

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
“ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ИМЕНИ Б.И. СТЕПАНОВА  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ”

УДК 621.373.826, 535.37,535.341,535-15, 621.378.35, 535:621.373.8; 535:621.375.8

**УШАКОВ**  
Дмитрий Владимирович

**ОПТИЧЕСКИЕ И ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРНЫХ  
СТРУКТУР НА КВАНТОВЫХ ЯМАХ И СВЕРХРЕШЕТКАХ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.21 – лазерная физика

Минск, 2022

Работа выполнена в Белорусском государственном университете

Научный консультант: **Афоненко Александр Анатольевич**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой квантовой радиофизики и оптоэлектроники Белорусского государственного университета

Официальные оппоненты: **Галоненко Сергей Васильевич**, доктор физико-математических наук, академик НАН Беларуси, профессор, директор Исполнительной дирекции Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований;

**Ануфрик Славамир Степанович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической физики и теплотехники учреждения образования Гродненский государственный университет имени Янки Купалы;

**Гончаренко Игорь Андреевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры естественных наук университета гражданской защиты МЧС Беларуси;

Оппонирующая организация: Белорусский национальный технический университет

Защита состоится 15 февраля 2022 г. в 14<sup>30</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.01 в ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ НАН Беларуси по адресу: 220072, Минск, пр. Независимости, 68-2, тел. ученого секретаря: 270-87-98, e-mail: m.parkhots@ifanbel.bas-net.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси.

Автореферат разослан 11 января 2022 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
кандидат физико-математических наук



Пархоц М.В.

## ВВЕДЕНИЕ

Уникальное сочетание в полупроводниковых лазерных диодах таких качеств как компактность, высокая эффективность, быстродействие, надежность и низкая стоимость стало результатом их широкого применения в системах телекоммуникации, медицине, накачке твердотельных лазеров, спектроскопии и специальных приложений. Современное развитие физики полупроводниковых гетеролазеров непосредственно связано с исследованием сложных структур пониженной размерности. Прогресс в области технологий молекулярно-лучевой и газо-фазовой эпитаксии позволяет создавать новые, несуществующие в природе структуры с большим количеством чередующихся слоев различных полупроводниковых материалов с уникальными электронными и оптическими свойствами. Умение контролировать их уровни возбуждения в активных, эмиттерных и волноводных слоях, создавать на основе инженерии волновых функций эффективные дизайны лазерных переходов очень важно для улучшения функциональных возможностей полупроводниковых многоямных гетеролазеров, охвативших широкий спектральный диапазон от ультрафиолетовой области до дальнего инфракрасного диапазона. В видимой области спектра и ближнем инфракрасном диапазоне 0.35–3 мкм широкое распространение получили лазерные гетероструктуры на межзонных переходах между состояниями зоны проводимости и валентной зоны, концепция создания которых впервые была высказана в 1963 г. Ж.И. Алферовым, Р.Ф. Казариновым и независимо Г. Кремером. В среднем ИК-диапазоне 3–22 мкм и терагерцовой 1–6 ТГц областях прочно доминируют униполярные квантово-каскадные лазеры на сверхрешетках, состоящие из большого количества гетерослоев  $\sim 1000$ , в которых излучательные переходы между рабочими уровнями осуществляются внутри одной зоны – зоны проводимости. Идея создания таких лазеров высказана в 1971 г. Р.А. Казариновым и Р.А. Сурисом, а первая реализация устойчивой генерации продемонстрирована группой Ф. Капассо в 1994 г. Особое внимание занимают фотонные кристаллы, свойство которых эффективно концентрировать энергию, широко используется во всех типах квантово-размерных полупроводниковых лазеров.

Математическое моделирование процессов и явлений в квантово-размерных гетеролазерах является одним из основных способов получения новых знаний и технологических решений, не требующих больших капитальных затрат. В этой связи повышаются требования к точности расчетов за счет совершенствования теоретических моделей физических процессов в полупроводниковых гетероструктурах. Представленная диссертационная работа посвящена исследованию физики процессов генерации в инжекционных гетеролазерах на квантовых ямах и сверхрешетках, в том числе влиянию на выходные характеристики эффектов захвата–выброса носителей в квантовые ямы, утечек в эмиттерные слои, процессов поглощения света свободными носителями

и нагрева активной области; развитию теории лазерной генерации в квантово-каскадных лазерах и анализу влияния механизмов рассеяния носителей заряда, процессов переноса между каскадами, конструктивных особенностей на их спектральные, мощностные характеристики и рабочие температуры; исследованию нелинейных электронно-оптических эффектов в легированных сверхрешетках и возможности управления спектральными характеристиками фотонных кристаллов на их основе. Разработка лазеров нового поколения связана с поиском новых полупроводниковых материалов и структур, освоением новых спектральных диапазонов и оптимизацией режимов генерации. Решение этих вопросов способствовало бы дальнейшему развитию физики полупроводниковых квантово-размерных лазеров, позволило бы улучшить параметры приборов и разработать новые элементы полупроводниковой квантовой электроники.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами (проектами), темами**

Диссертационная работа соответствует научному направлению кафедр физики и аэрокосмических технологий и квантовой радиофизики и оптоэлектроники Белорусского государственного университета и выполнялась в рамках научно-исследовательских тем: проект № Ф99-220 БРФФИ “Анализ неравновесных электронно-оптических процессов в квантоворазмерных инжекционных лазерах для разработки приборов нового поколения”, № госрегистрации 20002429, 2000–2002; проект № Ф99-Р119 БРФФИ “Исследование оптических переходов в полупроводниковых гетероструктурах с квантовыми ямами и сверхрешетках и разработка физических принципов генерации излучения инфракрасного диапазона”, № госрегистрации 20002430, 2000–2002; НИР 800/13 “Исследовать внутризонные процессы в квантоворазмерных полупроводниковых структурах” государственной программы фундаментальных исследований ГПОФИ “Наноматериалы и нанотехнологии”, № госрегистрации 20015118, 2001–2005; проект № Ф02-Р095 БРФФИ “Разработка физических принципов создания новых оптоэлектронных элементов на квантоворазмерных гетероструктурах”, № госрегистрации 20022223, 2002–2004; проект № Ф04М-058 БРФФИ “Многочастичные процессы в квантоворазмерных полупроводниковых структурах”, № госрегистрации 20042271, 2004–2006; НИР 548/13 “Разработка мощных лазерных и светодиодных источников излучения на основе полупроводниковых гетероструктур” государственной программы 2.01 ГКПНИ “Фотоника”, № госрегистрации 20061279, 2006–2010; проект № Ф06Р-087 БРФФИ “Нелинейное взаимодействие мод в резонаторах полупроводниковых лазеров с квантовыми ямами и полупроводниковых волноводах”, № госрегистрации 20063142, 2006–2008; проект № Ф07Р-059 БРФФИ “Разработка полупроводниковых излучателей ИК-диапазона на основе многослойных квантово-каскадных гетероструктур”, № госрегистрации 20072021, 2007–2009; НИР 200/13 “Разработка ме-

тогда формирования самоорганизованных наноструктур мощным лазерным излучением на поверхности кремния и сплавов SiGe для электронных и оптоэлектронных приборов”, № госрегистрации 20080834, 2008–2009; проект № Ф08Р-119 БРФФИ “Генерация терагерцового излучения в лазерных полупроводниковых наноструктурах АЗВ5”, № госрегистрации 20081456, 2008–2010; проект № Ф12Р-107 БРФФИ “Создание и исследование полупроводниковых лазеров с нестандартными волноводами”, № госрегистрации 20122472, 2012–2014; проект № Ф16Р-018 БРФФИ “Создание и исследование мощных полупроводниковых лазеров с узкой диаграммой направленности излучения”, № госрегистрации 20162953, 2016–2018; проект № Ф18Р-107 БРФФИ “Квантово-каскадные лазеры терагерцового диапазона: новые дизайны, развитие технологии, спектроскопические приложения”, № госрегистрации 20181311, 2018–2020.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является выявление закономерностей электронно-оптических явлений в квантово-размерных гетероструктурах, разработка физических моделей протекающих процессов и установление характерных конструктивных особенностей, которые определяют спектральные и генерационные характеристики межзонных инжекционных лазеров с набором квантовых ям, квантово-каскадных лазеров и фотонных гетероструктур на легированных сверхрешетках.

Для достижения поставленной цели решались *следующие задачи*:

- провести анализ структуры уровней энергий, спектральных характеристик многоямных квантово-размерных гетероструктур с неоднородным возбуждением квантовых ям;
- развить теорию лазерной генерации в мощных инжекционных лазерах и проанализировать влияние эффектов захвата–выброса носителей в квантовые ямы, утечек в эмиттерные слои, процессов поглощения света свободными носителями и нагрева на выходные характеристики;
- исследовать механизмы улучшения мощностных характеристик полупроводниковых лазеров с вытекающей модой и лазеров с волноводным эффектом квантовых ям;
- установить особенности влияния поглощения полупроводниковых и металлических слоев на спектры модовых потерь квантово-каскадных лазеров с двойным металлическим волноводом;
- развить теорию лазерной генерации квантово-каскадных лазеров и проанализировать влияние различных механизмов рассеяния носителей заряда, процессов переноса между каскадами, конструктивных особенностей на спектральные и мощностные характеристики и рабочие температуры;
- выявить закономерности нелинейных электронно-оптических эффектов в легированных сверхрешетках и проанализировать возможность управления спектральными характеристиками фотонных кристаллов на их основе.

Объектом исследования являются полупроводниковые квантово-размерные лазеры на межзонных и внутризонных переходах, легированные сверхрешетки, фотонные кристаллы. Предметом исследования являются спектральные и генерационные характеристики. Выбор объекта исследования обусловлен широким применением мощных полупроводниковых лазеров для накачки твердотельных лазеров, перспективами использования квантово-каскадных лазеров в ИК и ТГц спектроскопии и системах связи, нелинейных оптических элементов и микролазеров – в устройствах оптической обработки информации.

### **Научная новизна**

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит:

- в развитии теории лазерной генерации межзонных квантово-размерных инжекционных гетеролазеров с неоднородным возбуждением активной области;
- в развитии теории переноса носителей заряда и лазерной генерации квантово-каскадных лазеров на межподзонных переходах;
- в теоретическом предсказании возникновения доменов электрического поля в квантово-каскадных лазерах на основе сверхрешеток;
- в разработке методов управления спектральными характеристиками одномерных фотонных кристаллов за счет использования в качестве активных слоев легированных сверхрешеток.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Асимметричные многослойные квантово-размерные гетероструктуры на основе соединений GaInAs/GaInAsP, InGaAsSb/AlGaAsSb с набором 2–4 неоднородно возбужденных квантовых ям, управляемых шириной, высотой и степенью легирования барьерных слоев, позволяют получать широкие и практически плоские контуры спектров усиления в спектральных диапазонах 1.36–1.60 мкм и 2.30–2.84 мкм, соответственно, что дает возможность их использования в качестве широкополосных усилителей без применения дополнительных оптических фильтров.

2. Изменение наклона энергетических зон волноводных слоев и нагрев активной области полупроводниковых лазерных гетероструктур InGaAs/GaAs/InGaP ( $\lambda \approx 1$  мкм) при протекании тока стимулируют накопление неравновесных носителей заряда в волноводных слоях, что приводит к сверхлинейному росту коэффициента внутренних оптических потерь и падению максимальной мощности излучения с увеличением тока накачки. Введение вблизи квантовых ям InGaAs широкозонных легированных слоев GaAsP (в квантово-размерных лазерах с волноводом из квантовых ям) и InGaP (в гетеролазерах с выводом излучения через подложку) блокирует утечки тока в волноводные слои и обеспечивает уменьшение уровня поглощения свободными носителями заряда, в результате чего расширяется область линейности ватт-

амперных характеристик, а максимальная мощность генерации увеличивается в  $\sim 2.5$  раза (в квантово-размерных лазерах с волноводом из квантовых ям) и на  $\sim 30\%$  (в гетеролазерах с выводом излучения через подложку).

3. Коэффициент модовых потерь терагерцовых квантово-каскадных лазеров на основе GaAs с двойным металлическим волноводом, обусловленный поглощением свободными носителями заряда, ТО-фононами и потерями в металлических контактах, имеет минимум в спектральной полосе 2–5 ТГц, положение которого зависит от толщины и уровня легирования приконтактных слоев и сдвигается в область высоких частот с ростом температуры. Применение в качестве металлических контактов серебра вместо золота позволяет уменьшить волноводные потери более чем на  $2 \text{ см}^{-1}$  и повысить максимальные рабочие температуры квантово-каскадных лазеров на  $\sim 30^\circ\text{C}$ .

4. Новый метод анализа эффектов дефазировки квантовых состояний в полупроводниковых сверхрешетках, основывающийся на модификации собственного базиса уравнения Шредингера путем минимизации матричных элементов дипольных переходов для туннельно связанных состояний, позволяет на основе системы балансных уравнений без использования аппарата функций Грина или матрицы плотности прогнозировать максимальные рабочие температуры, вольт- и ватт-амперные характеристики квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона, а также предлагать их новые дизайны.

5. Распределенная модель терагерцового квантово-каскадного лазера, учитывающая перенос носителей заряда по локализованным состояниям и состояниям непрерывного спектра, объясняет неустойчивую генерацию в структурах GaAs/AlGaAs при выборе рабочей точки на участке вольт-амперных характеристик одного каскада с отрицательным дифференциальным сопротивлением и формирование доменной структуры электрического поля, при которой напряжение в доменах соответствует соседним участкам вольт-амперных характеристик с положительным дифференциальным сопротивлением.

6. Рост коэффициента усиления и показателя преломления, обусловленные изменениями эффективной ширины запрещенной зоны и глубины потенциальных ям структуры, на начальном участке их зависимости от плотности фотонов в легированных сверхрешетках на основе GaAs обеспечивает реализацию бистабильных режимов переключения коэффициентов пропускания и отражения, выходной мощности излучения и подстройки длины волны генерации в фотонных кристаллах и лазерных элементах на их основе.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Личный вклад соискателя состоит в выборе направления исследований, комплексном решении поставленных научных задач, участии в проведении вычислительного эксперимента и интерпретации полученных результатов. Приведенные в диссертации теоретические результаты в полупроводниковых лазерах на асимметричных гетероструктурах проанализированы совместно с В.К. Ко-

ноненко (Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси) и И.С. Манаком (БГУ). Результаты в полупроводниковых гетеролазерах InGaAs/GaAs с различным набором квантовых ям обсуждались при участии А.А. Афоненко (БГУ), В.Я. Алешкина и А.А. Дубинова (Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород). Образцы квантово-размерных лазеров на квантовых ямах и лазеров с вытекающей модой изготовлены Б.Н. Звонковым, С.М. Некоркиным (Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского). Образцы квантово-каскадных лазеров на 2.3 ТГц, 3 ТГц, 4.3 ТГц изготовлены Ю.Г. Садофьевым (Темпе, США). Разработанный дизайн квантово-каскадного лазера в системе GaAs/AlGaAs на 3.3 ТГц выращен в группе И.С. Васильевского (Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва)). Процессинг и постростовые измерения квантово-каскадных лазеров выполнены Р.А. Хабибуллиным (Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН (Москва)). Экспериментальные исследования электрических и оптических характеристик квантово-каскадных лазеров проведены в Институте физики микроструктур РАН (Нижний Новгород) группой В.И. Гавриленко, С.В. Морозова, К.В. Маремьянина. Теоретические работы по квантово-каскадным лазерам на основе HgCdTe инициированы с А.А. Дубиновым, а на основе GeSiSn – П.И. Гайдуком (БГУ). Комплексные диффузионно-дрейфовые модели лазеров на межзонных и внутривозонных переходах разработаны лично соискателем и проанализированы совместно с научным консультантом А.А. Афоненко (БГУ). Результаты по анализу фотонных гетероструктур на легированных сверхрешетках проанализированы совместно с В.К. Кононенко и И.С. Манаком, составные микрорезонаторы – совместно с А.Г. Смирновым (Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси), нелинейные явления – совместно с И.С. Нефедовым, В.Н. Гусятниковым и Ю.А. Морозовым (Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского). В диссертацию вошли результаты, личный вклад автора в которых является определяющим.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты исследования, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на международных конференциях и симпозиумах: Международный симпозиум *“Нанопфизика и наноэлектроника”* (Н. Новгород: 2003, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021); Международный научно-техническая конференция *“Квантовая электроника”* (Минск: 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2013, 2015, 2017, 2019); Int. Conf. *“Laser and fiber-optical networks modeling”* (Kharkiv: 2001, 2002, 2005, 2006; Alushta: 2003, 2008; Sevastopol 2010); Белорусско-Российский семинар *“Полупроводниковые лазеры и системы на их основе”* (Минск: 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019); Российский симпозиум с международным участием *“Полупровод-*

никовые лазеры: физика и технология” (Санкт-Петербург: 2012, 2016, 2018); Международная научная конференция “Лазерная физика и оптические технологии” (Гродно: 2006, 2012; Минск 2008); Int. Conf. “*Physics, Chemistry, and Application of Nanostructures*” (Minsk: 2001, 2002); Int. Symp. “*Nanostructures: Physics and Technology*” (St. Petersburg 2006; Minsk 2009); Российская конференция по физике полупроводников (Екатеринбург 2007; Новосибирск-Томск 2009); Int. Conf. “*Transparent Optical Networks*” ICTON (Warsaw: 2002, 2003); Міжнарод. конф. “*Фізика і технологія тонких плівок та наносистем*” (Івано-Франківськ: 2005, 2007); Conf. Fizicienilor din Moldova (Chisinau: 2005, 2007); Int. Symp. “*Internet presentation Laser technologies & lasers*” (Plovdiv 2001); Международная конференция по люминесценции, посвященная 110-летию со дня рождения академика С. И. Вавилова (Москва 2001); Int. Conf. “*Transparent Optical NetWorks*” (Krakow 2001); Int. Conf. “*Solid State Crystals – Materials Science and Applications*” (Zakopane 2002); Int. Conf. “*Advanced Optoelectronics and Lasers*” (Alushta: 2003, 2008; Kharkiv 2005); Photonics Europe Symposium (Strasbourg, 2006); Международная научно-практическая конференция “*Современная радиоэлектроника: научные исследования, подготовка кадров*” (Минск 2006); 17 Междунар. Крымская конференция “*СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*” (Севастополь 2007); Международной научной конференции “*Оптика неоднородных структур*” (Могилев 2007); Int. conf. “*TERA 2008*” (Alushta 2008); IV Междунар. конф. “*Релаксационно-, нелинейно-, акустооптические процессы и материалы*” (Луцк 2008); XII Int. Conf. “*Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems*” (Ivano-Frankivsk 2009); Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Нижний Новгород 2009); 18th International Conference “*Laser Optics «ICLO 2018»*” (St.Petersburg 2018); 6th “*EOS Topical Meeting on Terahertz Science and Technology*” (Berlin 2018); Saratov Fall Meeting (Saratov 2018); The Int. Conf. “*Micro- and Nanoelectronics – 2018*” (Zvenigorod 2018); The Int. Conf. “*Terahertz and microwave radiation: generation, detection and applications*” (Nizhny Novgorod 2018).

