

**На правах рукописи**

**БУТАЕВ МАРАТ РАДЖАБАЛИ ОГЛЫ**

**ЭПИТАКСИЯ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР  
СОЕДИНЕНИЙ  $A^2B^6$  И СОЗДАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ДИСКОВЫХ ЛАЗЕРОВ НА ИХ ОСНОВЕ**

Специальность: 1.3.19 – Лазерная физика

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата  
физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) и в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»»

**Научный руководитель:** **Козловский Владимир Иванович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Ладугин Максим Анатольевич**  
доктор физико-математических наук, заместитель генерального директора по НИОКР  
Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха

**Тункин Владимир Григорьевич**  
доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ)

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Защита состоится «02» октября 2023 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.262.01 на базе Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, а также на сайте института [www.lebedev.ru](http://www.lebedev.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.262.01,  
доктор физико-математических наук

Золотко Александр Степанович

# **I. Общая характеристика работы**

## **Актуальность диссертационной работы**

Диссертация направлена на развитие полупроводниковых дисковых лазеров (ПДЛ), излучающих в сине-зеленой (~480-550 нм) области спектра на основной частоте.

Полупроводниковые дисковые лазеры интенсивно развиваются в последние 15 лет многими лабораториями развитых стран мира (см. обзоры [1-4]). Повышенный интерес к данному типу лазеров связан с высокой эффективностью накачки лазерными диодами, высоким качеством лазерного пучка, возможностью эффективного нелинейного преобразования частоты генерации внутри резонатора. В отличие от твердотельных дисковых лазеров, полупроводниковые лазеры имеют более широкую спектральную перестройку, высокую стабильность параметров генерации, и в них отсутствуют релаксационные колебания. В отличие от лазерных диодов полупроводниковые дисковые лазеры имеют высокое качество пучка при высоких мощностях (до ~100 Вт в непрерывном режиме с пятна ~0.5 мм<sup>2</sup> [5]). На основе полупроводниковых дисковых лазеров разрабатываются когерентные источники ультрафиолетового, видимого, среднего инфракрасного и терагерцового излучения, а также генераторы фемтосекундных импульсов с высокой частотой повторения, которые имеют многочисленные применения. Несмотря на высокий потенциал полупроводниковых дисковых лазеров, данный тип лазеров практически не разрабатывается в России.

В настоящее время в полупроводниковых дисковых лазерах основные результаты достигнуты на гетероструктурах (ГС) соединений  $A^3B^5$ , таких как AlGaInAs, излучающих в ближней ИК области спектра. Путем генерации второй гармоники можно относительно легко продвинуться в видимую область спектра. Однако, дальнейшее продвижение в ультрафиолетовую область, в частности в область среднего УФ (~200-300 нм), сопряжено с существенным усложнением оптической схемы лазера и понижением эффективности лазерной системы в целом. Следует отметить, что до сих пор средний УФ диапазон также, как и зеленый диапазон, по-прежнему не перекрыт компактными (относительно мощными) полупроводниковыми лазерами. В настоящее время средний УФ диапазон освоен в основном только

ртутными и эксимерными лампами спонтанного излучения, громоздкими эксимерными газовыми лазерами, системами на сложных схемах твердотельных лазеров, работающих на высоких гармониках, а также ПДЛ на 3-й и 4-й гармониках. Данную проблему можно решить путем использования в ПДЛ резонансно-периодических структур из широкозонных полупроводниковых соединений, излучающих в сине-зеленой области спектра. В этом случае переход в наиболее востребованный для ряда применений средний УФ диапазон спектра можно осуществить относительно простым внутрирезонаторным удвоением частоты. Для накачки активной области ПДЛ на основе широкозонных материалов можно использовать лазерные диоды (ЛД) фиолетового диапазона на основе InGaN, которые коммерчески доступны в настоящее время.

Одними из самых популярных и широко исследуемых в настоящее время широкозонных соединений, излучающих в сине-зеленой области спектра, являются соединения на основе нитридов. Лазерные и светоизлучающие структуры на основе нитридных соединений обычно выращиваются на сапфировых подложках эпитаксиальными методами. В классической схеме полупроводникового дискового лазера используется встроенное в эпитаксиальную структуру высокоотражающее брэгговское зеркало (БЗ). Несмотря на большие достижения в нитридной эпитаксиальной технологии, такое зеркало высокого качества до сих пор получить не удается. В новой схеме полупроводникового дискового лазера «мембранного» типа, все зеркала резонатора выносятся из эпитаксиальной структуры [6-11]. Для этого выращенная эпитаксиальная структура зажимается между двумя оптически прозрачными теплоотводами типа алмаза или SiC. Сама ростовая подложка при этом удаляется. Однако, нитридные гетероструктуры отделить от сапфировой подложки, сохранив оптическое качество обеих поверхностей гетероструктуры, также практически невозможно из-за высокой химической стойкости сапфира.

Другими известными широкозонными соединениями являются соединения  $A^2B^6$ . Эти соединения в конце прошлого столетия рассматривались как наиболее перспективные соединения для лазеров сине-зеленого диапазона спектра. Синий лазер на структурах, основанных на ZnSe, был реализован значительно раньше, чем на структурах на основе GaN [12]. Однако, проблема деградации в инжекционных лазерах на основе

соединений  $A^2B^6$  до сих пор не решена. Кроме факторов деградации, присущих инжекционным лазерам, в которых необходимо создавать  $p$ - $n$  переход и надежные контакты, называли также недостаточную прочность химических связей атомов металла второй группы с селеном и внутренние упругие напряжения в квантовых ямах (КЯ). В лазерах с оптической накачкой лишь последние факторы могут играть существенную роль в деградации. Однако, следует отметить, что из соединений  $A^2B^6$  также, как и из соединений  $A^3N$ , трудно вырастить эпитаксиальное брэгговское зеркало из-за отсутствия подходящей пары материалов с согласованными с ростовой подложкой параметрами кристаллической решетки и требуемым скачком показателей преломления. Но, в случае гетероструктур  $A^2B^6$ , выращиваемых в основном на подложках GaAs, их проще перенести на другую подложку типа алмаза или SiC с лучшей теплопроводностью, поскольку имеются селективные травители для GaAs. При этом можно использовать либо два внешних зеркала (ПДЛ мембранного типа), либо вместо эпитаксиального брэгговского зеркала использовать нанесенное на поверхность гетероструктуры диэлектрическое брэгговское зеркало, состоящее, например, из окислов типа  $SiO_2/Ta_2O_5$ ,  $SiO_2/TiO_2$ ,  $SiO_2/ZrO_2$  и др.

Дополнительная сложность использования соединений  $A^2B^6$  в ПДЛ заключается в относительно невысокой теплопроводности данных соединений. Эту проблему в перспективе можно решить либо путем прямой оптической накачки квантовых ям гетероструктуры (а не через широкие барьерные слои как в традиционном варианте ПДЛ), либо уменьшением толщины эпитаксиальной структуры за счет использования нескольких КЯ в одной пучности стоячей волны резонатора.

В связи с вышеизложенным, в данной работе исследовалась возможность создания полупроводниковых дисковых лазеров с оптической накачкой, излучающих в зеленой области спектра на основе гетероструктур из соединений  $A^2B^6$ , в частности относительно новой гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe (ZnCdS/ZnSSe) с разрывами зон 2-го типа.

### **Цель и задачи работы**

Основной целью данной работы являлось создание полупроводникового дискового лазера с оптической накачкой, излучающего в зеленой области спектра на основной частоте. Для этой цели, в качестве

активной области лазера была выбрана относительно новая гетероструктура 2-го типа CdS/ZnSe/ZnSSe. Предполагалось, что данная структура более стабильна, чем ранее широко исследованные гетероструктуры ZnCdSe/ZnSe или ZnSe/ZnMgSSe при высоких уровнях накачки из-за более прочных химических связей Cd-S. Для исследования лазерных характеристик выращенных ГС 2-го типа CdS/ZnSe/ZnSSe, в качестве источника накачки, использовался как азотный лазер ( $\lambda=337$  нм), так и «фиолетовый» лазерный диод на основе ГС InGaN/GaN ( $\lambda\sim 430-440$  нм).

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие основные задачи:

1) Разработать технологию выращивания гетероструктур CdS/ZnSe/ZnSSe на подложках GaAs методом газофазного осаждения из элементоорганических соединений (ГФЭЭОС), характеризующихся высокой интенсивностью люминесценции в зеленой области спектра.

2) Провести всестороннее исследование структурных и люминесцентных свойств выращенных гетероструктур методами фото- и катодолюминесценции, рентгеноструктурного анализа, просвечивающей и атомно-силовой микроскопии.

3) Провести расчеты коэффициента оптического усиления исследуемых гетероструктур с разрывами зон 2-го типа из соединений  $A^2B^6$ .

4) Провести расчет зонной диаграммы гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe в предположении взаимной диффузии атомов Cd и Zn при температуре выращивания.

5) Разработать технологию изготовления активных элементов ПДЛ и лазеров с микрорезонатором из выращенных гетероструктур.

6) Исследовать характеристики ПДЛ с оптической накачкой и накачкой электронным пучком на известных и более совершенных («эталонных») гетероструктурах  $A^3B^5$ , выращенных в НИИ «Полюс», с целью отработки методики исследования ПДЛ.

7) Реализовать полупроводниковые лазеры с микрорезонатором и продольной оптической накачкой на выращенных гетероструктурах и исследовать их характеристики.

