almarm@mail.ru

В последнее время наметилась тенденция перехода лазерных устройств ближнего ИК-диапазона в условно безопасную для глаз область с длинами волн излучения, превышающими 1,4 мкм, которая затронула и полупроводниковые лазеры, предназначенные для работы в системах, допускающих контакт излучения с глазом человека. В этой связи представляет значительный интерес поиск путей повышения выходной мощности полупроводниковых лазеров, генерирующих в области длин волн 1,5-1,6 мкм. Для решения указанной задачи хорошо зарекомендовал себя подход по использованию гетероструктур с расширенными волноводами для снижения внутренних оптических потерь. Так, показано повышение выходной мощности лазеров с расширенными волноводами, излучающих на длинах волн 800-850 нм, 940-1060 нм и рассматриваемого диапазона 1500-1600 нм. Вместе с тем, в ряде работ установлено, что в приборах со значительным тепловыделением начинают получать преимущества лазеры с узким волноводом, который способствует снижению последовательного и теплового сопротивления, играющих ключевую роль в таких излучателях. Действенность такого подхода продемонстрирована при создании лазерных диодов с длиной волны излучения 800-810 нм, предназначенных для накачки твердотельных лазеров на основе YAG:Nd. Настоящая работа посвящена исследованию потенциала гетероструктур с узкими волноводами для создания мощных лазерных излучателей спектрального диапазона 1500-1600 нм, для которых характерен меньший КПД и более низкие значения характеристической температуры, а, следовательно, и более сильная зависимость выходных характеристик от температуры активной области.

Анализируя полупроводниковые материалы (GaInAsP, AlGaInAs, InP), пригодные к созданию лазерных диодов рассматриваемого спектрального диапазона, легко видеть, что теплопроводность InP существенно превышает аналогичные значения для твердых растворов GaInAsP и AlGaInAs. Отсюда следует вывод о том, что максимальное сужение волновода будет обеспечивать лучший теплоотвод и способствовать повышению выходной мощности. Использование узкого волновода приводит к тому, что значительная часть электромагнитного излучения будет распространяться по эмиттерным слоям. Используя профильное легирование, возможно снижение связанных с этим внутренних оптических потерь.

Гетероструктуры AlGaInAs/InP выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии. Ширина волновода варьировалась в пределах 0,05-0,1 мкм. Активная область состояла из двух квантовых ям InGaAs, фактор оптического ограничения которых был приблизительно равным фактору оптического ограничения, характерному для гетероструктур с расширенным волноводом. Изучались выходные характеристики лазеров с шириной мезаполоска 100 мкм в непрерывном и импульсном режимах работы.

Установлено, что лазерные диоды на основе гетероструктур с узкими и сверхузкими волноводами позволяют достигнуть выходной мощности 3,5-3,8 Вт при непрерывном режиме работы и 15-20 Вт в импульсном режиме. Показано, что улучшение условий отвода тепла от активной области лазерного диода способствует реализации более высокой выходной мощности, несмотря на увеличение внутренних оптических потерь.

Современное состояние разработки полупроводниковых источников излучения для перспективных лазерных информационных систем

В.А. Симаков

Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Москва, 117342,
ул. Введенского, 3
эл. почта: *simakov2002@yahoo.com*

В настоящей работе изложены результаты работ по разработке полупроводниковых источников излучения для перспективных лазерных информационных систем отражающие современный уровень российской элементной базы ориентированной на надежную работу в жестких климатических и эксплуатационных условиях. Основными направлениями нашей деятельности в этот период являлись разработка и поставка:

- мощных импульсных полупроводниковых лазеров с высокой энергетической яркостью для систем управления скоростными объектами;
- широкополосных (1-12 ГГц) волоконно-оптических передающих и приемных модулей для управления фазированными антенными решетками;
- цифровых до 120 Мбит/с волоконно-оптических передающих и приемных модулей для локальных информационных сетей мобильных пунктов управления;
- высокостабильных источников накачки космических атомных стандартов частоты системы ГЛОНАСС;
- суперлюминесцентных излучателей для волоконно-оптических гироскопов,
- источников накачки активных элементов малогабаритных всепогодных твердотельных лазерных дальномеров.

Ведется проработка в области создания квантово-каскадных лазеров среднего ИК-диапазона и терагерцевых излучателей.

Лазеры-тиристоры, как интегральные источники мощного импульсного лазерного излучения

**С.О. Слипченко¹, А.А. Подоскин¹, О.С. Соболева¹, Н.А. Пихтин¹, В.В. Васильева¹,
Д.Н. Романович¹, Т.А. Багаев², М.А. Ладугин², А.А. Мармалюк², В.А. Симаков²,
И.С.Тарасов¹**

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

² НИИ "Полюс" им. М.Ф. Стельмаха, Москва, 117342, Введенского, 3, корп.1

эл. почта: serghpl@mail.ioffe.ru

Рассмотрены основные принципы создания источников мощного импульсного лазерного излучения на основе низковольтных тиристорных гетероструктур. В рамках разработанных моделей представлены основные механизмы формирования нелинейности ВАХ и блокирующего напряжения, а также факторы, определяющие скорость переходных процессов в гетероструктурах лазеров-тиристоров. Продемонстрированы излучательные характеристики лазеров-тиристоров при генерации мощных лазерных импульсов, а также рассмотрены принципы генерации импульсных последовательностей в МГц диапазоне частот. Показано, что пиковая мощность с одиночного излучателя с апертурой 200мкм достигала 50Вт. Рассмотрены характеристики многоэлементных интегральных и гибридных сборок лазеров-тиристоров. Показано, что увеличение излучающей апертуры позволяет кратно повысить выходную пиковую мощность. Для линейки лазеров-тиристоров из трех элементов пиковая мощность достигала 114Вт для импульсов длительностью 120нс и блокирующего напряжения 13В. Вертикальная интеграция с лазерными диодами продемонстрировала высокую эффективность работы лазера-тиристора как токового ключа. Продемонстрированная пиковая мощность лазерного диода достигала 85Вт (апертура 800мкм) для импульсов длительностью 140нс и блокирующего напряжения лазера-тиристора 11В.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-01560)

Решетки лазерных диодов на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs с КПД выше 60 %

**М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, А.В. Лобинцов, Ю.В. Курнявко,
М.Б. Успенский, С.М. Сапожников, А.И. Данилов, А.В. Подкопаев**
АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, 117342, ул. Введенского, 3, корп. 1
эл. почта: *maximladugin@mail.ru*

Одним из ключевых направлений развития твердотельной лазерной (ТТЛ) техники на ближайшее десятилетие является переход от ламповой накачки активных сред к накачке полупроводниковыми лазерами, что обусловлено их высоким коэффициентом полезного действия, точной подстройкой длины волны под полосу поглощения, миниатюрностью и повышенной надежностью работы. Для успешного создания конкурентоспособной ТТЛ техники необходима, в первую очередь, разработка полупроводниковых лазерных линеек и решеток (ЛЛД и РЛД) с высокой выходной мощностью и длительным сроком службы, что естественным образом приводит к необходимости дальнейшего совершенствования конструкции и технологии. При этом наиболее важной и сложной задачей является достижения максимально возможного коэффициента полезного действия РЛД.

В настоящей работе описана перспективная конструкция излучателя и представлены главные достижения основных этапов технологии изготовления мощных лазеров – технологии изготовления эпитаксиальных гетероструктур, технологии формирования активного излучающего элемента, технологии сборки лазерных линеек и решеток.

В первой части представленного исследования описана конструкция эпитаксиальной гетероструктуры системы материалов AlGaAs/GaAs, предназначенной для изготовления на ее основе ЛЛД и РЛД спектрального диапазона 800-810 нм. В качестве метода получения выбрана МОС-гидридная эпитаксия – ведущий метод производства гетероструктур в промышленных масштабах. Обсуждены преимущества и недостатки различных вариантов конструкций волноводных слоев, квантоворазмерной области на основе AlGaAs, GaAsP и InAlGaAs. Предложен подход наиболее целесообразного легирования, волноводных, эмиттерных и контактных слоев в зависимости от предъявляемых требований.

Вторая часть работы посвящена разработке конструкции и технологии изготовления активного элемента – ЛЛД длиной 5 мм и 10 мм. Установлены ключевые стадии технологического процесса (такие как формирование низкоомных контактов, повышение лучевой прочности выходных граней и т.д.), влияющие на предельные характеристики изготавливаемых изделий. Выявлены перспективные пути создания активных элементов с выходными мощностями излучения на уровне мировых достижений.

В заключение работы описана технология сборки ЛЛД и РЛД с использованием припоя на основе золото-олово, которая позволила заметно снизить омическое сопротивление и тепловую нагрузку на весь излучатель.

Совокупным результатом всех вышеперечисленных действий стало повышение внутренней квантовой и внешней дифференциальной эффективности на 5-15%, снижение последовательного сопротивления и рабочего напряжения на 5-10%. Полный коэффициент полезного действия ЛЛД, работающих в квазинепрерывном режиме накачки ($\tau_{\text{имп}} \sim 200$ мкс, $\nu_{\text{имп}} \sim 20$ Гц), удалось увеличить до 65-68%, а РЛД – до 55-61%.

Эффективный лазерный материал на основе керамики YAG : (Nd,Yb) с системой диодной лазерной накачки

Ю.Л. Копылов³, В.В. Безотосный¹, А.Ю. Канаев², А.Л. Коромыслов¹, В.Б. Кравченко³,
О.Н. Крохин¹, К.В. Лопухин³, С.Л. Лысенко², М.А. Панков², Ю.М. Попов³,
И.М.Тупицын⁴, Е.А. Чешев¹

¹ ФИАН им. П.Н.Лебедева, Москва, Ленинский 53,

² ФКП «ГЛП «Радуга»,

³ Фрязинский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Фрязино, Введенского,1

⁴ НИЯУ МИФИ, Москва, Каширское шоссе д.31.

эл. почта: ylk215@yandex.ru

Разработан комплекс технологий получения оптических керамик больших размеров лазерного качества на основе алюмоиттриевого граната легированного неодимом и иттербием. Особенностью технологий является применение в процессе спекания специально подобранных спекающих добавок испаряющихся (почти) к окончанию процесса. Это дает возможность получать высококачественные керамики без применения дорогостоящих процедур горячего изостатического прессования. Выполнена оценка лазерного качества полученных керамик методом измерения зависимости порога лазерной генерации от длины резонатора при продольной диодной накачке в условиях синхронизации поперечных мод. Основы метода описаны в работах [1,2]. Сравнение с эталонным образцом керамики фирмы Konoshima Chemical Co., Ltd позволяет утверждать, что лазерное качество полученной керамики практически не уступает качеству эталонного образца. Для построения эффективных лазерных систем на основе оптических керамик разработаны линейки лазерных диодов (ЛЛД) на длины волн 808, 940,980 нм, мощностью не ниже 100 Вт при частоте следования импульсов 100 Гц длительностью 300 мкс. На основе этих ЛЛД получены решетки лазерных диодов (РЛД) с числом ЛЛД 40 в каждой РЛД и суммарной мощностью 4000 Вт.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, Соглашение № 14.575.21.0047. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57514X0047, Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 42 «Фундаментальные проблемы фотоники и физика новых оптических материалов», Программы фундаментальных исследований отделения физики РАН, Учебно-научного комплекса ФИАН.

Литература

- [1] Bezotosnyi V V, Cheshev E A, Gorbunkov M V, Koromyslov A L, Kostyukov P V, Krivonos M S, Popov Y M, Tunkin V G Behavior of threshold pump power of diode end-pumped solid-state lasers in critical cavity configurations, 2015 *Laser Phys. Lett.* **12** (2), 025001.
- [2] Bezotosnyi V V, Krokhin O N, Koromyslov A L Cheshev E A, Kopylov Y L, Kravchenko V B, Lopukhin K V, Tupizin I M Generation characteristics of YAG:Nd laser with YAG: Cr⁴⁺ passive lock on the base of oxide ceramics. 2015 Proceedings of V symposium on coherent optical radiation of semiconductor compounds and structures. Moscow-Zvenigorod, 23-26 November .

Разработка и исследование терагерцового (3 ТГц) квантово-каскадного лазера на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур

Ф.И. Зубов¹, А.В. Иконников², С.В. Морозов², Р.А. Хабибуллин³, Г.Э. Цырлин¹,
А.Е. Жуков¹

¹ СПбАУ РАН, Санкт-Петербург, 194021, Хлопина, 8/3, литер А

² ИФМ РАН, Нижний Новгород, 603950, ГСП-105

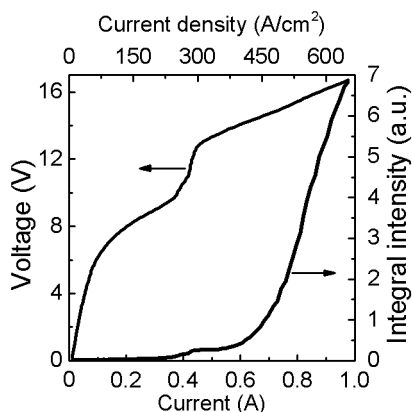
³ ИСВЧПЭ РАН, Москва, 117105, Нагорный проезд, 7, стр.5

эл. почта: fedyazu@mail.ru

Терагерцовое излучение, частота которого лежит в диапазоне от 0.1 до 10 ТГц, имеет огромного значение в различных направлениях науки и техники, среди которых спектроскопия, передача данных, изучение биологических объектов и др. Перспективными источниками данного излучения являются квантово-каскадные лазеры (ККЛ), что определяется их компактностью, высокой мощностью, яркостью и относительно невысокой стоимостью. Хотя результаты исследования первого ТГц ККЛ были опубликованы в 2002 г. [1], о достижении лазерной генерации в таких приборах, созданных в России, насколько нам известно, до сих пор не сообщалось.

В настоящей работе для создания 3 ТГц ККЛ нами была синтезирована методом молекулярно-пучковой эпитаксии гетероструктура на основе системы материалов AlGaAs/GaAs, содержащая 228 каскадов с резонансно-фононным дизайном. Отдельный каскад состоял из трех туннельно связанных квантовых ям (КЯ): одна широкая КЯ – инжектор/экстрактор и две узкие КЯ, излучающие 3 ТГц фотон. Синтез гетероструктуры контролировался при помощи рентгеновской дифракции, а также микрофотолюминесценции при низких температурах в сочетании с моделированием спектров излучения.

Далее создавался двойной металлический волновод, заключающий в себе активную область (каскадные слои). Постростовая обработка включала термокомпрессионное соединение исходной полупроводниковой пластины эпитаксиальной стороной к проводящей подложке n⁺-GaAs с использованием металлической прослойки Au-Au. Посредством травления исходной подложки GaAs до активной области, а также электронной литографии и сухого травления активной области сквозь маску верхней металлизации создавались полосы шириной 100 мкм. Посредством скалывания приборам придавалась длина около 1.5 мм.



Измерения вольт-амперной и ватт-амперной характеристик образцов осуществлялись в импульсном режиме накачки при температуре жидкого гелия. Зависимость интенсивности излучения от тока накачки имела характерный резкий, пороговый рост начиная с 0.6 А (см. рис), что позволяет предположить переход излучателя в режим генерации. Напряжение начала резкого роста интенсивности, около 13 В, находится в соответствии с расчетным значением электрического поля выстраивания уровней каскада, соответствующего порогу генерации. Также были проведены эксперименты

по исследованию циклотронного резонанса в образцах ККЛ, которые показали, что оптическое излучение прибора соответствует 100 мкм (3 ТГц).

Литература

[1] R. Koehler et al., Nature 417, 156 (2002).

Квантово-каскадные лазеры в досмотровых системах

Л.А. Скворцов¹, П.И. Абрамов¹, Е.В. Кузнецов¹, Е.М. Максимов², А.П. Шкуринов³

1)АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, 117342, Введенского, 3, корп. 1

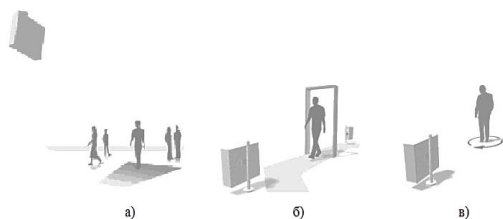
2)ФСБ России

3)МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

эл.почта: lskvortsov@gmail.com

Разработка компактных неинвазивных систем дистанционного досмотра для обнаружения взрывчатых веществ (ВВ) имеет первостепенную важность в связи с возросшей вероятностью террористических атак с их применением. В общем случае можно выделить три наиболее распространенных сценария досмотра физических лиц.

Возможные сценарии дистанционного досмотра показаны на рисунке:



а) досмотр отдельно стоящих лиц на большом расстоянии; б) скрининг движущегося объекта в условиях массового пассажиропотока одновременно с фронтальной/ боковой стороны; в) всесторонний (360°) досмотр.

Целью данной работы является обоснование возможности построения досмотровых систем для рассмотренных сценариев, благодаря появившимся инновационным технологическим решениям в части создания квантово-каскадных лазеров и достижениям в области анализа и построения мульти/гиперспектральных изображений.

В настоящей работе рассматриваются досмотровые системы, использующие технику активного формирования спектральных изображений, которая подразумевает дополнительное воздействие на объект излучения внешнего источника, например, лазерного. При этом каждая из них содержит, как минимум, три информационных канала в разных частотных диапазонах: VIS, MIR и THz. Применение терагерцового излучения обусловлено его способностью проникать сквозь непрозрачные непроводящие материалы, что делает возможным обнаружение скрытых ВВ. В то же время регистрация рассеянного объектом излучения в среднем ИК диапазоне позволяет не только увеличить вероятность обнаружения ВВ, но и решить проблему связанную с выявлением лиц, представляющих потенциальную террористическую угрозу, например, имевшими ранее контакт с ВВ.

Наименование параметра	Сценарий		
	а)	б)	в)
Расстояние до объекта	> 20 м	> 50 см	< 50 см
Время досмотра области размером $100 \times 100 \text{ см}^2$	1 – 2 мин	1 – 2 с	> 10 с
Мощность эквивалентная шуму МФПУ (NEP)	$\sim 10^{-12} \text{ Вт}$		
Динамический диапазон, ТГц диапазон	$\sim 100 \text{ дБ}$	$\sim 50 \text{ дБ}$	$\sim 50 \text{ дБ}$
Чувствительность при детектировании следов ВВ	не менее 10 мкг/см^2		
Спектральный диапазон	(1,8 – 5) ТГц, не менее 4-х линий; (4 – 12) мкм, не менее 4-х линий.		
Пространственное разрешение в ТГц диапазоне	$\sim 1 \text{ см}$		
Средняя мощность ТГц ККЛ	> 1Вт	> 5 мВт	> 3 мВт
Средняя мощность ИК ККЛ	> 10 Вт	> 100 мВт	> 50 мВт

В таблице представлены предварительной оценки параметров систем дистанционного досмотра, полученные в результате проведенных расчетов и моделирования рассмотренных сценариев [1, 2].

Литература

- [1] С.В. Лупанов, В.А. Симаков, Л.А. Скворцов. Применение квантово-каскадных лазеров для дистанционного обнаружения следов взрывчатых веществ на поверхности тел. участием. Полупроводниковые лазеры: физика и технология, 4-й Всероссийский симпозиум с международным 2014 СПб, Россия.
- [2] Linden, K. J., and Neal, W. R. Terahertz Laser Based Standoff Imaging System, 2005.

Применение квантово-каскадных лазеров в системах инфракрасного противодействия

Л.А. Скворцов, П.И. Абрамов, Е.В. Кузнецов,

АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, 117342, Введенского, 3, корп. 1

эл.почта: lskvortsov@gmail.com

Последние разработки в области лазерных технологий сделали возможным применение лазеров в системах инфракрасного противодействия различного назначения. Хорошо известным примером таких систем являются так называемые направленные инфракрасные системы противодействия (DIRCM, *Directed Infrared Countermeasure*), устанавливаемые на борту самолетов для их защиты от управляемых ракет с инфракрасными головками самонаведения (ИК ГСН), а также используемые для подавления тепловизионных средств разведки, наблюдения и прицеливания (ТПС) [1].

Наиболее перспективным методом противодействия ИК ГСН и ТПС с двумерными матричными фотоприемными устройствами (МФПУ, ФРА) рассматривается их функциональное подавление («ослепление») излучением непрерывного или импульсного лазера, длина волны которого попадает в область чувствительности МФПУ [2].

Целью настоящей работы является обоснование возможности применения квантово-каскадных лазеров (ККЛ) среднего инфракрасного диапазона спектра для функционального подавления систем, чувствительных в этой спектральной области.

Пользуясь установленной в [2] эмпирической зависимостью радиуса области насыщения $x_{\text{нас}} = \sqrt[3]{4/\pi(I_{\text{об}}/I_{\text{нас}})}$ (в пикселях) от интенсивности излучения в плоскости ИК объектива $I_{\text{об}}$, в настоящей работе получено выражение для мощности лазерного излучения P_0 , необходимой для полного «ослепления» МФПУ:

$$P_0 = 4\pi S_0 I_{\text{нас}} x_{\text{нас}}^3 (1 - R) \tau_{\text{атм}} \tau_{\text{опт}}, \quad (1)$$

в котором S_0 – площадь лазерного пятна на расстоянии L от источника излучения; $R = 0,1$ – коэффициент отражения германия с нанесенным широкополосным просветляющим покрытием; $\tau_{\text{атм}} = 0,8$ – пропускание атмосферы на расстоянии $L = 2$ км при метеорологической дальности видимости 15 км; $\tau_{\text{опт}} = 0,9$ – пропускание ИК объектива. При расходимости лазерного излучения $\theta = 1$ мрад (FWHM), для матрицы на основе твердого раствора теллурида кадмия и ртути формата 256×256 и $I_{\text{нас}} = 10^2$ пВт/см² значение средней мощности лазерного излучения получается равным ~ 20 Вт, что хорошо согласуется с данными, полученными из независимых экспериментов [1].

Уже сейчас на базе технологии сведения пучков от отдельных лазеров и линеек на их основе (*Beam Combining*) созданы мультиспектральные ККЛ-модули, суммарная мощность излучения которых превышает 20 Вт [3]. В ближайшем будущем планируется получить ККЛ-системы с мощностью излучения в среднем ИК от 100 Вт до 1 кВт и с расходимостью близкой к дифракционной ($M^2 < 2$) [4]. Приведенные результаты позволяют предположить, что компактные мультиспектральные ККЛ-модули должны представлять несомненный интерес для перспективных систем ИК противодействия.

Литература

- [1] C.Willers, M.Willers, Proc. of SPIE **8543**, 85430M-1 (2012).
- [2] R.Schleijpen, J.Heuvel, A.Mieremet, B.Mellier, F.Putten, Proc. SPIE **6543**, 65431B (2007).
- [3] <http://www.pranalytica.com/core-technologies/quantum-cascade-lasers.php>
- [4] http://www.navysbir.com/14_2/133.htm

Подавление волноводной рекомбинации и улучшение лазерных характеристик с помощью асимметричных барьерных слоев

А.Е. Жуков¹, А.Ф. Зубов¹, Ю.М. Шерняков^{2,1}, М.В. Максимов^{1,2}, А.А. Липовский¹, А.С. Паюсов^{2,1}, Э.И. Моисеев¹, Ю.В. Полубавкина¹, Г.Э. Цырлин¹, Л.В. Асрян³, Е.С. Семенова⁴

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет РАН, Санкт-Петербург, 194021, Хлопина 8

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

³ Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia 24061, USA

⁴ DTU Fotonik, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, DK-2800, Denmark

эл. почта: zhukale@gmail.com

Исследованы лазерные диоды на основе квантовых ям (Al)GaAs/AlGaAs с длинами волн излучения в диапазоне 0.8...0.85 мкм. Продemonстрировано подавление рекомбинации в волноводном слое лазеров, содержащих асимметричные барьерные слои (АБС) GaInP и AlGaInAs. По сравнению с лазерами традиционной конструкции (с прямоугольным волноводом), лазеры с АБС демонстрируют увеличение характеристической температуры, улучшение линейности ватт-амперной характеристики и снижение поровой плотности тока.