Результаты диссертации использованы в Институте электроники и информационных технологий Люблинского технического университета (Люблин, Польша) по договору о научно-техническом сотрудничестве между факультетом радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета и Электротехническим факультетом Люблинского технического университета от 20.06.2002 г.; в научных исследованиях: Института физики микроструктур РАН, Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН (акты об использовании результатов работы представлены в Приложении к диссертации). На основании результатов диссертации получено 2 патента на изобрете-

ния Республики Беларусь [96, 97].

### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 97 научных работах, из которых: 4 главы в 3-х коллективных монографиях (4 авторских листа), 35 статей в научных журналах (17 авторских листов), соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 2 статьи в других научных изданиях (1 авторский лист), 55 статей и тезисов докладов в сборниках материалов научных конференций и симпозиумов, 2 патента на изобретение.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, литературного обзора, 5 оригинальных глав, заключения и библиографического списка из 408 наименований, включая собственные публикации соискателя. Объем диссертации составляет 256 страниц, включая 118 иллюстраций, 33 таблицы и 1 приложение на 3 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ**

**Глава 1** посвящена анализу современных тенденций развития многоямных квантово-размерных лазеров на межзонных переходах, состояния разработок квантово-каскадных лазеров на сверхрешетках, а также особенностей одномерных фотонных кристаллов. Проведен литературный обзор по многоямным гетероструктурам с широким спектром усиления на основе соединений:  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}-\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ,  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ ,  $\text{GaInAsSb}/\text{AlGaAsSb}$  и  $\text{InGaN}/\text{AlGaIn}$ . Показано, что при проектировании излучающих элементов на основе квантово-размерных гетероструктур вопрос о влиянии числа квантовых ям в активной области на выходные характеристики индивидуален для каждой гетеропары соединений, зависит от длины резонатора и требует предварительных теоретических исследований. Проанализированы разработки по квантово-размерным лазерным структурам с вытекающей модой для получения большой мощности излучения и узкой диаграммы направленности.

Подробно проанализированы публикации по квантово-каскадным лазерам (ККЛ) как среднего инфракрасного (ИК), так и терагерцового (ТГц) диапазонов. Для ККЛ среднего ИК диапазона, работающих при комнатной температуре, построены графики достигнутых к настоящему времени мощностей излучения, как показано на рисунке 1 а. Аналогично на рисунке 1 б проанализирован прогресс достигнутых рабочих температур ККЛ ТГц диапазона для дизайнов с фононным резонансом и на переходах уровень-минизона.

Рассмотрены свойства одномерных фотонных кристаллов. Проанализированы перспективы использования легированных сверхрешеток или  $n-i-p-i$ -кристаллов в качестве активных слоев фотонных гетероструктур.

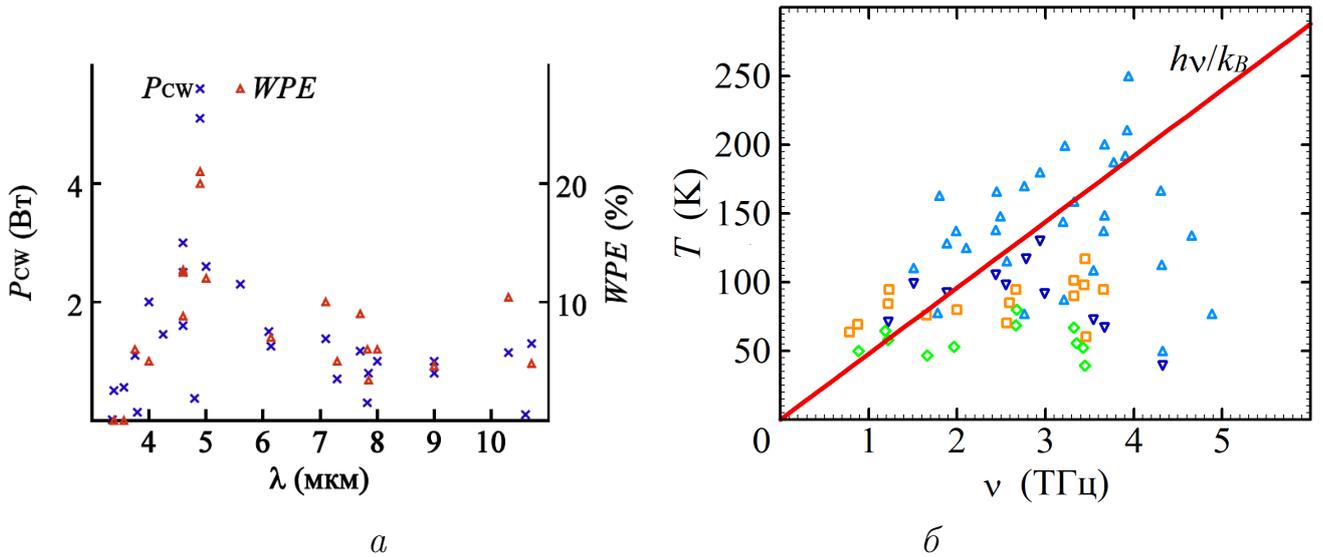
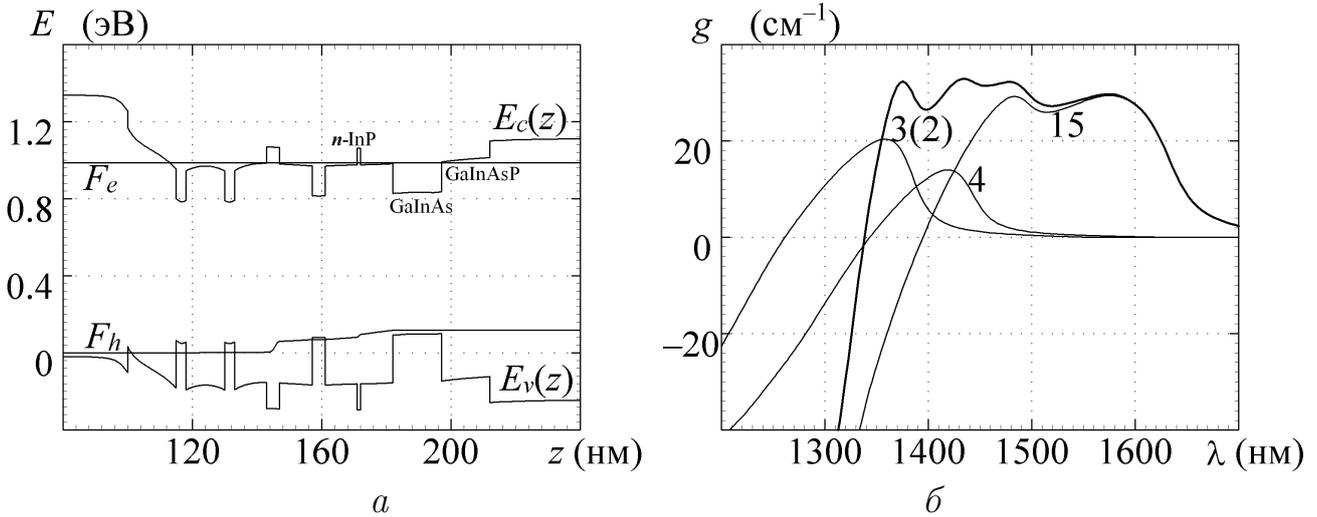


Рисунок 1. – (а) Достигнутые мощности излучения вблизи комнатной температуры (288–300 К) в непрерывном режиме  $P_{CW}$  (крестики) и КПД ( $WPE$ ) (треугольники) для разработанных ККЛ среднего ИК диапазона, (б) прогресс достигнутых рабочих температур ККЛ ТГц диапазона для дизайнов с фоновым резонансом в импульсном (треугольники) и непрерывном (перевернутые треугольники) режимах, а также ККЛ с переходами уровень-минимума в импульсном (квадраты) и непрерывном (ромбы) режимах

В конце главы сформулированы задачи, которые оставались неразрешенными к началу выполнения настоящей работы.

В главе 2 изложена теория  $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ -метода, учитывающая эффекты смешения зон и проведен расчет энергетической структуры зон, волновых функций носителей заряда, матричных элементов межзонных переходов и спектров усиления для различных уровней возбуждения для квантово-размерных гетероструктур на основе соединений  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{Ga}_{0.18}\text{In}_{0.82}\text{As}_{0.4}\text{P}_{0.6}$ . Далее исследованы асимметричные гетероструктуры из трех и четырех квантовых ям с различными толщинами, чтобы длины волн оптических переходов электронов на уровни тяжелых и легких дырок в разных квантовых ямах были немного разнесены и перекрывали желаемый диапазон длин волн 1.3–1.6 мкм.

Расчеты результирующих спектров волноводного усиления асимметричных квантово-размерных гетероструктур проводились в несколько этапов. На первом этапе на основе четырехзонного  $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ -метода при различных уровнях возбуждения рассчитывались энергетические и спектральные характеристики для квантовых ям (КЯ) с толщинами от 2 до 15 нм. Полученная база данных применялась на втором шаге при оптимизации уровней возбуждения полупроводниковой системы из нескольких квантовых ям различной толщины с целью получения широкого и плоского спектра волноводного усиления в требуемом диапазоне длин волн. На третьем этапе на основе системы уравнений Пуассона и непрерывности определялись электрофизические характеристики, а также находились уровни легирования и толщины барьерных слоев с целью получения рассчитанных на этапе 2 неоднородных уровней возбуждения квантовых



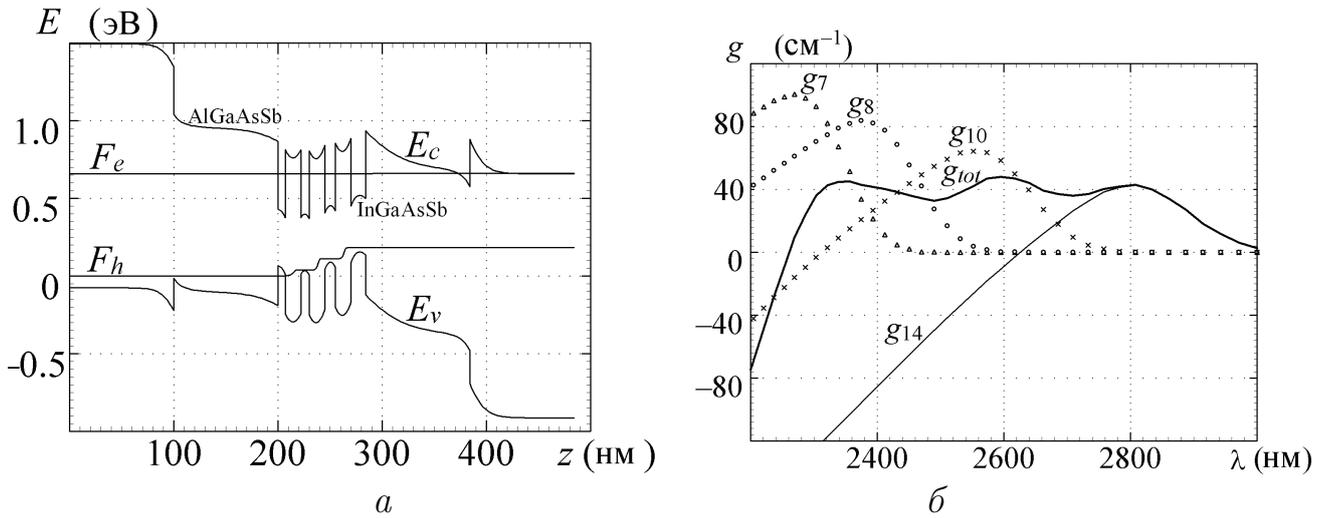
Числа на кривых соответствуют толщинам квантовых ям  $d$

**Рисунок 2.** – (а) Распределение зоны проводимости  $E_c(z)$  и валентной зоны  $E_v(z)$ , а также (б) спектры волноводного усиления ТЕ-моды при различных уровнях возбуждения и суммарный спектр модового усиления (жирная линия) для квантово-размерных структур  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{Ga}_{0.18}\text{In}_{0.82}\text{As}_{0.4}\text{P}_{0.6}$  с четырьмя квантовыми ямами с набором толщин 3(2)–4–15

ям.

На рисунке 2 представлены результаты численного решения системы уравнений Пуассона и непрерывности для структуры  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{Ga}_{0.18}\text{In}_{0.82}\text{As}_{0.4}\text{P}_{0.6}$  с подложкой InP, а также спектры волноводного усиления. Расчеты проведены для набора толщин (нм): 3(2)–4–15 (в скобках отмечено количество КЯ одинаковой толщины). Для контроля уровней возбуждения в квантовых ямах производилось легирование донорными примесями (концентрация  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) барьерных слоев  $\text{Ga}_{0.18}\text{In}_{0.82}\text{As}_{0.4}\text{P}_{0.6}$  и широкозонных барьеров InP между 2-й и 3-й, а также 3-й и 4-й квантовыми ямами, а также подбирались толщины барьерных слоев. Для эффективного управления уровнем возбуждения квантовых ям в валентной зоне внутри барьерных слоев  $\text{Ga}_{0.18}\text{In}_{0.82}\text{As}_{0.4}\text{P}_{0.6}$  встраивались легированные широкозонные барьерные слои InP. Для максимального значения коэффициента модового усиления  $g_{max} = 30 \text{ см}^{-1}$  область усиления составила  $\sim 240 \text{ нм}$  в диапазоне 1.36–1.60 мкм при отклонении от максимума  $\pm 3 \text{ см}^{-1}$ . Для набора толщин квантовых ям 2(2)–3–7 нм при максимальном значении коэффициента усиления  $g_{max} = 25 \text{ см}^{-1}$  диапазон усиления составляет  $\sim 245 \text{ нм}$  в области 1.28–1.525 мкм при отклонении от максимума  $\pm 3 \text{ см}^{-1}$ .

При другом выборе квантовых ям возможно получение коэффициента волноводного усиления с более плоским спектром с отклонением от максимального значения меньшим  $1 \text{ см}^{-1}$ . Расчеты показывают, что для активной области с четырьмя квантовыми ямами 4–5–9–14 нм ширина спектра усиления с практически постоянным максимальным значением  $\sim 30 \text{ см}^{-1}$  составляет  $\sim 120 \text{ нм}$  в области 1.48–1.6 мкм. Уменьшение количества квантовых ям до 3 приводит



$g_{tot}$  – суммарный спектр волноводного усиления

Рисунок 3. – (а) Зонная диаграмма при прямом смещении 0.66 В и (б) волноводный спектр усиления ТЕ моды в структуре с четырьмя КЯ с толщами: 7 ( $g_7$ ), 8 ( $g_8$ ), 10 ( $g_{10}$ ) и 14 нм ( $g_{14}$ )

к сокращению диапазона постоянного коэффициента усиления, а увеличение числа квантовых ям до 5 ведет к возрастанию максимума коэффициента усиления, однако область плоского участка сужается.

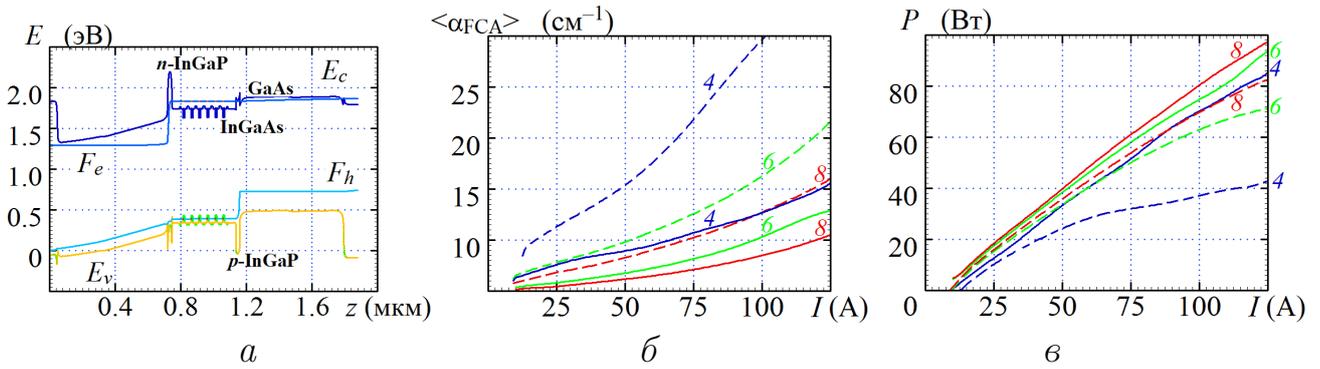
Далее аналогично исследованы узкозонные гетероструктуры в системе твердых растворов GaSb-InAs, которые являются перспективными материалами для создания оптоэлектронных приборов, работающих в спектральном диапазоне 2–3 мкм. Проведена оценка длин волн основных оптических переходов в зависимости от толщины КЯ и показано, что, используя квантовые ямы  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}_{0.36}\text{Sb}_{0.64} / \text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$  с шириной от 5 до 15 нм, расчетные длины волн основных оптических переходов лежат в интервале 2.5–3 мкм. Как показали расчеты результирующего усиления для структуры с двумя квантовыми ямами шириной 10 и 14 нм формируется широкий спектр волноводного усиления в диапазоне 2.6–2.8 мкм при коэффициенте потерь  $40 \pm 0.5 \text{ см}^{-1}$ . При использовании набора из трех КЯ 9, 10, и 14 нм с усилением в области 2.48, 2.60 и 2.78 мкм результирующий спектр модового усиления охватывает диапазон 2.52–2.82 мкм с отклонением  $40 \pm 3 \text{ см}^{-1}$ . Для структуры из четырех квантовых ям 7, 8, 10 и 14 нм как показано на рисунке 3, область усиления расширяется до 540 нм и охватывает диапазон 2.3–2.84 мкм. При этом, получается практически плоский спектр усиления с отклонением от  $g_{max} = 40 \text{ см}^{-1}$  меньше  $5 \text{ см}^{-1}$ .

Для GaInAs/GaInAsP/InP лазеров на асимметричных гетероструктурах с 2 квантовыми ямами и длиной волны излучения около 1.55 мкм показана слабая температурная чувствительность порога генерации. Установлено, что оже-рекомбинация приводит к сверхлинейной температурной зависимости плотности порогового тока и ее влияние существенно для температур активной области выше 350 К при потерях больше  $60 \text{ см}^{-1}$ . Показано, что скорость оже-

рекомбинации растет практически как активационная функция в интервале температур от 250 до 350 К и следует экспоненциальной зависимости от ширины квантовой ямы. Разработан аналитический подход, который позволяет оценить характеристическую температуру порога генерации и ее связь с эффективной энергией активации оже-процессов.