8) Реализовать ПДЛ с оптической накачкой на основе выращенных гетероструктур и исследовать их характеристики.

## Научная новизна работы

Научная новизна данной работы заключается в следующем:

1) Впервые методом газофазного осаждения из элементоорганических соединений выращены гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe с резонансно-периодическим усилением для полупроводниковых лазеров, излучающих в зеленой области спектра.

2) Впервые проведен расчет коэффициента оптического усиления для гетероструктуры CdS/ZnSe с разрывами зон 2-го типа. Показано, что при поверхностной концентрации неравновесных носителей  $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , которое достижимо в гетероструктурах 2-го типа, коэффициент оптического усиления в квантовых ямах может достигать величины  $\sim 5000 \text{ см}^{-1}$ , достаточной для реализации полупроводниковых лазеров с оптической накачкой на ее основе при оптимальных зеркалах.

3) Впервые использовалась методика измерения сопротивления растекания тока при фиолетовой подсветке контакта зонда с поверхностью скола гетероструктуры в зондовом (атомно-силовом) микроскопе для обнаружения разделения носителей заряда в гетероструктуре с разрывами зон 2-го типа.

4) Обнаружена взаимная диффузия атомов Cd и Zn, приводящая к размазыванию КЯ в процессе выращивания гетероструктуры при температуре роста  $\sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$  и типичных соотношениях потоков элементоорганических соединений, содержащих атомы II и VI группы периодической таблицы элементов (соотношение VI/II  $\sim 10$ ). Показано, что данный эффект может быть существенно подавлен, если рост проводить при пониженных соотношениях потоков в слоях КЯ гетероструктуры (VI/II  $\sim 2-4$ ).

5) Впервые на выращенных гетероструктурах CdS/ZnSe/ZnSSe с резонансно-периодическим усилением реализованы различные (как лазер с микрорезонатором, так и с внешним зеркалом обратной связи) полупроводниковые лазеры с продольной оптической накачкой, излучающие в зеленой области спектра.

## Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие положения:

1) Коэффициент оптического усиления в гетероструктурах CdS/ZnSe/ZnSSe с разрывами зон 2-го типа, рассчитанный методом

согласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона, оценивается величиной  $\sim 5000 \text{ см}^{-1}$  при поверхностной концентрации неравновесных носителей  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ , что косвенно подтверждается экспериментом.

2) Выращивание гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe методом газофазного осаждения из элементоорганических соединений при оптимальной с точки зрения скорости роста и морфологии поверхности температуре  $\sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$  и соотношении VI/II  $\sim 10$  приводит к взаимной диффузии атомов Cd и Zn в КЯ в процессе роста, и, как следствие, к неоднородности КЯ по глубине структуры. Эта взаимная диффузия существенно подавляется при выращивании слоев КЯ CdS и ZnSe при пониженных соотношениях VI/II  $\sim 2-4$ , что объясняется уменьшением вакансий металла вблизи КЯ, стимулирующим диффузию.

3) Экспериментально наблюдаемый коротковолновый сдвиг линии излучения гетероструктур с увеличением уровня возбуждения и пространственное разделение неравновесных носителей (электроны в слоях CdS, а дырки в соседних слоях ZnSe), обнаруженное в зондовом микроскопе в режиме измерения сопротивления растекания тока, свидетельствуют о том, что выращенные при оптимальных ростовых условиях гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe относятся к гетероструктурам с разрывами зон 2-го типа.

4) На выращенных гетероструктурах CdS/ZnSe/ZnSSe с резонансно-периодическим усилением при продольной накачке излучением «фиолетового» лазерного диода реализованы полупроводниковый лазер с микрорезонатором с импульсной мощностью до 0.32 Вт на длине волны 525 нм и эффективностью 10 %, и полупроводниковый дисковый лазер с мощностью до 17 мВт на длине волны 522 нм и углом расходимости менее 5 мрад.

### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость работы заключается в создании ПДЛ, излучающего в зеленой области спектра на основной частоте. Это является необходимым шагом на пути к созданию компактных, перестраиваемых, а также недорогих лазерных источников, излучающих в среднем ультрафиолетовом диапазоне. Также практически важным является результат использования гетероструктуры из соединений  $A^2B^6$  в ПДЛ, в частности новой структуры CdS/ZnSe/ZnSSe с разрывами зон 2-го типа, что

расширяет набор полупроводниковых соединений, из которых может быть создан лазер.

### **Личный вклад автора**

Автором настоящей работы лично:

- проведен литературный анализ современного состояния развития ПДЛ;
- выращены полупроводниковые квантово-размерные гетероструктуры из соединений  $A^2B^6$  для создания полупроводниковых лазеров с продольной оптической накачкой;
- проведено теоретическое моделирование (расчет) исследуемых ГС;
- проведено исследование характеристик лазеров, созданных на основе выращенных ГС.

Модернизация и запуск экспериментальной установки газофазной эпитаксии из элементоорганических соединений (ГФЭЭОС) для выращивания полупроводниковых квантоворазмерных гетероструктур из соединений  $A^2B^6$ , исследование выращенных ГС и обработка полученных при этом результатов, изготовление активных элементов (АЭ) полупроводниковых лазеров на основе полученных гетероструктур, создание лазеров на их основе, а также подготовка публикаций проводились совместно с соавторами, однако, при этом вклад автора настоящей работы был основным.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность (обоснованность) результатов (научных положений, выводов), представленных в настоящей диссертационной работе, подтверждается проведенными экспериментальными и теоретическими исследованиями, повторяемостью и воспроизводимостью экспериментальных результатов, полученных с использованием современного сертифицированного оборудования, корреляцией экспериментальных результатов с проведенными расчетами и с результатами теоретических работ других исследовательских групп, а также успешным представлением основных результатов диссертации на ведущих российских и международных конференциях.

## **Апробация результатов работы и публикации**

Результаты, полученные в рамках диссертационной работы, представлялись и обсуждались на 7 всероссийских и 12 международных конференциях. По теме диссертации опубликовано 28 печатных работ, 9 из которых в рецензируемых статьях, рекомендованных ВАК РФ и включенных в базы данных Web of Science или Scopus, и 19 в сборниках трудов конференций. Основные результаты диссертационной работы, докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- VII и VIII Международные конференции: Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ. Москва, 2021 и 2022.

- 21-я, 22-я и 23-я Всероссийские научные молодежные конференции: Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника. Санкт-Петербург, 2019, 2020 и 2021.

- Мокеровские чтения: 10-я, 11-я, 12-я и 13-я Международные научно-практические конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. Москва, 2019, 2020, 2021 и 2022.

- I и II Всероссийские научно-технические конференции: Полупроводниковые материалы в современной микро- и наноэлектронике. Махачкала, 2020 и 2022.

- VIII Международная молодежная научная школа-конференция: Современные проблемы физики и технологий. Москва, 2019.

- VII и VIII Международные симпозиумы по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур. Москва, 2019 и 2021.

- 7th International school and conference on optoelectronics, photonics, engineering and nanostructures «Saint-Petersburg open 2020».

- 12-й Белорусско-Российский семинар: «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе». Минск, 2019.

- 7-й симпозиум: Полупроводниковые лазеры: физика и технология. Санкт-Петербург, 2022.

## **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 190 страниц, включая 12 таблиц и 106 рисунков. Список использованной литературы содержит 151 наименований.

## II. Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследования, характеризуется степень ее разработанности, определяются цель и задачи. Также формулируются основные положения, выносимые на защиту и научная новизна работы.

Первая глава посвящена литературному обзору по диссертационной теме. В ней приведена: классификация полупроводниковых ГС по разрыву зон; проведен анализ современного состояния развития ПДЛ; описаны принципы работы современных ПДЛ; приведены пути освоения зеленого и среднего УФ диапазонов с помощью ПДЛ, а также перечислены возможные области применения таких лазеров; дан краткий обзор использования ГС 2-го типа в ПДЛ.

Вторая глава посвящена обоснованию выбора новых ГС 2-го типа  $\text{Cd}(\text{Zn})\text{S}/\text{Zn}(\text{S})\text{Se}$  из соединений  $\text{A}^2\text{B}^6$  для ПДЛ. Эти гетероструктуры в отличие от ранее изученных ГС типа  $\text{Zn}(\text{Cd})\text{Se}/\text{Zn}(\text{Mg})\text{SSe}$  [13,14], менее подвержены твердотельной диффузии при температурах эпитаксиального роста и интенсивном возбуждении из-за более прочных серных химических связей. При определенном составе в КЯ и барьерах ( $\text{Cd}_{0.56}\text{Zn}_{0.44}\text{S}/\text{ZnS}_{0.08}\text{Se}_{0.92}$ ), все слои данной ГС могут быть практически полностью согласованными по параметрам кристаллической решетки с подложкой GaAs, что существенно понижает внутренние напряжения.

Особый интерес представляет структура  $\text{CdS}/\text{ZnSe}/\text{ZnSSe}$ , в которой, уже при малых уровнях накачки достигается достаточно высокая локализация дырок (см. рисунок 1). Эта структура позволяет сдвинуться в зелено-желтую область спектра. Кроме того, бинарные слои CdS и ZnSe проще выращивать, чем слои тройных соединений ZnCdS или ZnCdSe при относительно высоких потоках металлоорганики, необходимых для достижения высокой интенсивности люминесценции ГС.