Основные результаты

1. Использование АБС приводит к подавлению (в 1.4...1.5 раз) полосы излучения, обусловленной рекомбинацией носителей заряда в волноводе, наблюдаемой при больших плотностях накачки ($> 20 \text{ кА/см}^2$).

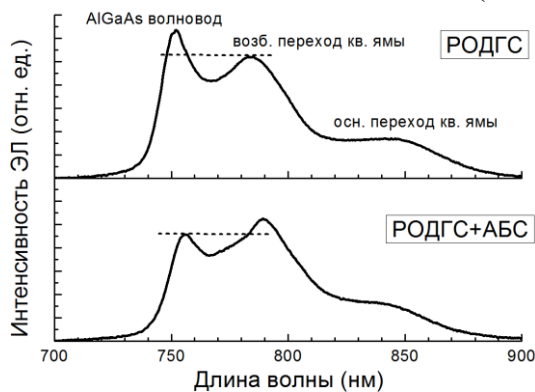


Рис. 1. Спектры излучения диодов длиной 0.1 мм при накачке 24 кА/см^2 .

2. Несимметричный характер пространственного распределения интенсивности волноводной люминесценции лазеров с АБС, наблюдаемый с помощью ближнепольной оптической спектроскопии, позволяет сделать вывод о способности АБС GaInP, примыкающего к квантовой яме со стороны n -эмиттера, подавлять транспорт дырок.
3. Использование АБС позволяет заметно снизить порог генерации (до 35%). Например, в лазерах с $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ волновом толщиной 0.8 мкм ($\lambda=808\text{ нм}$, $L=0.5 \text{ мм}$) пороговая плотность тока уменьшается с 880 до 650 А/см^2 .
4. Вследствие подавления нелинейности ВТАХ в лазерах с АБС имеет место снижение рабочего

тока. Этот эффект наиболее заметен при больших мощностях излучения. Например, в лазерах длиной 2 мм рабочий ток, требуемый для достижения мощности 8 Вт, снижается с 14.8 до 8.3 А.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 14-42-00006.

Лазерный диод GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами InGaAs, выращенный на неотклоненной подложке Ge/Si(001)

А.А. Дубинов^{1,2}, В.Я. Алешкин^{1,2}, Н.В. Байдусь³, З.Ф. Красильник^{1,2}, К.Е. Кудрявцев^{1,2},
С.М. Некоркин^{1,3}, А.В. Новиков^{1,2}, Д.А. Павлов², И.В. Самарцев³, Е.В. Скороходов¹,
А.А. Сушков², А.Г. Фефелов⁴, М.В. Шалеев¹, П.А. Юнин¹, Д.В. Юрасов^{1,2},
А.Н. Яблонский¹

¹ ИФМ РАН, Нижний Новгород, 603950, ГСП-105

² ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603950, пр. Гагарина, 23

³ НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603950, пр. Гагарина, 23/3

⁴ ФГУП «Салют», 603950, ул. Ларина, 7

эл. почта: sanya@ipmras.ru

Переход от медных проводов к оптическим межсоединениям в высокопроизводительных процессорах может быть осуществлен с использованием гибридных АЗВ5 гетеролазеров, совместимых с комплементарной металло-оксидной полупроводниковой технологией (CMOS) на кремнии [1]. Значительный прогресс был достигнут в создании лазеров на Si подложках с использованием гетероструктур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами InGaAs [2], а также с квантовыми точками InAs [3]. Практически во всех случаях рост III-V лазерных структур был осуществлен на кремниевых подложках, отклоненных на несколько градусов от оси [001], чтобы избежать формирования антифазных дефектов на границе полярного и неполярного материалов [4]. В то же время, существующие технологии изготовления кремниевых процессоров развиты для точно ориентированных подложек Si (001) с отклонением, не превышающим 0.5° [1]. Поэтому для интеграции АЗВ5 лазера с кремниевым резонатором на чипе предпочтительным является использование точно ориентированных подложек Si (001).

В настоящей работе создан и исследован лазер на основе GaAs/AlGaAs с тремя квантовыми ямами InGaAs, выращенными методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений на неотклоненной подложке Si (001) с буферным слоем Ge. На выращенных структурах формировались лазерные диоды с планарными контактами. Ширина волновода составляла 20 мкм, длина 2.7 мм. Пороговая плотность тока составила 460 А/см² при температуре жидкого азота (длина волны излучения 941 нм) и 5.5 кА/см² при комнатной температуре (длина волны излучения 992 нм) [5].

Таким образом, было продемонстрировано, что искусственные подложки с буферным слоем германия на кремнии могут быть сформированы с удовлетворительным состоянием поверхности (относительно низкая концентрация прорастающих дефектов, низкая среднеквадратичная шероховатость), и быть пригодными для роста качественных лазерных гетероструктур InGaAs/GaAs/AlGaAs с высокой квантовой эффективностью.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 14-12-00644).

Литература

- [1] C. Sun, et al, Nature 528, 534 (2015).
- [2] В.Я. Алешкин и др., Письма в ЖЭТФ 100, 900 (2014).
- [3] A.Y. Liu, et al, Appl. Phys. Lett. 104, 041104 (2014).
- [4] H. Kroemer, K.J. Polasko, S.C. Wright, Appl. Phys. Lett. 36, 763 (1980).
- [5] V.Ya. Aleshkin et al, Appl. Phys. Lett. 109, 061111 (2016).

Метод уменьшения расходимости излучения GaAs/AlGaAs лазера с InGaAs квантовыми ямами

А.А. Дубинов^{1,2}, Н.В. Байдусь¹, Б.Н. Звонков¹, С.М. Некоркин¹, А.В. Рыков¹, В.Я. Алешкин^{1,2}, Д.А. Колпаков¹, И.В. Самарцев¹, А.А. Афоненко³

¹ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603950, пр. Гагарина, 23

² ИФМ РАН, Нижний Новгород, 603950, ГСП-105

³ БГУ, Минск, 220072, пр. Независимости, 68

эл. почта: sanya@ipmras.ru

Диаграмма направленности типичных полупроводниковых лазеров обычно имеет угловые размеры около 10° в параллельной и 40° в перпендикулярной p - n -переходу плоскостях. Такая форма диаграммы направленности часто требует дополнительной фокусировки для практических применений. Существуют разновидности лазерных диодов, конструкция которых способствует обужению диаграммы направленности, среди которых можно выделить лазеры с широкими и сверхширокими волноводами [1], с туннельно-связанными пассивными волноводами [2], с выходом излучения через подложку [3] и с ассиметричной волноводной областью [4].

В настоящей работе создан полупроводниковый лазер с оригинальным волноводом, позволяющим добиться существенного обужения диаграммы направленности (до 4° в плоскости перпендикулярной p - n -переходу). В использованном волноводе, благодаря подбору толщин волноводного слоя GaAs и ограничительных слоев $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, обеспечивается минимальное превышение эффективного показателя преломления возбуждаемой моды n_{eff} над показателем преломления подложки n_s ($n_{\text{eff}} - n_s \ll 1$), что существенно увеличивает размер волноводной моды и приводит к обужению диаграммы направленности.

Такой лазер сочетает в себе преимущества лазеров с ассиметричной волноводной областью, с вытеканием излучения в подложку, а также с волноводным эффектом КЯ [5]. За счет такой комбинации этот лазер избавлен от необходимости роста достаточно толстых слоев и от значительного поглощения излучения в легированной подложке. Такая конструкция обеспечивает обужение диаграммы направленности гетеролазера, а также позволяет добиться значительной мощности излучения в импульсном режиме работы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ-БРФФИ (проект 16-52-00049) и Минобрнауки России (государственное задание 3.285.2014/К).

Литература

- [1] С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, Д.А. Винокуров, А.Д. Бондарев, В.А. Капитонов, Н.А. Пихтин, П.С. Копьев, И.С. Тарасов, ФТП, 47, 1082 (2013).
- [2] В.Я. Алешкин, Н.В. Дикарева, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, Д.А. Колпаков, С.М. Некоркин, ФТП, 49, 1625 (2015).
- [3] В.Я. Алешкин, Т.С. Бабушкина, А.А. Бирюков, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, М.Н. Колесников, С.М. Некоркин, Квант. Электроника, 40, 855 (2010).
- [4] B.S. Ryvkin, E.A. Avrutin, J. Appl. Phys., 98, 026107 (2005).
- [5] В.Я. Алешкин, Н.В. Дикарева, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, М.В. Карзанова, К.Е. Кудрявцев, С.М. Некоркин, А.Н. Яблонский, Квант. Электроника, 43, 401 (2013).

Эффективная пространственная селекция поперечных мод в торцевых полупроводниковых лазерах

**Н.Ю. Гордеев^{1,2}, А.С. Паюсов^{1,2,3}, Ю.М. Шерняков^{1,2}, Н.А. Калюжный^{1,2},
С.А. Минтаиров^{1,2}, А.А. Серин^{1,3}, М.В. Максимов^{1,2,3}, А.Е. Жуков^{1,2,3}**

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

² СПБАУ РАН, Санкт-Петербург, 194021, Хлопина, 8/3

³ СПб ГПУ, Санкт-Петербург, 195251, Политехническая, 29

эл. почта: gordeev@switch.ioffe.ru

Преимущество лазерных диодов – малые размеры кристалла – одновременно является причиной серьёзных трудностей в получении луча высокого качества. Типичный торцевой полупроводниковый лазер состоит из квантоворазмерной активной области, находящейся в нелегированном или слаболегированном волноводе, параметры которого определяют модовый состав лазерного излучения. Расширение лазерного волновода может приводить к лазерной генерации на модах высокого порядка и к многомодовой генерации. Это ведёт к расширению диаграммы направленности излучения в плоскости, перпендикулярной р-п переходу, и к возникновению в ней дополнительных максимумов. Наличие оптических мод высокого порядка и негауссов профиль основной моды приводят к ухудшению качества лазерного пучка, что ухудшает свойства лазера с точки зрения его практического применения.

Нами был предложен новый подход, который позволяет селективно исключать из лазерной генерации вертикальные моды высокого порядка широкого активного волновода за счёт их резонансного туннелирования в оптически связанные пассивные волноводы, получивший название CLOC (Coupled Large Optical Cavity) [1].

В работе обсуждаются особенности формирования оптических мод в CLOC лазерах. Теоретически и экспериментально показано, что расходимость лазерного пучка в вертикальном направлении имеет очень высокую токовую и температурную стабильность, обусловленную слабой зависимостью от изменений показателей преломления волновода. Подробно рассмотрены допустимые отклонения по составам и толщинам волноводных слоёв и показано, что волноводы CLOC лазеров обладают высокой устойчивостью к ростовым флуктуациям. Экспериментально продемонстрированы InGaAs/GaAs CLOC лазеры с длиной волны излучения 1,04 мкм, работающие на фундаментальной вертикальной моде, имеющей расходимость ~11 град. Также обсуждается применимость концепции CLOC для уменьшения оптических потерь, уменьшения последовательного сопротивления и повышения стабильности лазерного пучка в лазерах с волноводом стандартной толщины.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №14-42-00006).

Литература

[1] N.Yu.Gordeev, A.S.Payusov, Yu.M.Shernyakov, S.A.Mintairov, N.A.Kalyuzhnyy, M.M.Kulagina, M.V.Maximov, Optics Letters 40, 2150 (2015).

Нанопотонные компоненты для создания полностью оптических аналогово-цифровых преобразователей

**В.Е. Бугров¹, Е.С. Колодезный¹, А.Ю. Егоров^{1,2},
И.И. Новиков², Л.Я. Карачинский², Ю.В. Соловьев³, М.А. Одноблюдов³**

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Кронверкский пр., 49

² ООО «Коннектор Оптикс», Санкт-Петербург, 194292, Домостроительная ул., 16

³ СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Политехническая ул., 29

эл. почта: vladislav.bougrov@corp.ifmo.ru

Функциональность современных электронных систем на сверхвысоких частотах ограничена. Радиопотоника расширяет функциональность СВЧ систем и увеличивает возможности информационно-коммуникационных систем при объединении их с фотонными СВЧ схемами. Большой интерес к радиопотонным системам традиционно связан с возможностью их применения для систем радиолокации, а также применений в распределенных сотовых, беспроводных и спутниковых сетях, в аэродромных антенных системах, в обработке сигналов и визуализации [1]. Для того, чтобы стать жизнеспособной альтернативой электронным компонентам, фотонные блоки должны быть выполнены в виде микрочипов – фотонных интегральных схем. Ключевой технической проблемой является отсутствие оцифровки сигналов в фотонных интегральных схемах. В настоящее время большинство устройств работают в аналоговом режиме, из-за чего они накапливают ошибки по мере увеличения их количества. Это приводит к значительному ухудшению качества сигнала и требует его регенерации. Решением поставленной задачи является разработка полностью оптических аналогово-цифровых преобразователей (АЦП). Ключевыми нанопотонными компонентами блока дискретизации оптического АЦП являются интегрированные тактовый генератор и модулятор, а также приемник оптического излучения. Полупроводниковые лазеры являются перспективными источниками коротких оптических импульсов. Лазеры, работающие в режиме синхронизации мод, могут создавать короткие оптические импульсы с частотой повторения до нескольких сотен ГГц [2,3], и выполнять функцию оптических «часов» для формирования временных отсчетов и обработки сигналов.

В настоящем докладе рассмотрены основные схемы построения и реализации фотонных АЦП и представлены предварительные результаты по разработке лазеров с пассивной синхронизацией мод спектрального диапазона 1550 нм на основе InGaAs/InAlGaAs гетероструктур.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», шифр 2015-14-582-0038, соглашение № 14.581.21.0013 от 4 августа 2015 г., уникальный идентификатор RFMEFI58115X0013.

Литература

- [1] S. Iezekiel in *Microwave photonics: devices and applications*, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd 2009.
- [2] E.A. Avrutin, J.H.Marsh, E.L.Portnoi, *IEE Proceedings-Optoelectronics* 147, 4 (2000).
- [3] K.A.William, M.G.Thompson, I.H.White, *New Journal of Physics* 6, 179 (2004).

Полупроводниковые модули в основе высокоскоростных активно-импульсных систем

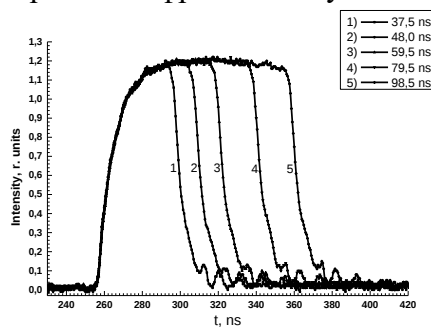
В.В. Кабанов

Институт физики НАН Беларуси, Минск, 220072, Независимости, 68, Беларусь

эл. почта: v.kabanov@ifanbel.bas-net.by

Разработка мощных, высокоэффективных полупроводниковых лазеров и создание высокочувствительных полупроводниковых фотоприемных модулей открывают новые возможности в разработке оптоэлектронных систем нового поколения, в частности, высокоскоростных активно-импульсных систем (АИС), которые находят широкое применение в ультрабыстрой диагностике (стробируемое построение изображений и спектров быстро протекающих процессов), высокоэффективных приборах ночного видения и системах мониторинга окружающей среды [1,2]. Подобные системы характеризуются как высокой чувствительностью, так и высоким пространственным и временным разрешением. К основным модулям, интегрированным в АИС, относятся: лазерный импульсный источник излучения, электронно-оптический преобразователь и высокоскоростная видеокамера. В докладе обсуждаются основные характеристики современных АИС и требования, предъявляемые к отдельным модулям и элементной базе. Представлены результаты исследования и разработки мощного импульсного инфракрасного модуля лазерной подсветки и построение системы активного ночного видения на ее основе. Анализируются достижения и перспективы развития АИС на основе полупроводниковых гетероструктурных модулей.

В инфракрасном модуле лазерной подсветки (ИК МЛП) использована матрица лазерных диодов (производство ОАО «НПП «Инжект») на основе полупроводниковых гетероструктур AlGaAs/GaAs с длиной волны излучения в спектральном диапазоне прозрачности атмосферы (790 – 880 нм) и выходной оптической пиковой мощностью импульса вплоть до 6 кВт. В ИК МЛП реализована безлинзовая заданная диаграмма направленности ($25^\circ \times 10^\circ$) и автоматическая стабилизация параметров излучения (длина волны 845 нм, спектральная ширина по полувысоте 6 нм, рабочая температура $27 \pm 0,5^\circ\text{C}$). Передний фронт импульса лазерного излучения МЛП (рис. 1) достигает своей



максимальной интенсивности в течение 25 - 30 нс и резко отключается на заднем фронте за 10 - 15 нс. При записи видеоизображения АИС в реальном масштабе времени скорость записи кадров ограничена снизу характерной скоростью протекания исследуемого процесса. В этом случае эффективность экспозиции может быть повышена посредством увеличения частота следования импульсов подсветки $\nu_{pr} = 1/T_{pl}$ (T_{pl} – период следования импульсов), с увеличением

которой линейно возрастает полная средняя мощность лазерного излучения. Для импульсов с длительностью $\tau_{pl} = 50 \div 100$ нс и предельно высоким коэффициентом заполнения $PDC \approx 50\%$ ($PDC = \tau_{pl} \nu_{pr} 100\%$) частота повторения импульсов лежит в пределах $\nu_{pr} = 5 \div 10$ МГц, что соответствует реализации суммарной средней мощности излучения МЛП 2,3 кВт для $\tau_{pl} = 50$ нс и 2,6 кВт для $\tau_{pl} = 100$ нс.

Литература

- [1] D.M.Kabanau, V.V.Kabanov, Y.V.Lebiadok et al. International Journal of Mechanical Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, 8, 1892 (2014).
- [2] В.А.Горобец, В.В.Кабанов, В.П. Кабашников и др. ЖПС, 82, 68. (2015).

Применение лазерно-оптических компонентов в области разработки и производства изделий фотоники.

Компания ООО «Специальные Системы. Фотоника»

Адрес: г. Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 32 А

Web: www.sphotonics.ru, E-mail: info@sphotonics.ru

Тел.: +7 (812) 385-72-97, Факс: +7 (812) 385-72-97

Компания Специальные Системы является специализированным поставщиком и интегратором лазерно-оптических изделий, оптоэлектронных и оптомеханических устройств, компонентов волоконной и интегральной оптики, спектрального оборудования, лазеров и оптических систем различного назначения.

Миссия нашей компании - оснащение научных лабораторий и производственных центров компонентами и оборудованием для проведения работ в области фотоники.

Мы предлагаем комплексные решения и техническую поддержку внедрения лазерных, оптических и оптомеханических компонентов, специализированного измерительного и аналитического оборудования.

Компания Специальные Системы сотрудничает с ведущими производителями лазерно-оптических и оптомеханических компонентов.

Ознакомьтесь с нашим онлайн каталогом по адресу www.sphotonics.ru и свяжитесь с нами любым удобным для Вас способом для получения консультации.

Специалисты нашей компании будут рады предоставить Вам любую дополнительную информацию о продукции, технологиях и услугах и подобрать оптимальное решение под Ваш бюджет.

Лазерные конвертеры зеленого - желтого диапазона спектра

Е.В.Луценко¹, А.Г.Войнилович¹, Е.В.Муравицкая¹, Г.П.Яблонский¹, А.Alyamani²,
М.Aljohani², A.Aljariwi², С.В.Сорокин³, И.В.Седова³, С.В.Гронин³, С.В.Иванов³.

¹ Институт физики им. Б. И. Степанова, 220072, Беларусь, Минск, пр. Независимости, 68

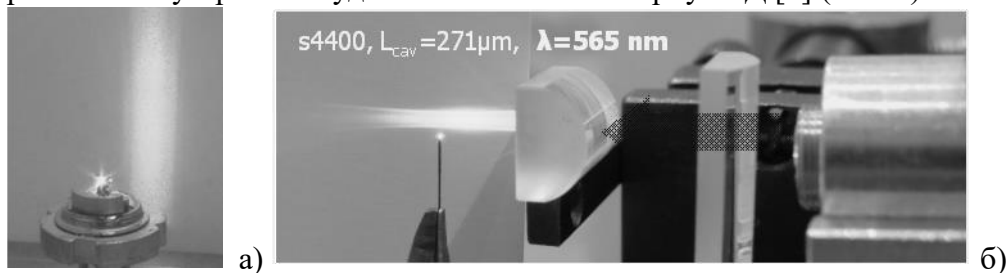
² Nanotechnology centre, KACST, PO Box 6086, 11442 Riyadh, Saudi Arabia

³ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

эл. почта: e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by

Значительные достижения в технологии эпитаксиального роста гетероструктур с квантовыми ямами InGaN привели к промышленному выпуску зеленых лазерных диодов (ЛД) на их основе ($\lambda \sim 520$ нм). Однако увеличение длины волны излучения InGaN ЛД ($\lambda > 540$ нм) приводит к резкому уменьшению их эффективности и долговечности.

В то же время оптически накачиваемые лазеры на гетероструктурах II-VI с квантовыми точками Cd(Zn)Se, выращенные на подложках GaAs, позволили получить эффективное лазерное излучение не только в зеленом, но также и во всем желтом спектральном диапазоне, вплоть до оранжевого [1]. На их основе были созданы миниатюрные лазерные конвертеры, в которых гетероструктура II-VI является активным элементом, а для ее накачки используется сфокусированное микролинзой [2] излучение InGaN ЛД ($\lambda = 400$ -450 нм). При этом все устройство удалось поместить в корпус ЛД [3] (Рис. а).



Для накачки гетероструктур II-VI с квантовыми точками Cd(Zn)Se использовались новые InGaN ЛД NUBM44 с рабочей мощностью излучения в непрерывном режиме 6 Вт на длине волны 444 нм. Импульсный режим работы ($\tau = 20$ нс) позволил увеличить их мощность до 40-50 Вт на длине волны излучения 442 нм. Высокие мощности возбуждения на относительно короткой длине волны возбуждения позволили увеличить мощность излучения «зеленых» конверторов до 6-8 Вт.

Лазерный конвертер, представленный на рисунке б), был изготовлен на основе гетероструктуры с активной областью состоящей из массива квантовых точек Cd(Zn)Se шириной 2.5 монослоя с наращенной сверху квантовой ямой Cd_{0.4}Zn_{0.6}Se шириной 3 нм [1]. Как видно из рисунка б), длина волны излучения составила 565 нм, квантовая эффективность преобразования излучения – 25%. Использование гетероструктуры с варизонным волноводом и активной областью состоящей из массива квантовых точек Cd(Zn)Se шириной 2.8 монослоя с наращенной сверху квантовой ямой Cd_{0.5}Zn_{0.5}Se шириной 2 нм [1] для оптически накачиваемого лазера конвертора, позволило получить излучение на границе желто-оранжевой области ($\lambda \sim 590$ нм). Таким образом, нами впервые были созданы конверторы, излучающие во всем желтом спектральном диапазоне.

Литература

- [1] A.Alyamani, at el. Phys. Stat. Sol. B 253, 1490 (2016).
- [2] E.V.Lutsenko at el. U.S. patent 9,042,419 (26 May 2015).
- [3] A.G. Vainilovich at el. Phys. Stat. Sol. B 253, 1498 (2016).