**В главе 3** разработана диффузионно-дрейфовая модель гетероструктуры с учетом процессов захвата-выброса носителей на уровни квантовых ям, поглощения света свободными носителями заряда и нагрева активной области. Процессы захвата-выброса учитывались из системы балансных уравнений, в которых приравниваются скорости поступления носителей на локализованные уровни и скорости межзонной рекомбинации в квантовых ямах. Эволюция локальной температуры внутри активной области после начала импульса накачки находилась с использованием функций Грина и решением уравнения теплопроводности. Джоулев нагрев в волноводе, включая активные, эмиттерные, волноводные слои и подложку рассматривался отдельно. Мощность источников тепла в центральной части гетероструктуры в расчете на единичную площадь определялась законом Джоуля-Ленца за вычетом мощности, передаваемой лазерному излучению. При этом, частота генерации  $\omega$  зависит от температуры через эффекты нагрева и температурной зависимости ширины запрещенной зоны.

На основе разработанной модели проанализирована зависимость эффективности генерации в лазерной структуре  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}/\text{InGaP}$  со значительным выходом излучения через подложку от количества квантовых ям в активной области. При моделировании учитывалось также неоднородное возбуждение КЯ, процессы рекомбинации в барьерных областях, эффекты нелинейного усиления, роль которых значительно увеличивается при больших токах инжекции. Сечения поглощения для электронов и дырок считались равными  $5 \times 10^{-18}$  и  $10^{-17}$   $\text{см}^2$ , соответственно. Как показали расчеты, при малых коэффициентах потерь в структуре с одной квантовой ямой порог генерации может реализоваться при уровне возбуждения, близком к инверсии, тогда при больших токах инжекции мощность генерации практически не зависит от числа ям. При больших коэффициентах потерь из-за эффекта стабилизации усиления генерации, структуры с малым количеством ям (1–3) наименее эффективны. В таких структурах при высоком уровне возбуждения КЯ заселенность барьерных областей значительна. Для большего числа ям (6–10) мощность генерации практически не зависит от их количества, а оптимальные потери составляют  $\sim 20$   $\text{см}^{-1}$ . При сильном неоднородном возбуждении часть КЯ может не участвовать в усилении излучения. Поэтому по сравнению со случаем однородного возбуждения оптимальное количество КЯ уменьшается. При этом, число усиливающих КЯ увеличивается при увеличении коэффициента потерь. Установлено, что для лазерных структур с числом КЯ больше 5 кривые распределения



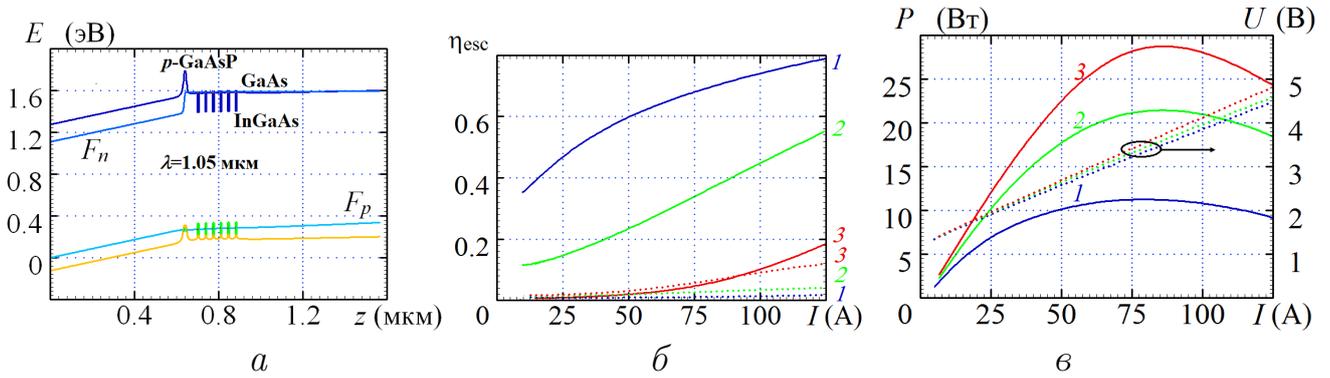
Штриховой линией на (б) и (в) показаны расчеты без введения блокирующих слоев

**Рисунок 4.** – (а) Зонная диаграмма с 6 квантовыми ямами при лазерной генерации при токе 125 А в конфигурации с легированными барьерами (б) коэффициент внутризонного поглощения в зависимости от тока накачки и (в) ватт-амперные характеристики для различного числа КЯ (числа на кривых)

коэффициента усиления по КЯ практически совпадают, а оптимальное число квантовых ям в зависимости от коэффициента потерь и тока накачки составляет  $5 \pm 1$ .

Из-за больших полезных потерь на вытекание в подложку в полупроводниковых лазерах увеличивается населенность квантовых ям и волноводных слоев, что приводит к росту порогового тока и внутренних оптических потерь, связанных с поглощением излучения свободными носителями. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что большей эффективностью обладают структуры с большим количеством квантовых ям (6–10), за счет которых снижается заселённость волноводных слоев и внутренние потери излучения. Эффективную генерацию излучения в структурах с небольшим числом квантовых ям (4–6) можно получить на основе предложенного оригинального дизайна гетеролазера, в котором нежелательная населенность волновода блокируется широкозонными легированными барьерными слоями InGaP.

Расчеты мощностных характеристик лазерных гетероструктур с 4, 6 и 8 квантовыми ямами в активной области проведены в режиме импульсной накачки с длительностью импульсов тока 5 мкс. Коэффициенты отражения на гранях резонатора считались равными 0.95, 0.05. Как показало моделирование на рисунке 4, при прохождении тока через структуру легированные барьерные слои InGaP толщиной 25 нм эффективно препятствуют попаданию носителей заряда в волноводные области. Это снижает коэффициент поглощения свободными носителями по сравнению с обычной структурой практически вдвое. При этом омическое сопротивление волноводных слоев определяется только исходным уровнем легирования. За счет этого нагрев активной области может быть больше, чем в структуре без барьеров. Ватт-амперные характеристики для структуры с активной областью из 6 квантовых ям с блокирующими барьерами в отличие от обычной структуры оказываются практически линейными,



$F_n$  и  $F_p$  – квазиуровни Ферми для электронов и дырок

Рисунок 5. – (а) Зонная диаграмма центральной части лазерной структуры с волноводом из шести КЯ и легированным блокирующим гетерослоем при токе 125 А и температуре 350 К, (б) доля токов утечки  $\eta_{esc}$  электронов (сплошные кривые) и дырок (пунктир) и (в) средняя за время действия импульса мощность генерации (сплошные кривые) и напряжение (пунктир) на структуре при импульсной накачке длительностью 5 мкс для структур без блокирующих слоев (1), с легированными блокирующими слоями (2) и с легированными блокирующими гетерослоем (3)

при этом мощность излучения повышается на 30% при токе накачки 125 А.

Концепция использования широкозонных легированных барьерных слоев, блокирующих утечки носителей заряда, проанализирована для гетеролазеров с волноводом из КЯ. Первая исследуемая структура, состояла из волноводных слоев, образованных шестью нелегированными КЯ  $In_{0.32}Ga_{0.68}As$  шириной 6 нм и обкладочных слоев GaAs толщиной 5.6 мкм, легированных примесями  $p$ - и  $n$ -типа с концентрацией  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация легирующей примеси подложки  $n$ -типа составляла  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Во второй структуре в качестве барьерного слоя, блокирующего утечки электронов, дополнительно вблизи КЯ использовался слой GaAs толщиной 20 нм с концентрацией акцепторов  $2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . В третьей структуре, как показано на рисунке 5, а для увеличения потенциального барьера центральная часть легированного блокирующего слоя толщиной 10 нм изготавливалась из более широкозонного материала  $GaAs_{0.9}P_{0.1}$ . Коэффициенты отражения зеркал считались равными 95 % и 5 %, длина лазерного чипа составляла 4 мм, ширина – 100 мкм. Расчетная длина волны генерации равнялась 1.05 мкм. Как показали расчеты, потенциальный барьер вблизи КЯ приводит к снижению квазиуровней Ферми для электронов  $F_n$  и уменьшению токов утечки. Для второй и третьей структур потенциальные барьеры при температуре 350 К составляли 150 и 230 мэВ. В обоих случаях имеет место ослабление волновода (из-за легирования и наличия широкозонного материала с меньшим показателем преломления). Параметр оптического ограничения в анализируемых структурах составил соответственно 0.0018, 0.0015 и 0.0013 в расчете на одну КЯ. Численное моделирование показало, что при использовании барьера из  $GaAs_{1-x}P_x$  оптимальным является содержание фосфора 10%. Как показали расчеты на рисунке 5 б, при токе инжекции около 10 А

токи утечки в структуре без барьерных слоев составляют около 35%. Введение блокирующего слоя приводит к значительному уменьшению токов утечки электронов: с 69% при токе 80 А для обычных лазеров на КЯ до 5% для лазеров с блокирующим легированным гетерослоем. При этом из-за легирования блокирующего слоя коэффициент поглощения свободными носителями увеличивается примерно на  $1 \text{ см}^{-1}$ , однако все равно остается достаточно малым. Показано, что при токе 80 А в лазере с блокирующим легированным гетерослоем расчетная средняя мощность может быть увеличена в 2.5 раза до  $\sim 29 \text{ Вт}$ , что сопоставимо с характеристиками мощных лазеров с вытекающими модами. При этом, область линейности ВТАХ увеличивается до  $\sim 43 \text{ А}$ , что почти в 2 раза больше, чем для гетеролазеров без блокирующих слоев.

**В главе 4** разработана двухпериодная модель самосогласованного моделирования спектральных характеристик многопериодных квантово-каскадных структур (ККС) в условиях квазиравновесия. Значения энергии, вид волновых функций, а также профиль потенциальной энергии находились в расширенной модели Бастарда из самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона, а также системы балансных уравнений для 2-х периодов ККС. Степень заполнения подзон определялась из следующей системы балансных уравнений

$$\frac{dn_{i_N}}{dt} = \sum_{j_N \neq i_N} (R_{j_N i_N} - R_{i_N j_N}) + \sum_{j_{N-1}} (R_{j_{N-1} i_N} - R_{i_N j_{N-1}}) + \sum_{j_{N+1}} (R_{j_{N+1} i_N} - R_{i_N j_{N+1}}). \quad (1)$$

Здесь первая сумма соответствует разности скоростей прихода на уровень  $i$  со всех  $j$  и ухода с  $i$  на все уровни  $j$  в  $N$ -ом периоде. Вторая и третья суммы определяют разность скоростей прихода и ухода электронов на уровень  $i$   $N$ -ого периода со всех уровней  $j$   $(N-1)$ -ого и  $j$   $(N+1)$ -ого периодов. Интегральные скорости переходов  $R_{ij}$  находятся суммированием скоростей всех возможных механизмов рассеяния. Последнее уравнение включает в себя сумму поверхностных концентраций электронов на всех уровнях  $N$ -ого периода, равную результирующей концентрации электронов  $n_{stot} = \sum_{i_N=1}^{n_{max}} n_{si_N}$ . В приближении, когда уровни энергии и волновые функции во всех периодах ККС идентичны, степени их заполнения можно считать также одинаковыми. При этом переходы электронов из  $N$ -ого в  $(N+1)$ -ый период эквивалентны переходам электронов из  $(N-1)$ -ого в  $N$ -ый период, что позволяет рассчитывать волновые функции только для двух периодов ККС. В случае необходимости повышения точности расчетов модель может быть легко модифицирована за счет включения в один расчетный период 2, 3, 4 ... физических периодов ККС.

Рассмотрены различные контуры уширения линий излучения в квантово-каскадных структурах на сверхрешетках и оценено их влияние на форму спектров усиления и спонтанной рекомбинации, связанных между со-

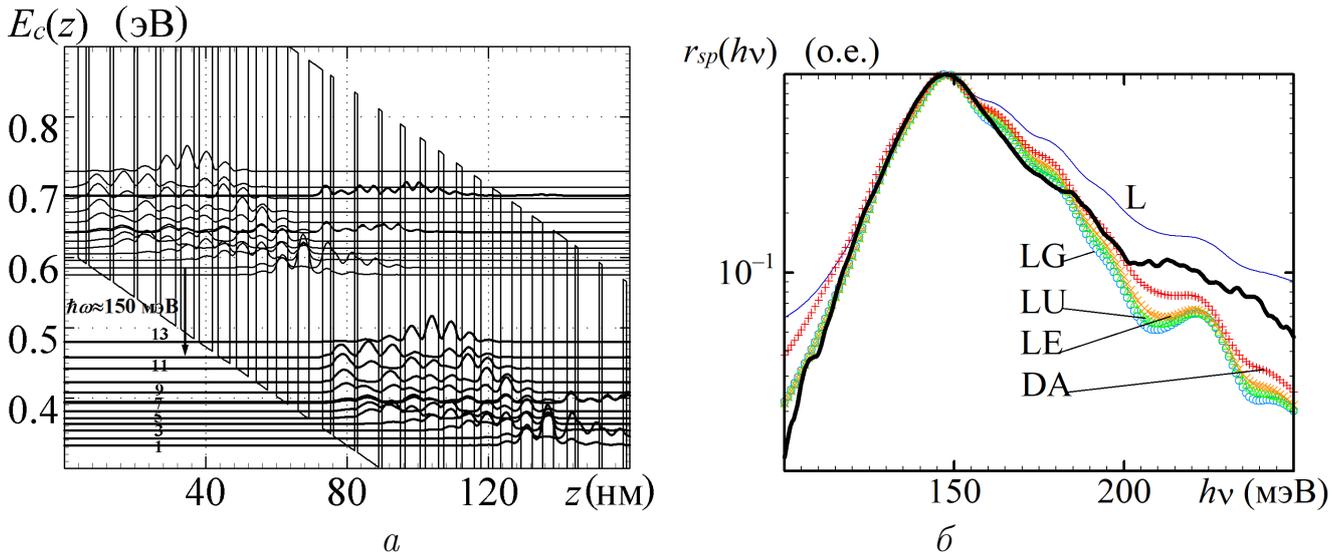
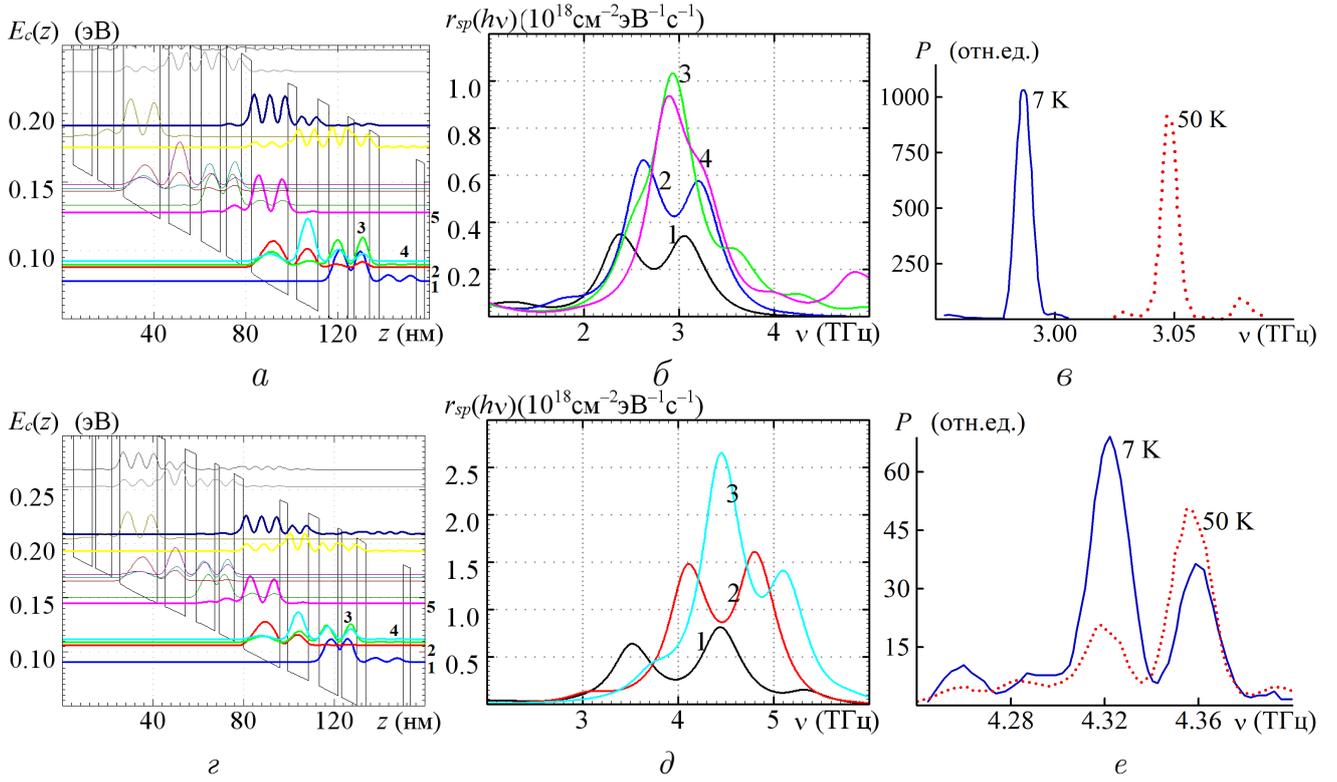


Рисунок 6. – (а) Диаграмма зоны проводимости  $E_c(z)$  и квадраты модулей волновых функций электронов и (б) спектры испускания с различными форм-факторами уширения линии излучения в сравнении с наблюдаемыми спектрами электролюминесценции (жирная кривая) для квантово-каскадной структуры  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$  в электрическом поле  $E = 32.5$  кВ/см

бой полученным модифицированным для ККС соотношением Степанова-Грибковского. Сравнение рассчитанных спектров испускания с наблюдаемыми спектрами электролюминесценции для гетероструктур в системе  $\text{AlInAs}-\text{GaInAs}$  представлено на рисунке 6. Как показали вычисления, несимметричные  $LU$ - (Лоренц-Унгер),  $LE$ - (Лоренц-Елисеев),  $LG$ - (Лоренц-Гаусс) и  $DA$ -форм-факторы (Дрозд-Афоненко) уширения линии излучения наилучшим образом описывают экспериментальные спектры, которые в длинноволновой области проявляют экспоненциальный спад. Лоренцевская модель уширения линии излучения менее всего подходит для описания спектров излучения.