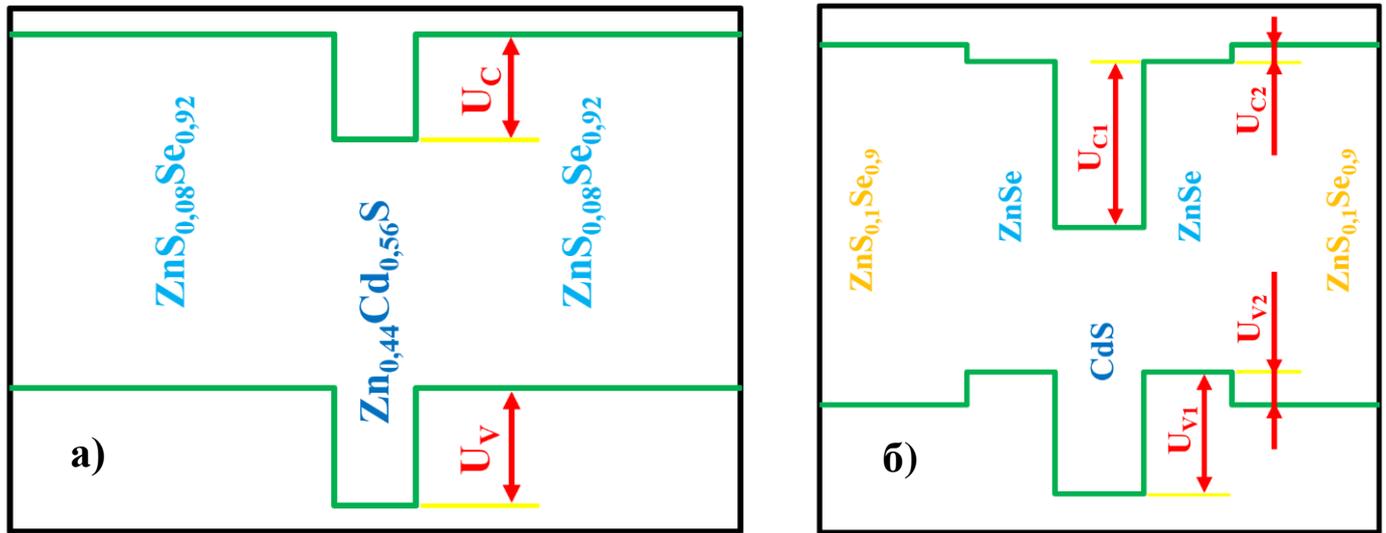


Рисунок 1 - Схематическое изображение зонной диаграммы изоморфной ГС ZnCdS/ZnSSe (а) и напряженной ГС CdS/ZnSe/ZnS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> (б) при низком уровне возбуждения.

Другим важным достоинством ГС CdS/ZnSe является низкий скачок показателя преломлений на гетерограницах. Это позволяет существенно ослабить эффект вытеснения моды за пределы запрещенной зоны фотонного кристалла (каким является периодическая структура) и из максимума линии усиления, и тем самым достигнуть минимального порога генерации, который можно получить при резонансно-периодическом усилении [15]. Потенциально полезным является также малое внутреннее поглощение при неоднородной накачке КЯ, что связано с особенностью зонной диаграммы (ЗД) данной ГС. Но следует отметить, что данная ГС относится к ГС с разрывами зон 2-го типа, что приводит к пространственному разделению генерируемых накачкой носителей заряда, что в свою очередь понижает скорость излучательной рекомбинации и может приводить к повышению пороговой концентрации неравновесных носителей.

Для увеличения коэффициента усиления ГС вместо трехслойных ZnSe/CdS/ZnSe КЯ (далее одиночные КЯ (ОКЯ)) использовались также пятислойные ZnSe/CdS/ZnSe/CdS/ZnSe КЯ (двойные КЯ (ДКЯ)).

**Третья глава** посвящена моделированию и расчету исследуемых ГС. Сначала были рассчитаны условия изоморфного роста ГС на подложке GaAs. Для компенсации упругих напряжений, возникающих в ГС с десятью КЯ CdS/ZnSe/ZnSSe, было решено повысить содержание S в барьерных слоях до  $\approx 10\%$ . Были рассчитаны толщины буферного, барьерных и покровного слоев для достижения резонансно-периодического усиления для заданной длины

волны генерации ПДЛ, а также однородность возбуждения КЯ по глубине в зависимости от длины волны накачки.

Далее был проведен теоретический расчет коэффициента оптического усиления ГС 2-го типа CdS/ZnSe в приближении резких гетерограниц КЯ, с целью определения возможности ее использования в полупроводниковых лазерах зеленого диапазона с оптической накачкой, в частности в ПДЛ. Расчет основан на согласованном решении уравнений Пуассона и Шредингера. На рисунке 2 представлены расчётные спектры оптического усиления КЯ ZnS<sub>0.1</sub>Se<sub>0.9</sub>(~90 нм)/ZnSe(3 нм)/CdS(2 нм)/ZnSe(3 нм)/ZnS<sub>0.1</sub>Se<sub>0.9</sub>(~90 нм) для двух температур при различных концентрациях неравновесных носителей. Расчетное значение коэффициента оптического усиления для данной КЯ при комнатной температуре на длине волны вблизи 525 нм при концентрации неравновесных носителей  $1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  составляет выше  $5000 \text{ см}^{-1}$  ( $\sim 10^{-3}$  на одну КЯ), что достаточно для реализации полупроводниковых лазеров зеленого диапазона на основе ГС с 10 КЯ при использовании зеркал с реально достижимыми коэффициентами отражения  $R_1 \cdot R_2 \approx 0.98$ .

Возможность достижения столь высокого значения коэффициента усиления связано с тем, что при одном и том же уровне накачки, в ГС 2-го типа, в отличие от ГС 1-го типа, будет создаваться более высокая концентрация неравновесных электронно-дырочных пар из-за большего времени жизни неравновесных носителей, что связано с меньшим значением перекрытия волновых функций электрона и дырки. Это может привести к тому, что порог генерации лазера будет примерно таким же, как в гетероструктурах 1-го типа. Основное отличие состоит в том, что пороговая концентрация неравновесных носителей будет выше в гетероструктурах 2-го типа. Это возможно, если ГС бездефектная, и в ней отсутствуют другие конкурирующие безызлучательные каналы рекомбинации.

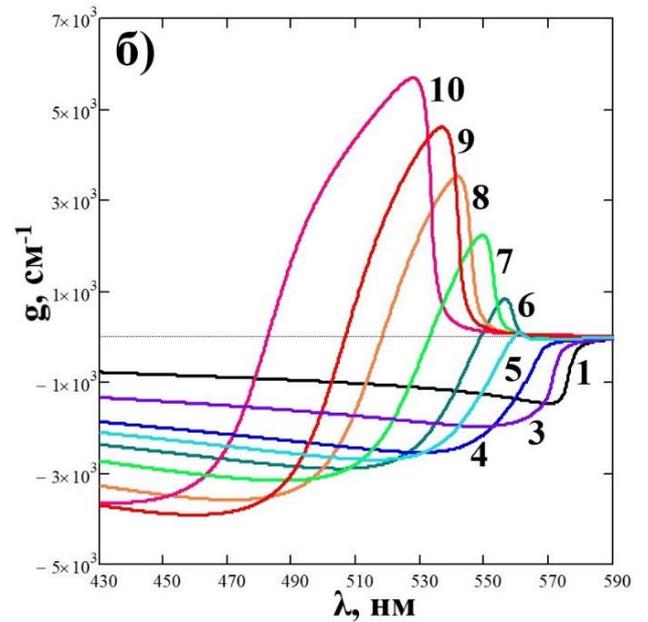
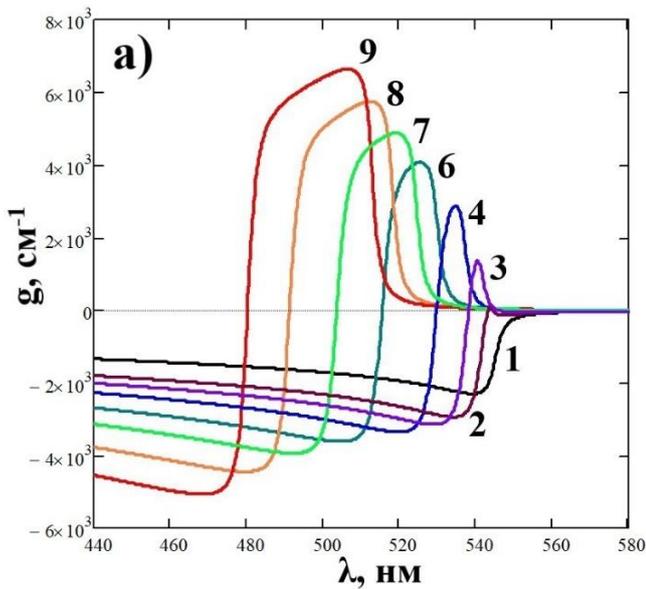


Рисунок 2 - Расчётные спектры оптического усиления ГС ZnSSe/ZnSe/CdS/ZnSe/ZnSSe с эффективной шириной КЯ  $L_{ef} = 2.23$  нм при температуре 15 К (а) и 300 К (б) и различных концентрациях неравновесных носителей: 1 –  $0.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 2 –  $0.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 3 –  $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 4 –  $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 5 –  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 6 –  $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 7 –  $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 8 –  $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 9 –  $10 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , 10 –  $15 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

Условие резкости гетерограниц может быть нарушено из-за взаимной диффузии Cd и Zn в процессе роста. В связи с этим были проведены теоретические исследования изменения зонной диаграммы ГС в результате размывания КЯ в процессе роста. Основываясь на известном из литературы коэффициенте диффузии атомов Cd  $D = 0.06 \text{ nm}^2/\text{min}$  при  $T = 440 \text{ }^\circ\text{C}$  в ГС ZnCdSe/ZnSe [16], мы рассчитали зонные диаграммы 1-й и 10-й КЯ, представленные на рисунке 3. Данные расчеты показывают, что в зависимости от времени пребывания КЯ при температуре роста, может происходить плавная перестройка от ЗД с разрывами 2-го типа в ЗД с разрывами 1-го типа.