Управление морфологией активных областей в источниках спонтанного и лазерного ультрафиолетового излучения на основе AlGaN гетероструктур

В.Н. Жмерик¹, Д.В. Нечаев¹, А.А. Торопов¹, Е.А. Европейцев¹, Е.В. Луценко²,
Н.В. Ржеуцкий², С. Рувимов^{1,3}, В.И. Козловский⁴, С.В. Иванов¹

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

² Институт физики им.Б.Я. Степанова, Минск, 220072, пр. Независимости, 68

³ University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana 46556, USA

⁴ Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Ленинский пр., 53

эл. почта: jmerik@pls.ioffe.ru

Разработка физических основ и технологий получения излучателей на основе широкозонных соединений AlGaN с шириной запрещенной зоны, варьируемой от 3.4 до 6.1 эВ, определяет развитие ультрафиолетовой (УФ) полупроводниковой оптоэлектроники. В докладе будут рассмотрены возможности управления морфологией активных (светоизлучающих) областей в квантоворазмерных гетероструктурах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ во время их роста с помощью плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии (ПА МПЭ). Будут обсуждены возможности метода субмонослойной дискретной эпитаксии (СДЭ), которая благодаря относительно низким температурам эпитаксиального роста ПА МПЭ (<800°C) и возможности сверхбыстрой (<1 с) модуляции ростовых потоков позволяет контролировать на атомарном уровне профили изменения состава в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x=0-1$) слоях. Будут продемонстрированы выращенные с помощью СДЭ квантовые ямы (КЯ) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ с различной толщиной (0.5-2.5 нм) и морфологией (2D-3D). Особенностью СДЭ является формирование КЯ как номинальных сверхрешеток $\{\text{GaN}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}\}_N$ $N=1-10$ с различными толщинами GaN вставок и $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ барьерных слоев, величины которые варьировались от 0.5 до 4 монослоев (МС).

Будут представлены результаты исследования гетероструктур с помощью высоко-разрешающей просвечивающей электронной микроскопии, которые подтвердили возможности управления внутренней морфологией этих КЯ от обычных двумерных непрерывных плоскостей до дискретных Ga-обогащенных квантовых дисков с толщиной ~1 МС и диаметром несколько десятков нанометров. Кроме того, будут рассмотрены возможности введения упорядочения $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ в объемные AlGaN слои за счет периодического изменения стехиометрических условий роста. Для выращенных структур будут приведены результаты исследований характеристик фотолюминесценции в спектральном УФ диапазоне $\lambda=230-300$ нм в стандартной и краевой геометриях измерения спектров излучения. Первые использовались для исследований процессов локализации носителей в КЯ и их транспорта к центрам безызлучательной рекомбинации, а во втором случае для достижения стимулированного излучения. Результаты измерений будут сравниваться с расчетными параметрами носителей заряда и экситонов в КЯ, полученными с помощью 6-зонной k_p модели с учетом влияния упругих напряжений и внутренних поляризационных полей. В результате будут продемонстрированы наиболее оптимальные конструкции и условия роста как КЯ, так и объемных AlGaN слоев для мощных излучателей спонтанного УФ-излучения с электронной накачкой и оптически возбуждаемых источников УФ-лазерного излучения в диапазоне длин волн менее 300 нм.

Литература

[1] A.A. Toropov *et al.* Phys. Stat. Sol. C 13, 232 (2016).

Лазер со случайной генерацией «белого» излучения в системе микропорошков полупроводников ZnCdSSe

М.С. Леоненя¹, Е.В. Луценко¹, Д.И. Бабуськин¹,
A. Y. Alyamani², L. M. Alanazi², Г.П. Яблонский¹

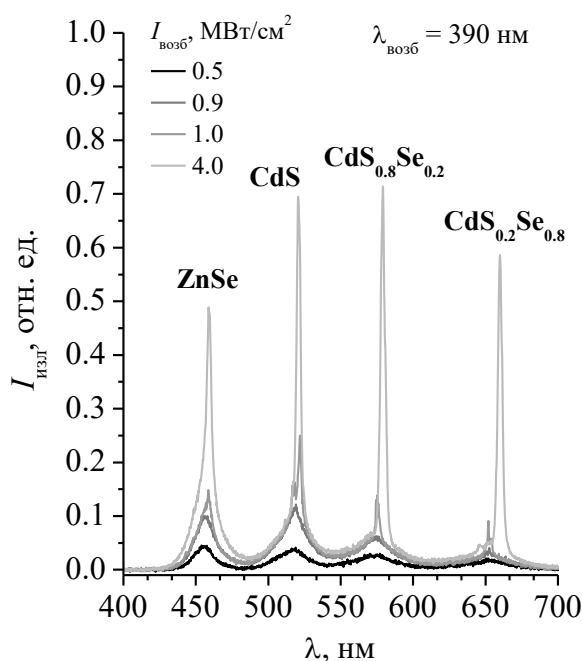
¹Институт физики НАН Беларуси, Минск, 220022, Независимости, 68

²King Abdulaziz City for Science and Technology (KACST), Riyadh 11442, P.O. Box 6086, Kingdom of Saudi Arabia

эл. почта: max.leanenia@gmail.com

Одним из подходов для получения лазеров с одновременной генерацией излучения на наборе длин волн в видимом диапазоне спектра является использование эффекта случайной генерации лазерного излучения в разупорядоченных активных рассеивающих средах («random lasing»). Эффект заключается в достижении генерации за счет создания случайным образом обратной связи для стимулированного излучения при многократном рассеянии света. Случайная генерация лазерного излучения синего, зеленого и красного спектрального диапазона, что в сумме дает белый свет, уже была достигнута в смеси трех лазерных красителей с пассивными рассеивателями [1], а также в смеси порошков широкозонных полупроводников $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ в нашей первой работе [2].

В настоящей работе представлены и обсуждаются результаты по получению лазеров со случайной генерацией «белого» света в системе микрокристаллических порошков



полупроводников с общей формулой $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}_y\text{Se}_{1-y}$ при возбуждении импульсным излучением на 390 нм (вторая гармоника $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ -лазера). Случайная генерация лазерного излучения достигнута одновременно на четырех длинах волн в синей, зеленой, оранжевой и красной областях спектра в активной среде из смеси микропорошков ZnSe (460 нм), CdS (520 нм), $\text{CdS}_{0.8}\text{Se}_{0.2}$ (580 нм) и $\text{CdS}_{0.2}\text{Se}_{0.8}$ (660 нм) при пороговой плотности мощности 1 МВт/см² (см. рис.). Лазерный эффект происходит за счет возникновения контуров случайной обратной связи в каждом типе активных рассеивающих кристаллитов при достаточном уровне оптического возбуждения. Излучение на четырех длинах волн перемешивается в «белый» свет и распространяется во всем телесном угле без заданного направления.

Ключевыми особенностями полученного «белого» лазера являются простота конструкции (так как отсутствуют сложные зеркальные резонаторы), возможность нанесения активной микропорошковой среды на поверхности любой формы. Эти особенности открывают такие области применения, как визуализация изображения в системах телевидения, обработки и передачи информации, в качестве биосенсоров в медицине, в системах обнаружения «свой-чужой», в технологиях освещения.

Литература

[1] Sh. Chen, X. Zhao, Y. Wang et al. Applied physics letters, 101, 123508 (2012).

[2] A. Y. Alyamani, M. S. Leanenia, L. M. Alanazi et al. Proc. of SPIE, 9726, 972625 (2016).

Быстродействующие вертикально-излучающие лазеры диапазона 1550 нм.

**А.Ю. Егоров^{1,2}, А.Г. Гладышев¹, Л.Я. Карачинский¹, И.И. Новиков¹, А.В. Бабичев¹,
S. Mikhailov³, V. Iakovlev³, A. Sirbu³**

¹ ООО «Коннектор Оптикс», Домостроительная ул., 16, 194292, Санкт-Петербург, Россия.

² Университет ИТМО, Кронверкский пр. 49, 197101, Санкт-Петербург, Россия.

³ RTI-Research SA, Rue Galilée 6, 1400 Yverdon-les-Bains, Switzerland

эл. почта: anton.egorov@connector-optics.com

Непрерывное увеличение объёма информации, передаваемой по оптическим сетям, предъявляет новые требования к передающим оптоэлектронным устройствам, основными из которых являются повышение скорости передачи информации и увеличение энергоэффективности устройств. Вертикально-излучающий лазер (VCSEL) является наиболее энергоэффективным лазерным излучателем. Основными преимуществами вертикально-излучающих лазеров являются малый пороговый ток генерации и способность непрерывной работы без принудительного охлаждения на больших скоростях передачи данных [1,2,3].

В настоящем докладе сообщается об успешной реализации VCSEL излучающих в спектральном диапазоне 1550 нм. Приборы с захороненным туннельным переходом изготовлены методом спекания трех полупроводниковых гетероструктур: двух распределенных брэгговских отражателей AlGaAs-GaAs и активной области с квантовыми ямами InGaAlAs-InGaAs-InP. Все гетероструктуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на промышленном реакторе MBE49 Riber. Изготовленные приборы работают в непрерывном режиме и излучают в спектральном диапазоне 1550 нм. Приборы демонстрируют малые значения пороговых токов генерации < 2 мА и высокие значения выходной оптической мощности > 2 мВт в температурном диапазоне 20-70°C. Лазеры, работающие в непрерывном режиме, демонстрируют одномодовую генерацию с существенным подавлением боковых мод, до 45 дБ. Граничная частота малосигнальной модуляции, 8 ГГц, определенная при токе 9 мА, и высокая эффективность изготовленных приборов демонстрируют их потенциальную пригодность для использования в качестве передающих устройств в системах скоростной передачи данных.

Литература

- [1] P. Moser, J. A. Lott, P. Wolf, G. Larisch, A. Payusov, N. N. Ledentsov, W. Hofmann, IEEE Photonics Technol. Lett., 24, 19-21 (2012).
- [2] D. Ellafi, V. Iakovlev, A. Sirbu, G. Suruceanu, Z. Mickovic, A. Caliman, A. Mereuta, E. Kapon, Opt. Express 22, 32180-32187 (2014).
- [3] S. Spiga, D. Schoke, A. Andrejew, M. Müller, G. Boehm, M. C. Amann. In: Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, Anaheim, CA, USA, 20–22 March 2016, p. Tu3D-4.

Усиление спонтанной эмиссии в лазерах на таммовских плазмонах

М.А. Калитеевский^{1,2}, К.А. Иванов¹, А. Р. Губайдуллин¹, С. Symonds³, J. Bellessa³

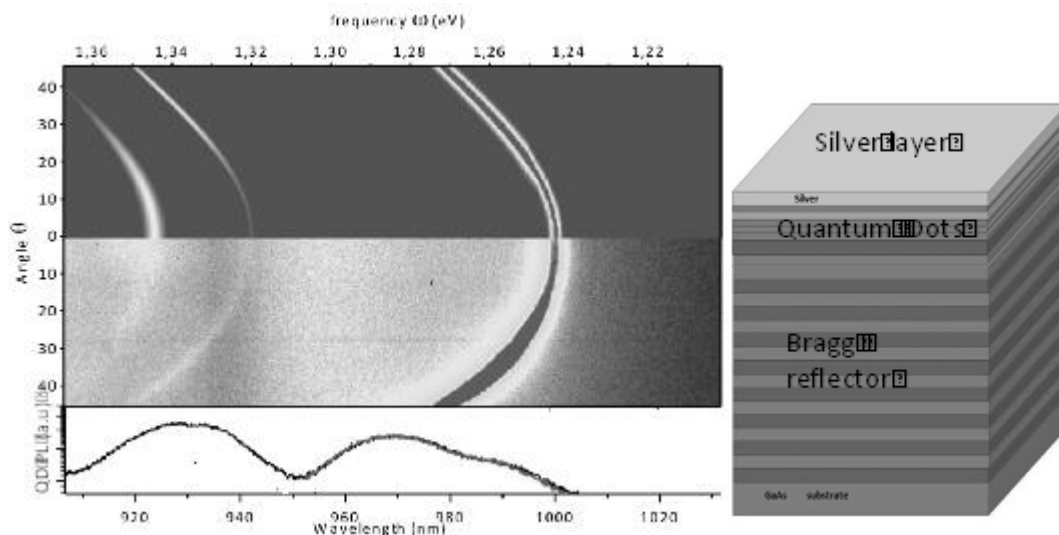
¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

² СПбАУ РАН, Санкт-Петербург, 194021, Хлопина, 8/3

³ Claude Bernard University Lyon 1, Lyon, France

эл. почта: m.kaliteevski@mail.ru

Локализованные состояния электромагнитного поля на границе металла и брэгговского отражателя (таммовские плазмоны) [1] являются объектом интенсивных исследований. Оказалось, что при определенном подборе параметров структуры поглощение света в металлическом слое подавлено, и таммовские плазмоны могут использоваться для создания вертикальных лазеров [2]. Подавление поглощения в металле приводит к тому, что на частотах собственных мод спонтанная эмиссия излучения существенно усилена. Для экспериментального исследования спонтанной эмиссии в вертикальных лазерах на таммовских плазмонах были выращены структуры (на рисунке справа) с брэгговскими отражателями на основе GaAs/AlGaAs активной областью из квантовых точек InAs (обладающих широким спектром люминесценции, показанным на рисунке слева внизу) и слоя серебра. На рисунке в центре показана зависимость интенсивности фотolumинесценции от угла эмиссии и частоты света, измеренная при температуре 77



(на рисунке справа в центре). Анализ результатов был произведен с помощью формализма S-квантования [3], позволяющего рассчитывать вероятность спонтанной эмиссии для произвольного направления распространения, частоты и поляризации света. На рисунке слева вверху показана рассчитанная зависимость интенсивности излучения от частоты и направления эмиссии, полученная как произведение вероятности спонтанной эмиссии, полученной методом S-квантования, на интенсивность люминесценции квантовых точек. Установлено, что в исследуемой структуре спонтанная эмиссия усиливается на два порядка.

Литература

- [1] M. A. Kaliteevski, et al, Phys.Rev. B 76, 165415 (2007)
- [2] C. Symonds, et al, Nano letters, 13 (7) 3179-3184 (2013)
- [3] М.А. Калитеевский и др, Оптика и спектроскопия, 121(3) 446–456 (2016)

Сдвоенные полупроводниковые дисковые лазеры среднего ИК диапазона ($\lambda \sim 2,28$ мкм) на модах шепчущей галереи

М.А. Ройз¹, А.Н. Именков¹, А.Н. Баранов², Ю.П. Яковлев¹, А.М. Монахов¹

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

²Institut d'Electronique du Sud (IES), Universite Montpellier 2, CNRS, IES (UMR CNRS 5214), 34095 Montpellier, France

эл. почта: michaelroyz11@gmail.com

Средний ИК диапазон электромагнитного излучения весьма интересен для различных инженерных задач. Важно, что в данном диапазоне находятся характеристические линии поглощения многих газов, в том числе ядовитых и взрывоопасных. Безусловно, детектирование таких газов представляет большой интерес. Однако положение затрудняет нехватка дешевых и простых в изготовлении источников когерентного излучения данного диапазона. Проблема заключается в том, что полупроводники среднего ИК диапазона имеют большие потери, преимущественно связанные с оже-рекомбинацией. Эти потери необходимо неким образом компенсировать, дабы создавать эффективные лазеры для систем детектирования. Один из путей решения данной проблемы – использование дискового дизайна лазерных систем на модах шепчущей галереи (Whispering Gallery Modes) [1].

В настоящей работе проведено исследование систем на основе сдвоенных WGM-лазеров. Лазерные чипы со сдвоенными дисковыми резонаторами радиусом 100 и 200 мкм с различными расстояниями между ними 0 - 6 мкм были изготовлены на основе квантово-размерной наногетероструктуры GaInAsSb/AlGaAsSb. Расстоянию в 0 мкм соответствует случай образования соединительной перемычки между резонаторами, появляющейся вследствие специфики процессов травления. Эксперимент включает в себя измерение спектров и диаграмм направленности излучения рассматриваемых систем. Измерение спектров излучения проводилось на монохроматоре ДФС-32 при комнатной температуре в импульсном режиме питания с частотой 10 кГц и длительностью импульса 2.7 мкс.

Из полученных данных следует, что в рассматриваемых системах наблюдаются два основных режима генерации. Первый режим является одномодовым и проявляется только у образцов с перемычкой. С другой стороны, как образцы с перемычкой, так и без, способны работать в многомодовом режиме генерации. В этом режиме при высоких токах накачки выделяются моды, межмодовое расстояние которых в два раза меньше, чем у одиночных лазеров. Такие моды мы будем называть коллективными модами. Высказано предположение о том, что данный эффект обусловлен перетеканием излучения из одного лазера в другой при пространственном уширении излучения в резонаторах с увеличением тока накачки. Диаграммы направленности излучения показывают, что значительная часть излучения выходит из перемычки, соединяющей лазеры между собой, тогда как в образцах без перемычки подобная направленность излучения практически отсутствует.

Литература

- [1] A. Baranov, E. Tournié, Semiconductor lasers and applications. Woodhead Publishing Limited, 2013. 631p.

Высокоэффективные быстродействующие фотодиоды для регистрации ИК лазерного излучения

И.А. Андреев, Н.Д.Ильинская, Г.Г.Коновалов, Е.В.Куницына, В.В.Романов, Ю.П.Яковлев
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

эл. почта: igor@iropt9.ioffe.ru

Созданы и исследованы неохлаждаемые быстродействующие p-i-n фотодиоды с мостиковым фронтальным контактом для регистрации коротких импульсов излучения в спектральном диапазоне 1.3–2.4 мкм. Данные фотодиоды 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 методом ЖФЭ изопериодных гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb и InAs/InAsSbP/InAs/InAsSbP, постростовую технологию, корпусирование фотодиодов. Главной конструктивной особенностью фотоприемника с мостиковым контактом является отделение чувствительной мезы от контактной. Чувствительная площадка была выполнена в форме круга диаметром 50 мкм, контактная площадка – в форме прямоугольника размерами 50×70 мкм. Фронтальный омический контакт был сформирован к широкозонному «окну» - слою p-GaAlAsSb (или InAsSbP) и представлял собой мостик шириной 20 мкм и длиной 85 мкм. Мостик формировался напылением Cr-Au толщиной 2200 Å, и нанесением гальванического Au толщиной 3-6 мкм. Со стороны контактной площадки мостик заканчивался прямоугольной частью размером 60×40 мкм. Достигнуто низкое значение собственной емкости GaInAsSb/

GaAlAsSb фотодиодов: $C=2.0 - 3.0$ пФ без обратного смещения и $C=0.8-1.0$ пФ при смещении $U=-(1-3)$ В. Быстродействие ФД, определяемое по времени нарастания

импульса фотоотклика по уровню 0.1-0.9, составляет величину $t_{0.1-0.9}=50-110$ пс. Ширина полосы пропускания 5-10 ГГц. Фотодиоды характеризуются низкой величиной обратных темновых токов $I_D=200-1500$ нА при обратном смещении $U=-(0.5-3.0)$ В, высокими значениями токовой моно-хроматической чувствительности $S_I=1.10-1.15$ А/Вт и обнаружительной способности $D^*(\lambda_{\max}, 1000, 1)=9 \times 10^{10}$ Вт⁻¹×см×Гц^{1/2} на $\lambda_{\max} = 2.0-2.2$ мкм. Гетерофотодиоды InAsSbP/InAs/InAsSbP характеризуются низким значением обратных темновых токов (10-30 мкА, $U=-(0.2-0.5)$ В), малой величиной емкости (1-3 пФ, $U=-(0.2-0.5)$ В), высокой токовой монохроматической

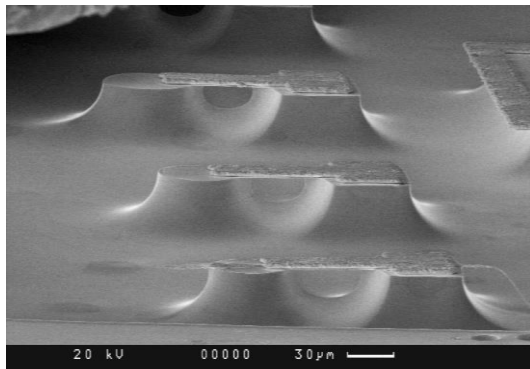


Рис. 1. SEM фотография фотодиода с мостиковым контактом. Чувствительная (слева) и контактная (справа) мезы.

чувствительностью (1.20-1.35 А/Вт, $\lambda=3.0-3.3$ мкм). Время фотоотклика InAsSbP/InAs/InAsSbP p-i-n фотодиодов не было измерено ввиду отсутствия скоростных лазеров с длиной волны около 3 мкм. Оценка быстродействия дает значение 300-500 пс (полоса пропускания 1-2 ГГц).

Сравнительный анализ внутренних оптических потерь в мощных лазерах на основе GaAs (1.0-1.1 мкм) и InP (1.4-1.6 мкм)

Д.А.Веселов¹, И.С.Шашкин¹, З.Н. Соколова¹, Н.А.Пихтин¹, И.С.Тарасов¹

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

эл. почта: dmitriy90@list.ru

В мощных полупроводниковых лазерах на основе GaAs спектрального диапазона 1.0-1.1 мкм наблюдается рост величины внутренних оптических потерь при увеличении температуры лазера [1] и тока накачки [2]. Данное явление существенно снижает эффективность лазера и ограничивает его максимальную выходную оптическую мощность. Аналогичное явление может происходить и в лазерах спектрального диапазона 1.4-1.6 мкм.

Недавно нами была предложена новая методика, позволяющая исследовать поглощение на свободных носителях в слоях наногетероструктуры лазера, работающего в импульсном режиме (длительность 100 нс, амплитуда плотности тока до 50 кА/см²) при разных температурах. Суть метода заключается в том, что в волновод исследуемого образца вводится зондирующее излучение с энергией кванта меньше энергии всех запрещённых зон в образце. На выходе из кристалла зондирующее излучение собирается, селективируется от собственного лазерного излучения и регистрируется. При протекании тока накачки через образец этот ток вызывает увеличение поглощения на свободных носителях и таким образом модулирует зондирующее излучение. По величине модуляции и известной длине резонатора нетрудно рассчитать величину изменения потерь, которую в силу логарифмического характера зависимости мы вычисляем с точностью до постоянного слагаемого, которое в реальных лазерах не превышает 0.2-0.5 см⁻¹.

В докладе представлены результаты измерений роста оптических потерь с током накачки и температурой лазеров двух спектральных диапазонов и различных конструкций, проведено сравнение полученных величин внутренних оптических потерь с ватт-амперной характеристикой (ВтАХ) тех же лазеров.

Показано, что для лазеров спектрального диапазона 1.0-1.1 мкм с волноводом GaAs измеренные внутренние оптические потери являются достаточными для наблюдаемого насыщения ВтАХ того же лазера только при токе накачки до примерно 50 А (10 кА/см²), затем, видимо к процессу роста оптических потерь добавляется процесс токовой утечки за счёт делокализации носителей заряда из активной области в волновод. Продемонстрировано, что использование волновода из AlGaAs позволяет минимизировать эффект токовой утечки во всём измеренном диапазоне токов накачки.

Обнаружено, что для лазеров на основе InP диапазона 1.4-1.6 мкм наблюдается рост внутренних оптических потерь аналогично лазерам на GaAs, причём величина потерь может достигать 8 см⁻¹ при токе накачки 80 А (16 кА/см²). Однако, теоретические расчёты показали, что этих потерь недостаточно для насыщения ВтАХ того же лазера и в качестве преимущественного механизма ограничения мощности скорее всего выступает токовая утечка носителей заряда.

Литература

- [1] Н. А. Пихтин, С. О. Слипченко, И. С. Шашкин, М. А. Ладугин, А. А. Мармалюк, А. А. Подоскин и И. С. Тарасов, ФТП 44(10), 1411 (2010).
- [2] Д. А. Веселов, В. А. Капитонов, Н. А. Пихтин, А. В. Лютецкий, Д. Н. Николаев, С. О. Слипченко, З. Н. Соколова, В. В. Шамахов, И. С. Шашкин и И. С. Тарасов, Квантовая электроника 44 (11), 993 (2014).

Поляризационные свойства наноразмерных гетеролазеров

¹Л.А.Кулакова, ¹Н.С.Аверкиев, ²А.Губенко, ¹А.В.Лютецкий, ¹И.С.Тарасов

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

² Innolume GmbH, Dortmund, 11Konrad-Adenauer-Allee, 44263 Germany

эл. почта: L.Kulakova@mail.ioffe.ru

В рамках изучения возможности управления параметрами гетеролазеров переменной деформацией нами были проведены исследования воздействия ультразвуковой деформации на поляризационные свойства излучения InGaAsP/InP ($\lambda=1,48 \text{ }\mu\text{m}$) и InGaAs/GaAs ($\lambda=1,06 \text{ }\mu\text{m}$) гетеролазеров на квантовой яме.