Для квантово-каскадных структур  $\text{GaAs}-\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  на основе 4 КЯ с дизайном “резонансное испускание оптического фонона” проведены самосогласованные расчеты спектральных характеристик, как показано на рисунке 7. На основе оптимизации толщин квантовых ям и барьерных слоев, получены конструкции ряда новых квантово-каскадных структур для работы в терагерцевой области в диапазоне 1.1–4.4 ТГц. На основе предложенных дизайнов на 2.95 ТГц и 4.4 ТГц выращены квантово-каскадные лазеры. Как показало численное моделирование на рисунке 7, расчетные значения частоты излучения хорошо согласуются с наблюдаемыми экспериментальными линиями излучения в области 2.99 ТГц и 4.32 ТГц.

Одним из перспективных направлений исследований квантово-каскадных структур считается создание лазеров на основе неполярных материалов – гетероструктур на основе  $\text{Ge}/\text{GeSiSn}$ . На основе соединений  $\text{Ge}/\text{Ge}_{0.49}\text{Si}_{0.40}\text{Sn}_{0.11}$  предложена структура с активной областью из сверхрешетки связанных ям с плавно меняющимся периодом (дизайн "chirped superlattice"), оптимизи-

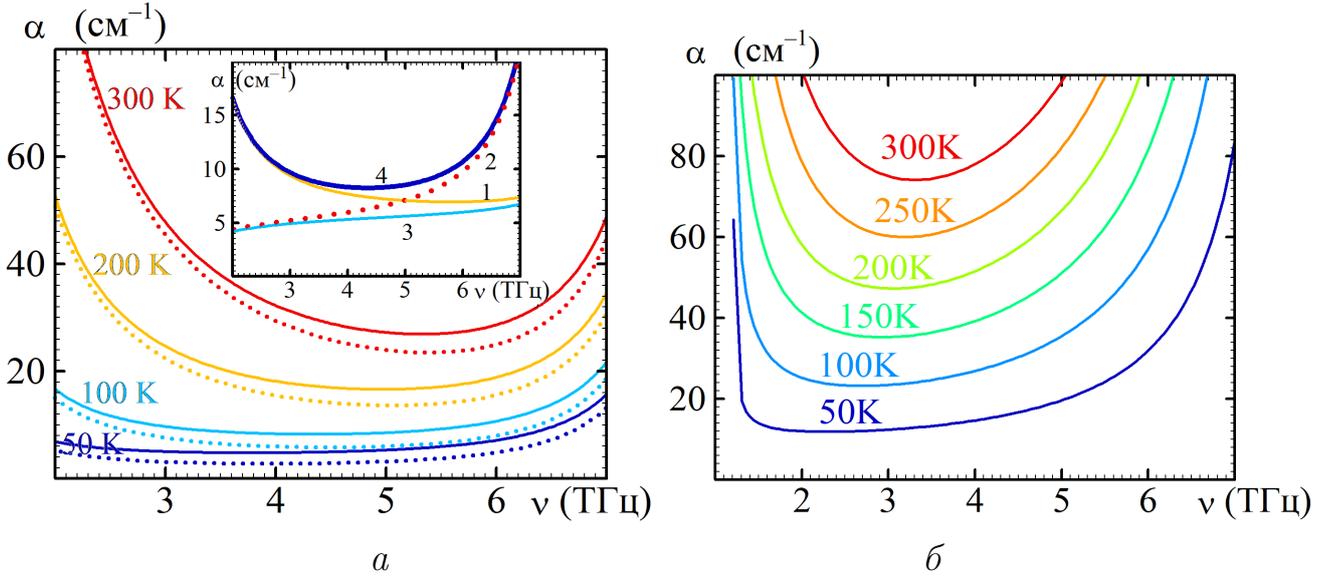


Толщины слоев GaAs/AlGaAs в периоде слева направо, начиная с широкой КЯ составляют (в нм): (а, б, в) / 16.09 / 3.66 / 9.36 / 4.78 / 8.20 / 2.62 / 6.79 / 4.25; (г, д, е) / 16.39 / 3.39 / 9.04 / 4.80 / 8.19 / 1.70 / 6.78 / 3.96

Рисунок 7. – (а, г) Диаграмма зоны проводимости  $E_c(z)$  и квадраты модулей волновых функций электронов при напряженности электрического поля  $E = 10$  (а) 11 кВ/см(г), (б, д) спектры спонтанного испускания при различных значениях напряженности электрического поля (б)  $E = 8$  (1), 9 (2), 10 (3) и 11 кВ/см (4) и (д)  $E = 9$  (1), 10 (2) и 11 кВ/см (3), а также спектры излучения 4КЯ ККЛ на 3 ТГц (в) и 4.3 ТГц (е)

рованная для диапазона 5.7 ТГц (52.6 мкм, 23.6 мэВ). Толщины слоев Ge/Ge<sub>0.49</sub>Si<sub>0.40</sub>Sn<sub>0.11</sub> в периоде слева направо, начиная с широкой КЯ составили (в нм): / 19.0/1.3/20.4/0.7/16.5/2.6/15.8/2.6/8.8/2.6/6.0/3.6/8.2/4.3. Подчеркнутые КЯ легировались со слоевой концентрацией  $3.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

Далее для двойного металлического волновода (ДМВ) толщиной 10 мкм на основе Au и Ag проведен анализ спектров суммарных потерь, включающих потери на обкладках ДМВ и зеркалах резонатора, а также поглощения оптическими фононами и свободными носителями заряда. На основе измеренных температурных зависимостей удельного сопротивления золота и серебра рассчитаны энергии затухания и коэффициент потерь в обкладках. Как показывают численные расчеты на рисунке 8, суммарный коэффициент потерь в зависимости от частоты ведет себя немонотонно. В области низких частот  $< 2$  ТГц рост потерь обусловлен поглощением света свободными носителями, а в области  $> 6$  ТГц – резонансным поглощением на ТО-фононах. Значения коэффициента потерь  $\alpha$  на фиксированной частоте увеличиваются с ростом температуры. Кроме того, увеличение температуры приводит к резкому росту



На вставке *a* показаны составляющие для коэффициента потерь в ККЛ с ДМВ на основе Ag для  $T = 100$  K: обусловленные поглощением света свободными носителями (кривая 1), поглощением на оптических фононах (точками 2) и на металлических обкладках (кривая 3), а также результирующий коэффициент потерь (кривая 4)

Рисунок 8. – Результирующие ТГц спектры коэффициента потерь для различных температур для ККЛ с конфигурацией волновода (*a*) Au- $n^+$  (50 нм) -ККЛ (10мкм)- $n^+$ (50 нм)-Au (сплошные кривые) и Ag- $n^+$  (50 нм) -ККЛ (10мкм)- $n^+$ (50 нм)-Ag (точками) и (*б*) Au- $n^+$  (800 нм) -ККЛ (10мкм)- $n^+$ (50 нм)-Au

$\alpha$  в областях низких и высоких частот. При этом спектр результирующих потерь имеет широкий минимум в области от 3 до 6 ТГц для волновода с тонкими приконтактными слоями  $n^+$  (50 нм)-ККЛ (10мкм)- $n^+$ (50 нм), который сужается до диапазона 2.3–3.3 ТГц при увеличении толщины приконтактного слоя до 800 нм. Увеличение температуры от 50 до 300 K приводит к росту минимума потерь с 4.8 до 27.0  $\text{см}^{-1}$  для Au и с 2.7 до 23.4  $\text{см}^{-1}$  для Ag. При этом вклад поглощения, обусловленного ДМВ, меняется с 73 % до 48 % для Au и с 52 % до 39 % для Ag. Таким образом, использование ДМВ на основе Ag по сравнению с ДМВ на основе Au позволяет уменьшить потери на 2.1, 2.4, 3.0 и 3.6  $\text{см}^{-1}$  для  $T = 50, 100, 200$  и 300 K, соответственно, и увеличить максимальную рабочую температуру лазера.

В главе 5 разработана эффективная методика учета эффектов дефазировки путем локализации волновых функций туннельно-связанных состояний. Предложено ортогональное преобразование для перехода от базиса собственных волновых функций уравнения Шредингера к локализованному базису согласно

$$\varphi_{i\text{loc}}(z) = \sum_j a_{ij} \varphi_j(z), \quad (2)$$

в котором средние координаты  $\int z \varphi_{i\text{loc}}^2(z) dz$  состояний максимально разнесе-

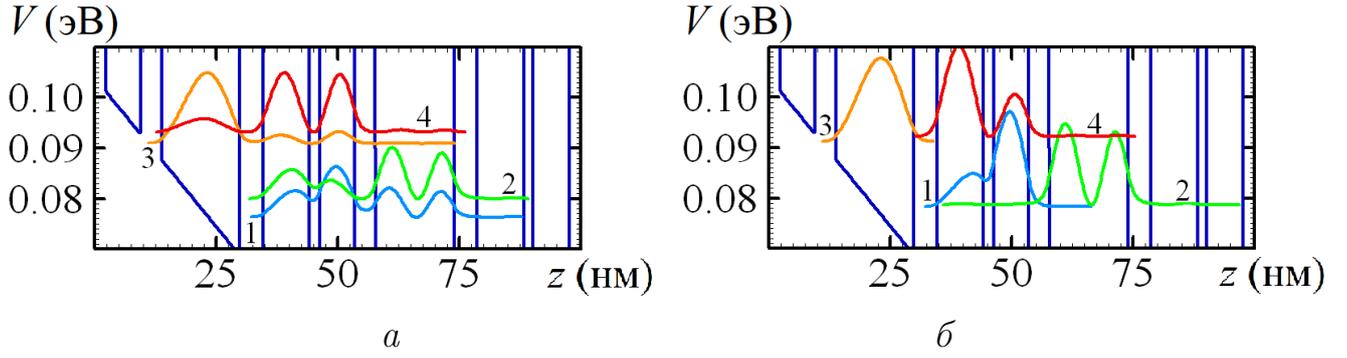


Рисунок 9. – Профиль энергии и волновые функции для нелокализованных (а) и локализованных (б) состояний

ны друг от друга. Коэффициенты преобразования  $a_{ij}$  находятся как собственные вектора следующей матрицы:

$$\begin{bmatrix} z_{11}^* & z_{12}^* & \cdots \\ z_{21}^* & z_{22}^* & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}, \quad z_{fi}^* = z_{fi} L \left( \frac{|E_i - E_f|}{\gamma_{\text{loc}}} \right), \quad (3)$$

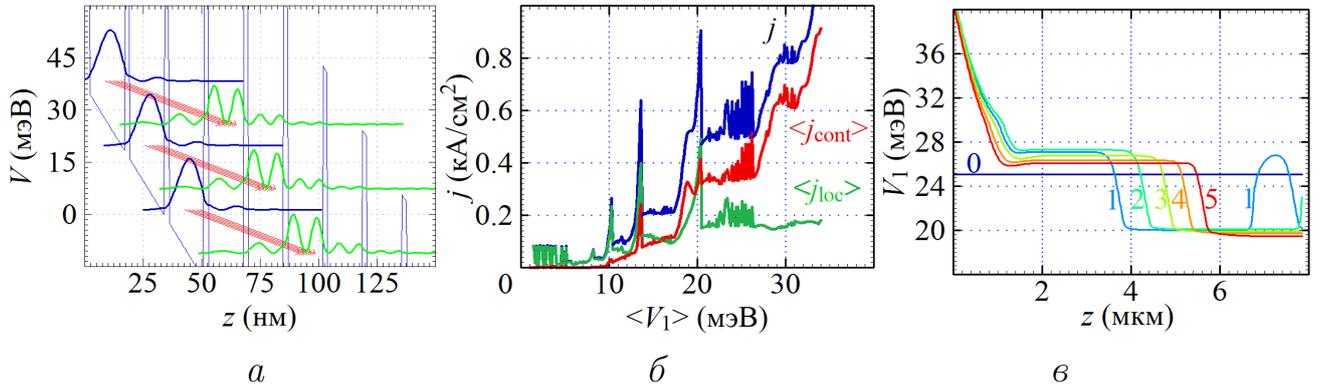
где  $z_{fi}^*$  – матричные элементы дипольных переходов,  $L(x)$  – функция локализации с параметром локализации  $\gamma_{\text{loc}}$ .

Пример локализирующего преобразования волновых функций представлен на рисунке 9. Электронная плотность исходных состояний 1 и 2 распределена в трех соседних квантовых ямах. После процедуры локализации электронная плотность базисного состояния 1 сконцентрировалась преимущественно в КЯ один и два, а базисного состояния – во 2-ой и 3-ей КЯ. Аналогичная ситуация с волновыми функциями базисных состояний 3.

Алгоритм расчета параметров ККЛ начинался с определения интегральных характеристик одного каскада в зависимости от приложенного напряжения  $V_1$ . Для этого решалось уравнение Шредингера и определялись уровни энергий и волновые функции. Далее проводилась процедура локализации волновых функций. После этого рассчитывались матричные элементы дипольных переходов, вероятности рассеяния на оптических фонах и электрон-электронного рассеяния. Вероятность туннельных переходов рассчитывалась в приближении случайных фаз с лоренцевскими контурами линий. Населенности уровней  $n_i$  находились из системы балансных уравнений для одного каскада структуры:

$$\frac{dn_i}{dt} = - \sum_{j \neq i} \frac{n_i}{\tau_{ij}} + \sum_{j \neq i} \frac{n_j}{\tau_{ji}} - v_g g_{ij} (n_i - n_j) S - \frac{n_i}{\tau_{\text{esc } i}} = \frac{n_i}{\tau_{\text{esc}}} . \quad (4)$$

Здесь  $\tau_{ij}$  – времена безызлучательных переходов с уровня  $i$  на уровень  $j$ ,  $g_{ij}$  – коэффициенты дифференциального усиления,  $\tau_{\text{esc } i}$  – время утечки электронов с локализованного уровня в состояния континуума,  $S$  – двумерная плотность фотонов в каскаде,  $v_g$  – групповая скорость света. Времена утечки оценивались



(а)– диагональными стрелками показаны излучательные переходы между уровнями, (в)–цифрами обозначены моменты времени в нс

Рисунок 10. – (а) Диаграмма зоны проводимости, уровни энергии и квадраты модулей волновых функций электронов для квантово-каскадного лазера на основе сверхрешетки Ванье-Штарка при напряжении на каскаде  $V_1 = 18.5$  мВ, а также зависимости (б) суммарной плотности тока  $j$ , средней по структуре плотности тока нелокализованных  $j_{\text{cont}}$  и локализованных  $j_{\text{loc}}$  носителей от среднего напряжения на одном каскаде  $V_1$ , (в) напряжения на одном каскаде  $V_1$  от координаты  $z$  вдоль нормали к плоскости слоев

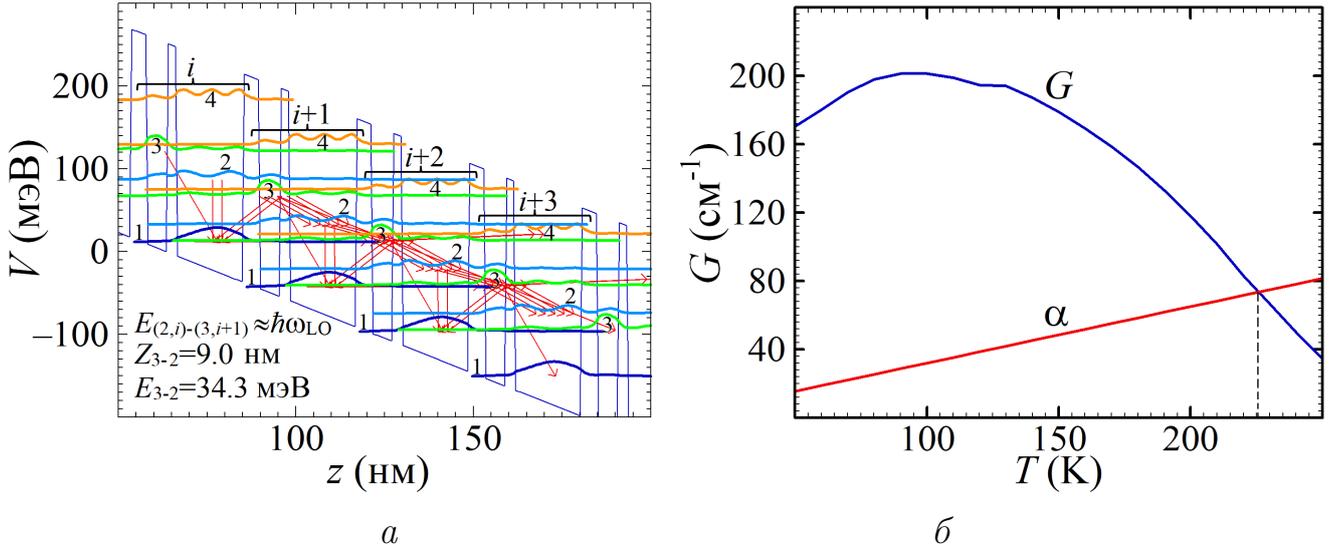
по амплитудам волновых функций в области континуума, аналогично временам жизни оптических мод в резонаторе. Эффективное время утечки электронов  $\tau_{\text{esc}}$  соответствует наименьшему собственному значению линейной системы (4).

Базовые уравнения распределенной модели включали уравнение Пуассона, а также уравнения непрерывности для тока локализованных состояний и состояний континуума и уравнение для плотности фотонов:

$$\begin{aligned} \frac{dn_{\text{loc}}}{dt} &= -\frac{1}{e} \nabla j_{\text{loc}}(V_1, n_{\text{loc}}) - \frac{n_{\text{loc}}}{\tau_{\text{esc}}} + \frac{n_{\text{cont}}}{\tau_{\text{cap}}}, \\ \frac{dn_{\text{cont}}}{dt} &= -\frac{1}{e} \nabla j_{\text{cont}}(V_1, n_{\text{cont}}) + \frac{n_{\text{loc}}}{\tau_{\text{esc}}} - \frac{n_{\text{cont}}}{\tau_{\text{cap}}}, \quad \frac{dS}{dt} = v_g (G(V_1, n_{\text{loc}}) - \alpha) S, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $n_{\text{loc}}$  – концентрация локализованных носителей заряда,  $n_{\text{cont}}$  – концентрация носителей заряда в континууме,  $\tau_{\text{cap}}$  – эффективное время захвата носителей заряда в КЯ,  $G(V_1, n_{\text{loc}})$  – коэффициент усиления на частоте генерации,  $\alpha$  – коэффициент потерь. Токи локализованных электронов и электронов континуума учитывают дрейф в электрическом поле и диффузию.