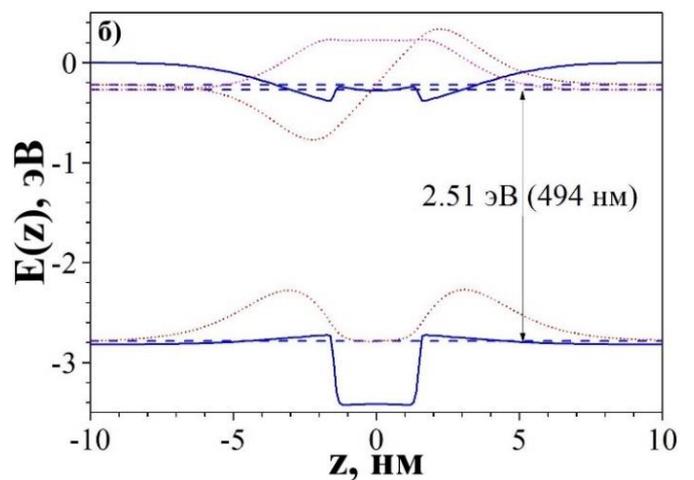
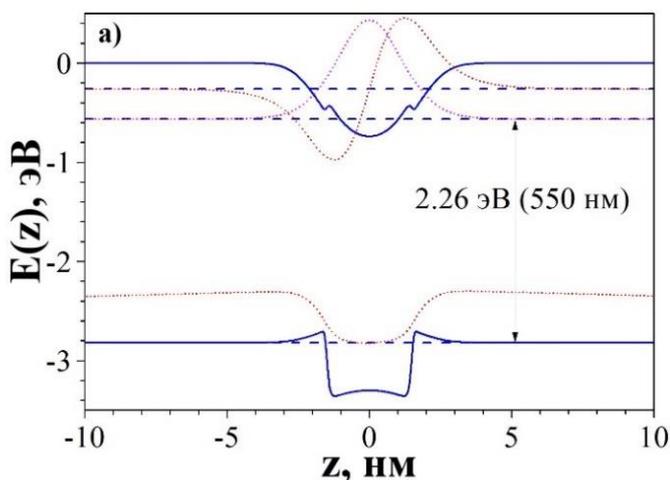


Рисунок 3 - ЗД КЯ (сплошные линии), уровни квантования (штриховые линии) и волновые функции электрона и дырки (пунктирные линии) при отжиге 6 (а) и 60 (б) минут.

Кроме того, на положение линии излучения ГС может оказывать непреднамеренное легирование ГС донорной примесью, например, примесью Ga из подложки GaAs. На рисунке 4,а представлены расчетные спектры линии излучения ГС  $\text{ZnS}_{0.1}\text{Se}_{0.9}$ (~100 нм)/ZnSe(3 нм)/CdS(3 нм)/ZnSe(3 нм)/ $\text{ZnS}_{0.1}\text{Se}_{0.9}$ (~100 нм) при различных концентрациях легирующей примеси с энергией связи электрона 26 мэВ и малых уровнях накачки [17]. Пример зонной диаграммы при концентрации примеси  $7.1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  представлен на рисунке 4,б. Видно, что коротковолновый сдвиг может быть в несколько десятков нанометров.

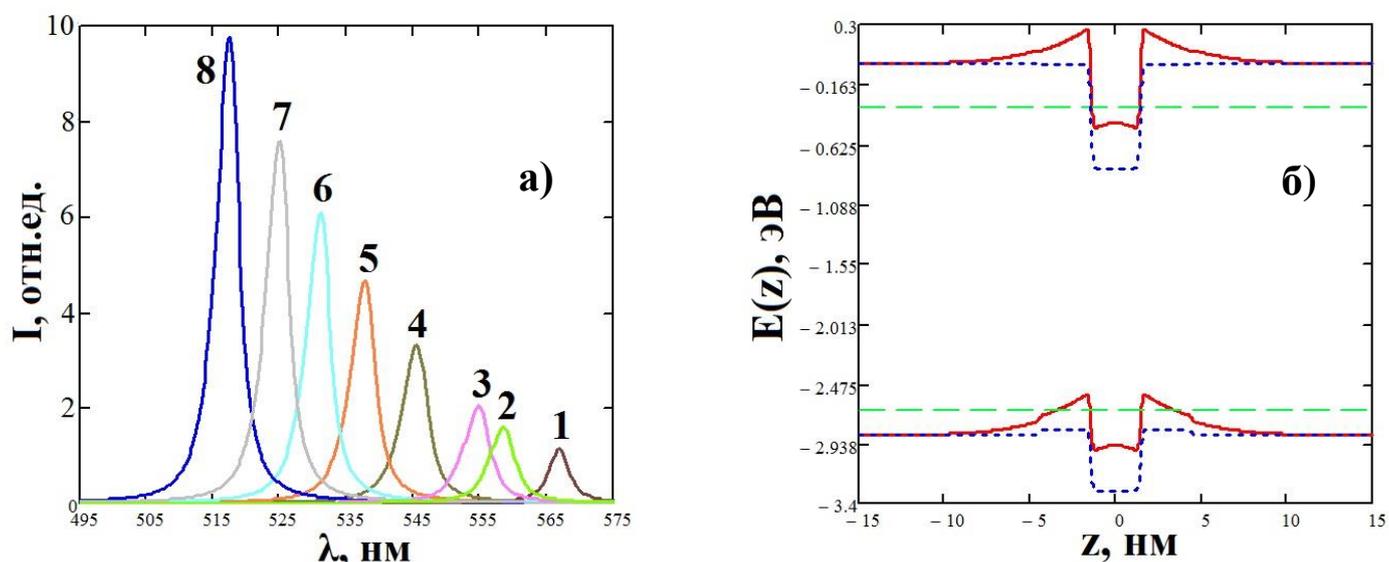


Рисунок 4 - а) Расчётные спектры спонтанного излучения ГС  $\text{ZnS}_{0.1}\text{Se}_{0.9}$ (~100 нм)/ZnSe(3 нм)/CdS(3 нм)/ZnSe(3 нм)/ $\text{ZnS}_{0.1}\text{Se}_{0.9}$ (~100 нм) для низкой температуры при следующих уровнях легирования структуры донорной примесью Ga из подложки GaAs: 1 – нелегированная ГС, 2 –  $1.1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , 3 –  $2.6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , 4 –  $1.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , 5 –  $3.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , 6 –  $7.1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , 7 –  $1.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , 8 –  $4.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ; б) Исходная ЗД ГС ZnSe(3нм)/CdS(3нм)/ZnSe(3нм) (синяя пунктирная линия). Красная сплошная линия соответствует ЗД, полученной после расчета с учетом влияния подложки на выращенную структуру (концентрация легирования равна  $7.1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). Штриховые зеленые линии соответствуют нижайшим уровням размерного квантования для электрона и дырки при учете легирование структуры.

В конце третьей главы представлены расчеты спектров усиления и люминесценции согласованной ГС  $\text{Cd}_{0.56}\text{Zn}_{0.44}\text{S}/\text{ZnS}_{0.08}\text{Se}_{0.92}$ . Показано, что на согласованной структуре, спектральная область, где может быть достигнута

лазерная генерация сильно ограничена из-за существенного сдвига линии излучения в коротковолновую (синюю) сторону с повышением интенсивности накачки до порогового значения.

**Четвертая глава** посвящена росту ГС 2-го типа CdS/ZnSe/ZnSSe методом газофазной эпитаксии из элементоорганических соединений (ГФЭЭОС) и исследованию выращенных ГС. Приведено описание лабораторной установки ГФЭЭОС и технологии роста исследуемых ГС. Рост проводился в кварцевом реакторе при атмосферном давлении из элементоорганических соединений диметил селенид  $(\text{CH}_3)_2\text{Se}$ , диметил кадмий  $(\text{CH}_3)_2\text{Cd}$ , диэтил сульфид  $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{S}$  и диэтил цинк  $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{Zn}$ . В основном использовались нелегированные подложки GaAs, разориентированные на  $10^0$  от плоскости (001) к плоскости (111)А. Была найдена оптимальная температура роста  $\sim 450$  °С. Сначала мы использовали широко используемое в литературе соотношение потоков халькогеносодержащей органики и металлосоодержащей органики VI/II  $\sim 10$  при росте всех слоев ГС. Однако было обнаружено, что при этих условиях наблюдается заметная взаимная диффузия атомов Cd и Zn, приводящее к размыванию КЯ и их неоднородности по глубине ГС. Далее было установлено, что понижение соотношения VI/II до  $\sim 2-4$  при росте слоев CdS и ZnSe существенно снижает взаимную диффузию Cd и Zn, что связано с уменьшением концентрации вакансий металла, которые в первых экспериментах стимулировали эту диффузию.