В результате впервые экспериментально (в InGaAsP/InP – лазере) было обнаружено вращение вектора поляризации с периодичностью вводимой извне ультразвуковой деформации. Теоретический анализ полученных экспериментальных данных показал, что наблюдаемый эффект обусловлен фундаментальными свойствами зонной структуры материалов: модуляцией энергии дырочных состояний в квантовой яме и смешивания их волновых функций под влиянием ультразвуковой сдвиговой деформации [1,2]. При этом в рамках предложенной модели эффективность такого смешивания возрастает с уменьшением энергии расщепления тяжёлых и лёгких дырок, т.е. с увеличением ширины квантовой ямы. Действительно, эта зависимость подтверждается данными, полученными в In₂₈GaAs/GaAs-структуре с более широкой квантовой ямой.

В последнее время нами исследуется влияние ультразвука на поляризационные свойства InAs/In₁₅GaAs/GaAs гетеролазеров ($\lambda=1,3 \text{ }\mu\text{m}$) на квантовых точках InAs. В результате обнаружена неожиданно (для исследуемой структуры) большая эффективность деформационного воздействия на поляризацию излучения таких лазеров.

В настоящем сообщении представлен анализ влияния структурных особенностей на поляризационные свойства ранее исследованных лазеров и полученных новых данных в лазерах на квантовых точках. Высказывается ряд предположительных объяснений наблюдаемой неожиданно большой эффективности вращения вектора поляризации, обусловленного переменной деформацией в лазерах на квантовых точках.

Литература

- [1] Kulakova,L; Gorelov,V; Lutetskiy,A; Averkiev,NS. “The rotation of the polarization plane of quantum-well heterolasers emission under the ultrasonic strain” Solid State Commun., 152, 1690 (2012).
- [2] Л.А. Кулакова, Н.С. Аверкиев, А.В. Лютецкий, В.А. Горелов. ФТП, 47, 137 (2013).

Эффективная комнатная фотолюминесценция в среднем ИК диапазоне метаморфных наногетероструктур InSb/InAs/InGa(Al)As/GaAs

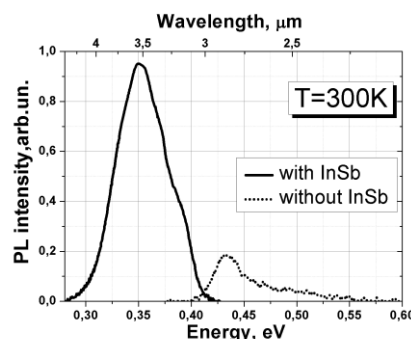
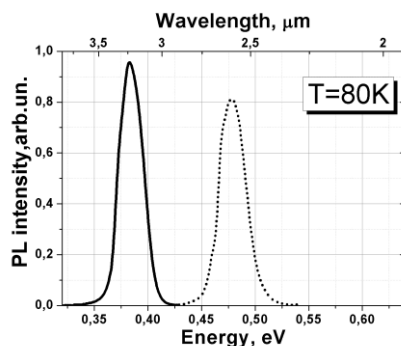
В.А. Соловьев, М.Ю. Чернов, П.Н. Брунков, А.А. Ситникова, Б.Я. Мельцер, А.Н. Семёнов, С.В. Иванов

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

эл. почта: vasol@beam.ioffe.ru

На протяжении последних двадцати лет интенсивные усилия в мире направлены на создание компактных инжекционных источников излучения (светодиодов и лазеров) среднего ИК диапазона ($\lambda = 2 - 4$ мкм), обладающих широким спектром применений (мониторинг состояния окружающей среды, медицина, специальные технологии и т.д.). Весьма перспективными для этих целей представляются малодефектные узкозонные гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) типа I InAs/InGa(Al)As, выращиваемые на прочных и дешевых, но сильно-рассогласованных ($\Delta a/a > 5\%$) подложках GaAs с использованием метаморфного буферного слоя (МБС) AlInAs с градиентным увеличением содержания In [1]. Вследствие локализации прорастающих дислокаций (ПД) в МБС, такие структуры продемонстрировали недавно высокую интенсивность фотолюминесценции (ФЛ) в диапазоне длин волн $\lambda = 2.1 - 2.4$ мкм вплоть до 300К [2]. Для сдвига λ в область спектра более 3 мкм мы предложили использовать внутри КЯ InAs/InGaAs типа I когерентную ультратонкую вставку InSb, образующую с InAs гетеропереход типа II [3].

Данная работа посвящена получению и исследованию КЯ InAs/In_{0.75}Ga_{0.75}As с субмонослойными вставками InSb, выращиваемых методом МПЭ на подложках GaAs (001) с использованием МБС с параболическим изменением состава In_xAl_{1-x}As ($x = 0.05 - 0.79$). Исследования методами рентгеновской дифрактометрии, атомно-силовой и



просвечивающей электронной микроскопии продемонстрировали хорошее кристаллическое качество оптимизированных гетероструктур и низкую плотность

ПД в области КЯ (менее 10^6 см^{-2}). Метаморфные наноструктуры с InSb вставкой характеризуются интенсивной ФЛ вплоть до 300К, существенно сдвинутой в область спектра с $\lambda > 3.2$ мкм (см. рисунок) и обусловленной излучательными переходами электронов с нижнего уровня зоны проводимости в КЯ InAs на дырочный уровень в КЯ InSb. Варьирование толщины InSb вставки позволяет в широких пределах менять длину волны излучения, делая такие структуры перспективными для спонтанных и лазерных излучателей среднего ИК диапазона.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 15-12-30022).

Литература

- [1] F. Capotondi et al., Thin Solid Films 484, 400 (2005).
- [2] Ya.V. Terent'ev et al., Appl. Phys. Lett. 104, 101111 (2014).
- [3] В.А. Соловьев и др., Письма в ЖТФ, т. 42, в. 20, 33 (2016).

Получение пористого арсенида галлия методом электрохимического травления

А.С.Леньшин¹, П.В. Середин¹, А.В. Федюкин¹, Худер Абдульджаббар Рияд Худер, И.Н. Арсентьев², И.С. Тарасов²

¹ Воронежский государственный университет, Воронеж, 394006, Университетская пл. 1

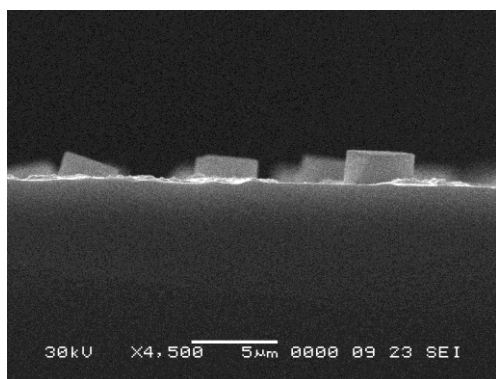
² ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

эл. почта: seredin@phys.vsu.ru

Получение пористых слоев GaAs с четко определенной структурой, с заданными размерами пор является довольно сложной задачей. Тем не менее, с быстрым развитием технологий в наше время, можно добиться изготовления качественных пористых слоев GaAs простым и дешевым способом. Одним из них является метод электрохимического травления. Подбором конкретного состава электролита, конфигурации ячейки электрохимического травления и рабочих характеристик процесса можно получить необходимые параметры для пористых слоев GaAs. Однако, хорошо известно, что качество получаемых на сегодняшний день пористых слоев весьма далеко от совершенства и не всегда пригодно для дальнейшей эпитаксии. Поэтому исследования структурного и оптического качества пористого GaAs в зависимости от состава электролита является существенным фактором для достижения успеха.

Целью нашей работы стали исследования методами электронной микроскопии, ИК и УФ спектроскопии свойств пористого GaAs, полученного методом электрохимического травления монокристаллических пластин. В работе использовалась разработанная нами оригинальная ячейка электрохимического анодного травления с уникальной формой электрода, обеспечивающего стабильную плотность тока в электролите.

На основе полученных в работе экспериментальных данных удалось показать, что варьированием основных технологических параметров могут быть достигнуты различных толщины пористого слоя и размеры пор, которые зависят от концентрации исходных веществ в растворе, а также от плотности тока, поданной на электроды.



Подбором условий электрохимического травления нам удалось получить на поверхности пластин GaAs правильные многогранники монокристаллического GaAs, расположенные на сопоставимых друг от друга расстояниях с одинаковой плотностью на

единицу поверхности.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2014-2016 годы. (Проект №740, Задание №3.130.2014/К).

МУРР-исследования сверхрешетки в фосфиде индия

М.Д. Шарков¹, М.Е. Бойко¹, А.М. Бойко¹, С.Г. Конников¹

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

эл. почта: mischar@mail.ioffe.ru

Фосфид индия InP является прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 1.34 эВ и решеткой сфалерита (параметр 5.87 Å). На лабораторном приборе МАРС-2 (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) была получена серия кривых малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (МУРР) от образца InP, изначально представлявшего собой монокристаллическую пластину с концентрацией допантов n-типа порядка 10^{18} см^{-3} . Измерения проводились при $\text{Cu K}\alpha_1$ -излучении (длина волны 1.5405 Å) как в просвечивающем режиме, так и в режиме отражения. Регистрация данных МУРР в просвечивающем режиме осуществлялась в 2D-области углов рассеяния с применением точечного детектора.

Результаты

5. Как оказалось, 2D-картина малоугловой рентгеновской дифракции содержит дискретный набор широких брэгговских рефлексов, что наряду с провалом в окрестности нулевого угла [1] свидетельствует о присутствии в образце периодичной сверхструктуры (например, сверхрешетки или опалоподобной структуры).
6. Наборы рефлексов обнаружены в латеральных направлениях (110) и $(1\bar{1}0)$, откуда следует вывод, что сверхструктура в образце может обладать двумерной прямоугольной, трехмерной орторомбической либо трехмерной моноклинной сингонией (в последнем случае ось сверхрешетки (001) параллельна поверхности образца). На Рис. 1 и Рис. 2 приведены кривые МУРР от исследуемого образца, отвечающие направлениям вектора рассеяния (110) и $(1\bar{1}0)$ соответственно.
7. Набор брэгговских пиков, присутствующих на Рис. 1, соответствует межплоскостным расстояниям 450 ± 20 нм. Набор брэгговских рефлексов, присутствующих на Рис. 2, отвечает межплоскостным расстояниям 260 ± 30 нм.
8. Для кривой МУРР, полученной в режиме отражения, анализ данных в соответствии с моделью Порода [2] приводит к величине степенного показателя, которая значительно превышает по модулю стандартные значения 1–4. Такое поведение кривой МУРР может быть объяснено присутствием брэгговского пика, максимум которого расположен по угловой шкале ниже порогового значения полного внешнего отражения (ПВО) [3]. Аппроксимация кривой МУРР в области наиболее резкого падения значений функцией Гаусса приводит к значению межплоскостного расстояния, отвечающего максимуму, около 19 нм. Таким образом, в направлении (001) у образца также может наблюдаться сверхструктурная периодичность.

Литература

- [1] A. Guinier, G. Fournet, *Small-Angle Scattering of X-Rays*, J. Wiley and Sons, N.-Y., 1955. P. 53.
- [2] *Small-Angle X-Ray Scattering*, ed. by O. Glatter and O. Kratky, Academic Press, London, 1982. 516 p.
- [3] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, *Электродинамика сплошных сред*, Физматлит, М. 2005, с. 390.

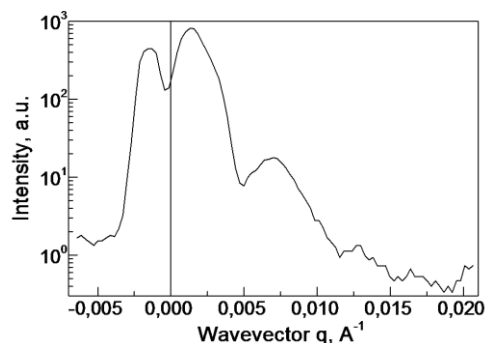


Рис. 1.

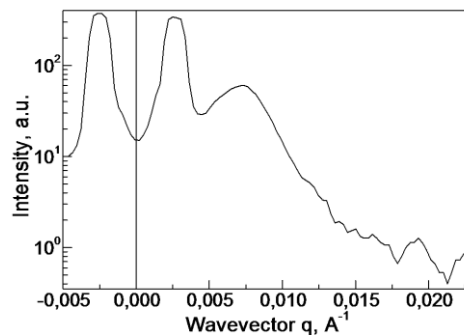


Рис. 2.

Особенности послойного анализа полупроводниковых квантово-размерных гетероструктур методом ВИМС

Ю.А. Кудрявцев

CINVESTAV-IPN, México, 07360, Av.IPN#2508, México

эл. почта: yuriyk@cinvestav.mx

Любой экспериментальный результат измерения какой либо физической величины включает в себя так называемую аппаратную функцию, то есть искажения, вносимые измеряемой аппаратурой. В случае послойного анализа методом Масс-Спектрометрии Вторичных Ионов (ВИМС) о наличие таких искажений можно пренебречь при анализе имплантированных профилей, «толстых» пленок и т.д. В случае же послойного анализа полупроводниковых квантово-размерных структур типа: квантовых ям, дельта-слоев, моно-атомных слоев и т.д., параметры аппаратной функции масс-спектрометра становятся сравнимы с толщинами анализируемых слоев и должны быть учтены тем или иным способом.

В докладе описывается математически Функция Разрешения по Глубине (ФРГ) (аппаратная функция масс-спектрометра) включающая в себя эффект ионного вбивания и перемешивания, а также формирования рельефа поверхности в процессе ионного травления [1,2]. В докладе показана возможность экспериментального определения этой функции используя дельта-легированные слои, и сравнительно толстые слои анализируемого материала [1]. Показана зависимость ФРГ от основных экспериментальных параметров: энергия и угол падения пучка, тип первичных ионов, температура мишени и т.д. [1,2]. Далее, рассматривается алгоритм использования ФРГ для проведения операции «обратная свертка» экспериментального профиля и получение «реального» распределения элементов в квантово-размерной структуре [3].

В заключении дан краткий обзор формирования рельефа поверхностного при ионном распылении некоторых полупроводников. Этот важнейший эффект, влияющий на разрешение по глубине, пока не получил теоретического описания. Поэтому на данный момент при анализе квантово-размерных структур либо подбирается режим ионного травления с минимальной шероховатостью поверхности, либо шероховатость измеряется экспериментально атомно-силовым микроскопом и полученное значение используется для процедуры «двух-этапной» обратной свертки [3].

Литература

- [1] Y. Kudriavtsev, S. Gallardo, A. Villegas, G. Ramirez, and R. Asomoza, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 72(7) (2008) 895-898
- [2] S. Gallardo, Y. Kudriavtsev, A. Villegas, A. Godines, R. Asomoza, Proceedings of 3rd International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Veracruz, Mexico, September 2006.
- [3] Yu. Kudriavtsev, R. Asomoza, S. Gallardo-Hernandez, M. Ramirez-Lopez, M. Lopez-Lopez, V. Nevedomsky, K. Moiseev, Physica B: Condensed Matter, 453 (2014) pp.53–58

Стимулированное излучение пленок Cu(In,Ga)Se_2 и его использование для оценки их структурного совершенства

В.Н. Павловский¹, И.Е.Свитенков¹, Е.В. Лутенко¹, Г.П. Яблонский¹, А.В. Мудрый²,
В.Д. Живулько², О.М. Бородавченко², М.В. Yakushev^{3,4,5}, R.W. Martin³

¹ Институт физики НАН Беларуси, Минск, 220022, Независимости, 68

² ГНПО «НПЦ по материаловедению НАН Беларуси», Минск, 220072, П. Бровки, 19

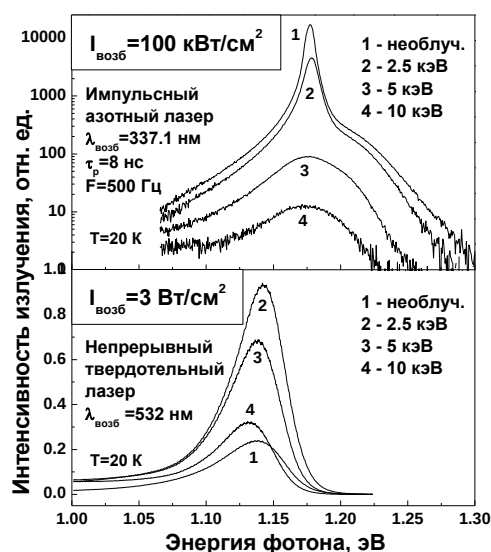
³ Department of Physics, SUPA, University of Strathclyde, Glasgow G4 0NG, UK

⁴ Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

⁵ Institute of Solid State Chemistry of the Russian Academy of Science, Ekaterinburg

эл. почта: v.pavlovskii@ifanbel.bas-net.by

Недавно были продемонстрированы стимулированное (СИ) и лазерное излучение в плёнках Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS) для солнечных элементов [1,2]. В настоящей работе показано, что возможность оценки относительной концентрации свободных неравновесных носителей заряда (ННЗ), ответственных за создание фототока, по параметрам СИ позволяет проводить сравнение электронных свойств различных плёнок и оценивать их структурное совершенство. Приведены результаты сравнительного анализа излучения необлученных и облученных протонами плёнок CIGS при высоких уровнях возбуждения по интенсивности и полуширине полос излучения, позволившие оценить качество их структуры.



При больших интенсивностях возбуждающего излучения (см. рис.) наблюдаются значительный высокоэнергетический сдвиг спектра излучения пленки вследствие заполнения носителями состояний в хвостах зон. При достижении ~ 20 кВт/см² начинает преобладать рекомбинация в электронно-дырочной плазме, а также наблюдаются сужение спектра и резкое увеличение интенсивности, обусловленные появлением СИ. Вклад СИ в спектры уменьшается с увеличением энергии протонов в диапазоне 2.5 – 10 кэВ при неизменной дозе облучения 5×10^{16} см⁻².

Таким образом, использование высокого уровня возбуждения позволяет переключить механизм излучательной рекомбинации, обеспечить преобладание межзонной излучательной рекомбинации, когда концентрация именно свободных ННЗ определяет положение и форму спектра излучения, установить прямую и однозначную связь между интенсивностью, полушириной спектров СИ и структурным совершенством плёнок CIGS. Проведенные эксперименты демонстрируют высокую чувствительность СИ к содержанию дефектов структуры в тонких плёнках CIGS. Поэтому наличие СИ, интенсивность и полуширина его полосы могут являться критерием оценки структурного совершенства плёнок CIGS и отбора наиболее качественных плёнок для создания на их основе солнечных элементов.

Литература

- [3] I.E. Svitsiankou, V.N. Pavlovskii, E.V. Lutsenko et al. J. Phys. D, 49, 095106 (2016).
- [4] M. Moret, O. Briot, B. Gil et al. Proc. of SPIE 9358, 93581A1 (2015).

Конкуренция однонаправленного и модового сверхизлучения при импульсной и непрерывной накачке брэгговских гетероструктур

Вл.В. Кочаровский¹, Е.Р. Кочаровская¹, В.В. Кочаровский^{1,2}

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, ул. Ульянова, 46

² Department of Physics and Astronomy, Texas A&M University, College Station, TX 77843-4242, USA

эл. почта: kochar@appl.sci-nnov.ru

Доклад посвящён аналитическим и численным исследованиям явления коллективного спонтанного излучения (сверхизлучения) в различных полупроводниковых гетероструктурах с распределенной обратной связью встречных волн в условиях импульсной или непрерывной накачки электрон-дырочных возбуждений. Будут выяснены условия, при которых наличие низкодобротного резонатора переводит суперфлюоресценцию или сверхизлучение из однонаправленного в одно- или многомодовый режим. Будут установлены преимущества сверхизлучательной генерации мод при непрерывной накачке и указаны возможные пути достижения такой генерации в определённых (брэгговских) гетероструктурах. Будут рассмотрены основные режимы работы сверхизлучающих лазеров. Полученные результаты основаны на недавно проведённых исследованиях [1, 2] и включают случаи почти однородного и сильно неоднородного уширения спектральной линии активной среды.

Литература

- [1] Е.Р.Кочаровская, Н.С.Гинзбург, А.С.Сергеев, В.В.Кочаровский, Вл.В.Кочаровский, Режимы генерации лазеров с сильным неоднородным уширением активной среды и слабой распределенной обратной связью волн, Изв. ВУЗов. Радиофизика 59 (вып. 6), 535 (2016).
- [2] V.I.V.Kocharovskiy, A.A.Belyanin, E.R.Kocharovskaya, V.V.Kocharovskiy, Superradiant lasing and collective dynamics of active centers with polarization lifetime exceeding photon lifetime. Chapter in the book Advanced Lasers: Laser Physics and Technology for Applied and Fundamental Science: Springer Series in Optical Sciences, v. 193. Eds. Oleksiy Shulika and Igor Sukhoivanov, 2015, ch. 4, p. 49-69.

Механизмы потерь в полупроводниковых лазерах при высоких уровнях импульсной накачки: двухфотонное поглощение и накопление носителей за счёт протекания тока.

Е.А. Аврутин¹, Б.С. Рывкин²

¹Dept of Electronics, University of York, York YO10 4LE, UK

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

эл. почта: eugene.avrutin@york.ac.uk

Эффективность вывода излучения $\eta_{out}(i)$ в полупроводниковом лазере определяет его выходную мощность $P(i)$ и КПД $\eta(i)$. Механизмы её деградации при высоких уровнях инжекции в целом известны, но их сравнительная важность остаётся предметом дискуссии. Мы провели сравнительный анализ двух важнейших эффектов для импульсного режима, т.е. в случае постоянной температуры. Эффективность вывода определяется как $\eta_{out}(i) = \alpha_{out} / (\alpha_{out} + \alpha_{in}(i))$, где α_{out} - потери на выход, а $\alpha_{in}(i)$ - внутренние потери (поглощение), возрастающие с током, что и приводит к деградации эффективности. Рассматривается характерный для мощных лазеров расширенный (толщиной $h > 1 \mu\text{m}$) волновод, содержащий тонкую ($d_a \sim 0.01-0.03 \mu\text{m}$) квантоворазмерную активную область, находящуюся на произвольном расстоянии l_a от n -эмиттера. В таком лазере основной механизм возрастания $\alpha_{in}(i)$ связан с накоплением носителей в волноводе за счёт диффузионного тока и поглощением света этими носителями, главным образом межподзонным поглощением дырок. В предыдущих работах мы разработали теорию этого эффекта и вывели формулы для его вклада $\alpha_j^{(FCA)}(i)$ в потери $\alpha_{in}(i)$. В данном докладе этот вклад сравнивается с влиянием двухфотонного поглощения (ДФП), предложенного рядом авторов (см. например 0) как важный механизм деградации η_{out} . Эффект ДФП в свою очередь включает 0 прямой эффект и непрямой, за счёт генерации носителей в волноводе из-за ДФП и последующего поглощения света этими носителями. Для учёта последнего нами разработана теория, основанная на уравнении амбиполярной диффузии с генерационным членом за счёт ДФП и граничными условиями, учитывающими эффективный захват носителей из волновода в активный слой. Полные потери рассчитывались как $\alpha_{in}(i) \approx \alpha_{in}^{(built-in)} + \alpha_j^{(FCA)}(i) + \alpha_{TPA}^{(FCA)}(i) + \alpha_{in}^{(TPA)}(i)$, где предпоследний член описывает эффект созданных ДФП носителей (рис.1а), а последний – прямой эффект ДФП.