На основе предложенной теории рассмотрены неустойчивости режима генерации при попадании на отрицательную ветвь ВАХ. Рассмотрена структура лазера на основе сверхрешетки Ванье-Штарка на рисунке 10 а, в которой основное состояние выступает в качестве верхнего лазерного уровня, лазерный переход является диагональным и происходит на возбужденные уровни других каскадов (через два и более периодов сверхрешетки), положение которых управляется приложенным напряжением. На рисунке 10 а представлено распределение уровней энергии и волновых функций одного каскада при температуре 77 К для сверхрешетки GaAs (15 нм) – Al<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As (1.9 нм) с легиро-

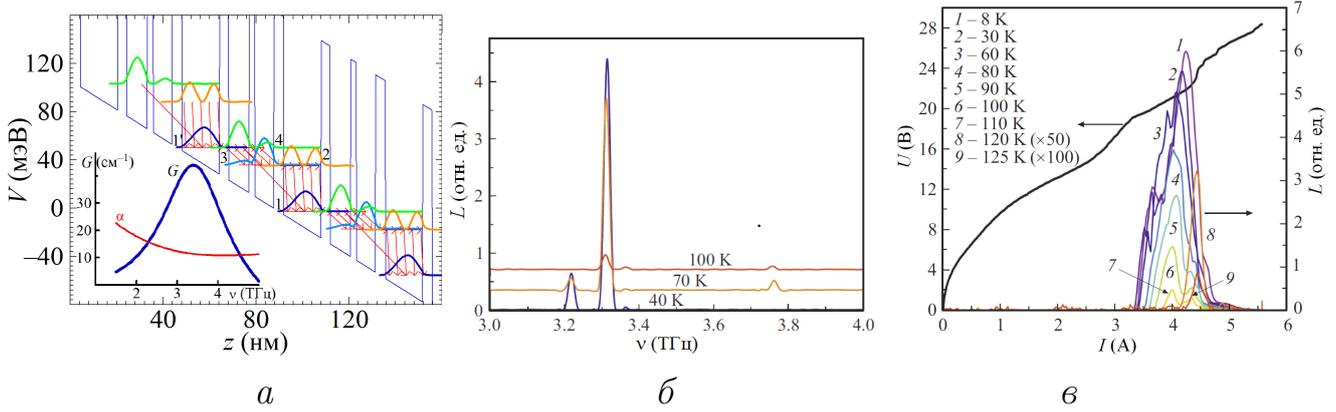


(а) Стрелками показана интенсивность протекания тока по уровням.

Рисунок 11. – (а) Диаграммы зоны проводимости и квадраты модулей волновых функций электронов, рассчитанные к·р-методом для ККЛ на основе  $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}/\text{Hg}_{0.6}\text{Cd}_{0.4}\text{Te}$  при напряжении на каскаде  $V_1 = 54$  мВ и  $T = 200$  К, (б) температурные зависимости коэффициентов усиления  $G$  и потерь  $\alpha$  на частоте 8.3 ТГц

ванием  $1.1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и числом периодов 465. Оцененные потери для двойного металлического волновода равнялись 6–8  $\text{см}^{-1}$  в зависимости от частоты, что показывает возможность генерации при диагональных переходах через 2 и 3 периода сверхрешетки. Как видно из рисунка 10 б, величина шунтирующего тока, создаваемого электронами континуума, быстро увеличивается с ростом напряжения и может значительно превышать ток через локализованные состояния. При этом, на участках с положительным дифференциальным сопротивлением имеется плавная пространственная неоднородность электрического поля, которая приводит к снижению максимального усиления структуры по сравнению с расчетами одного каскада. Как показывают расчеты на рисунке 10 в, на участках с отрицательным дифференциальным сопротивлением возникают домены электрического поля с резкими границами. Напряжения в доменах соответствует соседним участкам ВАХ с положительным дифференциальным сопротивлением.

Предложена структура ККЛ на основе  $\text{HgCdTe}$  с каскадом из двух КЯ, излучающих на частоте 8.3 ТГц в области фоновой запрещенной зоны  $\text{GaAs}$ . На рисунке 11 а приведены расчеты уровней энергии и волновых функций, а также спектры усиления для одной из оптимальных структур, толщины слоев которой барьер( $\text{Hg}_{0.6}\text{Cd}_{0.4}\text{Te}$ )/КЯ( $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ ) слева направо имеют следующие значения: 4.5/5.8/2.6/18.8 нм. Центральная часть широкой КЯ легирована примесями со слоевой концентрацией  $3.2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Предложенный новый дизайн с 2 КЯ характеризуется гибридной схемой накачки, основанной на резонансных туннельных переходах через период с уровня инжектора 1 периода  $i$  на



(а) Стрелками показана интенсивность протекания тока по уровням.

$V_1 = 53$  мВ,  $T = 77$  К. На вставке представлен спектры усиления  $G$  и коэффициента потерь  $\alpha$

Рисунок 12. – (а) Диаграмма зоны проводимости и квадраты модулей волновых функций электронов для двух последовательных активных каскадов структуры, (б) спектры излучения при токе  $I = 1.78$  А и трех температурах  $T = 40, 70$  и  $100$  К и (в) ВАХ и зависимости интенсивности интегрального излучения от тока для предложенного ККЛ в диапазоне температур от  $8$  К до  $125$  К

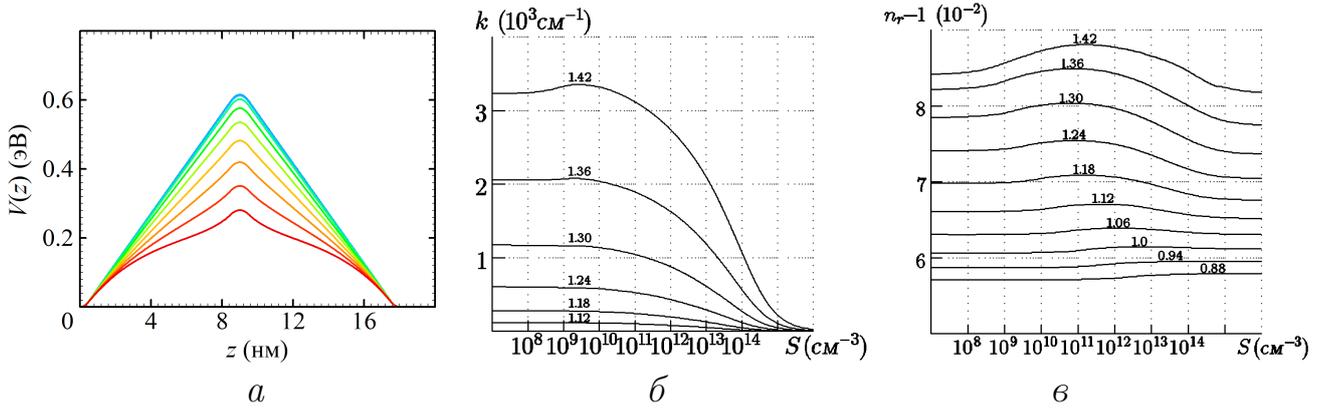
верхний лазерный уровень 3 периода  $i + 2$ . Накачка верхнего лазерного уровня 3 периода  $i + 1$  осуществляется с уровня 2 предыдущего периода  $i$  путем резонансного испускания оптического фона. В предложенном дизайне волновые функции, соответствующие рабочим уровням 3 и 2, оказываются протяженными и слабо локализованными с большим матричным элементом дипольных переходов  $z_{32} = 9$  нм. Населенность верхнего лазерного уровня 3 слабо связана с населенностью инжекторного уровня 1 и синхронизирована через электрон-фононное взаимодействие с ростом населенности нижнего лазерного уровня 2 предыдущего каскада. Расчеты коэффициента суммарных потерь проведены для волновода толщиной 12 мкм. Как видно из рисунка 11 б при нагревании потери на частоте 8.3 ТГц растут практически линейно. При температуре 225 К потери составляют  $74 \text{ см}^{-1}$  и сравниваются с коэффициентом усиления, что определяет максимальную рабочую температуру ККЛ.

Для высокотемпературной генерации ТГц ККЛ разработан и реализован оригинальный дизайн с активным модулем на основе трех туннельно-связанных КЯ GaAs/Al<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>As с резонансно-фононной схемой депопуляции нижнего лазерного уровня и частотой генерации около 3.3 ТГц. Толщины слоев активного модуля разработанного дизайна, начиная с барьера инжектора, составляют: 4.23/16.09/3.95/8.75/2.54/8.18 в нм, где КЯ GaAs выделены жирным шрифтом. Легирование активного модуля донорной примесью Si составляло  $3.0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . На рисунке 12 а приведен расчет рабочих уровней энергий и волновых функций для разработанного дизайна. Инжекция электронов на верхний лазерный уровень 4 осуществляется за счет резонансного туннелирования с основного уровня 1' широкой КЯ предыдущего активного

модуля. Далее электроны излучательно переходят на нижний лазерный уровень 3, который эффективно опустошается за счет туннелирования на уровень 2 и безызлучательного перехода на уровень 1 путем испускания оптического фонона. Диагональный лазерный переход  $E_{43}$  с матричным элементом дипольных переходов  $Z_{43} = 3.8$  нм реализуется на частоте генерации 3.3–3.4 ТГц и соответствует максимуму спектра усиления, как показано на вставке рисунка 12 *a*.

Гетероструктура оптимизированного дизайна GaAs/Al<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>As для ТГц ККЛ была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Riber Compact 21T в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (Москва). На уникальной исследовательской технологической линии института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН (Москва) произведены постростовые технологические процессы при формировании ККЛ. Исследование электрических и оптических характеристик ККЛ диапазона произведено на комплексе научного оборудования в институте физики микроструктур РАН (Нижний Новгород). На рисунке 12 *б* для ККЛ измерены спектры генерации при токе  $I = 1.78$  А (вблизи максимума сигнала) при трех температурах  $T = 40, 70$  и  $100$  К. При 40 К на спектре наблюдаются две мощные спектральные линии вблизи 3.2 ТГц и 3.3 ТГц, что хорошо согласуется с рассчитанным спектром усиления на вставке рисунка 12 *a*. На рисунке 12 *в* для ККЛ представлены ВАХ и зависимости интенсивности интегрального излучения от тока  $L(I)$ , измеренные в диапазоне температур от 8 К до 125 К. При низких температурах порог генерации составляет  $I_{th}$  около 3.35 А, после чего наблюдается резкий рост сигнала  $L$ . Немонотонное поведение зависимости  $L(I)$  в диапазоне токов от 3.6 А до 3.8 А вероятнее всего связано с эффектом перескока мод. Увеличение температуры до 60 К не приводит к значительному падению сигнала  $L$  (уменьшение амплитуды составляет менее 20%). Однако при увеличении температуры более 80 К наблюдается более резкое падение сигнала, что также сопровождается резким увеличением  $I_{th}$ . При этом лазерная генерация наблюдалась вплоть до температуры 125 К.

**В главе 6** исследованы нелинейные оптические процессы в легированных сверхрешетках (*n-i-p-i*-кристаллах). На основе самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона показано, что при возбуждении легированной сверхрешетки заряд донорных и акцепторных примесей экранируется неравновесными носителями, что вызывает, как видно на рисунке 13 *a*, трансформацию профиля потенциальных ям, уменьшение их глубины и связанное с ним увеличение эффективной ширины запрещенной зоны. При рассмотрении эффектов насыщения поглощения с учетом экранирования электростатического потенциала носителями тока и гауссовых хвостов плотности состояний установлено, что коэффициент поглощения  $k$  на фиксированной энергии  $h\nu$  проявляет немонотонное поведение при увеличении плотности фотонов  $S$ , как



$$N_a = N_d = 10^{20} \text{ см}^{-3}, d_p = d_n = 1 \text{ нм}, d_i = 8 \text{ нм}, T = 300 \text{ К}$$

**Рисунок 13.** – (а) Трансформация профиля потенциальной энергии  $V(z)$   $\delta$ -легированной сверхрешетки с ростом разности квазиуровней Ферми  $\Delta F$  в диапазоне 0.5–1.5 эВ с шагом 0.1 эВ, (б) насыщение поглощения и (в) изменение показателя преломления  $n_r$  от плотности фотонов  $S$  при различных энергиях фотонов (числа на кривых в эВ)

видно из рисунка 13 б. Наблюдается эффект ”затемнения”, т.е. увеличения коэффициента поглощения  $k$  при увеличении плотности фотонов  $S$ , который обусловлен трансформацией потенциального рельефа легированной сверхрешетки, перераспределением уровней энергии в квантовых ямах для электронов и дырок, изменением интегралов перекрытия волновых функций электронов и дырок, а также сужением ширины запрещенной зоны полупроводника. Рассчитанный на основе соотношения Крамерса-Кронига показатель преломления также проявляет немонотонный характер в зависимости от плотности фотонов, особенно для энергий порядка ширины запрещенной зоны кристалла, что продемонстрировано на рисунке 13 в. Величина изменения показателя преломления на фиксированной частоте при изменении уровня возбуждения максимальна в  $\delta$ -легированных сверхрешетках из-за большего диапазона перестройки глубины потенциального рельефа и при температуре  $T = 300 \text{ К}$  может достигать 0.02.

Продемонстрирована возможность использования эффекта изменения коэффициента поглощения (усиления) и показателя преломления в легированных полупроводниковых сверхрешетках для оптических переключателей и фотонных кристаллов для перестройки резонансов пропускания. Показано, что при накачке  $n$ - $i$ - $p$ - $i$ -слоев фотонной гетероструктуры  $(AB)_{50} A (AB)_{50}$  в системе GaAs–InGaP дефектная мода сначала смещается в длинноволновую область из-за увеличения показателя преломления активных слоев. При значительных уровнях возбуждения наблюдается обратный, “синий” сдвиг из-за уменьшения показателя преломления. Величина спектрального сдвига в фотонной гетероструктуре с дефектом более чувствительна к уровню возбуждения и в максимуме может достигать 2 нм.

Как показывает детальный анализ, насыщение усиления и сопутствующие ему изменения показателя преломления, главным образом, в окрестности

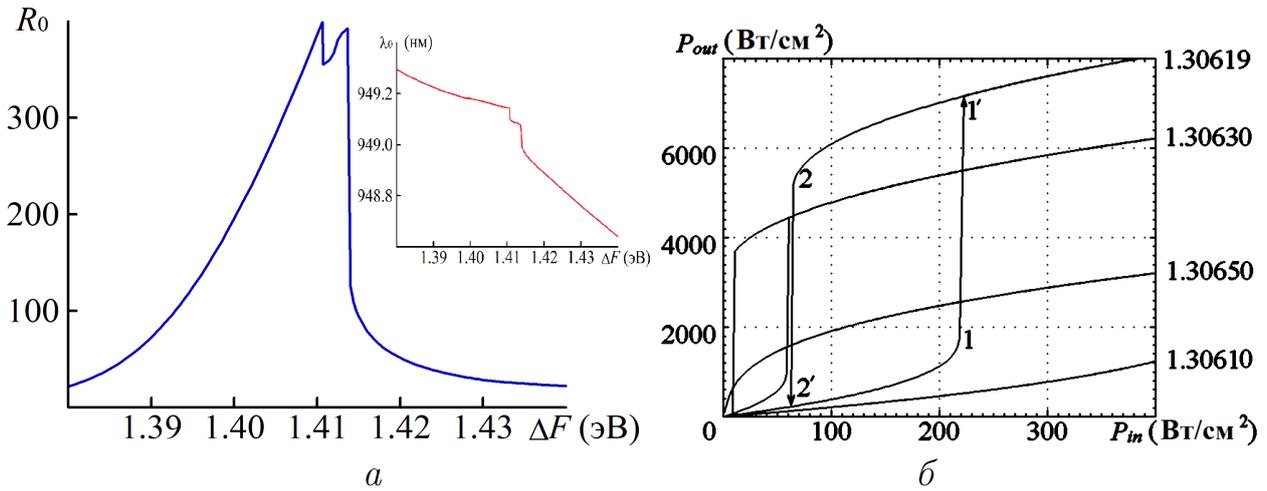
(a)–  $P_{in} = 10$  Вт/см<sup>2</sup>

Рисунок 14. – (а) Изменение коэффициента отражения  $R_0$  фотонной гетероструктуры на длине волны максимума спектра отражения  $\lambda_0$  (на вставке) в зависимости от начальной разности квазиуровней Ферми  $\Delta F = \Delta F_0$ , (б) гистерезисные кривые выходная мощность– входная мощность  $P_{out}(P_{in})$  для различных энергий  $h\nu$  (числа на кривых, эВ) фотонной гетероструктуры  $(AB)_{50}D(AB)_{50}$  с  $n-i-p-i$ -слоями

дефектного слоя влияют на спектры пропускания и отражения фотонной гетероструктуры. Два новых нелинейных оптических эффекта проявляются для усилителей с активными  $n-i-p-i$ -слоями. Первый эффект связан с появлением двух близко расположенных резонансных пиков мощности прошедшего и отраженного излучения на длине волны дефектной моды в зависимости от разности квазиуровней Ферми, как показано на рисунке 14 а. Длина волны  $\lambda_0$  максимума спектров пропускания и отражения фотонной гетероструктуры сдвигается в коротковолновую область с увеличением  $\Delta F = \Delta F_0$ . При этом вблизи  $\Delta F_0 = 1.41$  эВ наблюдается два последующих уменьшения  $\lambda_0$ . Это проявляется, в свою очередь, как возникновение двух пиков на зависимостях  $R_0(\Delta F_0)$ . Максимальная величина коэффициента отражения  $R_0$  достигает порядка 400 при входной мощности  $P_{in} = 10$  Вт/см<sup>2</sup>. Другой эффект – это бистабильное переключение пропускания, отражения, а также выходной мощности в области спектральной полосы дефектной моды, как показано на рисунке 14 б. Спектральный гистерезис на дефектной моде существует в интервале значений  $\Delta F_0$ , приблизительно соответствующим ширине фотонного резонанса. Выходные-входные характеристики имеют S-тип, а ширина петли гистерезиса определяется настройкой длины волны сигнала на длину волны дефектной моды.