Выращенные структуры исследовались с помощью атомно-силового, просвечивающего электронного и люминесцентного микроскопов, рентгеновской дифракции, низкотемпературной катодолюминесценции и фотолюминесценции.

На рисунке 5,а представлена схема измерения тока на сколе гетероструктуры в атомно-силовом микроскопе. На рисунке 5,б представлено изображение поверхности скола одной из структур с 8 ОКЯ, полученный в АСМ в режиме измерения тока при отрицательном потенциале на ГС без освещения области контакта зонда поглощающим в ГС излучением, что говорит о присутствии свободных электронов в КЯ. При положительном потенциале, ток и изображение появляется только при освещении области контакта зонда фиолетовым ( $\lambda = 404$  нм) излучением, когда генерируются неравновесные дырки.

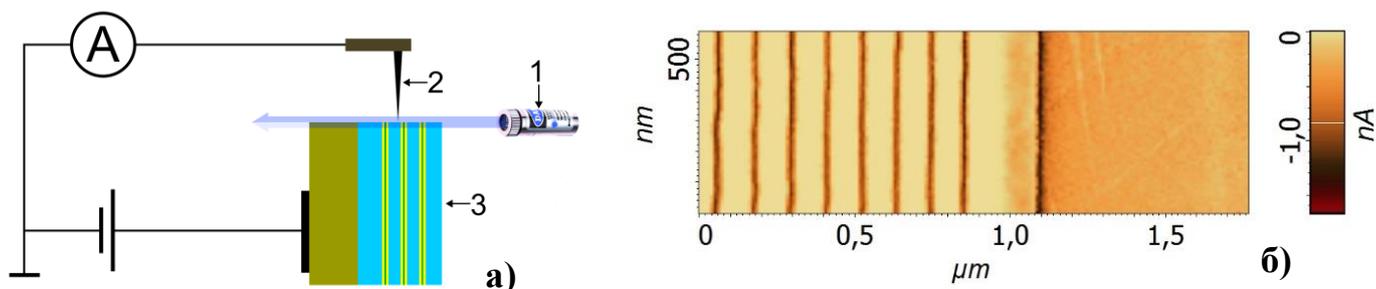


Рисунок 5 - а) Схема измерения тока на сколе гетероструктуры в атомно-силовом микроскопе. б) Изображения скола ГС с 8 ОКЯ, полученное в АСМ в режиме измерения тока при отрицательном потенциале на ГС без освещения ЛД. Подложка GaAs находится справа.

На рисунке 6 представлены изображения и усредненный по вертикали ток, протекающий через структуру, содержащую три широко расставленных слоя CdS в обкладках ZnSe. Представленные результаты свидетельствуют о пространственном разделении носителей, что доказывает принадлежность данной ГС к ГС с разрывами зон 2-го типа. Дополнительным доказательством того, что исследуемые ГС имеют разрывы зон 2-го типа, является наблюдаемый коротковолновый сдвиг линии излучения с увеличением интенсивности накачки (см. рисунок 7,а), что соответствует выполненным расчетам.

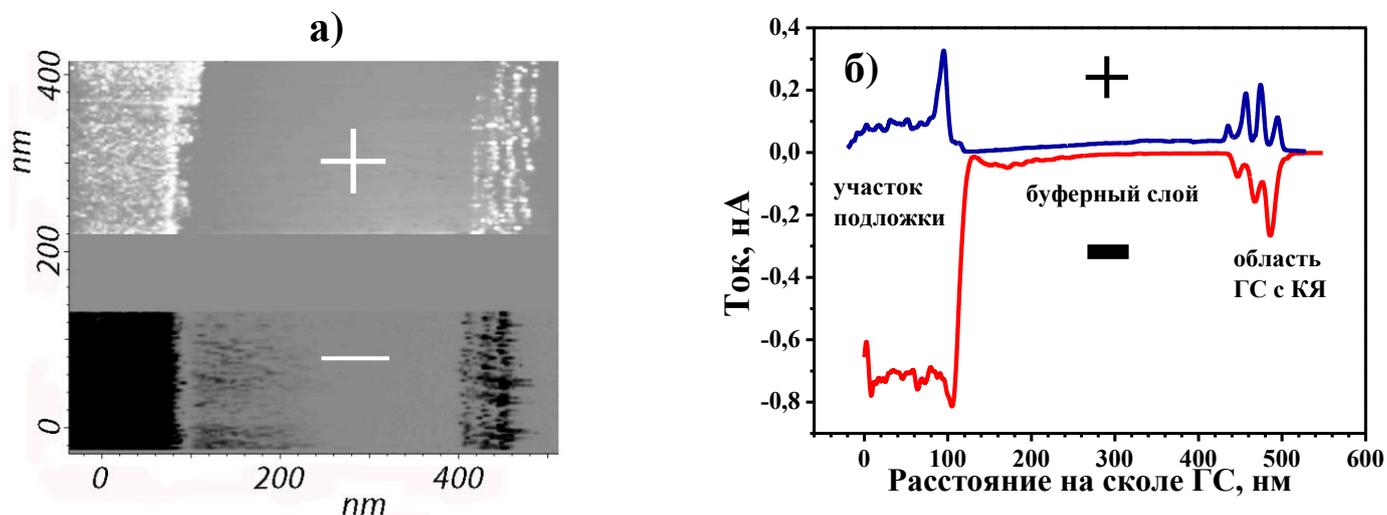


Рисунок 6 - Изображение ГС с 3 слоями CdS в обкладках ZnSe, полученное в АСМ в режиме измерения тока (а) и зависимости усредненного вдоль слоев тока от сдвига зонда по нормали к ГС (б) при отрицательном и положительном потенциалах на ГС.

ГС, выращенные при небольшом избытке халькогена над металлом ( $VI/II \sim 2-4$ ), обладают высокой однородностью КЯ по глубине структуры. Об этом свидетельствует идентичность спектров катодолюминесценции ГС с 10 КЯ, представленных на рисунке 7,б для двух энергий электронов 10 и 30 кэВ,

при которых характерная глубина возбуждения изменяется в 10 раз. При этом возбуждаются либо две верхние КЯ, либо все 10 КЯ.

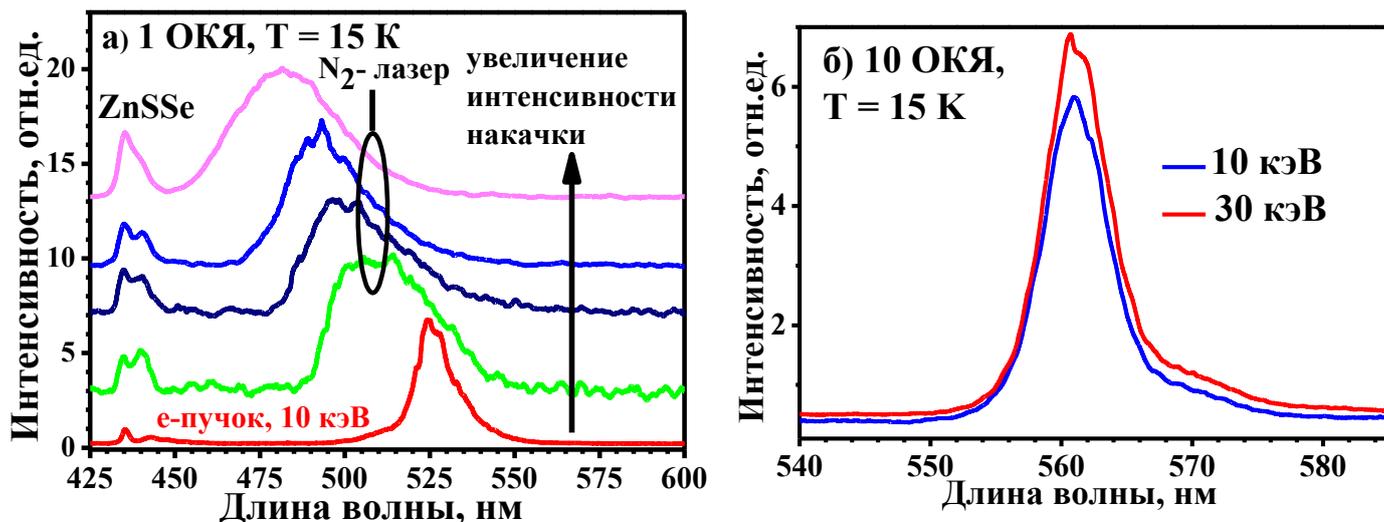


Рисунок 7 - а) Спектры фотолюминесценции ( $N_2$ -лазер с интенсивностью импульсной накачки до  $0.5 \text{ МВт/см}^2$ ) и катодолюминесценции ( $E_e=10 \text{ кэВ}$ ,  $j_e \sim 1 \text{ мА/см}^2$ ) ГС с одной одиночной КЯ ( $T = 15 \text{ К}$ ); б) спектр катодолюминесценции ГС с 10 КЯ при  $E_e=10 \text{ кэВ}$  и  $30 \text{ кэВ}$ ,  $j_e \sim 1 \text{ мА/см}^2$  ( $\sim 10 \text{ Вт/см}^2$ ) ( $T = 15 \text{ К}$ ).