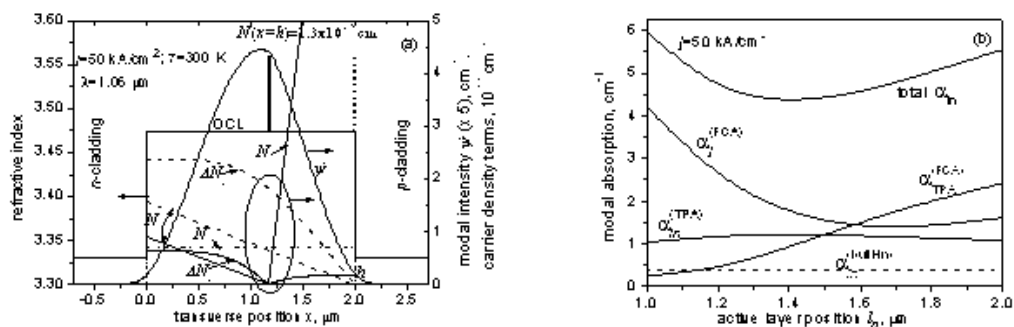


Рис. 1. (а) схема GaAs/AlaAs волновода и вкладов в концентрацию носителей за счёт тока (N_j) и ДФП (ΔN_{TPA}). Длина резонатора 3 mm, отражения граней 0.05/0.99; $l_a = 1.17 \mu\text{m}$ (сплошная линия), $\approx 2 \mu\text{m}$ (пунктир). (б) Вклады в α_{in} как функция l_a .

Расчёты (рис.1) показывают, что существует оптимальное положение активного слоя (рис.1б), позволяющее минимизировать потери.

Литература

[1] M. Dogan et al., , Proc. SPIE, Vol. 8965, p. 89650P, 2014

Распределение носителей заряда в активной области лазера с квантовыми точками

А.В. Савельев¹, С.С. Коноплев¹, В.В. Коренев¹, Ю.М. Шерняков¹, М.В. Максимов¹, А.Е. Жуков¹

¹ СПб Академический Университет РАН, Санкт-Петербург, 194021, Хлопина 8/3А

эл. почта: artem.savelyev@gmail.com

Известно, что нарушение равенства концентраций электронов и дырок в активной области лазеров с квантовыми точками (КТ) может существенно влиять на особенности лазерной генерации: зависимость порогового тока от температуры [1], конкуренцию между генерацией на основном и возбужденных состояниях [2] и целый ряд других. Помимо этого, большинство аналитических моделей КТ лазеров основываются на тех или иных допущениях об отношении концентрации носителей разных знаков. К известным можно отнести приближение малой концентрации [1], приближение равенства концентраций (частичной электрической нейтральности), подход фиксированного отношения концентраций (h -фактор, [2]) и представление о «плоских» зонах. В различных режимах работы КТ лазера применимы различные из этих приближений и целью нашего исследования является понимание границ применимости каждого из них на основе численного моделирования зонной диаграммы работающего лазера с квантовыми точками. В качестве практически значимого результата рассматривается вопрос об оптимизации лазерных характеристик за счет модулированного легирования активной области лазера.

В результате построена дрейф-диффузионная модель лазера с КТ, с учетом особенностей захвата носителей в КТ, кинетики носителей внутри КТ и взаимодействия носителей со светом. Показано, что в ряде случаев концентрации электронов и дырок могут заметно различаться. Проведен анализ применимости приближений и рассмотрены возможные аналитические подходы к моделированию лазеров с КТ. Также выполнен анализ влияния особенностей распределения электронов и дырок на лазерные характеристики и проведен анализ экспериментальных данных об излучении лазеров с модулированным легированием активной области.

Работа поддержана грантом РФФИ № 14-42-00006.

Литература

- [1] L.V. Asryan, R.A. Suris, IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. 3, 148 (1997).
- [2] V.V. Korenev et al., Appl. Phys. Lett. 102, 112101 (2013)

Увеличение мощности излучения лазерных гетероструктур на основе GaAs/AlGaAs за счет введения дополнительной КЯ

А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков

БГУ, Минск, 220030, пр. Независимости, 4

эл. почта: afonenko@bsu.by

Лазерные гетероструктуры GaAs/AlGaAs, излучающие на длине волны ~ 850 нм, представляют интерес как источники накачки твердотельных лазеров [1, 2]. Одним из факторов, ограничивающих выходную мощность излучения, является поглощение свободными носителями, которое увеличивается с ростом тока накачки. В настоящей работе показана возможность уменьшения внутренних потерь путем введения дополнительной КЯ вблизи эмиттерных слоев.

В численных расчетах анализировалась конструкция асимметричной лазерной гетероструктуры на основе GaAs/Al_{0.38}Ga_{0.62}As, предложенная в работе [2]. Расчеты мощностных характеристик лазерных гетероструктур проведены на основе модифицированной диффузионно-дрейфовой модели [3] с учетом поглощения излучения свободными носителями и изменения длины волны генерации в зависимости от температуры и уровня возбуждения структуры.

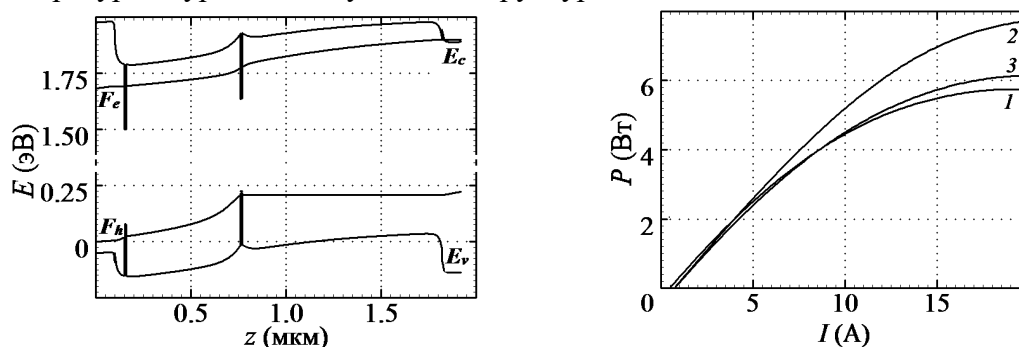


Рис. 1. Зонная диаграмма лазерной гетероструктуры с дополнительной КЯ вблизи p -эмиттера (а) и ватт-амперная характеристика лазерных гетероструктур (б): 1 – лазерная гетероструктура [2], 2 – с дополнительной КЯ вблизи p -эмиттера, 3 – с дополнительной КЯ вблизи n -эмиттера

Как показано на рис. 1 а, введение дополнительной КЯ вблизи эмиттера, позволяет снизить населенность волноводного слоя и уменьшить поглощение свободными носителями [4]. При введении дополнительной КЯ вблизи p -эмиттера увеличение мощности составляет 16 и 34 % при токе 10 и 20 А соответственно.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по проекту БРФФИ № Ф16Р–018.

Литература

- [1] А.Ю. Андреев, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, Т.А. Налет, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, Д.Р. Сабитов, В.А. Симаков, С.О. Слипченко, М.А. Хомылев, И.С. Тарасов, ФТП 40, 628 (2006).
- [2] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, Л.С. Вавилова, И.С. Тарасов, ФТП 46, 1344 (2012).
- [3] А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков, ФТП 48, 88 (2014).
- [4] А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков, Сб. статей 10-го Белорусско-российского семинара "Полупроводниковые лазеры и системы на их основе", 46 (2015).

Влияние внутризонного поглощения излучения на пороговые характеристики InGaAsP/InP гетеролазеров ($\lambda=1,3-1,55$ мкм)

Н.В. Павлов¹, А.Г. Зегря¹, А.Е. Романов^{1,2}, Г.Г. Зегря^{1,2}

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

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Кронверкский пр., 49

эл. почта: pavlovnv@mail.ru

Механизмы внутризонного поглощения излучения в лазерах на квантовых ямах (КЯ) исследуются как теоретически, так и экспериментально на протяжении многих лет [1]. Экспериментальные результаты показывают, что коэффициент внутризонного поглощения лазерного излучения в несколько раз выше, чем предсказывает теория.

В работе выполнен детальный анализ механизмов внутризонного поглощения излучения в лазерной структуре InGaAsP/InP. Показано, что коэффициент внутризонного поглощения излучения электронами в несколько раз меньше коэффициента внутризонного поглощения дырками.

В рамках микроскопической модели выполнен расчет коэффициента внутризонного поглощения дырками с переходом их в спин-отщепленную (so) зону для КЯ. Механизм внутризонного поглощения возможен без участия третьей частицы (фонона либо примеси) и является основным процессом внутризонного поглощения и потерь излучения для лазеров на КЯ. Расчет коэффициента поглощения выполнен для двух поляризаций электромагнитной волны: перпендикулярной и параллельной гетерогранице.

Для нахождения скорости внутризонного поглощения, а, следовательно, и коэффициента поглощения, была использована модель Кейна-Латтинжера 8×8 , которая точно описывает состояния как зоны проводимости, так и валентной зоны. Из решения уравнений Кейна-Латтинжера найдены волновые функции тяжелых и so- дырок как в области КЯ, так и в барьерной области. С использованием граничных условий получен закон дисперсии для тяжелых и so- дырок. Важно отметить, что спектр so- дырок в КЯ существенно непараболичен. Скорость внутризонного поглощения состоит из двух частей, соответствующих переходам в дискретный и непрерывный спектр so- дырок. Детально проанализирована частотная зависимость коэффициента внутризонного поглощения для перехода в дискретный спектр so- дырок для электромагнитной волны, поляризованной в плоскости КЯ.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы", шифр 2015-14-582-0038, соглашение № 14.581.21.0013 от 4 августа 2015 г., уникальный идентификатор RFMEFI58115X0013

Литература

- [1] Intersubband Transitions in Quantum Wells, edited by E. Rosencher and B. Levine, Plenum, New York, 1992.

Квантовые состояния экситонов и спектры фотолюминесценции из наночастиц SiO₂ при различных спектрах возбуждения.

В.П. Дзюба, А.В. Амосов, Ю. Н. Кульчин

ИАПУ ДВО РАН, Владивосток, 690041, ул. Радио 5.

эл.почта vdzyuba@iacp.dvo.ru

В докладе теоретически обсуждается возможность существования высокотемпературных коллективных когерентных квантовых состояний экситонов в диэлектрических наночастицах. Оцениваются условия существования таких состояний в ограниченном объеме наночастицы и их проявления в спектрах люминесценции. Этот механизм коллективных когерентных квантовых состояний экситонов используется, наряду с общепринятыми механизмами, для анализа спектров фотолюминесценции и поведения при изменении частоты возбуждения (рис.1) массивов наночастиц SiO₂, возбуждаемых фотонами, энергия которых меньше ширины запрещенной зоны объемного материала более чем в 2 раза. По данным атомно-силовой микроскопии (PNT Nano-DST), одни частицы имеют дискообразную форму диаметром 10-20 нм и толщиной 1.5-2 нм (образец 1). Второй вид имеет эллипсоидную форму с величиной осей 10 и 20 нм (образец 2). Массивы наночастиц представляли собой порошок массой 10⁻⁴ грамма спрессованный в таблетки толщиной около 300 микрон при помощи ручного пресса. Спектры люминесценции были получены на спектр-флуориметре Horiba Fluorolog 3 с накачкой Хе-лампой. Выбор интенсивности излучения и его частотного состава определялся желанием возбуждать люминесценцию, связанную с однофотонным возбуждением экситонных состояний и их излучательной аннигиляцией.

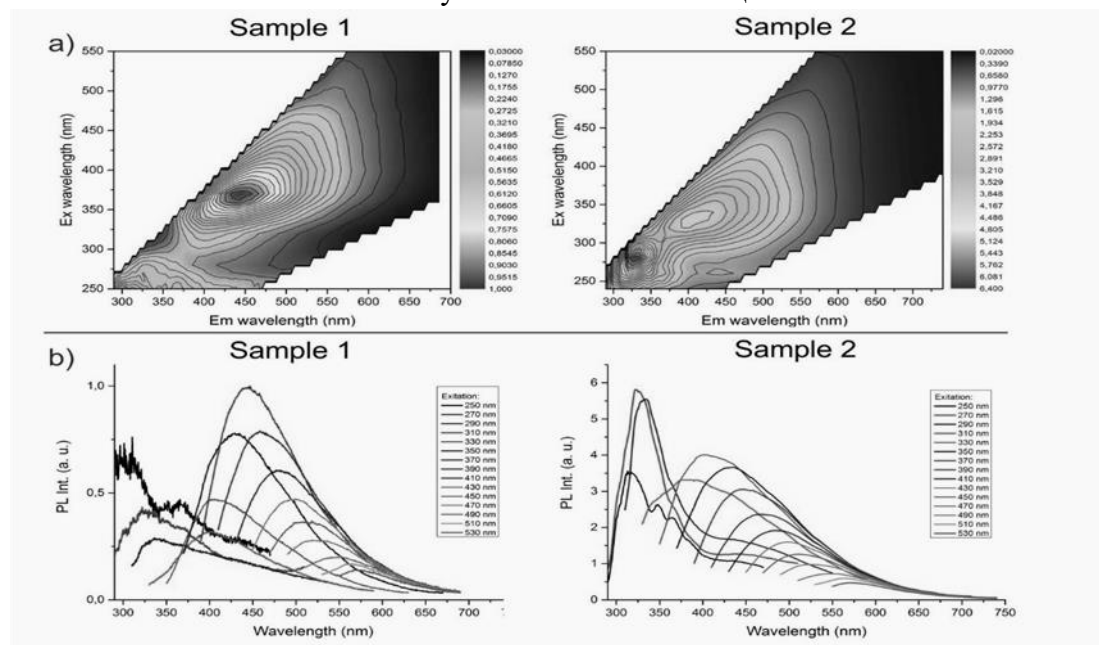


Рис.1 Спектры фотолюминесценции нормированные на интенсивность излучения накачки. В таблице приведены центральные частоты спектров накачки. Цвет линий спектров соответствует частотам накачки.

Перестраиваемые одночастотные полупроводниковые лазеры на основе двухпроходного усилителя.

В.П. Дураев, С.В. Медведев

ЗАО «Нолатех»

эл. почта: nolatech@mail.ru

Представлены результаты работ по созданию одночастотных перестраиваемых по длине волны полупроводниковых (п/п) лазеров с внешним резонатором на основе волоконных брэгговских решеток, сформированных в одномодовом волоконном световоде. Рассмотрены способы плавной перестройки длины волны излучения. Представленные лазеры способны генерировать динамически стабильное излучение с узкой шириной линии (менее 10 кГц) в диапазоне 635-1650 нм.

Для многих практических применений требуются значительно большие мощности излучения и стабильная узкая ширина линии излучения. Чаще всего, в этих случаях, применяются лазеры с внешним резонатором, в качестве которого используется дифракционная решетка. Основными элементами конструкции являются: двухпроходный оптический усилитель с отражающим покрытием на задней грани резонатора 90% и просветляющим покрытием на передней грани 0,01% и брэгговская решетка, сформированная в одномодовом световоде. Коэффициент отражения решетки обычно составляет 10-20%, селективность 0,1...10 нм. Для лучшего согласования лазерного кристалла с волоконным световодом на конце последнего формируется цилиндрическая микролинза, увеличивающая эффективность стыковки до 80%. Для уменьшения обратных отражений на микролинзу наносится просветляющее покрытие.

Плавная перестройка длины волны может быть осуществлена в пределах спектра отражения решетки за счет изменения тока инжекции или температуры ЛД.

Более стабильная перестройка в более широком диапазоне возможна за счет изменения показателя преломления волокна в области решетки. Волокно с решеткой помещается на пьезокерамику, способную изменять линейные размеры.

Получены следующие результаты для плавной перестройки: диапазон перестройки — 1,3 нм; шаг перестройки — менее 0,01 нм; мощность излучения — 10 мВт.; ширина линии генерации — <100кГц.

Таким образом плавная перестройка длины волны возможна за счет изменения сжатия/растяжения решетки, что очень востребовано при применении этих лазеров в спектроскопии высокого разрешения, в волоконно-оптических линиях связи со спектральным уплотнением каналов, в интерферометрии и т. д.

Генерация пикосекундных импульсов в двухсекционных лазерах на КЯ: влияние свойств насыщающегося поглотителя.

М. С. Буяло¹, И. М. Гаджиев¹, А. Ю. Егоров¹, Н. Д. Ильинская¹, А. А. Усикова¹,
А. В. Лютецкий¹, И. О. Бакшаев², Е. Л. Портной¹

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

² Innolume GmbH, 44263, Dortmund, Germany

эл. почта: mikhail.buyalo@gmail.com

Полупроводниковые лазеры, излучающие короткие оптические импульсы в режимах синхронизации мод (СМ) и модуляции добротности (МД) востребованы в современных оптоэлектронных устройствах, таких как оптические АЦП, генераторы опорного синхросигнала, источники сигналов для спектроскопии. Двухсекционная конструкция лазера с усиливающей и поглощающей секциями позволяет реализовать эти режимы, совмещая достоинства интегральной технологии с возможностью осуществлять генерацию импульсов при приложении постоянного тока. В тоже время, в структурах на основе КЯ, спектральные области, в которых достигается наибольшая эффективность работы усиливающих и поглощающих элементов, не совпадают. В частности, линия лазерной генерации в таких структурах из-за сужения запрещенной зоны в области накачки находится на длинноволновом краю спектра поглощения, поэтому для достижения необходимого уровня поглощения для синхронизации мод требуется прикладывать высокое напряжение.

В настоящей работе предложены пути оптимизации волновода и активной области лазеров на основе КЯ для улучшения рабочих характеристик лазеров. Для уменьшения величины обратного смещения на поглотителе предлагается использовать активную область с двумя туннельно-связанными асимметричными КЯ. При приложении обратного смещения порядка 1 В, возникает резонансная связь, и как следствие, длинноволновое поглощение на длине волны лазерной генерации, необходимое для режима СМ [1].

Для получения высоких частот повторения импульсов в режиме СМ были изготовлены лазеры длиной 0,5 мм с активной областью из трех КЯ. Из-за коротковолнового сдвига длины волны лазерной генерации (рис.2), величина поля, создаваемая фотоиндуцированными носителями, оказывается достаточной для компенсации приложенного обратного смещения к поглощающей секции [2] и лазер работает в режиме МД. При обратном смещении более 8 В, величина фототока уже недостаточна для компенсации приложенного поля, и лазер переходит в режим СМ с частотой следования импульсов 75 ГГц, при этом длительность импульсов определяется шириной спектра.

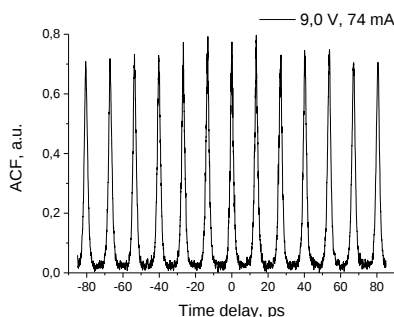


Рис. 1.

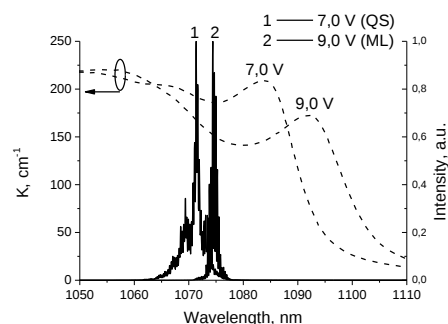


Рис.2.

Литература

- [1] M. S. Buyalo et al, El. Lett., Vol. 48, I. 14, pp. 870-872 (2012).
- [2] И. М. Гаджиев и др., ФТП 50, 16, стр. 843-847 (2016).

Полупроводниковые лазеры с выходным поверхностным распределенным брэгговским зеркалом высокого порядка дифракции

В.В. Золотарев, В.А. Капитонов, А.Ю. Лешко, Я.В. Лубянский, А.Н. Петрунов,
З.Н. Соколова, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов

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

эл. почта: zolotarev.bazil@mail.ioffe.ru

Управление спектральными и пространственными свойствами полупроводниковых лазеров является ключевым элементом расширения их областей применения. Поверхностное интегрированное распределенной брэгговское зеркало (П-РБЗ) высокого порядка дифракции позволяет кардинально уменьшить ширину спектра генерации мощного полупроводникового лазера полосковой конструкции сохранив относительно простую технологию его изготовления.

Характерной чертой РБЗ высокого порядка дифракции является наличие, помимо отраженного и проходящего лучей, дополнительного набора дифрагированных волн, распространяющихся вне плоскости волновода (рис. 1). Данное паразитное излучение не дает вклад в полезную выходную оптическую мощность и, как следствие, может быть представлено в виде дополнительных оптических потерь.

В данной работе были проведены исследования полупроводниковых лазеров с П-РБЗ высокого порядка дифракции. Результаты исследования показали, что основными параметрами, влияющими на величину паразитных оптических потерь, являются длина П-РБЗ и геометрическая форма его штриха. С целью снижения величины данных потерь представлена конструкция резонатора лазера с коротким выходным полупрозрачным П-РБЗ. С помощью данной конструкции удалось увеличить наклон ватт-амперной характеристики лазера в три раза и достичь более 4 ватт мощности (рис 2) при ширине спектра не более 3 Å [1].

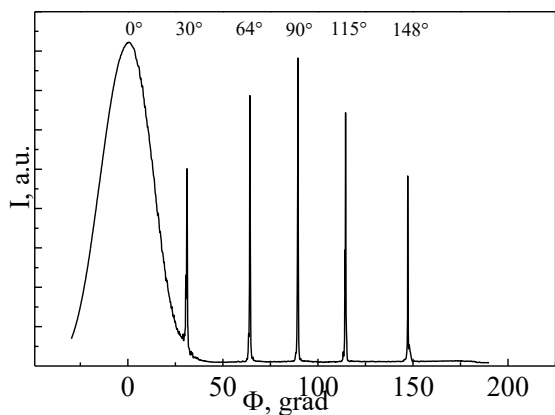


Рис. 1. Диаграмма направленности излучения лазера с П-РБЗ

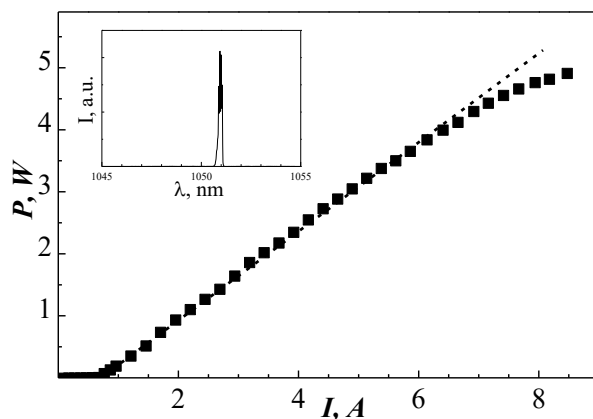


Рис. 2. Ватт-амперные характеристика и спектр (вставка) лазера с выходным П-РБЗ

Литература

- [1] V. V. Zolotarev et al., J. Phys.: Conf. Ser. 740 012003 (2016)

Ближнее поле излучения InGaAs/GaAs лазеров с вытекающей модой

А.А. Афоненко¹, М.С. Головчак¹, А.А. Маковский¹, В.М. Стецик¹, Д.В. Ушаков¹,
Н.В. Дикарева², С.М. Некоркин², И.И. Чунин², Б.Н. Звонков²

¹ БГУ, Республика Беларусь, Минск, 220030, пр. Независимости, 4

² ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603950, пр. Гагарина, 23

эл. почта: afonenko@bsu.by

Лазеры с увеличенной активной областью и выходом излучения через подложку обладают высокими энергетическими параметрами и улучшенными пространственными характеристиками [1, 2]. Измерение мощностных характеристик при импульсной накачке показывает, что, возможно, при коротких импульсах лазеры не прокачиваются на всю ширину активной области. Проведенные измерения ближнего поля излучения также свидетельствуют о наличии значительных неоднородностей излучения по ширине активной области (рис.1). При увеличении длительности и амплитуды тока ширина пятна заметно возрастает. Это может быть связано с флуктуациями толщины обкладочного слоя, определяющего эффективность вывода излучения в подложку, что влияет на порог генерации в разных частях структуры.