На основе фотонных кристаллов на легированных сверхрешетках предложена модель микролазера, работающего одновременно на двух длинах волн. Резонатор такого лазера представляет собой систему двух связанных микрорезонаторов, показанных на рисунке 15 а. Разнонаправленная генерация осуществляется одновременно на двух фундаментальных модах, как видно из ри-

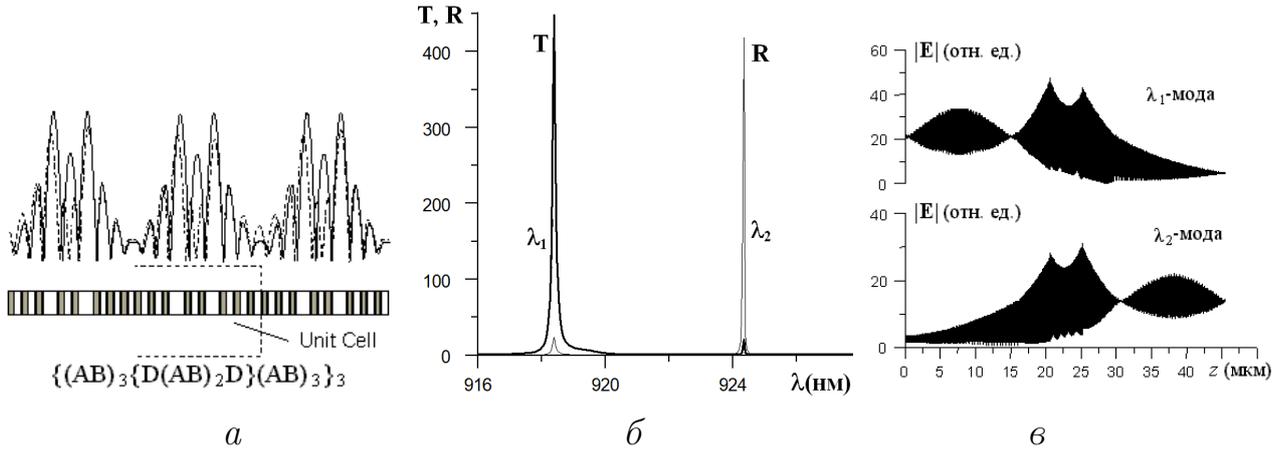


Рисунок 15. – (а) Распределения поля  $|E(z)|$  на собственных модах фотонных гетероструктур система перекрывающихся связанных резонаторов, (б) спектры пропускания  $T(\lambda)$  и отражения  $R(\lambda)$  и (в) распределение поля  $E(z)$  вдоль резонатора на различных рабочих длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$

сунков 15 б, в, назад для  $\lambda_1 \approx 918$  нм и вперед для  $\lambda_2 \approx 924$  нм. Данный эффект возникает благодаря дополнительным селективным брэгговским отражателям, блокирующим вывод излучения на торцах резонатора. Вся структура выглядит, как  $(Gc)_{40} \{(AB)_{35}D(AB)_{35}D(AB)_{35}\} (GC)_{40}$ , где  $G$  – слой GaAs толщиной 0.209 мкм,  $C$  – слой  $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$  толщиной 0.188 мкм и  $c$  – слой  $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$  толщиной 0.193 мкм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

Исследования, проведенные в диссертационной работе, относятся к решению крупной научной проблемы – развитию физических моделей протекающих процессов и установлению характерных конструктивных особенностей, которые определяют спектральные и генерационные характеристики, а также расширяют функциональные возможности межзонных инжекционных лазеров с набором квантовых ям, квантово-каскадных лазеров и фотонных гетероструктур на легированных сверхрешетках.

1. Установлено, что использование асимметричных многослойных квантово-размерных гетероструктур GaInAs/GaInAsP с набором из 4-х неоднородно возбужденных квантовых ям GaInAs с наборами толщин 3, 3, 4, 15 нм и 4, 5, 9, 14 нм позволяет получить широкие спектры усиления в диапазонах 1.36–1.60 мкм и 1.48–1.6 мкм с практически постоянными максимальными значениями коэффициента модового усиления  $30 \pm 3$  и  $30 \pm 1$   $\text{см}^{-1}$ , соответственно [2, 21, 22]. Показано, что для эффективного управления уровнем возбуждения квантовых ям внутри барьерных слоев GaInAsP целесообразно встраивать легированные широкозонные барьерные слои InP. Получено, что для квантово-размерной гетероструктуры на основе GaInAsSb/AlGaAsSb с 4 квантовыми ямами толщиной 7, 8, 10 и 14 нм можно получить широкий

спектр усиления в диапазоне 2.3–2.84 мкм со значениями максимального коэффициента модового усиления  $40 \pm 5 \text{ см}^{-1}$  [2, 19, 22, 65].

2. В InGaAs/GaInAsP/InP гетероструктурах с 2 квантовыми ямами и длиной волны излучения около 1.55 мкм скорость оже-рекомбинации растет практически как активационная функция в интервале температур от 250 до 350 К и следует экспоненциальной зависимости от ширины квантовой ямы. Процессы оже-рекомбинации приводят к сверхлинейной температурной зависимости плотности порогового тока и их влияние на порог генерации существенен для температур выше 350 К при потерях больше  $60 \text{ см}^{-1}$ . Разработанный аналитический подход позволяет оценить характеристическую температуру порога генерации и ее связь с эффективной энергией активации оже-процессов [12, 13].

3. На основе развитой динамической распределенной диффузионно-дрейфовой модели лазерных гетероструктур на междузонных переходах, учитывающей процессы захвата-выброса носителей в квантовые ямы, поглощение излучения свободными носителями и эффекты нагрева активной области, показано, что утечки уменьшаются с ростом глубины квантовых ям и для лазерных гетероструктур с 6 квантовыми ямами с одинаковым фактором оптического ограничения в пороге генерации составляют 35–45 % для системы InGaAs/GaAs (0.98 мкм), менее 5 % для InGaAsP/InP (1.31 мкм) и менее 1 % для системы GaInAs/InP (1.55 мкм). На основе квантово-размерных лазеров с волноводом из шести квантовых ям InGaAs/GaAs (1.05 мкм) предложены структуры с дополнительными легированными слоями GaAsP, которые позволяют сформировать эффективные потенциальные барьеры для неосновных носителей заряда, снизить токи утечки до единиц процентов, расширить область линейности ватт-амперных характеристик и при импульсах тока 80 А длительностью 5 мкс увеличить среднюю мощность генерации до 29 Вт, что в 2.5 раза больше по сравнению с лазерами без блокирующих слоев [29, 31, 37].

4. Установлено, что для гетеролазера на основе InGaAs/GaAs/InGaP (0.96 мкм) с вытекающими модами в широком диапазоне токов инжекции оптимальное количество квантовых ям для длины резонатора 1 мм составляет  $5 \pm 1$  при коэффициенте потерь  $\sim 20 \text{ см}^{-1}$ . Предложен новый дизайн InGaAs/GaAs/InGaP гетеролазера с активной областью из 6 квантовых ям, в котором нежелательная населенность волновода блокируется широкозонными легированными барьерными слоями InGaP, при этом удается снизить коэффициент внутризонного поглощения практически вдвое, повысить мощность излучения на  $\sim 30\%$  при токе накачки 125 А и расширить область линейности ватт-амперных характеристик [28, 30, 77, 79, 84, 97].

5. Разработана двухпериодная модель расчета спектральных характеристик многопериодных квантово-каскадных структур на основе самосогласованного решения уравнений Пуассона и Шредингера в расширенной модели Бастарда, а также системы замкнутых балансных уравнений, позволяющая

рассчитывать населенности уровней энергии, квазиуровни Ферми и плотности токов инжекции с учетом различных механизмов рассеяния носителей заряда. Предложены выражения для спектра коэффициента усиления и связанного с ним модифицированным универсальным соотношением Б.И. Степанова спектра спонтанного испускания, учитывающие несимметричный форм-фактор уширения линии излучения, которые позволяют описать особенности экспериментальных спектров испускания, имеющих экспоненциальное затухание в длинноволновой области [3, 18, 20, 25, 27, 96]. На основе разработанной модели предложен ряд дизайнов на основе GaAs/AlGaAs для получения генерации на частотах: 2.95, 4.4, 4 и 1.1–2 ТГц [24, 39], а также квантово-каскадные структуры на основе неполярных полупроводников Ge/GeSiSn с частотой излучения  $\sim 5.7$  ТГц [3, 26]. Изготовленные экспериментально GaAs/AlGaAs лазеры продемонстрировали хорошее соответствие частот генерации 2.99 ТГц и 4.32 ТГц с теоретическими расчетами [24, 39].

6. Для GaAs-AlGaAs квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона с двойным металлическим волноводом установлено, что в области низких частот  $< 3$  ТГц рост суммарных потерь обусловлен поглощением света свободными носителями, а в области  $> 6$  ТГц – резонансным поглощением на ТО-фононах. При этом, в промежуточной области 3–6 ТГц наблюдается минимум потерь, который для волновода толщиной 10 мкм на основе золота составляет  $8 \text{ см}^{-1}$  на частоте 4 ТГц при  $T = 100 \text{ К}$ , а с ростом температуры до  $T = 300 \text{ К}$  сдвигается в высокочастотную область к 5 ТГц при величине потерь  $\sim 27 \text{ см}^{-1}$ . На основе измеренных температурных зависимостей удельного сопротивления золота и серебра рассчитаны энергии затухания и коэффициент потерь. Показано, что использование серебра для обкладок по сравнению с золотом позволяет уменьшить потери в волноводе на  $2.2\text{--}3.6 \text{ см}^{-1}$ , что позволяет увеличить максимальные рабочие температуры на  $\sim 30^\circ \text{ С}$  [32, 33, 40, 85].

7. На основе предложенного метода учета дефазировки квантовых состояний разработана модель расчета спектров усиления, вольт- и ватт-амперных характеристик одного каскада с использованием системы балансных уравнений [34, 35]. Для ряда дизайнов квантово-каскадных лазеров (в том числе опубликованных другими авторами) найдено хорошее соответствие рассчитанных и экспериментальных вольт-амперных характеристик, токового диапазона генерации и максимальной рабочей температуры. В частности, предложен дизайн и изготовлена структура на основе GaAs/AlGaAs с 4 квантовыми ямами с частотой генерации 2.3 ТГц, у которой максимальная рабочая температура составила  $\sim 106 \text{ К}$  при теоретической оценке  $\sim 100 \text{ К}$ . Расчеты показали возможность увеличения максимальной рабочей температуры до 125 К при уменьшении толщины верхнего контактного слоя  $n^+$ -GaAs с 800 до 100 нм [34].

Для высокотемпературной ТГц генерации разработан и реализован оригинальный дизайн квантово-каскадного лазера с активным модулем на осно-

ве трех туннельно-связанных квантовых ям GaAs/Al<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>As с резонансно-фононной схемой депопуляции нижнего лазерного уровня и экспериментально продемонстрирована генерация излучения с частотой около 3.3 ТГц и максимальной рабочей температурой ~125 К [35, 36, 38].

8. Предложена новая концепция использования слабо локализованных состояний с волновыми функциями, простирающимися на два и более периода структуры, для улучшения температурных характеристик квантово-каскадных лазеров. Показано, что в таких структурах многократно растет величина матричного элемента дипольных переходов, а нижний лазерный уровень имеет больший энергетический зазор с инжектором и менее заселен по сравнению с традиционными дизайнами. Для квантово-каскадных лазеров на основе HgCdTe с каскадом из двух квантовых ям и дизайном рабочих уровней на слабо локализованных волновых функциях показана возможность получения генерации в области фононного поглощения GaAs на частоте ~8.3 ТГц с максимальной рабочей температурой ~225 К, что позволяет использовать элемент Пельтье для охлаждения [36, 93, 94].

9. На основе разработанной распределенной диффузионно-дрейфовой модели квантово-каскадного лазера с учетом переноса по локализованным состояниям и состояниям континуума показано, что величина шунтирующего тока, создаваемого электронами континуума, быстро увеличивается с ростом напряжения и может значительно превышать ток через локализованные состояния. На участках с положительным дифференциальным сопротивлением имеется плавная пространственная неоднородность электрического поля, которая приводит к снижению максимального усиления структуры по сравнению с расчетами одного каскада. На участках с отрицательным дифференциальным сопротивлением возникают домены электрического поля с резкими границами. Напряжения в доменах соответствует соседним участкам вольт-амперной характеристики с положительным дифференциальным сопротивлением. Границы между доменами могут двигаться в течении импульса накачки, приводя к пульсациям тока через структуру [34, 35, 92, 95].

10. Показано, что при накачке активных *n-i-p-i*-слоев одномерного фотонного кристалла с дефектным слоем величина "красного" спектрального сдвига дефектной моды может составлять ~2 нм, что объясняется перестройкой эффективной ширины запрещенной зоны, трансформацией уровней энергии и эффектом насыщения усиления, сопровождаемым немонотонным изменением показателя преломления активных слоев [1, 4, 5, 8–11, 14, 23]. При этом, на длине волны дефектной моды в зависимости от разности квазиуровней Ферми установлены два близкорасположенных резонансных пика мощности прошедшего и отраженного излучения. Установлено бистабильное переключение пропускания, отражения и выходной мощности в области спектральной полосы дефектной моды одномерного фотонного кристалла на основе легированной

сверхрешетки. Показано, что для резонансной энергии фотона  $h\nu \approx 1.31$  эВ наибольшее значение верхнего порога переключения составляют  $220 \text{ Вт/см}^2$  и реализуется максимальная ширина петли гистерезиса. Бистабильное поведение не проявляется, если длина волны входного сигнала более чем на  $0.2 \text{ нм}$  отличается от длины волны дефектной моды. Увеличение количества дефектных слоев до 2 в структуре  $(\text{AB})_{50}\text{D}_2(\text{AB})_{50}$  приводит к увеличению порогового значения мощности переключения на  $52\%$  и более, чем в 2 раза увеличивает ширину петли гистерезиса [8, 14–17].

11. Предложена модель микролазера на основе двух связанных микрорезонаторов с активными слоями на основе легированной сверхрешетки, работающего одновременно на двух длинах волн  $918$  и  $922 \text{ нм}$  с выводом излучения в противоположных направлениях независимо для каждой из рабочих длин волн [6, 7, 14].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

В результате выполнения диссертационной работы развиты физические основы управления спектральными и генерационными характеристиками квантово-размерных инжекционных лазеров на междузонных переходах и квантово-каскадных лазерных структур на сверхрешетках, разработана концепция использования легированных сверхрешеток для расширения функциональности полупроводниковых фотонных кристаллов.

Разработанные теоретические модели физических процессов в полупроводниковых лазерах для анализа оптических, волноводных, электрофизических, тепловых и мощностных характеристик, и соответствующее программное обеспечение позволяет выполнить полный цикл проектирования и оптимизации полупроводниковых лазерных структур с вытекающей модой и с волноводом на основе квантовых ям. Результаты работы могут быть использованы при разработке новых мощных полупроводниковых лазерных излучателей с улучшенными характеристиками для систем квантовой электроники в Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (С.-Петербург), ИФМ РАН (Н. Новгород), АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха». Лазерные структуры повышенной мощности с малой расходимостью излучения могут быть использованы для накачки твердотельных лазеров при создании и разработке новых лазерных компонентов в институте физики им. Б.И. Степанова НАНБ.

На основе разработанной распределенной модели квантово-каскадного лазера, предложен оригинальный дизайн структуры в системе  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$  и созданы экспериментальные образцы ККЛ, которые продемонстрировали устойчивую генерацию около  $3.3 \text{ ТГц}$ . Таким образом, в результате научно-технического сотрудничества с институтом сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Национальным исследовательским ядерным университетом «МИФИ», Институтом физики микроструктур

РАН и АО НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха впервые успешно осуществлено проектирование и практическая реализация полного технологического цикла производства ТГц ККЛ в СНГ. Результаты исследований по квантово-каскадным лазерам могут использоваться для дальнейшей оптимизации толщин квантовых ям и барьерных слоев соединений  $A^3B^5$ , подбору количества активных слоев и уровня легирования, а также совершенствованию и поиску новых материалов и механизмов получения инверсной населенности для проектирования на основе квантовой инженерии квантово-каскадных структур среднего и дальнего инфракрасного диапазона с низкими пороговыми токами, большим коэффициентом усиления с возможной перестройкой длины волны для новых элементов квантовой электроники, в том числе для целей лазерной спектроскопии, медицины, систем связи и мониторинга окружающей среды.

Фотонные кристаллы на легированных сверхрешетках с нелинейностью показателя преломления перспективны для реализации оптических элементов с бистабильным переключением характеристик, а также для стабилизации рабочей частоты усиливающих и генерирующих систем.

Предложена модель микролазера на основе двух связанных микрорезонаторов с активными слоями на основе легированной сверхрешетки, работающего одновременно на двух длинах волн 918 и 922 нм с выводом излучения в противоположных направлениях независимо для каждой из рабочих длин волн. Интегрированные сборки микролазеров с составным микрорезонатором с электрической либо оптической накачкой перспективны для телекоммуникационных технологий и генерации излучения с одновременным преобразованием частоты при выполнении фазового синхронизма, обеспечиваемого периодичностью структуры.

Результаты диссертационной работы частично вошли в изданные учебные монографии [1–3], которые использованы автором при чтении специальных курсов студентам, обучающимся на факультете радиофизики и компьютерных технологий БГУ.

## Список публикаций соискателя ученой степени

### Монографии

1. Фотоника: анализ и приложения / И.С. Манак, А.В. Андриевский, В.С. Белявский, Т.А. Железнякова, П.А. Зезюля, Д.В. Кучура, А.М. Лисенкова, В.Л. Малевич, В.В. Тихонович, Д.В. Ушаков, О.В. Царюк // Монография под ред. канд. физ.-мат. наук, доцента И.С. Манака. – Мн.: Акад. управл. при Президенте Республики Беларусь, 2007. – 188 с.

2. Квантовая электроника: перспективные направления / И.С. Манак, В.К. Кононенко, Д.В. Ушаков, П.А. Зезюля, М.С. Леоненя, Е.С. Панфиленок, В.Л. Малевич, А. Медвидс, П. Онуфриевс, В.В. Паращук, С.С. Поликарпов,

В.М. Стецик // Монография под ред. канд. физ.-мат. наук, доцента И.С. Манака. - Минск: Акад. упр. при Президенте Республики Беларусь, 2012. - 184 с.

3. Перспективные технологии в нано- и оптоэлектронике: пособие/ А.А. Афоненко, П.И. Гайдук, Ф.Ф. Комаров, А.Г. Новиков, С.Л. Прокопьев, Д.В. Ушаков // Минск: БГУ, 2018. - 209 с.

**Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь**

4. Ушаков, Д. В. Нелинейные оптические процессы в легированных полупроводниковых сверхрешетках/ Д.В. Ушаков, В.К. Кононенко, И.С. Манака // Журн. прикл. спект. - 2001. - Т. 68, № 4. - С. 501-505.

5. Ushakov, D.V. Saturation of absorption in *n-i-p-i* crystals / D.V. Ushakov, V.K. Kononenko, I.S. Manak // Proc. SPIE. - 2001. - Vol. 4358. - P. 171-174.

6. Smirnov, A.G. Photonic bandgap structures with *n-i-p-i* layers / A.G. Smirnov, D.V. Ushakov, V.K. Kononenko // Proc. SPIE. - 2002. - Vol. 4706. - P. 74-81.