Высокая периодичность выращенных ГС подтверждается рентгеноструктурным анализом (см. рисунок 8). Интенсивность сателлитов у экспериментальной кривой ( $\omega-2\theta$ )-сканирования сравнима с интенсивностью сателлитов на расчетной кривой. На рисунке 9 представлено изображение одной КЯ, полученное с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ). Виден слой CdS и соседние слои ZnSe. Изображения нижней и верхней КЯ практически идентичны.

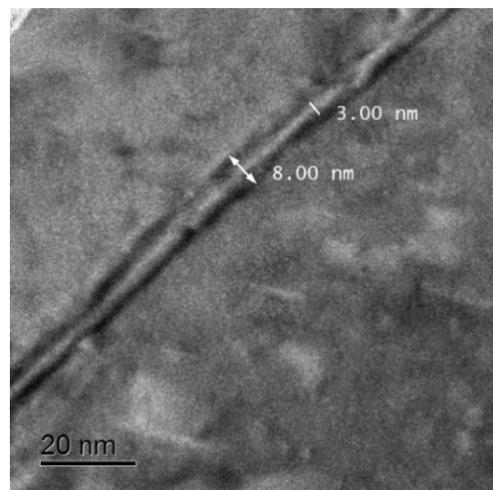
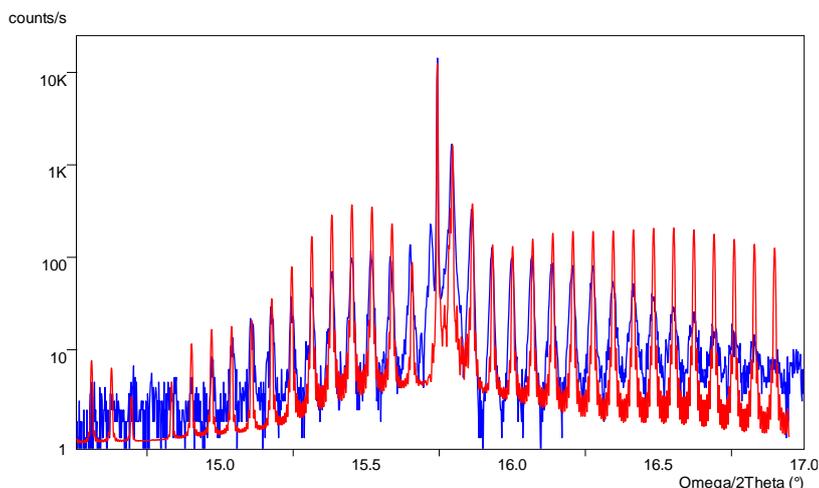


Рисунок 8 - Кривая ( $\omega-2\theta$ )-сканирования на рефлексе (002) (синяя) и расчетная кривая

Рисунок 9 - Фрагмент светлопольного изображения поперечного сечения одной

(красная) для ГС с 10 ОКЯ.

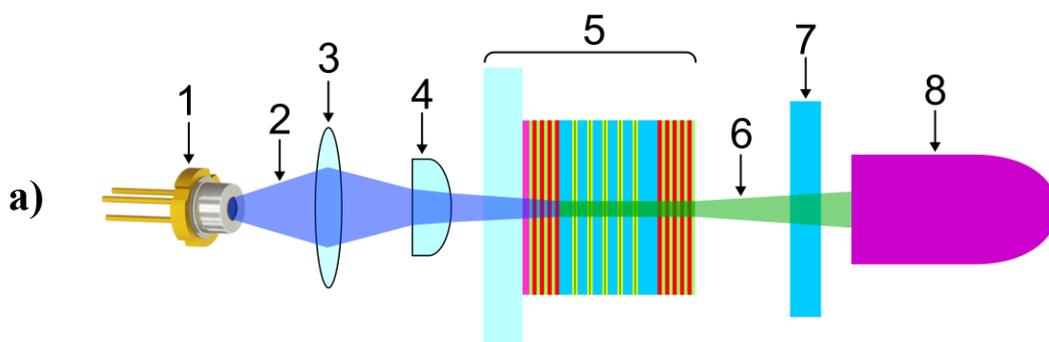
ОКЯ ГС, полученное с помощью ПЭМ.

В конце четвертой главы описана технология изготовления активных элементов (АЭ) полупроводниковых лазеров с продольной накачкой из выращенных ГС соединений  $A^2B^6$ . Она включает нанесение зеркального покрытия на поверхность ГС, приклеивание этой поверхностью к сапфировой подложке, удаление ростовой подложки GaAs. В случае лазера с микрорезонатором (МР), на освободившуюся поверхность ГС наносится второе зеркальное покрытие. В ПДЛ используется внешнее зеркало.

**Пятая глава** посвящена исследованию полупроводниковых лазеров, реализованных на основе выращенных квантоворазмерных ГС. Сначала представлены результаты исследований ПДЛ на основе «эталонных» ГС  $A^3B^5$  (InGaAs/GaAs,  $Al_xGa_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As$ ), выращенных методом ГФЭМОС в НИИ «Полюс». Эти результаты были ориентиром в исследовании полупроводниковых лазеров с продольной накачкой на основе выращенных ГС 2-го типа Cd(Zn)S/Zn(S)Se.

Далее в пятой главе приведены результаты исследования выращенных ГС 2-го типа CdS/ZnSe/ZnSSe (CdZnS/ZnSSe) в полупроводниковых лазерах как с микрорезонатором, так и с внешним зеркалом обратной связи.

На рисунке 10,а представлена оптическая схема лазера с микрорезонатором (МР) при продольной накачке излучением коммерческого лазерного диода (ЛД) на основе ГС InGaN/GaN с длиной волны  $\sim 440$  нм. Фотография эксперимента с работающим МР представлена на рисунке 10,б.



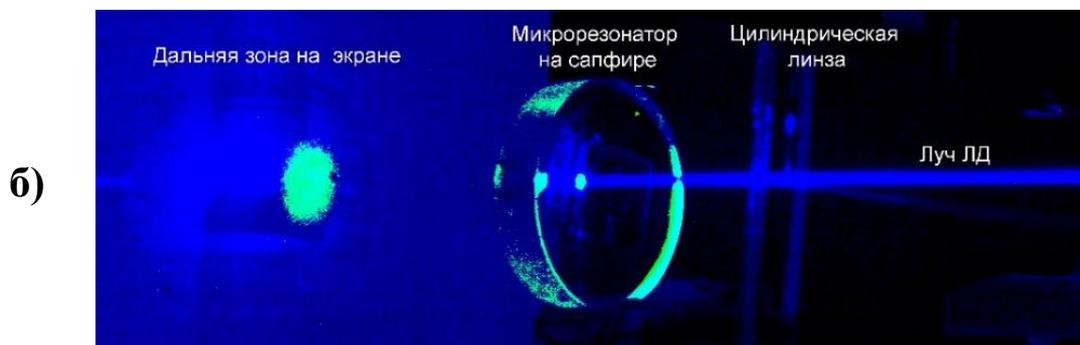


Рисунок 10 - Оптическая схема (а) и фотография работающего лазера (б). 1 – ЛД; 2 – излучение накачки; 3, 4 – линзы; 5 – АЭ МР; 6 – выходное излучение лазера с МР; 7 – фильтр для излучения МР; 8 – фотоэлемент коаксиальный (ФЭК).

На рисунке 11 представлены основные характеристики лазера с МР при продольной накачке излучением ЛД. Достигнута мощность лазера 0.32 Вт с дифференциальным КПД в 10 % на длине волны 525 нм.