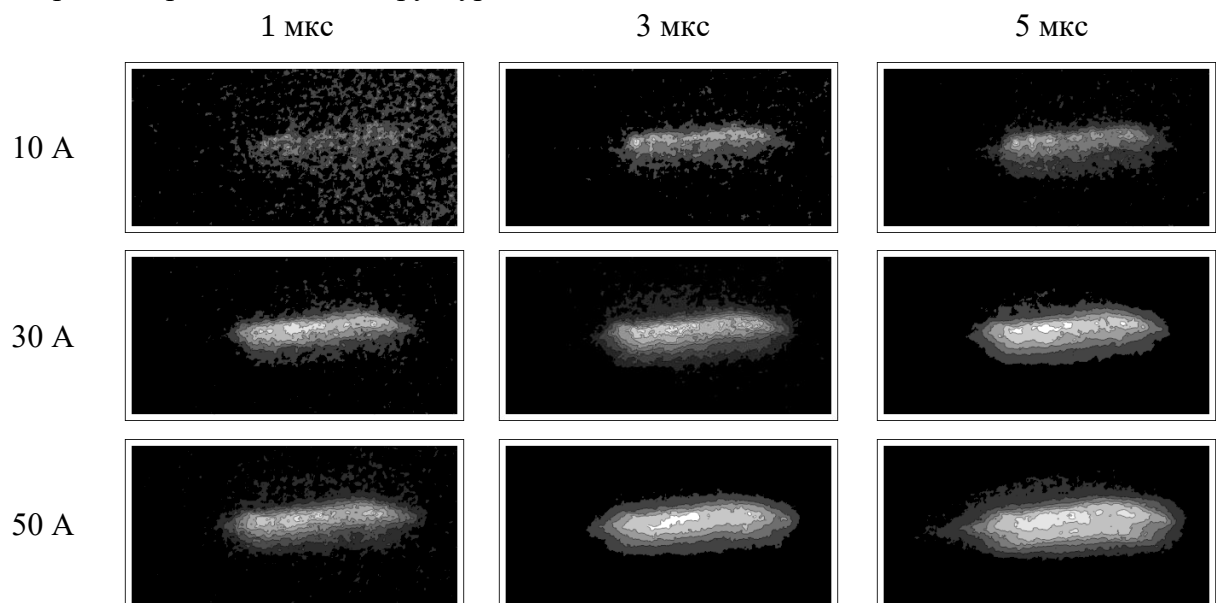


Рис. 1. Распределение интенсивности излучения в ближнем поле лазеров с вытекающей модой при разных токах накачки и длительностях импульсов

Работа выполнена при поддержке гранта Ф16Р-018 БРФФИ, стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики № СП-109.2016.3, гранта РФФИ-БРФФИ проект №16-52-00049 и поддержке Министерства образования и науки России (базовая часть государственного задания № 2014/134, проект 3423).

Литература

- [1] Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин и др./Квантовая электроника 40 (10), 855 (2010).
- [2] Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин и др./Вестник ННГУ 1, 1, 30-32 (2012).

Исследование генерации с двух уровней размерного квантования в лазерах на квантовой яме InGaAs

К.Р. Аюшева¹, Д.А. Веселов¹, Н.В. Воронкова¹, В.А.Стрелец¹,
С.О.Слипченко¹, Н.А. Пихтин¹, И.С.Тарасов¹

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

эл. почта: ayusheva@mail.ioffe.ru

Полупроводниковые лазеры с широким спектром излучения в последнее время представляют все больший интерес в области спектроскопии, коммуникации и формирования сверхкоротких импульсов. Существующие лазерные диоды на квантовых точках и системах квантовая яма/квантовая точка продемонстрировали возможность существования двух- и трехуровневых режимов генерации [1,2].

В данной работе исследовался механизм переключения уровней размерного квантования в мощных полупроводниковых лазерах AlGaAs/InGaAs/GaAs на квантовых ямах с асимметричным расширенным волноводом. Исследовались образцы с коротким резонатором (670 и 870 мкм). При такой длине резонатора большие внешние оптические потери требуют большую пороговую плотность тока. Концентрация носителей в квантовой яме оказывается достаточно большой, чтобы проявлялись эффекты насыщения усиления и переключения генерации между уровнями размерного квантования. Исследования проводились в импульсном режиме генерации (длительность импульса 100 нс, частота следований импульсов 1кГц). Показана тенденция к перестройке с первого уровня размерного квантования на второй при увеличении амплитуды тока/температуры. Определены режимы и диапазоны перестройки. Продemonстрировано одновременное существование спектральных линий двух уровней при заданном токе/температуре вблизи точки переключения. Физически механизм переключения объясняется ростом внутренних оптических потерь с увеличением амплитуды тока/температуры. Переключение наблюдалось при достижении значения усиления около 20 см^{-1} .

Проведено сравнение мощностных характеристик лазеров, работающих со второго и с первого уровней с порога генерации. Показано, что ватт-амперная характеристика (ВтАХ) лазера, работающего со второго уровня, до 50 А почти не отличается от ВтАХ обычного лазера. Проведены измерения ВтАХ лазера с переключением уровней. Максимальная пиковая мощность обоих уровней достигает 10 Вт в диапазоне токов вблизи переключения генерации.

Литература

- [1] V. V. Korenev, A. V. Savelyev, A. E. Zhukov, A. V.Omelchenko, M. V. Maximov, Journal of Physics: Conference Series 572, 1, 2014.
- [2] S. Chen, K. Zhou, Z. Zhang, J. R. Orchard, D. T. Childs, M. Hugues, R. A. Hogg, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 19(4), 2013
- [3] Г.С. Соколовский, Д. А. Винокуров, А. Г. Дерягин, В. В. Дюделев, В. И. Кучинский, С. Н. Лосев, И. С. Тарасов, Письма в ЖТФ, 34, 16, 2008

Влияние типа теплоотводящего элемента на тепловое сопротивление мощных лазерных диодов

**В.В. Безотосный^{1,2}, О. Н. Крохин^{1,2}, В. А. Олещенко¹, В. Ф. Певцов¹,
Ю. М. Попов^{1,2}, Е.А. Чешев^{1,2}**

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва 119991, Ленинский проспект 53.

² НИЯУ МИФИ, Москва, Каширское шоссе д.31

эл. почта: victorbe@sci.lebedev.ru

Исследованы параметры лазерных диодов с ресурсной мощностью до 15 Вт [1]. Изучены спектры излучения таких лазеров с полосковым контактом 95 мкм смонтированных на медных теплоотводящих элементах типа С-маунт и F-маунт [2] в диапазоне токов накачки от порога генерации до 14 А, соответствующем выходной мощности 15 Вт. Обсуждаются особенности спектров генерации обнаруженные при мощности излучения более 5-7 Вт. Для вычисления величины теплового сопротивления предложена методика определения максимума огибающей при значительном уширении и при наличии особенностей на спектральном контуре. С помощью указанной методики определено тепловое сопротивление серии образцов смонтированных на С и F маунтах в зависимости от тока накачки, обнаружена корреляция указанных зависимостей с зависимостью полного к.п.д. от тока накачки. Полученные нами результаты сравниваются с опубликованными данными других авторов полученными для аналогичных по параметрам чипов лазерных кристаллов при более сложных схемах монтажа и охлаждения [3,4]. Обсуждается вопрос адекватности применения термина «тепловое сопротивление» для анализа тепловых параметров лазерных диодов. Измерения на серии образцов при токе накачки 10 А показали усреднённые значения теплового сопротивления 2.75 К/Вт для F-маунтов и 3.9 К/Вт для С-маунтов. Вблизи максимума полного к.п.д., при токе накачки около 4А, отдельные образцы смонтированные на С-маунтах показали значения теплового сопротивления менее 1.5 К/Вт, что соответствует опубликованным рекордным результатам полученным при монтаже лазерного чипа на композит медь-алмаз и охлаждении микроканальным жидкостным охладителем.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, соглашение № 14.575.21.0047.

Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта)

RFMEFI57514X0047.

Литература

- [1] В.В. Безотосный, О.Н. Крохин, В.А. Олещенко, В.Ф. Певцов, Ю.М. Попов, Е.А.Чешев, Квантовая электроника, **45** (12), 1088, (2015).
- [2] В.В. Безотосный, О.Н. Крохин, В.А.Олещенко, В.Ф.Певцов, Ю.М .Попов, Е.А.Чешев, «Квантовая электроника», 46, № 8 (2016).
- [3] P.Cruimp, J. Decker, M. Winterfeldt, J.Fricke, A. Maassdorf, G. Erbert, G. Trankle, Proc. of SPIE Vol.9348, 93480D-1 , 2015.
- [4] Xiaoning Li, Yanxin Zhang, Jingwei Wang, Lingling Xiong, Pu Zhang, Zhiqiang Nie, Zhenfu Wang, Hui Liu . IEEE TRANS. ON COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACT. TECH., 2, 10, 1592, 2012.

Исследование рабочих характеристик мощных полупроводниковых лазеров при низких температурах

**Ю.К. Бобрецова¹, Д.А. Веселов¹, С.О. Слипченко¹, Н.А. Пихтин¹, З.Н. Соколова¹,
И.С. Тарасов¹**

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

эл. почта: bobre-yulya@yandex.ru

Полупроводниковые лазеры, излучающие в спектральных диапазонах 1000- 1100 нм и 1400-1600 нм, используются для накачки различных сред, оптоволоконной связи и лидарных систем. Для лазеров, излучающих в различных диапазонах длин волн, свойственно насыщение ватт-амперных характеристик (ВтАХ), обусловленное рядом причин. Одним из способов снижения влияния эффекта насыщения ВтАХ, следовательно, и повышению максимальной оптической мощности является снижение рабочей температуры лазера до предельных значений, например [1-3]. Исследование механизмов насыщения и влияния на них понижения рабочей температуры до предельных значений является основной целью данной работы.

В данной работе были проведены исследования мощностных и спектральных характеристик полупроводниковых лазеров на основе двойной гетероструктуры раздельного ограничения с квантово-размерной областью и ассиметричным волноводом при низких температурах 110-120 К. Лазеры спектрального диапазона 1000-1100 нм были выращены на основе системы твердых растворов InGaAs/AlGaAs/GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии. Лазеры спектрального диапазона 1400-1600 нм были выращены в системе твердых растворов AlGaInAs/GaInAsP/ InP.

Была разработана методика измерений при низких температурах. Измерения мощностных и спектральных характеристик при комнатной температуре проводились стандартным образом. Для измерения при температуре 110-120 К исследуемый образец лазера помещался в закрытую колбу, через которую проводилось охлаждение лазера жидким азотом. Также в колбу подавался поток газообразного азота для предотвращения обмерзания лазерного образца. Измерения мощностных и спектральных характеристик при температуре 110-120 К проводились аналогично. Все полученные результаты исследований рабочих характеристик будут представлены в докладе.

Для лазеров, излучающих в диапазоне 1000-1100 нм, при комнатной температуре была достигнута максимальная пиковая оптическая мощность 65 Вт с апертуры 100 мкм в импульсном режиме работы и 12 Вт в непрерывном режиме работы. При охлаждении до низких температур 110-120 К продемонстрировали мощности: 110 Вт в импульсном режиме работы и 25 Вт в непрерывном; причем полученные ВтАХ практически совпали. Достижение более высоких мощностей было ограничено явлением катастрофической оптической деградации зеркал (КОДЗ). Возможно, увеличение выходной оптической мощности связано с уменьшением внутренних оптических потерь при уменьшении температуры.

Лазеры, излучающие в диапазоне 1400-1600 нм, достигли максимальной пиковой оптической мощности 20 Вт с апертуры 100 мкм при низких температурах 110-120 К в импульсном режиме работы.

Литература

- [1] P. Crump, C. Frevert, H. Hösler, F. Bugge, S. Knigge, W. Pittroff, G. Erbert, G. Tränkle, Proc. of SPIE Vol. 9002, 90021I-6 (2014)
- [2] C. Frevert, P. Crump, H. Wenzel, S. Knigge, F. Bugge, G. Erbert, IEEE Conference Publications, p.2, (2013)
- [3] Д.А. Веселов, И.С. Шашкин, Ю.К. Бобрецова, К.В. Бахвалов, А.В. Лютецкий, В.А. Капитонов, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов, ФТП, т.50, вып.10 (2016)

Вклад спонтанного излучения в формирование основной моды излучения поверхностно излучающих полупроводниковых лазеров.

Л.И. Буров, А.С. Горбацевич, П.М. Лобацевич

БГУ, Беларусь, Минск, 220050, пр-т Независимости, 4

эл. почта: burov@bsu.by

Спонтанное излучение не только запускает процесс генерации в полупроводниковых инжекционных лазерах, но и во многом определяет целый ряд характеристик таких систем. Обычно вклад спонтанного излучения в основную моду генерации оценивается параметром β , значения которого для обычных торцевых лазерных диодов лежат в пределах $10^{-2} - 10^{-4}$ в зависимости от конструкции.

Для поверхностно излучающих полупроводниковых лазеров (VCSEL) ситуация с определением параметра β оказалась весьма запутанной, поскольку различные экспериментальные методы давали совершенно разные результаты в пределах от 10^{-1} до 10^{-5} . Теоретические оценки этого параметра, исходя из общих представлений теории полупроводниковых лазеров, также давали весьма разноречивые результаты в тех же пределах.

В тоже время при теоретическом моделировании процессов поляризационного переключения (резкого изменения одной линейной поляризации на ортогональную при небольшом изменении инжекционного тока) обычно используются значения β в области $10^{-5} - 10^{-6}$. Проведенное нами численное моделирование характера поляризационного переключения в VCSEL в рамках разных моделей, применяемых для описания таких процессов, показало, что использование величины β больше, чем $5 \cdot 10^{-5}$, приводят к эффектам, существенно отличающимся от наблюдаемых экспериментально, в первую очередь, для динамических режимов.

Результаты проведенных расчетов, а также анализ литературных данных позволяют считать, что роль спонтанного излучения, во всяком случае, по отношению к VCSEL, сильно преувеличена. В частности, на основе статистического моделирования проведена оценка влияния величины β на значения ряда характеристик выходного излучения (дисперсия функций распределения интенсивности и степени поляризации, среднее значение степени поляризации, среднее время переключения и т.д.). Показано, что, хотя влияние β четко прослеживается (например, происходит сдвиг функции распределения степени поляризации), считать, что флуктуации спонтанного излучения являются определяющими для статистических характеристик, нет достаточных оснований. Полученные результаты позволяют считать, что основной вклад дают флуктуации концентрации неравновесных носителей. Поэтому именно с допущением о доминирующей роли спонтанного излучения можно связать завышенные значения для β , которые получаются из анализа экспериментальных данных. В тоже время анализ полученных результатов статистического моделирования позволяют считать, что реальные значения β для VCSEL лежат именно в пределах $10^{-5} - 10^{-6}$.

Поляризационные характеристики неодимового лазера с неоднородной поперечной диодной накачкой.

Л.И.Буров, А.С. Горбачевич, А.Н.Мигуцкий

БГУ, Беларусь, Минск, 220050, пр-т Независимости, 4

эл. почта: burov@bsu.by

Поляризация является не только одной из основных характеристик выходного излучения лазера, но и позволяет получать важную информацию о процессах формирования такого излучения в резонаторе лазерной системы. Для твердотельных лазеров с продольной диодной накачкой она в основном определяется поляризацией излучения накачки. Для твердотельных лазеров с поперечной диодной накачкой исследования процессов формирования поляризованного излучения и управления такими процессами практически отсутствуют. В настоящей работе приводятся результаты первого, на наш взгляд, систематического экспериментального исследования поляризационных характеристик неодимового лазера с неоднородной поперечной диодной накачкой.

Исследования проводились для лазера на основе Nd-YAG при накачке двумя диодными линейками, расположенными по планарной схеме. Такая схема накачки обеспечивала практически линейную поляризацию выходного излучения в случае эрбиевого лазера [1]. Однако в данном случае был использован диффузный отражатель, который позволяет добиться как более однородной прокачки активной среды по объему, так и снижения влияния поляризации излучения накачки.

При проведении исследований было отмечено, что результаты сильно зависят даже от незначительных изменений в настройке резонатора. Поэтому большая часть экспериментальных данных получена для плоскопараллельного резонатора, который оказывается наиболее чувствителен как к юстировке, так и к возникающим пространственным неоднородностям показателя преломления в активном элементе. Как правило, начальная юстировка резонатора проводилась для достижения максимальной энергии выходного излучения при фиксированном значении тока накачки и не менялась при изменении тока или частоты следования импульсов.

Основные результаты исследований можно сформулировать следующим образом:

- даже при наличии диффузного отражателя среднее значение степени поляризации выходного излучения может достигать значений 0.8 – 0.9;
- степень поляризации заметно падает с ростом тока накачки;
- степень поляризации незначительно падает с ростом частоты следования импульсов накачки от 1 до 10 Гц;
- наблюдалась существенная неоднородность распределения степени поляризации по сечению выходного пучка, которая заметно меняется при изменении режима накачки и настройки резонатора, однако устойчивых корреляций между распределениями степени поляризации и интенсивности не выявлено;

Литература

[1] Г.И.Рябцев, М.В.Богданович, А.И.Енжиевский, В.В.Паращук, Л.И.Буров, М.А.Щемелев, А.Г.Рябцев, В.В.Машко, Л.Л.Тепляшин, А.С.Красковский. Оптический журнал 73, 10 (2006)

Влияние кулоновского взаимодействия на время жизни электронов и дырок в лазерных гетероструктурах с квантовыми ямами

Л.В. Данилов¹, А.Г. Зегря¹, В.Е. Бугров², Г.Г. Зегря^{1,2}

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

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Кронверкский проспект, 49

эл. почта: danleon84@mail.ru

Полупроводниковые лазеры спектрального диапазона 1.3-1.55 мкм, как правило, базируются на системе InGaAsP/InP. В такой системе квантовые ямы (КЯ) для электронов неглубокие (глубина квантовой ямы ΔE_c порядка 0.08 эВ), а глубина КЯ для дырок $\Delta E_v \approx 1.5\Delta E_c$. Как показывают теоретические расчеты и экспериментальные результаты, в такой лазерной структуре электрон, за счет теплового возбуждения выбрасывается в волноводную область [1]. В результате происходит перераспределение электронов между квантовой ямой и барьерной областью. Условие квазинейтральности при этом имеет вид $P_{QW} = n_{QW} + n_b$, где P_{QW} и n_{QW} - двумерные концентрации дырок и электронов в КЯ соответственно; n_b - концентрация электронов в волноводной области. Время жизни электронов в КЯ зависит от трех процессов: а) излучательной рекомбинации, б) безызлучательной Оже-рекомбинации (ОР) электронов и дырок, локализованных в КЯ, в) безызлучательной рекомбинации электронов в КЯ, взаимодействующих с электронами в волноводной области. Речь идет о процессе ОР, при котором энергия рекомбинации электрона и дырки, локализованных в КЯ, передается за счет кулоновского взаимодействия электрону в барьерной области. Вероятность такого процесса рекомбинации будет пропорциональна концентрации n_b . Для мелких КЯ скорость рассмотренного процесса рекомбинации сравнима или превышает скорость излучательной рекомбинации. Следовательно, такой процесс безызлучательной рекомбинации необходимо учитывать при анализе пороговых характеристик лазеров на КЯ.

В настоящей работе построена микроскопическая теория процессов ОР электронов в КЯ и барьерной области. Показано, что коэффициент ОР немонотонно зависит от ширины КЯ [2]. Скорость ОР растет с увеличением температуры степенным образом (практически линейно). При высоких уровнях возбуждения (в режиме генерации) время ОР может быть порядка и даже меньше времени излучательной рекомбинации [3].

«Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы", шифр 2015-14-582-0038, соглашение № 14.581.21.0013 от 4 августа 2015 г., уникальный идентификатор RFMEFI58115X0013»

Литература

- [1] Г.Г. Зегря, Н.А. Пихтин, Г.В. Скрынников, И.С. Тарасов, ФТП, 34, 1001, (2001).
- [2] Н.А. Гунько, А.С. Полковников, Г.Г. Зегря, ФТП, 34, 462, (2000).
- [3] L.V. Asryan, N.A. Gun'ko, A.S. Polkovnikov, Semicond. Sci. Tech., 15, 1131, (2000).

Влияние длины резонатора на энергетические характеристики GaAs лазеров с увеличенной активной областью и выходом излучения через подложку

Н.В. Дикарева¹, С.М. Некоркин¹, И.И. Чунин¹, Б.Н. Звонков¹, А.А. Афоненко²,
Д.В. Ушаков²

¹ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603950, пр. Гагарина, 23

² БГУ, Республика Беларусь, Минск, 220030, пр. Независимости, 4

эл. почта: dnat@ro.ru

В настоящей работе предложен метод управления мощностными свойствами GaAs лазеров с увеличенной активной областью и выходом излучения через подложку, ранее продемонстрировавших высокие энергетические параметры и улучшенные пространственные характеристики [1,2].

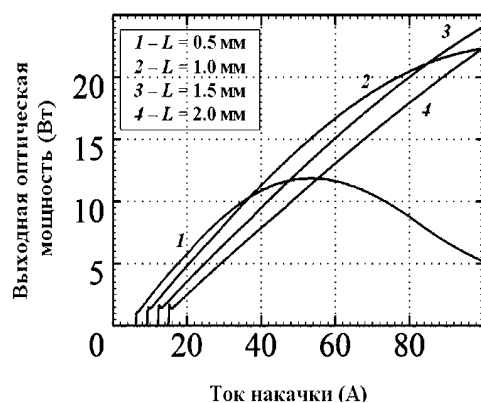
Проведены экспериментальные исследования ватт-амперных характеристик образцов лазерных диодов в зависимости от длины резонатора и длительности импульса накачки. Ширина полоскового контакта испытываемых образцов составляла 360 мкм, зеркалами служили сколотые грани структуры без отражающих и просветляющих диэлектрических покрытий. Обнаружено, что существует определенный интервал значений длины лазерного резонатора, при котором наблюдается существенное увеличение мощности. Так, для GaAs полупроводниковых лазеров с 6 квантовыми ямами в активной области и долей вытекающего через подложку излучения более 80% изменение длины резонатора с 500 до 800 мкм позволяет вдвое увеличить выходную мощность и квантовую эффективность излучателя при накачке импульсами тока 80 А и длительностью 5 мкс. Дальнейшее увеличение длины резонатора приводило к снижению мощности лазеров.

Теоретические исследования показали, что подобное поведение лазеров связано с процессами разогрева структуры (рис.). Короткий резонатор (0.5 мм) способствует снижению порогового тока и увеличению дифференциальной квантовой эффективности, но при увеличении тока быстро разогревается и мощность генерации падает. В диапазоне токов накачки до 80 А большей эффективностью обладают структуры с длиной резонатора до 1 мм. Напротив, если требуется лишь увеличение выходной оптической мощности и отсутствуют какие-либо требования к уровню и способу накачки, то дальнейшее увеличение длины резонатора при накачке микросекундными импульсами может быть предпочтительнее за счет лучшего рассеяния тепла.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики № СП-109.2016.3, гранта Ф16Р-018 БРФФИ, гранта РФФИ-БРФФИ проект №16-52-00049 и поддержке Министерства образования и науки России (базовая часть государственного задания № 2014/134, проект 3423).

Литература

- [1] Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин и др./Квантовая электроника 40 (10), 855 (2010).
- [2] Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин и др./Вестник ННГУ 1, 1, 30-32 (2012).