7. Smirnov, A.G. Multiple-wavelength lasing in one-dimensional bandgap structures: implementation with active *n-i-p-i* layers / A.G. Smirnov, D.V. Ushakov, V.K. Kononenko // J. Opt. Soc. Am. B. - 2002. - Vol. 19, No. 9. - P. 2208-2214.

8. Optical gain in one-dimensional photonic band gap structures with *n-i-p-i* crystal layers / I.S. Nefedov, V.N. Gusyatinikov, M. Marciniak, V.K. Kononenko, D.V. Ushakov // J. Telecommun. Information Technol. - 2002. - No.1. - P. 60-64.

9. Перестраиваемые спектры фотолюминесценции легированных полупроводниковых сверхрешеток/ В.К. Кононенко, Г.В. Кунерт, И.С. Манака, Д.В. Ушаков // Журн. прикл. спект. - 2003. - Т. 70, № 1. - С. 103-108.

10. Kononenko, V.K. Current carrier lifetime in doping superlattice crystals/ V.K. Kononenko, D.V. Ushakov, H.W. Kunert // Proc. SPIE. - 2003. - Vol. 5136. - P. 205-210.

11. Кононенко, В.К. Влияние насыщения усиления на выходные мощностные характеристики гетероструктур типа фотонных кристаллов / В.К. Кононенко, А.Г. Смирнов, Д.В. Ушаков // Изв. РАН. Сер. физическая. - 2004. - Т.68, № 1. - С. 128-131.

12. Auger recombination processes and threshold conditions in asymmetric multiple-quantum-well heterostructure lasers/ I.A. Sukhoivanov, O.V. Mashoshina, V.K. Kononenko, D.V. Ushakov // WSEAS transactions on mathematics. - 2004. - Vol. 3, No. 2. - P. 322-328.

13. How to restrain Auger recombination predominance in the threshold of asymmetric bi-quantum-well lasers/ I.A. Sukhoivanov, O.V. Mashoshina, V.K. Kononenko, D.V. Ushakov // *Microelectron. J.* – 2005. – Vol. 36, No. 3–6. – P. 264–268.
14. Фотонные гетероструктуры на полупроводниковых легированных сверхрешетках / В.К. Кононенко, А.Г. Смирнов, Д.В. Ушаков, И.С. Нефедов, В.Н. Гусятников // *Вестн. ФФИ.* – 2005. – Т. 34, № 4. – С. 54–75.
15. Kononenko, V.K. Nonlinear gain and bistability in photonic crystal heterostructures with compositional and doping superlattices / V.K. Kononenko, M. Marciniak, D.V. Ushakov // *Proc. SPIE.* – 2005. – Vol. 5950. – P. 56–65.
16. Ushakov, D.V. Nonlinearities in the reflection and transmission spectra of the photonic bandgap heterostructures with n-i-p-i crystals/ D.V. Ushakov, V.K. Kononenko, M. Marciniak. // *Optical and Quantum Electronics.* – 2007. – Vol. 39, No. 4–6. – P. 431–439.
17. Ціхановіч, В.У. Аптычная бістабільнасць у аднамерных фотонных крышталях на аснове GaAs/AlAs слаёў/ В.У. Ціхановіч, І.С. Манак, Дз.У. Ушакоў // *Вестник БГУ. Серия 1: Физ. Мат. Информ.* – 2007. – № 2. – С. 17–22.
18. Ушаков, Д.В. Двухпериодная модель расчета населенностей уровней подзон многопериодных квантово-каскадных сверхрешеточных структур/ Д.В. Ушаков, И.С. Манак // *Журн. прикл. спект.* – 2007. – Т. 74, № 6. – С. 801–804.
19. Manak, I.S. Wide and flat waveguide gain spectrum in the  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  asymmetric multiple-quantum-well heterostructures / I.S. Manak, D.V. Ushakov, U.S. Bialiausky // *Physics and chemistry of solid state.* – 2007. – Vol.8, No. 4. – P. 814–817.
20. Ушаков, Д.В. Энергетические и излучательные характеристики квантово-каскадных структур на сверхрешетках / Д.В. Ушаков, И.С. Манак // *Оптика и спектроскопия.* – 2008. – Т. 104, № 5. – С. 846–851.
21. Ушаков, Д.В. Получение широкого спектра волноводного усиления в асимметричных многослойных квантоворазмерных гетероструктурах на основе  $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}/\text{Ga}_{0,18}\text{In}_{0,82}\text{As}_{0,4}\text{P}_{0,6}$  / Д.В. Ушаков, В.К. Кононенко // *Квантовая электроника.* – 2008. – Т. 38, № 11. – С. 1001–1004.
22. Манак, И.С. Лазерные диоды с широким плоским спектром волноводного усиления в диапазоне 1–3 мкм / И.С. Манак, Д.В. Ушаков, В.С. Белявский // *Известия РАН. Серия физическая.* – 2008. – Т. 72, № 2. – С. 262–264.
23. Photoluminescence of the GaAs superlattices with quasi-delta doped layers / B.N. Zvonkov, V.Ya. Aleshkin, V.I. Gavrilenko, V.K. Kononenko, H.W. Kunert, S.V. Morozov and D.V. Ushakov // *The Open Optics Journal.* – 2009. – Vol. 3. – P. 70–73.

24. Спектры излучения квантовых каскадных лазеров терагерцового диапазона/ А.В. Антонов, В.И. Гавриленко, А.В. Иконников, К.В. Маремьянин, А.А. Ластовкин, С.В. Морозов, Д.В. Ушаков, Ю.Г. Садофьев, Н. Самал //Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2009. – Т. 52, № 7. – С. 550–556.

25. Ушаков, Д.В. Расчет спектров усиления и люминесценции квантово-каскадных лазерных структур с учетом несимметричных контуров уширения линии излучения/ Д.В. Ушаков, В.К. Кононенко, И.С. Манак //Квантовая электроника. – 2010. – Т.40, № 3. – С.195–198.

26. Ушаков, Д.В. Расчет энергетических характеристик  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{-Si}$  структур с одиночными квантовыми ямами / Д.В. Ушаков, В.К. Кононенко //Журн. прикл. спект. – 2011. – Т. 78, № 1. – С. 66–75.

27. Ушаков, Д.В. Исследование способов уменьшения частоты генерации терагерцового квантово-каскадного лазера с каскадом, состоящим из двух квантовых ям/ Д.В. Ушаков, Ю.Г. Садофьев, Н. Samal // ФТП. – 2012. – Т. 46, вып. 11. – С. 1430–1434.

28. Ушаков, Д.В. Эффективность генерации квантоворазмерных лазеров  $\text{InGaAs/GaAs}$  при неоднородном возбуждении квантовых ям/ Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, В.Я. Алешкин //Квантовая электроника. – 2013. – Т.43, № 11. – С.999–1002.

29. Афоненко, А.А. Эффективность токовой инжекции в полупроводниковых лазерах с волноводом из квантовых ям / А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков //ФТП. – 2014. – Т. 48, вып. 1. – С. 88–93.

30. Влияние “объема” активной среды на излучательные свойства лазерных гетероструктур с выходом излучения через подложку / С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков, Н.В. Байдусь, Н.В. Дикарева, О.В. Вихрова, А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков // ФТП. – 2017. – Т. 51, вып. 1. – С. 75–78.

31. Мощностные характеристики лазеров с волноводом на основе квантовых ям и блокирующими слоями / А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов, Н.В. Дикарева, С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48, №. 4.– С. 390–394.

32. Спектры модовых потерь в ТГц квантово-каскадных лазерах с двойным металлическим волноводом на основе Au и Ag / Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, А.А. Дубинов, В.И. Гавриленко, И.С. Васильевский, Н.В. Щаврук, Д.С. Пономарев, Р.А. Хабибуллин// Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48, № 11.– С. 1005–1008.

33. Silver-based double metal waveguide for terahertz quantum cascade laser/ R. Khabibullin, D. Ushakov, A. Afonenko, N. Shchavruk, D. Ponomarev, O. Volkov, V. Pavlovskiy, I. Vasil'evskii, D. Safonov, and A. Dubinov // Proc. SPIE.– 2019. – Vol. 11022.– P. 1102204 (1–8).

34. The operation of THz quantum cascade laser in the region of negative differential resistance / R.A. Khabibullin, N. V. Shchavruk, D. S. Ponomarev, D. V. Ushakov, A. A. Afonenko, K. V. Maremyanin, O. Yu. Volkov, V. V. Pavlovskiy, A. A. Dubinov // Opto-electronics Review. – 2019. – V. 27, No. 4. – P. 329–333.

35. Моделирование квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона частот методом балансных уравнений на основе базиса волновых функций со сниженными дипольными моментами туннельно-связанных состояний / Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, А.А. Дубинов, В.И. Гавриленко, О.Ю. Волков, Н.В. Щаврук, Д.С. Пономарев, Р.А. Хабибуллин // Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49, № 10. – С. 913–918.

36. HgCdTe-based quantum cascade lasers operating in the GaAs phonon Reststrahlen band predicted by the balance equation method / D. Ushakov, A. Afonenko, R. Khabibullin, D. Ponomarev, V. Aleshkin, S. Morozov, and A. Dubinov // Opt. Express. – 2020. – V. 28, No. 17. – P. 25371–25382.

37. Feasibility of lasing in the GaAs Reststrahlen band with HgTe multiple quantum well laser diodes/ A. Afonenko, D. Ushakov, G. Alymov, A. Dubinov, S. Morozov, V. Gavrilenko, D. Svintsov // J. Phys. D: Appl. Phys.– 2021.– Vol. 54, No. 17.– P. 1751108(1–9).

38. Квантово-каскадный лазер на 3.3 ТГц на основе активного модуля из трех квантовых ям GaAs/AlGaAs с рабочей температурой  $>120$  К/ Р.А. Хабибуллин, К.В. Маремьянин, Д.С. Пономарев, Р.Р. Галиев, А.А. Зайцев, А.И. Данилов, И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, А.Н. Клочков, А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков, С.В. Морозов, В.И. Гавриленко // ФТП. – 2021. – Т. 55, вып. 11. – С. 989–994.

### **Статьи в других научных изданиях**

39. Исследование спектров излучения квантовых каскадных лазеров терагерцового диапазона / А.В. Антонов, В.И. Гавриленко, А.В. Иконников, К.В. Маремьянин, А.А. Ластовкин, С.В. Морозов, Д.В. Ушаков, Ю.Г. Садофьев, N. Samal // Лазерная и оптико-электронная техника: Сб. науч. статей Вып. 11 / Отв. ред. И. С. Манак. - Мн.: Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2008. – С. 182–192.

40. Terahertz quantum cascade lasers with silver- and gold-based waveguides/ R.A. Khabibullin, N. V. Shchavruk, D.S. Ponomarev, D.V. Ushakov, A.A. Afonenko, O.Yu. Volkov, V.V. Pavlovskiy, A.A. Dubinov // EPJ Web of Conferences.–2018. – Vol. 195.– P. 04002 (1–2).

**Статьи в сборниках материалов научных конференций и  
тезисы докладов**

41. Control of transmission in photonic structures with *n-i-p-i* layers / V.K. Kononenko, D.V. Ushakov, I.S. Nefedov, V.N. Gusyatinikov, Yu.A. Morozov // Proc. 3rd Int. Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling. Kharkiv, 2001. – P. 97–99.

42. Controllable one-dimensional photonic structures with *n-i-p-i* crystal layers/ V.N. Gusyatinikov, I.S. Nefedov, Yu.A. Morozov, V.K. Kononenko, D.V. Ushakov // Review and Short Notes of Physics, Chemistry, and Application of Nanostructures, World Scientific, Singapore, 2001. – P. 142–145.

43. Ushakov, D.V. Broadening effects on emission spectra of the superlattice QC structures / D.V. Ushakov, A.A. Afonenko, I.S. Manak // Proc. 4-th Int. Conf. on “Transparent Optical Networks”: ICTON’2002. – Warshaw, 2002. – Vol. 2. – P. 78–80.

44. Ушаков, Д.В. Численный анализ спектральных характеристик квантово-каскадных лазеров / Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко // Низкоразмерные системы-2: Физика-химия элементов и систем с низкоразмерным структурированием (получение, диагностика, применение новых материалов и структур): Сб. науч. работ. Под ред. С.А. Маскевича, В.Ф. Стельмаха, А.К. Федотова. Вып. 3. – Гродно: ГрГУ, 2003. – С. 29–34.

45. Kononenko, V.K. Photonic crystal heterostructures with controllable active layers/ V.K. Kononenko, D.V. Ushakov, A.G. Smirnov // Proc. ICTON (2003, Warsaw). – 2003. – Vol. 1. – P. 247–251.

46. Ushakov, D.V. Nonlinear optical effects in one-dimensional photonic crystal heterostructure amplifiers/ D.V. Ushakov, V.K. Kononenko, M. Marciniak. // Proc. ICTON (2003, Warsaw). – 2003. – Vol. 1. – P. 330–332.

47. Оптическое переключение и гистерезис спектров пропускания и отражения одномерных фотонных кристаллов с *n-i-p-i*-слоями / Д.В. Ушаков, В.К. Кононенко, И.С. Манак, М. Marciniak // Материалы V Междунар. науч.-техн. конф. “Квантовая электроника”: КЭ’2004 / Отв. ред. И.С. Манак. - Мн.: Академия управления при Президенте Республики Беларусь, 2004. – С. 111–113.

48. Ushakov, D.V. Energy levels and wave functions of the superlattice quantum cascade structure with doped regions / D.V. Ushakov, I.S. Manak // Proc. of the 7st Int. conf. on “Laser and fiber-optical networks modeling”.– Kharkiv, KNURE, 2005. – P. 83–85.

49. Electrical and optical properties of InAs/InSb/GaSb superlattices for mid-infrared applications / P. Christol, Y. Cuminal, J.B. Rodriguez, A. Joullie, V.K. Kononenko, A.A. Afonenko, D.V. Ushakov // Proc. Of the 14th Symposium on Nanostructures (NANO 2006), St. Petersburg, 2006. – P. 101–102.

50. Ушаков, Д.В. Моделирование резонансного прохождения электронов в квантово-каскадных сверхрешеточных структурах / Д.В. Ушаков, И.С. Манак // Сборник мат. Междунар. научно-практической конф. “Современная радиоэлектроника: научные исследования, подготовка кадров”. - Мн.: МГВРК, 2006. Ч. 1. – С. 150–153.

51. Ushakov, D.V. Calculation of the injection coefficients for the superlattice quantum cascade structures / D.V. Ushakov, I.S. Manak // Proc. of the 8 Int. conf. on “Laser and fiber-optical networks modeling”. – Kharkiv, Ukraine, 2006. – P. 446–448.

52. Ушаков, Д.В. Спектральные характеристики квантово-каскадных гетероструктур / Д.В. Ушаков, И.С. Манак // Материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. “Квантовая электроника”: КЭ’2006 / Отв. ред. И.С. Манак. - Мн.: Академия управления при Президенте Республики Беларусь, 2006. – С. 69–71.

53. Манак, И.С. Формирование плоского спектра волноводного усиления в многослойных асимметричных квантоворазмерных гетероструктурах на основе  $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$  / И.С. Манак, В.С. Белявский, Д.В. Ушаков // Матер. 17 Междунар. Крымской конф. “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. – 2007. – С. 582–583.

54. Манак, И.С. Лазерные диоды с широким плоским спектром волноводного усиления в диапазоне 1-3 мкм / И.С. Манак, Д.В. Ушаков, В.С. Белявский // Мат. XI Междунар. Симпозиума “Нанозфизика и Нанозлектроника” (10–14 марта 2007 г.). Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2007. – Т. 2. – С. 553–554.

55. Манак, И.С. Спектры усиления и люминесценции асимметричных квантоворазмерных гетероструктур на основе  $GaInAsSb/AlGaAsSb$  / И.С. Манак, Д.В. Ушаков, В.С. Белявский // Материалы VII Междунар. научн. конф. “Лазерная физика и оптические технологии” (17–19 июня 2008 г.). – Минск: 2008. – Т. 3. – С. 329–331.

56. Manak, I.S. Energy and emission spectra of the  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$  multiple-quantum-well heterostructures / I.S. Manak, D.V. Ushakov, U.S. Bialiausky // Proc. of the 4-nd “Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers”. – 2008. – P. 285–287.

57. Ushakov, D.V. Wide modal gain spectra in the asymmetric multiple-quantum-well heterostructures  $Ga_{0,47}In_{0,53}As-Ga_{0,18}In_{0,82}As_{0,4}P_{0,6}$  / D.V. Ushakov and V.K. Kononenko // Proc. 9 Int. conf. on “Laser and fiber-optical networks modeling”. – 2008. – P. 104–106.

58. Гавриленко, В.И. Спектры терагерцового излучения в квантовых каскадных гетероструктурах  $GaAs/Al_{0,075}Ga_{0,925}As$  / В.И. Гавриленко, К.В. Маремьянин, Д.В. Ушаков // Материалы XII Междунар. Симпозиума

“Нанозифика и Нанозлектроника” (10–14 марта 2008 г.). Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2008. – Т. 2. – С. 351–352.

59. Ushakov, D.V. Numerical calculation of the gain and luminescence spectra of the quantum cascade structures / D.V. Ushakov, I.S. Manak // Proc. of Int. conf. “TERA 2008”. – 2008. – P. 27–29.

60. Ушаков, Д.В. Спектральные и пороговые характеристики квантово-каскадных лазерных структур / Д.В. Ушаков, И.С. Манак // Материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. “Квантовая электроника” (13–16 октября 2008 г.). Отв. ред. И.С. Манак. – Мн.: Академия управления при Президенте Республики Беларусь, 2008. – С. 75–77.

61. Ushakov, D.V. Broaden flat gain spectra in the asymmetric multiple-quantum-well  $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}/\text{Ga}_{0,18}\text{In}_{0,82}\text{As}_{0,4}\text{P}_{0,6}$  heterostructures / D.V. Ushakov and V.K. Kononenko // Proc. of the 17 th Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology”. Minsk, 2009. – P. 31–32.

62. Спектральные и поляризационные характеристики квантоворазмерных лазеров на GaInAsSb гетероструктурах / В.С. Белявский, Д.В. Ушаков, И.С. Манак, В.К. Кононенко // Mat. XII Int. Conf. “Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems”. – 2009. – Vol. 2. – P. 320–321.

63. Ушаков, Д.В. Расчет спектральных характеристик квантово-каскадных лазерных структур с учетом несимметричных контуров уширения линии излучения / Д.В. Ушаков, В.К. Кононенко, И.С. Манак // Сборник статей 7-го Белорусско-Российского семинара “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе”. Минск, 2009. – С. 52–55.