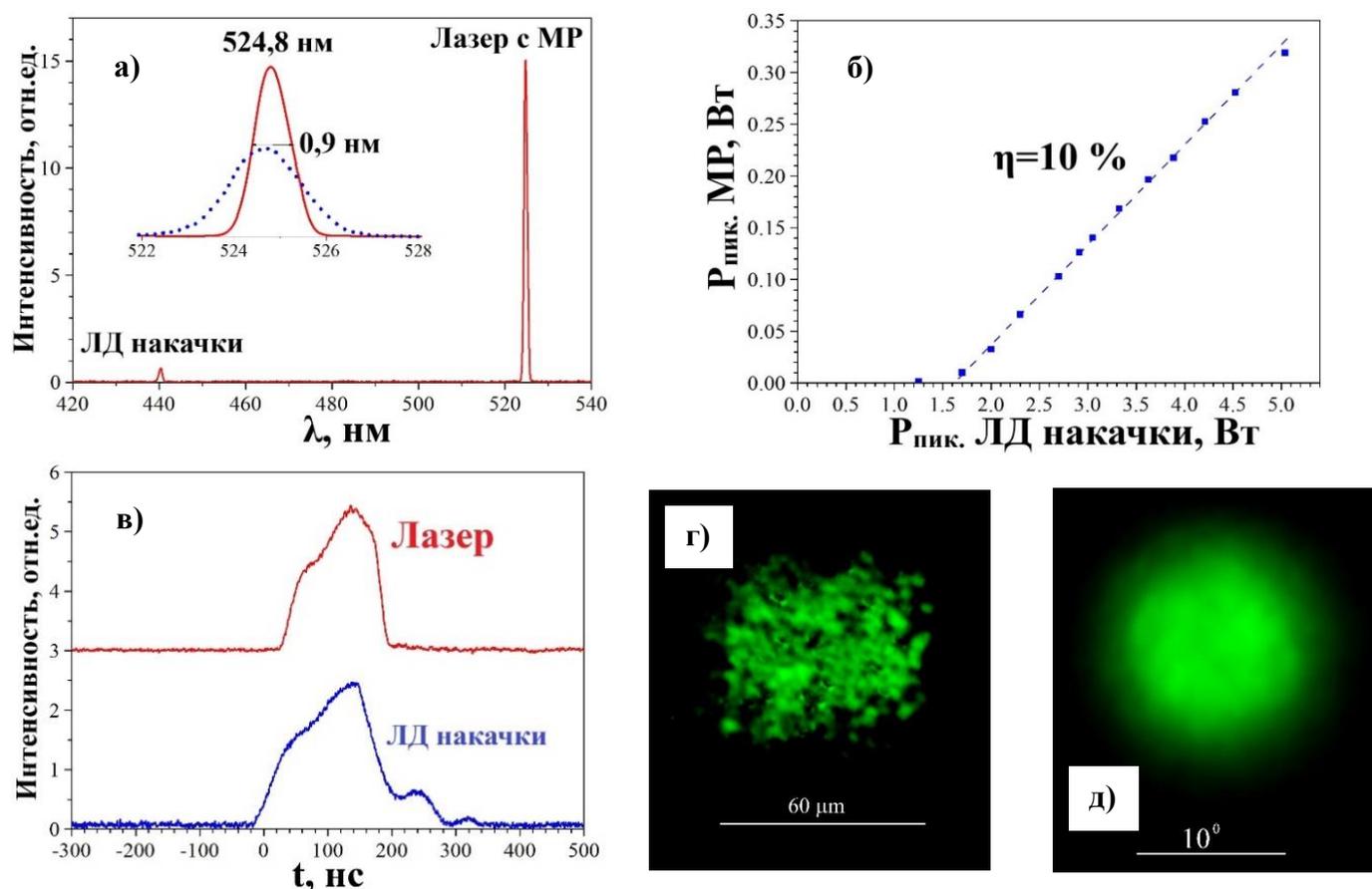


Рисунок 11 - а) Спектр МР и ЛД накачки (на вставке - спектр МР более подробно); б) зависимость пиковой мощности импульса излучения лазера от поглощенной мощности накачки; в) осциллограммы импульсов накачки и лазера; картины ближнего (г) и дальнего (д) поля лазера.

Также впервые реализован ПДЛ с оптической накачкой на основе выращенных ГС. В качестве источника накачки использовалось как

излучение N<sub>2</sub>-лазера ( $\lambda = 337$  нм), так и излучение коммерческого ЛД на основе ГС InGaN/GaN с длиной волны  $\sim 430$  нм.

На рисунке 12 представлены основные характеристики ПДЛ при продольной накачке излучением N<sub>2</sub>-лазера. При комнатной температуре и продольной накачке излучением импульсно-периодического N<sub>2</sub>-лазера, достигнута пиковая мощность излучения полупроводникового дискового лазера 0.75 Вт на длине волны  $\approx 496.5$  нм при длительности импульса 3 нс и частоте следования 100 Гц. Дифференциальный КПД составил 2.7 %. При длине резонатора 1.1 мм полный угол расходимости изменялся от 5 мрад вблизи порога генерации до 15 мрад при максимальной мощности накачки.

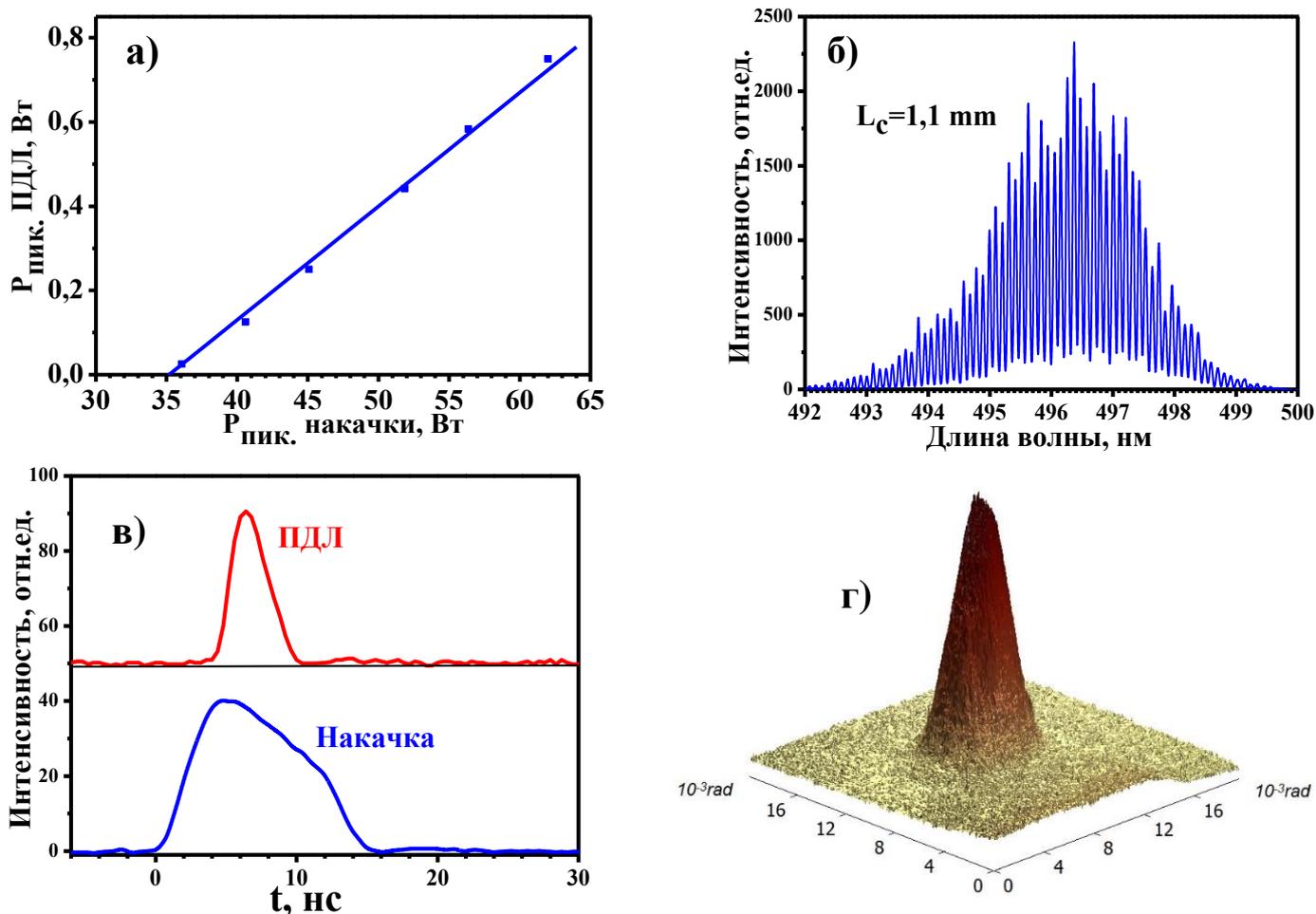


Рисунок 12 - а) Зависимость пиковой мощности лазера от пиковой вложенной мощности накачки; б) спектр генерации лазера при длине резонатора  $L_c = 1.1$  мм; в) осциллограммы импульса накачки (нижняя) и ПДЛ (верхняя); г) диаграмма расходимости лазерного пучка в дальней зоне.

Оптическая схема ПДЛ с накачкой излучением ЛД представлена на рисунке 13. В данном лазере, в отличие от ПДЛ с накачкой излучением азотного лазера, использовался составной резонатор, включающий микрорезонатор и внешнее зеркало обратной связи. Исследовались

характеристики лазера от длины резонатора. В случае резонатора, близкого к полуконцентрическому, получена импульсная мощность 57 мВт на длине волны 521 нм при дифференциальном КПД 1.5 % с углом расходимости примерно  $10^0$ . Расходимость излучения уменьшалась до 5 мрад при использовании полуконфокального резонатора.