Исследования структурных особенностей и оптических свойств разноориентированных подложек GaAs(100) для лазерных гетероструктур

**А.В. Жаботинский², П.В. Середин¹, А.В. Федюкин¹, И.Н. Арсентьев², Д.Н. Николаев²,
И.С. Тарасов², Tatiana Prutskij³, Harald Leiste⁴, Monika Rinke⁴**

¹ Воронежский государственный университет, Воронеж, 394006, Университетская пл. 1

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

³ Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Privada 17 Norte, No 3417, Col San Miguel Hueyotlipan, 72050, Puebla, Pue., Mexico

⁴ Karlsruhe Nano Micro Facility H.-von-Helmholtz-Platz 1 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany

эл. почта: seredin@phys.vsu.ru

Учитывая, что в технологиях эпитаксиального роста для создания устройств оптоэлектронной компонентной базы (лазерных структур) зачастую используются разноориентированные подложки GaAs, то исследования влияния кристаллографической ориентации материала подложки на структурные особенности и оптические свойства финальной лазерной гетероструктуры являются весьма востребованными и актуальными.

Проведенные нами исследования показали, что при росте однослойных гетероструктур (одинокных слоев) интенсивность ФЛ образцов, полученные на разориентированных подложках GaAs в несколько раз выше по сравнению с образцами гетероструктур, полученными в том же эпитаксиальном процессе, но выращенными на точноориентированной подложке. Максимальная интенсивность квантового выхода фотолюминесценции достигается в структурах, выращенных на подложках с разориентацией 4° к плоскости $[110]$.

Работа, в части разработки технологии получения гетероструктур, выполнена в соответствии с Государственным заданием ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2014-2016 годы. (Проект №740, Задание №3.130.2014/К).

Механизм двухволновой генерации в Nd:YLF-лазере с пассивным затвором Cr^{4+} :YAG при продольной диодной накачке

А. Л. Коромыслов^{1,2}, В.В. Безотосный^{1,2}, М.В. Горбунков¹, В.Г. Тункин³, Е.А. Чешев^{1,2}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва 119991, Ленинский проспект 53.

² НИЯУ МИФИ, 115409, Москва, Каширское шоссе д.31

³ МГУ, Международный лазерный центр, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

эл. почта akorom@mail.ru

Твердотельные лазеры с диодной накачкой и модуляцией добротности пассивным затвором Cr^{4+} :YAG широко востребованы в различных задачах. Например, в [1] на кристалле Nd:YVO₄ была получена генерация стоксового излучения и наблюдалась синхронизация одновременно и продольных, и поперечных мод основной и стоксовой компонент излучения. С целью создания двухволнового лазера для источника терагерцового излучения были исследованы генерационные характеристики Nd:YLF [100] лазера с пассивной модуляцией добротности затвором на кристалле Cr^{4+} :YAG при продольной диодной накачке в условиях синхронизации поперечных мод. Зарегистрировано падение порога генерации, увеличение длительности импульсов, уменьшение периода следования импульсов и уменьшение импульсной мощности в данном лазере в областях синхронизации поперечных мод. Показано, что эффекты обусловлены увеличением усиления за проход, вызванным синхронизацией поперечных мод. Эффект использован для реализации режима двухволновой генерации (1047 нм и 1053 нм) в лазере с пассивным затвором. Экспериментально определены условия, при которых двулучепреломление в активном элементе (АЭ) позволяет осуществлять двухволновую генерацию. Показано, что в Nd:YLF лазере с пассивным затвором двухволновый режим обеспечивается выравниванием усилений на указанных длинах волн за счет выбора длины резонатора, совпадающей с одной из областей синхронизации поперечных мод, в которой наблюдается падение усиления за проход на длине волны 1047 нм. Представляется перспективным использование компактного двухволнового лазера на кристалле Nd:YLF с пассивным затвором Cr^{4+} :YAG в компактных источниках излучения 1.64 ТГц, основанных на методе генерации разностной частоты в нелинейном кристалле.

Работа выполнена при поддержке РФФИ Грант № 16-32-00834 мол_а, Минобрнауки РФ, соглашение № 14.575.21.0047. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57514X0047 программы фундаментальных исследований отделения физики РАН, «Фундаментальные проблемы фотоники и физика новых оптических материалов» программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 42.

Литература

[1] В.В. Безотосный, М.В. Горбунков, В.И. Дашкевич, А.Л. Коромыслов, В.А. Орлович, Ю.М. Попов, В.Г. Тункин, Е.А. Чешев, Р.В. Чулков, КСФ, 43(6), 203-206, (2016).

Управление селекцией мод кольцевых микролазеров

Я.В. Левицкий¹, М.И. Митрофанов^{2,3}, В.П. Евтихий¹

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

² НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

³ ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Кронверкский проспект, 49

эл. почта: levitskyar@gmail.com

Оптическая обработка сигнала, базирующаяся на элементах нанофотоники [1] является на данный момент, самым энергоэффективным методом передачи и обработки информации. До недавнего времени считалось, что оптическая обработка сигналов не может конкурировать с электронной в связи с принципиально большими размерами логической ячейки. Однако, появление систем спектрального уплотнения каналов, позволяющих пропускать по единому тракту пакеты информации одновременно на нескольких десятках несущих частот, принципиально повысили конкурентоспособность решений, основанных на оптической передаче и обработке информации. В качестве базовых элементов оптических микросхем используются кольцевые резонаторы [2,3], поддерживающие моды шепчущей галереи, которые являются сильно локализованными резонансами с большой интенсивностью света вблизи края диска или кольца.

По результатам предварительных экспериментов, в ходе которых был исследован модовый состав целого ряда кольцевых и дисковых микрорезонаторов, сформированных на лазерной гетероструктуре InGaAs/AlGaAs/GaAs, для численного моделирования был выбран кольцевой микрорезонатор с внешним диаметром 9 и внутренним 5 мкм. После расчета собственных мод данного кольцевого микрорезонатора были выбраны моды различного порядка для численного исследования влияния субволновых полостей в резонаторе. Также было получено, что характерное расстояние между пиками интенсивности выбранных мод составило 100 нм, поэтому отверстия именно такого диаметра были рассмотрены в первую очередь. Дефект располагался на различных расстояниях от центра микрорезонатора.

По результатам численного моделирования были сделаны следующие выводы. При расположении дефекта диаметром больше 100 нм в максимуме интенсивности электромагнитной волны соответствующая мода перестает быть собственной из-за дифракции, а при меньших диаметрах мода остается собственной. В дополнение, для мод более высокого радиального порядка существует расположение дефекта между пиками интенсивности по радиусу кольцевого микрорезонатора, при котором мода остается собственной. Также выяснилось, что радиальная мода третьего порядка с уверенностью подавляется с помощью введения в микрорезонатор трех полостей диаметром 100 нм каждая, расположенных, например, в вершинах равностороннего треугольника. Полученные результаты позволили сформулировать подходы к селекции мод кольцевых микрорезонаторов с помощью введения субволновых дефектов в них.

Литература

- [1] Kirchain R and Kimerling L 2007 Nature Photonics 1 303–5.
- [2] Hunsperger R.G, Integrated Optics: Theory and Technology, Springer, 2009.
- [3] Rabus D.G, Integrated Ring Resonators: The Compendium, Springer, 2007.

Синтез пленок нитрида алюминия в качестве просветляющих покрытий мощных полупроводниковых лазеров 808-1060нм

**Я.В. Лубянский¹, А.Д. Бондарев¹, И.П. Сошников¹⁻³, В.В. Золотарев¹, К.Р. Аюшева¹,
Котляр К.П.², Н.А. Берг¹, И.С. Тарасов¹**

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

² СПб АУ РАН, Санкт-Петербург, 194021, ул. Хлопина, 8/3 лит. А

³ ИАП РАН, Санкт-Петербург, ул.И.Черных 33

эл. почта: lubianskiy@gmail.com

Представленная работа направлена на развитие методов синтеза пленок нитрида и оксинитридов алюминия для применений в качестве оптических элементов мощных полупроводниковых лазеров. Применение качественных просветляющих покрытий (зеркал) обеспечивает существенное снижение деградационных процессов в лазерных структурах и, как следствие, приводит к увеличению выходной мощности, КПД и срока службы. Указанное делает проблему развития технологии оптических элементов лазеров важной и актуальной.

Особое значение для технологии производства таких лазеров и последующей эксплуатации имеют технологические условия формирования таких оптических элементов как просветляющие покрытия резонатора. В частности, существенные ограничения возникают по используемому диапазону температур, радиационному облучению, ионному облучению, типу сред в которых происходит процесс синтеза. Нарушения ограничений может привести к существенной деградациии полупроводникового лазера.

Синтез пленок нитрида алюминия проводился методом реактивного ионно-плазменного распыления алюминиевой мишени размерами 75x105 мм и чистотой – 99.999% в плазме тлеющего разряда. В качестве плазмообразующего газа используется азот ОСЧ (99,999%).

В работе изучены основные закономерности процессов синтеза пленок нитрида и оксинитридов алюминия: зависимости скорости осаждения пленок и их толщины от основных технологических параметров (мощность разряда и напряжение смещения на мишени, давление плазмообразующего газа, температура образцов и мишени). В частности, показано, что диапазон толщин и скоростей напыления составляет от 10нм до 250нм и от 3нм/мин до 22 нм/мин соответственно. Показано, что коэффициент преломления синтезированных пленок находится в диапазоне от 1.7 до 2.02 и определяется влиянием технологических условий.

Исследования структуры таких пленок показывают возможность образования как поликристаллической, так и аморфной фазы. Образование аморфного слоя объясняется влиянием остаточного кислорода [1]. Определены условия, при которых пленки имеют поликристаллическую текстурированную структуру с $n=2,05$. Продемонстрирована возможность модификации оптических параметров пленок добавлением кислорода при синтезе.

В результате проведенных исследований продемонстрирована возможность синтеза просветляющих покрытий с коэффициентом отражения до 0.05%, что позволяет улучшить эксплуатационные (деградационные), мощностные и оптические характеристики лазеров с конструкцией резонатора на основе брэгговских отражателей для длин волн 1020-1060 нм и лазеров с резонатором Фабри-Перо для спектрального диапазон 808-910нм.

Литература

[1] V. Brien, P. Pigeat, Journal of Crystal Growth 310, 16 (2008)

Исследования тонких пленок AlN, выращенных методом ионно-плазменного напыления на подложках GaAs с различной ориентацией

А.Н. Лукин¹, П.В. Середин¹, В.Е. Терновая¹, А.В. Федюкин¹, И.Н. Арсентьев²,
А.Д. Бондарев², Я.В. Лубянский², И.С. Тарасов²

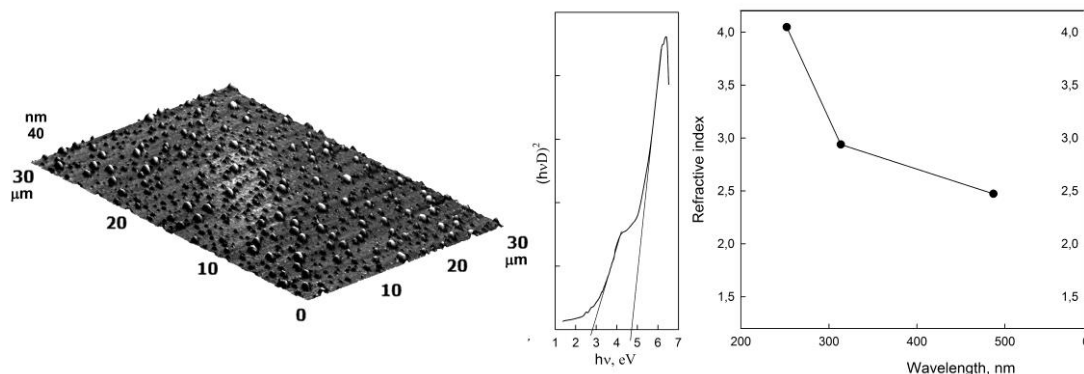
¹Воронежский государственный университет, Воронеж, 394006? Университетская пл. 1

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

эл. почта: seredin@phys.vsu.ru

Среди материалов, активно используемых для создания диэлектрических покрытий, оптически прозрачных в широком диапазоне длин волн, исследователи и технологи наиболее часто обращают свое внимание в последнее время на нитрид алюминия. Его прекрасная совместимость с различными соединениями III-V, выбираемыми в виде подложки, позволяет нитриду алюминия быть наиболее перспективным материалом в производстве оптических, оптоэлектронных, высокочастотных электроакустических устройств и датчиков, солнечной энергетике, а также сенсорике. Поэтому целью нашей работы стали исследования методами структурного анализа, атомно-силовой микроскопии, ИК, УВ и ФЛ спектроскопии были исследованы свойства наноструктурированных пленок нитрида алюминия, полученных методом реактивного ионно-плазменного распыления на подложках GaAs с различной ориентацией.

В ходе выполнения работы нами получены наноструктурированные тонкие пленки нитрида алюминия (100-200 нм) кубической сингонии, имеющие показатель преломления в диапазоне 1.6–4.0 для области длин волн ~250 нм и оптическую ширину запрещенной зоны ~5 eV. Рост на разориентированной подложке GaAs(100) (разориентация 4° к плоскости [110]) позволяет получить пленки AlN с меньшим размером зерна и более высоким показателем преломления ($n \sim 4$).



Кроме того, нам удалось показать, что управление морфологией, составом поверхности и оптическими функциональными характеристиками гетерофазных систем AlN/GaAs может быть достигнуто за счет использования разориентированных подложек GaAs.

Работа, в части разработки технологии получения диэлектрических пленок AlN, выполнена в соответствии с Государственным заданием ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2014-2016 годы (Проект №740, Задание №3.130.2014/К) и при финансовой поддержке гранта президента РФ МК-4865.2016.2

Травление сфокусированным ионным пучком Ga подложек $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{GaN}$ для субмикронной селективной эпитаксии

М.И. Митрофанов^{1,2}, С.Н. Родин¹, Я.В. Левицкий^{2,3}, С.И. Трошков¹, А.В. Сахаров¹,
В.В. Лундин¹, В.П. Евтихий¹

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

² НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая ул., 26

³ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Кронверкский пр., 49

эл. почта: taxi.mitrofanov@gmail.com

Введение

Перспективным методом формирования активных субмикронных структур (например, лазеров на основе фотонных кристаллов) в диапазоне длин волн 360–480 нм является селективная эпитаксия GaN [1]. В работе [2] экспериментально показано, что шероховатость и чистота поверхности структуры, а также адгезионная прочность маскирующего покрытия критически влияют на результат эпитаксии.

Эксперимент

На сапфировой подложке (0001) газовой эпитаксией выращен слой GaN толщиной 3 мкм, легированный Si до концентрации $n = 1\text{--}3 \cdot 10^{17} \text{ (см}^{-3}\text{)}$. Затем на поверхность GaN осаждался слой аморфного Si_3N_4 толщиной 5 нм. Сфокусированным ионным пучком (СИП) Ga с энергией 30 кэВ в атмосфере газа-прекурсора XeF_2 травились полосы шириной 100, 200 и 500 нм и длиной 200 мкм, доза экспонирования $8,5 \cdot 10^{15} \text{ (см}^{-3}\text{)}$, средняя шероховатость поверхности 0,53 нм (рис. 1). На маскированной поверхности проводился второй эпитаксиальный рост нелегированного GaN (рис.2).

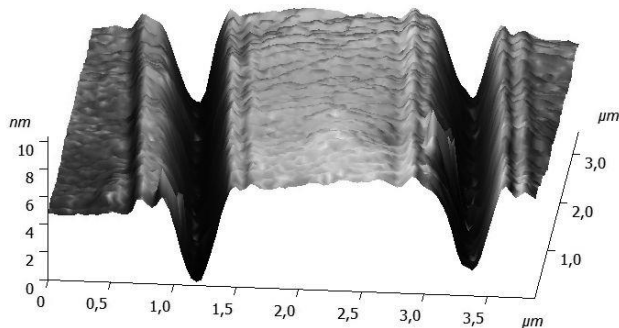


Рисунок 1. АСМ изображение травлёной поверхности.

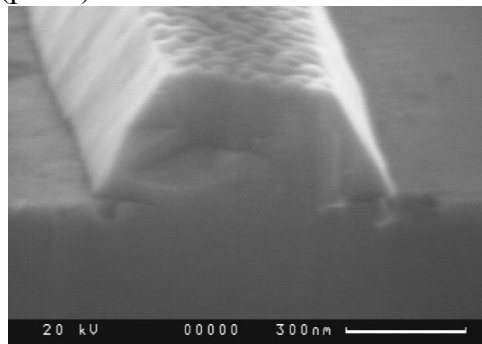


Рисунок 2. СЭМ изображение селективной эпитаксии GaN.

Заключение

Травление защитного слоя Si_3N_4 СИП Ga с газом-прекурсором XeF_2 , позволяет получить поверхность пригодную для селективного эпитаксиального роста. Микрофотолюминесцентные исследования показали хорошее кристаллическое совершенство выращенных полосков.

Работа выполнена в рамках госзадания № 0075-2014-0010, и гранта РНФ № 16-12-10503

Литература

- [1] SF. Li, A. Waag, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 11, 7, 071101 (2012).
- [2] F. Barbagini, et al, NANOSCALE RESEARCH LETTERS, 6, 1-9 (2011).

Электрофизические свойства полупроводниковых гетероструктур $\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$ и $\text{In}_{2x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3/\text{InAs}$

Е.А. Михайлюк¹

¹ СТИ НИТУ МИСиС, Старый Оскол, 309530, Макаренко, 42,

эл. почта: gazon1978@yandex.ru

Исследования систем типа МПП (металл-полупроводник-полупроводник) актуальны в связи с проблемой пассивации поверхности полупроводника [1]. По методике, представленной в работе [2], формировались гетероструктуры $\text{Al}/\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$ (n-типа) методом гетеровалентного замещения (ГВЗ) и методом напыления из независимых источников. В работах [3,4] установлено, что граница раздела в гетероструктуре $\text{Al}/\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$ (n-типа), полученной методом ГВЗ более однородная и не имеет существенных структурных нарушений в отличие от гетероструктур, образованных методом напыления.

Проведенный анализ температурных зависимостей дифференциальной проводимости и емкости [5,6] позволил получить данные о параметрах ЦЛЗ в гетероструктурах $\text{Al}/\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$, которые оказываются достаточными для решения уравнения электронейтральности в этих структурах, с учётом двух типов уровней в запрещённой зоне материала слоя In_2Te_3 ($E_d = 0.5\text{эВ}$ и $E_t = 0.36\text{эВ}$). Решение уравнения [7] позволяет установить зависимость уровня Ферми от температуры, а так же проследить изменение концентрации и подвижности носителей заряда. Обнаружено, что увеличение концентрации ловушечной примеси до $2 \cdot 10^{15} \text{см}^{-3}$ приводит к изменению типа проводимости с электронного на дырочный, обусловленное участием центра с энергией 0.36 эВ в процессах захвата и выброса электронов. Анализ рассчитанных температурных зависимостей подвижностей электронов и дырок в интервале температур от 77 до 300 К свидетельствует о том, что основной вклад в рассеяние носителей заряда в пленках теллуридов вносят дефекты решетки и тепловые колебания.

Таким образом, результаты исследований показывают, что слои In_2Te_3 по своим электрофизическим свойствам соответствуют требованиям, предъявляемым к подзатворным и полуизолирующим слоям на арсениде индия.

Литература

- [1] Б.И. Сысоев, А. П. Ровинский, В. Ф. Сыноров, Н. Н. Безрядин, Особенности вольт-фарадных характеристик МДП-структур с полупроводниковыми подзатворными слоями, Микроэлектроника 7, 2 (1978).
- [2] Б. И. Сысоев, Н. Н. Безрядин, А. В. Буданов, Т. В. Проконова, Ю. К. Шлык, Кристаллохимические особенности получения и электронные процессы в твердотельных гетероструктурах на основе арсенида индия, 35 Intern. Wiss. Koll. - Т.Н. Ilmenau, DDR (1990).
- [3] Ю. К. Шлык, В. Н. Моргунов, Г. М. Щевелева, Н. Н. Безрядин, Т.А. Кузьменко, Подготовка подложек InAs и получение гетероперехода $\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$ в квазизамкнутом объеме, Полупроводниковая электроника (1985).
- [4] Б. И. Сысоев, Б. Л. Агапов, Н. Н. Безрядин, Т. В. Проконова, Ю. К. Шлык, Гетеровалентное замещение в процессе получения полупроводникового гетероперехода $\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$, Изв. РАН, Неорган. Материалы 32, 12 (1996).
- [5] Е. А. Михайлюк, Т. В. Проконова, Е. А. Татохин, Построение эквивалентных схем для оценки параметров поверхностных состояний на границе раздела гетероструктур со слоями теллуридов индия, Евразийский Союз Ученых 6, 5 (2014).
- [6] Е. А. Михайлюк, Т. В. Проконова, Е. А. Татохин, Н. Н. Безрядин, Проводимость плёнок In_2Te_3 в гетероструктурах на основе арсенида индия, Вестник Воронежского государственного университета 10, 4 (2014).
- [7] Э.П. Домашевская, Е.А. Михайлюк, Н.Н. Безрядин, Т.В. Проконова, ФТП 50, 3 (2016).

Генерация субнаносекундных лазерных импульсов AlGaAs/GaAs лазерами-тиристорами

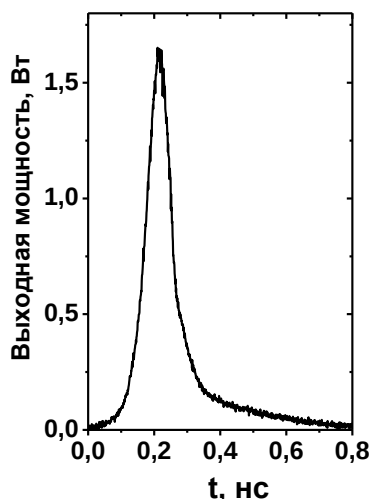
А.А. Подоскин¹, О.С. Соболева¹, Н.А. Пихтин¹, Д.А. Веселов¹, В.В. Золотарев¹,
К.В.Бахвалов¹, В.В. Васильева¹, Т.А. Багаев², М.А. Ладугин², А.А. Мармалюк²,
В.А.Симаков², И.С. Тарасов¹, С.О. Слипченко¹

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

² НИИ "Полюс" им. М.Ф. Стельмаха, Москва, 117342, Введенского, 3, корп. 1

эл. почта: podoskin@mail.ioffe.ru

В рамках проведенной работы рассмотрено дальнейшее развитие подхода, основанного на использовании лазер-тириستоров (эпитаксиально-интегрированных лазерной гетероструктуры и гетерофототристора) для целей генерации лазерных импульсов в наносекундном и субнаносекундном диапазонах. Применение лазер-тиристоров с шириной выходной апертуры более 100мкм позволило создать компактный, эффективный и простой в управлении лазерный источник излучения для получения импульсов в диапазоне длительностей 10-200нс и пиковой мощностью до 43 Вт [1-4]. Для дальнейшего уменьшения длительности оптических импульсов были созданы лазеры-тиристоры с 20мкм мезаполосковым контактом на основе гетероструктуры с длиной волны генерации 905нм. Продемонстрировано 2 режима генерации лазерных импульсов:



наносекундный и субнаносекундный режимы. В наносекундном режиме пиковая выходная оптическая мощность достигала 2.5Вт при длительности импульса до 13нс. В субнаносекундном режиме было показано значительное влияние величины блокируемого напряжения и амплитуды импульса тока управления на форму лазерного импульса, спектра лазерной генерации и распределение интенсивности излучения на выходном зеркале лазерного кристалла.

Была продемонстрирована возможность генерации управляемой последовательности лазерных импульсов с пиковой мощностью до 1.6Вт и длительностью 100пс (FWHM), при этом частота следования определялась частотой импульсов тока управления и максимальное

значение достигало 0.5МГц.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-01560)

Литература

- [1] S. O. Slipchenko et. al., IEEE Photonic. Tech. L. 27(3), 307 (2015).
- [2] S. O. Slipchenko et. al., Semiconductors 48(5), 697 (2014).
- [3] S. O. Slipchenko et. al., IEEE T. Electron Dev., 63(8), 3154 (2016).
- [4] S. O. Slipchenko et. al., Proc. SPIE 9751, 97510P (2016).