64. Исследование квантовых каскадных лазеров терагерцового диапазона и их применение для спектроскопии полупроводниковых наноструктур / А.В. Антонов, В.И. Гавриленко, А.В. Иконников, К.В. Маремьянин, А.А. Ластовкин, С.В. Морозов, Д.В. Ушаков, Ю.Г. Садофьев, N. Samal // Mat. XIII Междунар. Симпозиума “Нанозифика и Нанозлектроника”. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2009. – Т. 2. – С. 378–379.

65. Ушаков, Д.В. Расчет спектральных характеристик  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  структур  $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ -методом / Д.В. Ушаков, И.С. Манак // Mat. VIII Междунар. науч.-техн. конф. “Квантовая электроника” (22–25 нояб. 2010 г.) Отв. ред. М.М. Кугейко. – Минск: издательский центр БГУ, 2010. – С. 107–109.

66. Ушаков, Д.В. Самосогласованный расчет спектральных характеристик квантово-каскадных структур / Д.В. Ушаков // Mat. XIV Междунар. Симпозиума “Нанозифика и Нанозлектроника”. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2010. – Т. 2. – С. 484–485.

67. Ushakov, D.V. Calculation of energy characteristics of  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{-Si}$  quantum-well heterostructures using  $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$  method / D.V. Ushakov, V.K. Kononenko

//Proc. of the 10 Int. conf. on “Laser and fiber-optical networks modeling”. – 2010. – P.23–25.

68. Ушаков, Д.В. Расчет внутриподзонных переходов в квантово-каскадных структурах на основе соединений Si/Ge / Д.В. Ушаков, В.К. Кононенко //Мат. XV Междунар. Симпозиума “Нанопизика и Наноэлектроника”. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2011.– Т. 2.– С. 529–530.

69. Ушаков, Д.В. Спектры терагерцового усиления квантово-каскадных структур с двумя квантовыми ямами на основе  $Al_{0,15}Ga_{0,85}As/Al_{0,02}Ga_{0,98}As(GaAs)/Al_{0,15}Ga_{0,85}As$  / Д.В. Ушаков, Ю.Г. Садофьев, N. Samal //Сборник статей 8-го Белорусско-Российского семинара “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе”. Минск, 2011. – С. 73–76.

70. Афоненко, А.А. Эффективность токовой инжекции в полупроводниковых лазерах с волноводом из квантовых ям/ А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков // Мат. 3-го симпозиума “Полупроводниковые лазеры: физика и технология”. Санкт-Петербург, 2012. – С. 65.

71. Ушаков, Д.В. Расчет квантово-каскадных структур ТГц диапазона на основе соединений Ge/SiGeSn с плавно меняющимся периодом / Д.В. Ушаков, А.А. Дубинов, А.А. Афоненко // Мат. XVI Междунар. Симпозиума “Нанопизика и Наноэлектроника”. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2012. – Т. 1. – С. 243–244.

72. Ушаков, Д.В. Спектры усиления квантово-каскадных структур ТГц диапазона с 2 КЯ на основе  $Al_{0,15}Ga_{0,85}As/Al_{0,02}Ga_{0,98}As(GaAs)/Al_{0,15}Ga_{0,85}As$  / Д.В. Ушаков, Ю.Г. Садофьев, N. Samal // Мат. XVI Междунар. Симпозиума “Нанопизика и Наноэлектроника”. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2012. – Т. 2. – С. 384–385.

73. Ушаков, Д.В. Эффективность генерации квантоворазмерных лазеров InGaAs/GaAs с вытекающей модой при неоднородном возбуждении квантовых ям/ Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, В.Я. Алешкин //Мат. XVII Междунар. Симпозиума “Нанопизика и Наноэлектроника”. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2013.– Т. 2.– С. 621–622.

74. Ушаков, Д.В. Оптимизация дизайна структур квантовых каскадных лазеров терагерцового диапазона на основе трех квантовых ям / Д.В. Ушаков, Ю.Г. Садофьев, N. Samal //Мат. XVII Междунар. Симпозиума “Нанопизика и Наноэлектроника”. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2013.– Т. 2.– С. 619–620.

75. Ушаков, Д.В. Влияние количества квантовых ям на эффективность генерации в лазерной структуре  $Ga_{0,8}In_{0,2}As/GaAs/GaInP$  / Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, В.Я. Алешкин //Сборник статей 9-го Белорусско-Российского

семинара “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе”. – 2013. – С. 49–52.

76. Ушаков, Д.В. Влияние нагрева активной области на мощность генерации в лазерной структуре Ga<sub>0.8</sub>In<sub>0.2</sub>As/GaAs/GaInP/ Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, В.Я. Алешкин //Мат. IX Междунар. науч.-техн. конф. “Квантовая электроника” (18–21 нояб. 2013 г.) Отв. ред. М.М. Кугейко. Минск: издательский центр БГУ, 2013. – С. 115–116.

77. Мощностные характеристики InGaAs/GaAs/InGaP-лазеров с вытекающей модой/ А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков, С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков, Н.В. Байдусь, О.В. Вихрова, Н.В. Дикарева //Мат. X Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : РИВШ. – 2015.– С. 92–94.

78. Ушаков, Д.В. Перестройка частоты генерации GaAs/AlGaAs квантовых каскадных лазеров терагерцового диапазона на основе трех квантовых ям при изменении молевого состава коллекторного барьера / Д.В. Ушаков, Ю.Г. Садофьев // Материалы X Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : РИВШ, 2015. – С. 99–101.

79. Афоненко, А.А. Раздельная продольная накачка мощных полупроводниковых лазеров / А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков. // Сб. статей 10-го Белорусско-российского семинара “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе”. Минск (26–29 мая). – Минск, 2015. – С. 46–48.

80. Афоненко, А.А. Увеличение мощности излучения лазерных гетероструктур на основе GaAs/AlGaAs за счет введения дополнительной КЯ/ А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков //Программа и тезисы докладов 5-го Российского симп. с междунар. участием “Полупроводниковые лазеры: физика и технология”. Санкт-Петербург (15–18 ноября). – 2016. – С. 47.

81. Влияние длины резонатора на энергетические характеристики GaAs лазеров с увеличенной активной областью и выходом излучения через подложку / Н.В. Дикарева, С.М. Некоркин, И.И. Чунин, Б.Н. Звонков, А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков // Программа и тезисы докладов 5-го Российского симпозиума с междунар. участием “Полупроводниковые лазеры: физика и технология”. Санкт-Петербург (15–18 ноября). – 2016. – С. 60.

82. Анализ внутренних оптических потерь лазерных гетероструктур с вытекающей модой / А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов, Н.В. Дикарева, С.М. Некоркин, И.И. Чунин, Б.Н. Звонков //Мат. XVII Междунар. Симпозиума “Нанопизика и Наноэлектроника”. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2017. – Т. 2. – С. 515–516.

83. Афоненко, А.А. Анализ мощностных характеристик квантоворазмерных лазеров с расширенным волноводом и легированными широкозонными блокирующими слоями / Афоненко А.А., Ушаков Д.В. // //Сб. статей 11-го Белорусско-Российского семинара “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе”, Минск (22–26 мая).– 2017.– С. 24–26.

84. Анализ мощностных характеристик лазеров с вытекающей модой с широкозонными блокирующими слоями в активной области / А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин, Н.В. Байдусь, Н.В. Дикарева // “Квантовая электроника”: Мат. XI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13–17 нояб. 2017 г. редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]– Минск: РИВШ, 2017.– С. 101–103.

85. Ушаков, Д.В. Расчет коэффициента потерь в ТГц квантово-каскадных лазерах на основе GaAs/AlGaAs . Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, Р.А. Хабибуллин // “Квантовая электроника”: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13–17 нояб. 2017 г. редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]– Минск: РИВШ, 2017.– С. 110–112.

86. Мощностные характеристики лазеров с волноводом из квантовых ям и блокирующими слоями / А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов, Н.В. Дикарева, С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков //Сб. статей 11-го Белорусско-российского семинара “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе”, Минск (22–26 мая).– 2017.– С. 27–29.

87. Анализ оптического и токового ограничения в лазерах с волноводом из квантовых ям и потенциальными барьерами / А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов, Н.В. Дикарева, С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков //Труды XXII Междунар. симпозиума “Наноп физика и наноэлектроника”. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2018.– Т. 2.– С. 545–546.

88. Ушаков, Д.В. Анализ скорости излучательных и безызлучательных переходов в ТГц квантовокаскадных лазерах на основе GaAs/AlGaAs/ Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, Р. А. Хабибуллин // Труды XXII Междунар. симп. “Наноп физика и наноэлектроника”. (Нижний Новгород, 12–15 марта 2018 г.) В 2 т. Том 2. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2018. – С. 783–784.

89. Генерационные характеристики квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона на основе GaAs/AlGaAs / А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков, Н.В. Щаврук, Д.С. Пономарев, Р.А. Хабибуллин // Программа и тезисы докладов 6-го Российского симпозиума с международным участием “Полупроводниковые лазеры: физика и технология”. Санкт-Петербург (13–16 ноября). – 2018. – С. 24.

90. Самосогласованная квантово-механическая модель ККЛ ТГц диапазона на основе уравнений Пуассона и Шредингера в кр-приближении / Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, Е.В. Бизюк, Р.А. Хабибуллин, В.И. Гавриленко, А.А. Дубинов// “Квантовая электроника”: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–22 нояб. 2019 г. редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.] – Минск: РИВШ, 2019. – С. 144–146.

91. Вольт-амперные и мощностные характеристики квантово-каскадных

лазеров терагерцового диапазона на основе GaAs/AlGaAs/ А.А. Афоненко, Д. В. Ушаков, Н.В. Щаврук, Д.С. Пономарев, Р.А. Хабибуллин // Труды XXIII Междунар. симп. “Нанопизика и наноэлектроника”. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2019.– Т. 2. – С. 603–604.

92. The operation of THz quantum cascade laser in the region of negative differential resistance/ R.A. Khabibullin, N.V. Shchavruk, D.S. Ponomarev, D.V. Ushakov, A.A. Afonenko, K.V. Maremyanin, A.A. Dubinov, O.Yu. Volkov, V.V. Pavlovskiy// 8th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (Nizhny Novgorod, July 8–11, 2019.) .– Nizhny Novgorod, 2019. – P. 148–149.

93. Терагерцовый квантово-каскадный лазер на основе узкозонных квантовых ям HgCdTe/ А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков, А.А. Дубинов, В.Я. Алешкин, Р.А. Хабибуллин // Труды XXIII Междунар. симп. “Нанопизика и наноэлектроника”. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2019.– Т. 2. – С. 601–602.

94. Моделирование температурной зависимости усиления квантово-каскадных лазеров на основе HgCdTe с 2 КЯ на частоте 8.3 ТГц/ Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, В.Я. Алешкин, С.В. Морозов, В.И. Гавриленко, А.А. Дубинов// Труды XXIV Междунар. симп. “Нанопизика и наноэлектроника”. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2020.– Т. 2.– С. 764–765.

95. Афоненко, А.А. Неустойчивость режима генерации и пространственные домены в квантово-каскадных лазерах на основе сверхрешеток с лестницами Ванье–Штарка/ А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков, Р.А. Хабибуллин // Труды XXV Междунар. симпозиума “Нанопизика и наноэлектроника”. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2021.– Т. 2.– С. 564–565.

### Патенты

96. Устройство управления длиной волны излучения терагерцового полупроводникового лазера: полез. модель Ву 7198/ В.Л. Козлов, Д.В. Ушаков.– Оpubл. 14.10.2010.

97. Способ определения суммарных потерь в активной области полупроводникового лазера: пат. ВУ 17171 / В.Л. Козлов, Д.В. Ушаков. – Оpubл. 11.02.2013.

**РЭЗІЮМЭ****Ушакоў Дзмітрый Уладзіміравіч  
Аптычныя і генерацыйныя характарыстыкі  
паўправадніковых інжэкцыйных лазерных структур  
на квантавых ямах і звышрашотках**

**Ключавыя словы:** шматямны гетэралазер, квантава-каскадныя структуры, фатонныя гетэраструктуры, легаваныя звышрашоткі, блакавальныя пласты, спектральныя характарыстыкі, магутнасць выпраменьвання, уцечкі, працоўныя тэмпературы.

**Аб'ект даследавання:** паўправадніковыя квантавапамерныя лазеры на міжзонных і ўнутрызонных пераходах, легаваныя звышрашоткі, фатонныя крышталі.

**Прадмет даследавання:** спектральныя і генерацыйныя характарыстыкі.

**Мэта даследавання:** выяўленне заканамернасцяў электронна-аптычных з'яў у квантавапамерных гетэраструктурах, распрацоўка фізічных мадэляў працякаючых працэсаў і ўстанаўленне характэрных канструктыўных асаблівасцей, якія вызначаюць спектральныя і генерацыйныя характарыстыкі міжзонных інжэкцыйных лазераў з наборам квантавых ям, квантава-каскадных лазераў і фатонных гетэраструктур на легіраваных звышрашотках.

**Метады даследавання:** мадэляванне аптычных і генерацыйных характарыстык квантавапамерных структур на квантавых ямах і звышрашотках на аснове аналітычных і лікавых рашэнняў раўнанняў: Шрэдынгера, Максвела і балансных раўнанняў, а таксама размеркаванай сістэмы раўнанняў дыфузійна-дрэйфавай мадэлі.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна** складаюцца ў развіцці тэорыі лазернай генерацыі міжзонных квантавапамерных інжэкцыйных гетэралазераў з неаднароднай узрушанасцю актыўнай вобласці, развіцці тэорыі пераносу носбітаў зарада і лазернай генерацыі квантава-каскадных лазераў на внутрызонных пераходах, у тэарэтычным прадказанні ўзнікнення даменаў электрычнага поля ў квантава-каскадных лазерах на аснове звышрашотак, распрацоўцы метадаў кіравання спектральнымі характарыстыкамі аднамерных фатонных крышталяў за кошт выкарыстання ў якасці актыўных пластоў легіраваных звышрашотак.

**Галіна прымянення і рэкамендацыі па выкарыстанні.** Магутныя шматямныя гетэралазеры - для накачкі цвёрдацельных лазераў, квантава-каскадныя лазеры - у ІК і ТГц спектраскапіі і сістэмах сувязі, фатонныя крышталі на легіраваных звышрашотках - у якасці нелінейных аптычных элементаў і мікралазераў у прыладах аптычнай апрацоўкі інфармацыі.

## РЕЗЮМЕ

Ушаков Дмитрий Владимирович

### Оптические и генерационные характеристики полупроводниковых инжекционных лазерных структур на квантовых ямах и сверхрешетках

**Ключевые слова:** многоямный гетеролазер, квантово-каскадные структуры, фотонные гетероструктуры, легированные сверхрешетки, блокирующие слои, спектральные характеристики, мощность излучения, утечки, рабочие температуры.

**Объект исследования:** полупроводниковые квантово-размерные лазеры на межзонных и внутризонных переходах, легированные сверхрешетки, фотонные кристаллы.

**Предмет исследования:** спектральные и генерационные характеристики.

**Цель исследования:** выявление закономерностей электронно-оптических явлений в квантово-размерных гетероструктурах, разработка физических моделей протекающих процессов и установление характерных конструктивных особенностей, которые определяют спектральные и генерационные характеристики межзонных инжекционных лазеров с набором квантовых ям, квантово-каскадных лазеров и фотонных гетероструктур на легированных сверхрешетках.

**Методы исследования:** моделирование оптических и генерационных характеристик квантово-размерных структур на квантовых ямах и сверхрешетках на основе аналитических и численных решений уравнений: Шредингера, Максвелла и балансных уравнений, а также распределенной системы уравнений диффузионно-дрейфовой модели.

**Полученные результаты и их новизна** состоят в развитии теории лазерной генерации межзонных квантово-размерных инжекционных гетеролазеров с неоднородным возбуждением активной области, развитии теории переноса носителей заряда и лазерной генерации квантово-каскадных лазеров на внутризонных переходах, в теоретическом предсказании возникновения доменов электрического поля в квантово-каскадных лазерах на основе сверхрешеток, разработке методов управления спектральными характеристиками одномерных фотонных кристаллов за счет использования в качестве активных слоев легированных сверхрешеток.

**Область применения и рекомендации по использованию.** Мощные многоямные гетеролазеры – для накачки твердотельных лазеров, квантово-каскадные лазеры – в ИК и ТГц спектроскопии и системах связи, фотонные кристаллы на легированных сверхрешетках – в качестве нелинейных оптических элементов и микролазеров в устройствах оптической обработки информации.

## SUMMARY

Dmitrii Vladimirovich Ushakov

### Optical and lasing characteristics of semiconductor injection laser structures based on quantum wells and superlattices

**Keywords:** multi-well heterolaser, quantum cascade structures, photonic heterostructures, doped superlattices, blocking layers, spectral characteristics, radiation power, leakage, operating temperatures.

**Object of research:** semiconductor quantum-well lasers based on interband and intraband transitions, doped superlattices, photonic crystals.

**Topic of research:** spectral and generation characteristics.

**The aim research:** identification of the regularities of electro-optical phenomena in quantum-well heterostructures, development of physical models of ongoing processes and the establishment of characteristic design features, which determine the spectral and lasing characteristics of interband injection lasers with a set of quantum wells, quantum cascade lasers and photonic heterostructures based on doped superlattices.

**Methods of research:** simulation of optical and generation characteristics of quantum-well structures based on quantum wells and superlattices analytical and numerical solutions of equations: Schrödinger, Maxwell and balance equations, as well as a distributed system of equations of the diffusion-drift model.

**Obtained results and their novelty** consist in the development of the theory of lasing of interband quantum-well injection heterolasers with inhomogeneous excitation of the active region, the development of the theory of charge carrier transfer and lasing of quantum-cascade lasers based on intraband transitions, in the theoretical prediction of the appearance of electric field domains in quantum-cascade lasers based on superlattices, development of methods for controlling the spectral characteristics of one-dimensional photonic crystals through the use of doped superlattices as active layers.

**Scope and recommendations for use.** High-power multi-well heterolasers - for pumping solid-state lasers, quantum-cascade lasers - in IR and THz spectroscopy and communication systems, photonic crystals on doped superlattices - as nonlinear optical elements and microlasers in optical information processing devices.

УШАКОВ  
Дмитрий Владимирович

ОПТИЧЕСКИЕ И ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРНЫХ  
СТРУКТУР НА КВАНТОВЫХ ЯМАХ И СВЕРХРЕШЕТКАХ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.21 – лазерная физика



Подписано в печать “3” января 2022 г. Формат 60×90/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура «Times». Печать  
Объем: 2.9 усл. печ. л., 2.5 уч.-изд. л.  
Тираж 60 экз. Заказ № 1.

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
“ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ИМЕНИ Б.И. СТЕПАНОВА  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ”  
220072, Минск, пр. Независимости, 68-2.  
Отпечатано на ризографе Института физики НАН Беларуси