КОРРЕКЦИЯ ПРОФИЛЕЙ ПУЧКОВ МОЩНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ И УСИЛИТЕЛЕЙ С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Г.И. Рябцев¹, М.В. Богданович¹, А.П. Войтович¹, В.С. Калинов¹, Т.В. Безъязычная², К.И. Ланцов¹, К.В. Лепченков¹, А.Л. Пушкарчук², А.Г. Рябцев,

¹ Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, 220072, Независимости, 68;

² Институт физико–органической химии НАН Беларуси, Минск, 220072, Сурганова, 13.

эл. почта: if445r3@aim.com

Один из недостатков поперечной схемы возбуждения твердотельных активных элементов (АЭ) полупроводниковыми диодными линейками и матрицами заключается в относительно высокой неоднородности распределения излучения накачки в объеме АЭ [1]. При высоких энергиях импульсов генерации это накладывает дополнительные ограничения на допустимые величины вариаций интенсивности излучения в сечении выходных пучков.

Настоящая работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию методов, позволяющих повысить степень однородности распределения интенсивности генерируемого излучения в сечении выходных пучков мощных лазерных систем с поперечной диодной накачкой.

Используя результаты численного решения системы скоростных уравнений, учитывающей пространственное распределение интенсивности излучения, оценены величины максимально допустимых неоднородностей в сечении пучка задающего лазера, при которых наблюдаются минимальные искажения профиля интенсивности излучения, проходящего через активную среду усилителя с поперечной диодной накачкой.

С целью повышения степени однородности распределения излучения накачки внутри АЭ предложен новый материал для патентованного рассеивающего слоя [2], позволяющий подавить усиленную люминесценцию, развивающуюся в поперечном направлении относительно оси АЭ. Материал обладает минимальным поглощением в диапазоне длин волн 750–850 нм (спектральная область максимума излучения накачки) и максимальным поглощением в диапазоне 1000–1100 нм (спектральная область усиления АЭ на основе ионов неодима).

На основе квантово–химического моделирования [3–5] исследовано дефектообразование в материале рассеивающего слоя. Полученные данные использованы при выборе режима обработки рассеивающего слоя, при котором оптические свойства рассеивающего слоя в наибольшей степени обеспечивают эффективную работу активных элементов мощных Nd:YAG твердотельных лазеров и усилителей с поперечной диодной накачкой.

Литература

- [1] T.V. Bezyazychnaya, M.V. Bogdanovich, A.V. Grigor'ev et al. // Optics Communications. – 2013. – V. 308. – P. 26–29.
- [2] Т.В.Безъязычная, М.В. Богданович, А.В. Григорьев и др. Патент РБ № 8850 (2012).
- [3] <http://openmopac.net/MOPAC2009.html>.
- [4] <http://www.msg.ameslab.gov/gamess>.
- [5] M. Seel, Int. J. Quant. Chem. 34, 265 (1988).

Структурные и оптические исследования гетероструктур на основе твердых растворов GaInP_2 с упорядочением

П.В. Середин¹, И.Н. Арсентьев², Tatiana Prutskij³

¹ Воронежский государственный университет, Воронеж, 394006, Университетская пл. 1

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

³ Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Privada 17 Norte, No 3417, Col San Miguel Hueyotlipan, 72050, Puebla, Pue., Mexico

эл. почта: seredin@phys.vsu.ru

Хорошо известно, что актуальность проблемы упорядочения напрямую связана с модификацией фундаментальных свойств полупроводниковых систем, обусловленной понижением симметрии сфалеритной структуры соединений A_3B_5 , следствием, которого является возможное изменение ширины запрещенной зоны, переход от непрямозонного к прямозонному полупроводнику, инверсному порядку следования зон, усложнению оптических спектров сверхструктурных фаз в результате снятия вырождения с состояний, соответствующих потолку валентной зоны и дну зоны проводимости.

Используя методы рентгеновской дифракции, атомно-силовой микроскопии, ИК и УВ спектроскопии, а также фотолюминесцентной спектроскопии нами были изучены структурные и оптические исследования гетероструктур на основе твердых растворов GaInP_2 с упорядочением.

Эпитаксиальные слои соединения GaInP_2 с почти согласованной с монокристаллическим $\text{GaAs}(100)$ решеткой были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии в горизонтальном реакторе при давлении 60 мбар. Реагентами III группы были триметилгаллий (TMG) и триметилиндий (TMI), и реагентом V группы был фосфин в 10%-ной смеси с водородом. Слои GaInP_2 выращены на полуизолирующих подложках $\text{GaAs}(100)$, имевших разориентацию 2° к направлению $[110]$. Толщина эпитаксиальных пленок была ~ 1 мкм.

Было показано, что в следствии образования сверхструктурных фаз упорядочения со стехиометрией $\text{A}_{1-\eta}\text{B}_{1+\eta}\text{C}_2$ является не только изменение кристаллической симметрии соединения с кубической на тетрагональную, но и изменение оптических свойств по отношению к неупорядоченному твердому раствору аналогичного состава. Образование в эпитаксиальной пленке сверхструктурных фаз упорядочения GaInP_2 не нарушает хорошую однородность пленки и обеспечивает минимальные внутренние напряжения кристаллических решеток.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2014-2016 годы. (Проект №740, Задание №3.130.2014/К).

Численное 2D моделирование динамики электро-оптических процессов в гетероструктурах лазера-тиристора.

О.С. Соболева, А.А. Подоскин, С.О. Слипченко, В.С. Юферов, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов

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

эл. почта: soboleva@mail.ioffe.ru

В [1] продемонстрирован новый подход в генерации мощных лазерных импульсов при помощи лазеров-тиристоров на основе системы твердых растворов AlGaAs/GaAs с квантовой ямой InGaAs, излучающей на длине волны 900нм. В данном приборе объединены функции генератора токовых импульсов и лазерного диода, что существенно расширяет возможности для генерации мощных лазерных импульсов с не длительностью. В [2] показано, что одной из важных особенностей лазера-тиристора является локализация тока. В настоящее время экспериментальные результаты, демонстрирующие эффекты локализации, не имеют адекватных теоретических объяснений, что существенно усложняет процесс поиска оптимальных конструкций и режимов работы прибора. Методы численного 2D моделирования позволяют получить распределения плотности тока, неравновесных концентраций, потенциала, а также проанализировать генерационно-рекомбинационные процессы в многопереходных гетероструктурах лазера-тиристора в нестационарном режиме.

Как показано в [3] лазер-тиристор можно рассматривать как оптопару лазерный диод - фототранзистор с оптической обратной связью. Динамическая модель лазера-тиристора построена в программном пакете Silvaco Atlas. Модель основана на дрейф-диффузионном транспорте носителей с резким эмиттерным и плавным коллекторным гетеропереходом и учитывает ударную ионизацию в области объемного заряда коллекторного перехода и фотогенерацию в базе фототранзистора. На первом этапе было проведено моделирование динамики включения фототранзисторной части лазера-тиристора при локальной оптической активации, были получены скорости распространения включенного состояния для различных начальных напряжений на структуре. Показано, что максимальная скорость расширения области локального включения достигает 150мкм/нс. На втором этапе проводилось моделирование динамики лазерного излучения с учетом полученных результатов, описывающих пространственную динамику тока. В лазере-тиристоре локализация тока влияет на динамику лазерной генерации приводя к эффекту модуляции добротности. В [2] показано, что в таком режиме лазер-тиристор может генерировать импульсы оптической мощности длительностью до 90пс и мощностью в 1.6 Ватт.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-01560)

Литература

- [1] S.O. Slipchenko, et al., "High-Power Pulse Semiconductor Laser-Thyristor Emitting at 900-nm Wavelength," IEEE Photonics Technology Letters, vol.25 no.17, pp.1664-1667, 2013.
- [2] S.O. Slipchenko, et al., "Generation of nanosecond and subnanosecond laser pulses by AlGaAs/GaAs laser-thyristor with narrow mesa stripe contact, " Opt. Express, vol. 24, no. 15, 16500, 2016.
- [3] S. O. Slipchenko, V. S. Yuferev, A. A. Podoskin, O. S. Soboleva, N. A. Pikhtin, and I. S. Tarasov, "Specific Features of the Injection Processes Dynamics in High-Power Laser Thyristor," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 62, no.12, pp. 4091–4096, 2015.

Обобщённая теоретическая модель для полупроводниковых лазеров на квантовых ямах

З.Н. Соколова², Л.В. Асрян¹, Н.А. Пихтин², И.С. Тарасов²

¹ Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, USA

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

эл. почта: asryan@vt.edu

Одной из важнейших задач в области полупроводниковых лазеров с низкоразмерной активной областью является увеличение их выходной оптической мощности [1, 2]. Для достижения большой мощности ватт-амперная характеристика лазера (ВтАХ) должна оставаться линейной при больших токах накачки. На практике в лазерах раздельного ограничения с низкоразмерной активной областью наблюдается насыщение ВтАХ. Насыщение может быть обусловлено различными факторами, среди которых – захват носителей заряда из объемной волноводной области (optical confinement layer - OCL) (Рис. 1) в низкоразмерную активную область [3] и рост внутренних оптических потерь (в основном в OCL) при увеличении тока накачки.

В данной работе представлена обобщённая теоретическая модель для расчета рабочих характеристик полупроводниковых лазеров на квантовых ямах (КЯ). Модель учитывает немгновенность захвата электронов и дырок из объемной области (OCL) в двумерную область (КЯ), увеличение внутренних оптических потерь с ростом тока накачки, а также глобальную электронейтральность в лазерной структуре. Условие глобальной электронейтральности представляет собой равенство полного заряда электронов в КЯ и OCL полному заряду дырок в этих двух областях.

Рассчитаны характеристики InGaAs/GaAs/AlGaAs лазера, содержащего две напряженные In_{0.31}Ga_{0.69}As КЯ толщиной 90 Å. Материалом OCL шириной 3.2 мкм являлся GaAs, материалом эмиттеров – Al_{0.3}Ga_{0.7}As. Длина волны излучения при $T = 300$ К равнялась 1.075 мкм. Длина резонатора Фабри-Перо составляла 5.1 мм, ширина полоскового контакта 100 мкм, коэффициент отражения зеркал 0.05. Скорости захвата

электронов и дырок в пустую КЯ считались равными 5×10^5 см/с.

Получено хорошее согласие экспериментальной и расчетной ВтАХ. Расчеты показали, что концентрации электронов и дырок в КЯ существенно различаются, то есть имеет место нарушение локальной электронейтральности в КЯ. Концентрации электронов и дырок в OCL близки, а заряд носителей каждого знака в волноводной области существенно больше, чем в КЯ.

Работа выполнена в соответствии с Государственной программой ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Л.В. Асрян благодарит Исследовательский офис армии США (U.S. Army Research Office, грант № W911NF-13-1-0445) за поддержку данной работы.

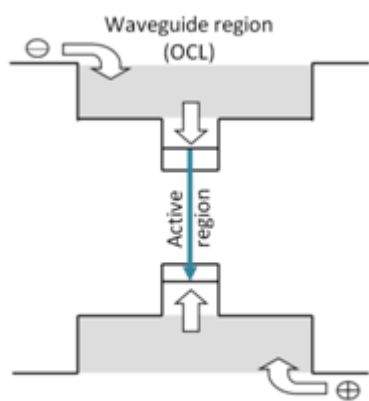


Рис. 1: Схема лазера с низкоразмерной активной областью.

Литература

- [1] P. S. Zory Jr., Ed., *Quantum Well Lasers*, Academic, Boston, 1993, 504 p.
- [2] E. Kapon, Ed., *Semiconductor Lasers*, 1st Edition, Academic, New York, 1999, 453 p.
- [3] L. V. Asryan and Z. N. Sokolova, *J. Appl. Phys.* **115**, 023107 (2014).

Фактор оптического ограничения гетероструктур на основе квантовых ям AlGaIn с варизонным волноводом для оптически накачиваемых лазеров

Н.П. Тарасюк¹, Е.В. Луценко², А.А. Гладышук¹

¹ БрГТУ, Брест, 224017, Московская, 267

² Институт физики НАН Беларуси, Минск, 220072, пр. Независимости, 68

эл. почта: ntarasiuk@tut.by

Гетероструктуры на основе квантовых ям AlGaIn перспективны для создания высокоэффективных источников излучения в ультрафиолетовой области спектра. Возможность изменения ширины запрещенной зоны гетероструктур AlGaIn от 3.4 до 6.1 эВ позволит создавать оптоэлектронные приборы, работающие в широком диапазоне длин волн ультрафиолетовой области спектра от 365 до 210 нм [1]. Увеличение фактора оптического ограничения позволит понизить порог генерации оптически накачиваемых лазеров и осуществить исследования лазерных параметров AlGaIn гетероструктур, что важно для оптимизации ростовых параметров и создания эффективных ультрафиолетовых инжекционных лазеров и светодиодов.

Для расчетов использовалась модель одномерной планарной структуры. Вычисления фактора оптического ограничения были проведены в приближении плоских волн для ТЕ поляризации электромагнитного излучения. Амплитуда напряженности электрического вектора E_j ТЕ-волны удовлетворяет волновому уравнению:

$$\frac{\partial^2 E_j(x)}{\partial x^2} - (\beta^2 - k_0^2 n_j^2) E_j(x) = 0, \quad (1)$$

где β – проекция волнового вектора k_0 на плоскость гетероструктуры, n_j – комплексный показатель преломления j -го слоя. Для решения уравнения (1) использовался метод матриц переноса. Для нахождения β использовался алгоритм скоростного спуска [2]. Фактор оптического ограничения вычислялся по формуле [3]:

$$\Gamma = \frac{\sum_{i=1}^N \int_{x_{ai}}^{x_{bi}} E^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} E^2(x) dx},$$

где интегрирование в числителе происходит по координатам квантовых ям AlGaIn.

Проведена оптимизация по фактору оптического ограничения толщины варизонного волновода AlN/Al_{0.8}Ga_{0.2}N гетероструктур с квантовыми ямами Al_{0.4}Ga_{0.6}N толщиной 1.2 нм для фундаментальной моды излучения на длине волны 285 нм. Показано, что в случае несимметричного волновода фактор оптического ограничения больше, чем у симметричного. Максимальное значение фактора оптического ограничения равно 1.03 % при толщине волновода 119 нм для одной квантовой ямы и 3.42 % при толщине 110 нм для трех квантовых ям.

Литература

- [1] В.Н. Жмерик, А.М. Мизеров, Т.В. Шубина, А.В. Сахаров, А.А. Ситникова, П.С. Копьев, С.В. Иванов, Е.В. Луценко, А.В. Данильчик, Н.В. Ржеуцкий, Г.П. Яблонский, ФТП 42, 12 (2008).
- [2] M.J. Bergmann, H.C. Casey, J. Appl. Phys. 84, 3 (1998)
- [3] М. Адамс, Введение в теорию оптических волноводов, Мир, М. 1984.

Эпитаксиальные твердые растворы $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As:Mg}$ с различным типом проводимости

**В.Е. Терновая¹, П.В. Середин¹, И.Н. Арсентьев², А.В. Жаботинский², Д.Н. Николаев²,
М.Г. Растегаева², В.В. Шамахов², Tatiana Prutskij³, Harald Leiste⁴, Monika Rinke⁴**

¹ Воронежский государственный университет, Воронеж, 394006, Университетская пл. 1

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Политехническая, 26

³ Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Privada 17 Norte, No 3417, Col San Miguel Hueyotlipan, 72050, Puebla, Pue., Mexico

⁴ Karlsruhe Nano Micro Facility H.-von-Helmholtz-Platz 1 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany

эл. почта: seredin@phys.vsu.ru

На основе комплексного подхода с привлечением методов высокоразрешающей рентгеновской дифракции, Рамановской спектроскопии и фотолюминесцентной спектроскопии нами были изучены структурные, оптические и энергетические свойства эпитаксиальных гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As:Mg/GaAs}(100)$ с различной степенью легирования магнием.

Было показано, что подбор технологических условий позволяет получить в твердом растворе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As:Mg}$ различный тип проводимости. Снижение температуры источника магния ведет к перераспределению преимущественного типа внедрения примеси в решетку твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Атомы магния преимущественно замещают атомы в неметаллической подрешетке, что ведет к появлению большого числа доноров и приводит к перекомпенсации носителей заряда с изменением типа проводимости с р на n. Рост температуры барботера сначала приводит к увеличению замещений в металлической подрешетке, что соответствует появлению акцепторной проводимости, а дальнейший рост температуры барботера, не меняя типа проводимости, приводит к снижению концентрации носителей заряда в пленках за счет уменьшения числа внедренного магния в твердый раствор. Все это отражается как на характере спектров фотолюминесценции, так энергетической характеристике полученных эпитаксиальных пленок.

Работа, в части разработки технологии получения гетероструктур, выполнена в соответствии с Государственным заданием ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2014-2016 годы (Проект №740, Задание №3.130.2014/К) и при финансовой поддержке гранта президента РФ МК-4865.2016.2.

Гетероструктуры GaN-por-Si/Si, полученные методом молекулярно-пучковой эпитаксии

Ю.Ю. Худяков¹, П.В. Середин¹, А.С.Леньшин¹, А.М.Мизеров², Д.С. Золотухин, В.Е. Терновая¹,

¹ Воронежский государственный университет, Воронеж, 394006, Университетская пл. 1

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Хлопина ул. 8

эл. почта: seredin@phys.vsu.ru

Производство A_3B_5/Si гетероструктур имеет высокий рыночный потенциал, позволяя найти замену дорогим подложкам из GaAs для оптоэлектронного производства традиционных устройств на основе A_3B_5 . Однако интеграция A_3B_5 материалов с Si несет в себе целый ряд трудностей, главным образом обусловленных как несоответствием параметров решетки, так и разнородностью свойств кремния и полупроводниковых соединений A_3B_5 . В нашей работе предложен и реализован абсолютно новый комплексный подход к формированию полупроводниковых соединений A_3B_5 на подложках кремния.

Рост эпитаксиальных слоев на основе A_3B_5 соединений выполнен через “податливую подложку”, состоящую из слоя нанопористого Si и сформированной на нем A_3B_5 нанокolonчатой (буферной) структуры. На подложках монокристаллического кремния, ориентированного в направлении (111), с тонким буферным слоем нанопористого кремния были выращены наноразмерные слои нитрида галлия. Образцы гетероструктур GaN/por-Si/Si (111) получены методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота на установке МПЭ промышленного типа Veeco Gen 200. Химическая подготовка кремниевых подложек с нанопористым слоем кремния была выполнена по методу Ширази к молекулярно-пучковой эпитаксии. Условия эпитаксиального роста были подобраны нами так, что привело к нанокolonчатому росту GaN на поверхности нанопористого кремния. Полученные таким образом гетероструктуры были исследованы комплексом структурно-спектроскопических методов. На рисунке приведено изображение характерного микроучастка образца гетероструктуры GaN/por-Si/Si (111).

Проводя анализ экспериментальных данных можно отметить, что рост на пористом буферном слое по сравнению с эпитаксией при аналогичных условиях на монокристаллической кремниевой подложке приводит к формированию более однородных по форме и размерам нанокolonок GaN. Т.е. если рост на монокристаллической подложке Si сопровождается формированием нанокolonок GaN с размерами основания, лежащими в достаточно широком диапазоне (20-150 нм), то при росте на нанопористом кремнии более 95% нанокolonок GaN имеет размер основания ~ 40 нм. Кроме того при росте на нанопористом буферном слое происходит уменьшение шероховатости поверхности, а также увеличение среднего расстояния между нанокolonками на 15%, по сравнению с аналогичным ростом на монокристаллическом кремнии. Полученные экспериментальные результаты открывают перспективы в изготовлении прототипов новой элементной базы нано- и оптоэлектроники на основе разработанных гетероструктур.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2014-2016 годы. (Проект №740, Задание №3.130.2014/К), а также гранта президента РФ МК-4865.2016.2.

Одномодовый полупроводниковый лазер ($\lambda = 1.06$ мкм).

Моделирование и эксперимент.

И.С. Шашкин¹, Д.А. Веселов¹, Н.А. Пихтин¹, С.О. Слипченко¹, И.С. Тарасов¹

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

тел: (812) 292-7379, эл. почта: Shashkin@mail.ioffe.ru

Проведено 2D-моделирование модового состава излучения в полупроводниковом лазере с волноводом толщиной 0.8 мкм на длину волны 1.06 мкм полосковой конструкции, активный элемент которого образован вытравленными меза-канавками, на основе двусторонней гетероструктуры раздельного ограничения с квантоворазмерной активной областью, система твердых растворов InGaAs/AlGaAs/GaAs. Из данных в работе [1] следует, что основной вклад в изменение показателя преломления вносит температура, а зависимостью показателя преломления от концентрации носителей можно пренебречь. С помощью теплового расчёта установлено, что при работе лазера с увеличением тока накачки выделяемая тепловая мощность под активным элементом способствует переключению лазерной генерации на моды ТЕМ_{х0}. Известно [2], что для достижения латерально-одномодовой генерации необходимо, с одной стороны, создать латеральный волновод с достаточно большим скачком эффективного показателя преломления, обеспечивающего стабильное распределение поля фундаментальной моды, с другой стороны, этот скачок должен быть достаточно малым, чтобы предотвратить возбуждение многомодовой генерации. Для апертуры излучателя 6.5 мкм определена область оптимальных значений параметра «недотрава до волновода», обеспечивающего скачок эффективного показателя преломления, которая составила величину 0.03 мкм от 0.18 до до 0.21 мкм. Вне этой области работа лазера на моде ТЕМ₀₀ маловероятна.

До проведения моделирования были изготовлены образцы лазеров описанной выше конструкции с шириной апертуры 6.5 мкм, длиной резонатора 1000 мкм. В ходе операций по процессированию лазерной гетероструктуры, выращенной на 2"-шайбе GaAs, сделаны фотографии меза-канавок с помощью SEM и определена величина недотрава до волновода: 0.05 мкм в центре и 0.186 мкм на краю шайбы. Измерения при непрерывной токовой накачке показали, что профиль интегрального по времени и длинам волн параллельного р-п-переходу дальнего поля отличается от расчётного профиля уже на пороге и сильно уширяется с увеличением тока накачки, что может свидетельствовать о конкуренции латеральных мод. Важно отметить, что недотравленный до границы с волноводом слой сильнолегированного Р-эмиттера может приводить к сильному токовому растеканию под меза-канавки и, соответственно, к созданию условий для усиления ненулевых мод, поэтому при изготовлении лазерной гетероструктуры с волноводом толщиной 0.8 мкм на длину волны 1.06 мкм необходимо растить слаболегированный слой между волноводом и Р-эмиттером с толщиной, равной «недотраву до волновода», с таким же составом, как у Р-эмиттера.

Таким образом, моделирование и эксперимент продемонстрировали, что работа лазера на моде ТЕМ₀₀ не достигается, если величина недотрава до волновода находится за пределами узкой области оптимальных значений.

Литература

- [1] P. Crump, M. Winterfeldt, J. Decker, M. Ekterai, J. Fricke, S. Knigge, A. Maaßdorf, G. Erbert, Proc. of SPIE Vol. **9767**, 97671L-1 (2016).
- [2] В.В. Поповичев, Е.И. Давыдова, А.А. Мармалюк, А.В. Симаков, М.Б. Успенский, А.А. Чельный, А.П. Богатов и др., «Квантовая электроника», **32**, № 12, 1099 (2002).

вом
овой
и, на
ной
их в
осит
жно
ра с
нтом
для
дать
теля
оды,
тить
лена
щего
м от

выше
аций
ланы
а до
вной
волн
ке на
ать о
цы с
овому
ления
водом
слой
таким

азера
ся за

Bdorf,

нский,
).

Подписано в печать 28.10.2016. Формат 60x84/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 9,75. Тираж 100. Заказ 14881b.

Отпечатано с готового оригинал-макета,
в Типографии Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14