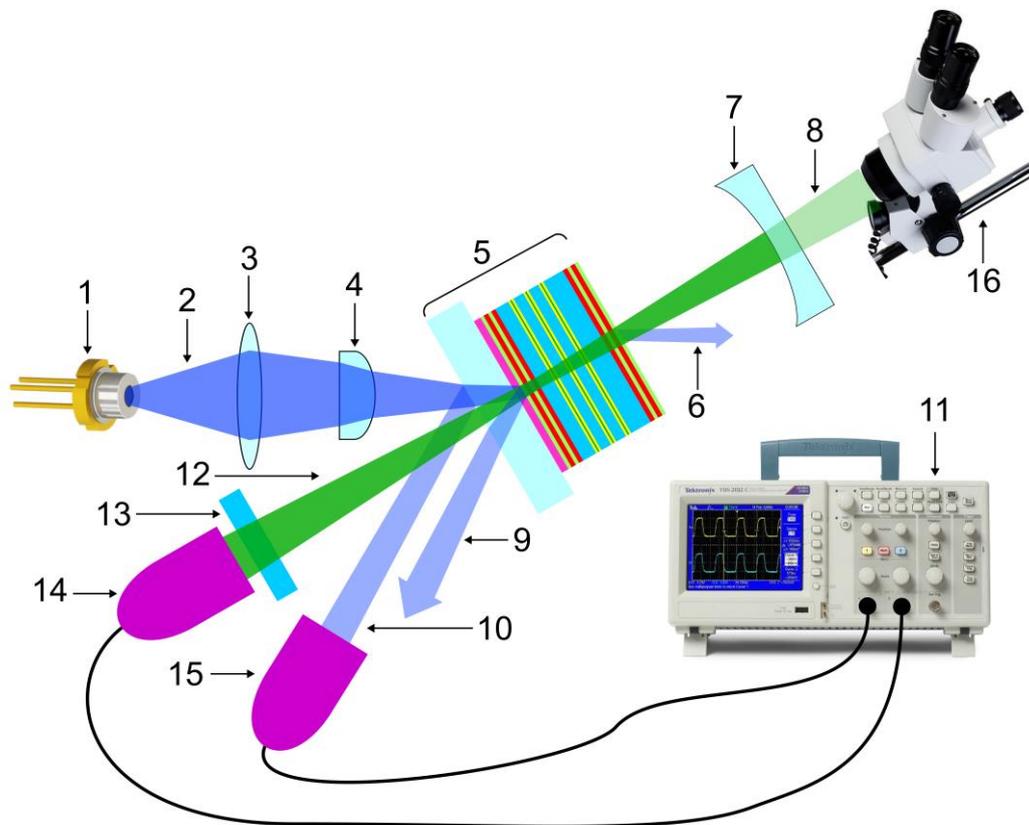


Рисунок 13 - Оптическая схема ПДЛ: 1 – ЛД; 2 – излучение накачки; 3, 4 – линзы; 5 – АЭ МР; 6 – излучение накачки, прошедшее через АЭ; 7 – внешнее зеркало; 8, 12 – выходное излучение ПДЛ; 9, 10 – излучение накачки, отраженное от сапфира и от встроенного БЗ; 11 – осциллограф; 13 – фильтр для излучения ПДЛ; 14, 15 – ФЭЖ; 16 – оптический микроскоп.

### III. Заключение

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы, заключающиеся в следующем:

1) Теоретически обоснована возможность использования гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe с разрывами зон 2-го типа в полупроводниковых лазерах с оптической накачкой. Несмотря на малое перекрытие волновых функций электрона и дырки, в гетероструктуре 2-го типа по сравнению с перекрытием в гетероструктурах 1-го типа, коэффициент оптического усиления в ней

может достигать величин  $\sim 5000 \text{ см}^{-1}$  при реально достижимых уровнях оптической накачки (менее  $100 \text{ кВт/см}^2$ ), что подтверждается на эксперименте.

2) Обнаружена взаимная диффузия атомов Cd и Zn в процессе роста гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe методом газофазного осаждения из элементоорганических соединений при оптимальных с точки зрения скорости роста и морфологии поверхности температуре  $\sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$  и соотношении VI/II  $\sim 10$ , которая приводит к неоднородности КЯ по глубине структуры и ухудшению характеристик лазеров на основе таких структур.

3) Показано, что взаимная диффузия атомов Cd и Zn существенно подавляется при выращивании тонких слоев CdS и ZnSe при пониженном соотношении VI/II  $\sim 2-4$ , что объясняется уменьшением вакансий металла вблизи КЯ, стимулирующим диффузию.

4) На основании экспериментально наблюдаемого коротковолнового сдвига линии излучения гетероструктуры с увеличением уровня возбуждения и пространственного разделения неравновесных носителей (электроны в слое CdS, а дырки в соседних слоях ZnSe), обнаруженного в зондовом микроскопе в режиме измерения сопротивления растеканию тока, установлено, что полученные при оптимальных ростовых условиях гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe, относятся к гетероструктурам с разрывами зон 2-го типа.

5) На выращенных гетероструктурах CdS/ZnSe/ZnSSe с резонансно-периодическим усилением, впервые реализованы различные (как с микрорезонатором, так и с внешним зеркалом обратной связи) полупроводниковые лазеры с продольной оптической накачкой, излучающие в зеленой области спектра. При продольной накачке микрорезонатора излучением «фиолетового» лазерного диода, достигнута импульсная мощность до  $0.32 \text{ Вт}$  на длине волны  $525 \text{ нм}$  с эффективностью  $10 \%$ . В случае полупроводникового дискового лазера, при использовании резонатора, близкого к полуконцентрическому, получена импульсная мощность  $57 \text{ мВт}$  на длине волны  $\approx 521 \text{ нм}$  с углом расходимости около  $10^\circ$ . Расходимость излучения уменьшалась до  $\sim 5 \text{ мрад}$  при использовании полуконфокального резонатора.

Основные результаты диссертационной работы получены при финансовой поддержке РФФИ, в рамках научного проекта № 20-32-90022 (Конкурс «Аспиранты» 2020 года, 2020-2022 гг.).

#### IV. Список публикаций автора по теме диссертации

##### Публикации в рецензируемых научных статьях, рекомендованных ВАК РФ и включенных в базы данных Scopus или Web of Science:

- 1) Исследование полупроводникового дискового лазера на гетероструктуре CdS/ZnSe/ZnSSe с оптической накачкой лазерным диодом / **М.Р. Бутаев**, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский, Н.Р. Юнусова // Краткие сообщения по физике. - 2023. - Т. 50. - № 2. - С. 41-50.
- 2) **Butaev, M.R.** Optical gain in CdS/ZnSe/ZnSSe heterostructures with type II band offsets / M.R. Butaev, V.I. Kozlovsky, Y.K. Skasyrsky // Optics and Laser Technology. - 2023. - Vol. 158. - P. 108890.
- 3) **Бутаев, М.Р.** Полупроводниковый лазер на основе гетероструктуры CdS/ZnSe с продольной оптической накачкой излучением лазерного диода / М.Р. Бутаев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский // Квантовая электроника. - 2022. - Т. 52. - № 4. - С. 359-361.
- 4) Полупроводниковый дисковый лазер с длиной волны излучения 780 нм на гетероструктуре  $Al_xGa_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As$ , выращенной методом МOCVD, с оптической накачкой и накачкой электронным пучком / **М.Р. Бутаев**, Я.К. Скасырский, В.И. Козловский, А.Ю. Андреев, И.В. Яроцкая, А.А. Мармалюк // Квантовая электроника. - 2022. - Т. 52. - № 4. - С. 362-366.
- 5) Cd diffusion in CdS/ZnSe MQW heterostructures grown by MOVPE for semiconductor disk lasers / **M.R. Butaev**, V.I. Kozlovsky, V.P. Martovitsky, Y.K. Skasyrsky, D.E. Sviridov // Journal of Alloys and Compounds. - 2021. - Vol. 880. - P. 160555.
- 6) **Бутаев, М.Р.** Наносекундный полупроводниковый дисковый лазер с длиной волны излучения 496.5 нм / М.Р. Бутаев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский // Квантовая электроника. - 2020. - Т. 50. - № 10. - С. 895-899.
- 7) **Бутаев, М.Р.** Полупроводниковый лазер с оптической накачкой на основе наноразмерной гетероструктуры CdS/ZnSe с разрывами зон второго типа / М.Р. Бутаев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский // Квантовая электроника. - 2020. - Т. 50. - № 7. - С. 683-687.
- 8) E-beam longitudinal pumped semiconductor laser based on ZnCdS/ZnSSe type-II multi quantum well structure / **M.R. Butaev**, V.I. Kozlovsky, D.A. Sannikov, Y.K. Skasyrsky // Journal of Physics: Conference Series. - 2020. - № 1439.
- 9) Исследование поверхностно-излучающего полупроводникового лазера с внешним зеркалом на структуре InGaAs/AlGaAs при накачке электронным пучком / А.Ю. Андреев, Т.А. Багаев, **М.Р. Бутаев**, Н.А. Гамов, Е.В. Жданова, М.М. Зверев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский, И.В. Яроцкая // Квантовая электроника. - 2019 - Т. 49. - № 10 - С. 909-912.

## Публикации в сборниках трудов международных и всероссийских конференций:

- 10) **Бутаев, М.Р.** Полупроводниковый дисковый лазер с длиной волны излучения 497 нм / М.Р. Бутаев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский // VII Международная конференция: Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2021. - Москва. - 2021. - С. 31-32.
- 11) **Бутаев, М.Р.** Оптические переходы в гетероструктуре CdS/ZnSe/ZnSSe с разрывами зон II-типа, выращенной ГФЭМОС / М.Р. Бутаев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский // 23-я Всероссийская научная молодежная конференция: Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника. - Санкт-Петербург. - 2021. - С. 56.
- 12) **Бутаев, М.Р.** Полупроводниковый лазер с микрорезонатором и оптической накачкой на основе гетероструктуры с квантовыми ямами ZnSe/CdS/ZnSe / М.Р. Бутаев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский // Мокеровские чтения: 11-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. - Москва. - 2020. - С. 149-150.
- 13) **Бутаев, М.Р.** Полупроводниковый дисковый лазер видимого диапазона на основе наноразмерной гетероструктуры с разрывами зон второго рода / М.Р. Бутаев, В.И. Козловский // 22-я Всероссийская научная молодежная конференция: Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника. - Санкт-Петербург. - 2020. - С. 74.
- 14) **Бутаев, М.Р.** Полупроводниковый дисковый лазер с оптической накачкой на основе наноразмерной гетероструктуры с квантовыми ямами ZnSe/CdS/ZnSe/CdS/ZnSe / М.Р. Бутаев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский // Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная памяти д.ф.-м.н., профессора Б.А. Билалова: Полупроводниковые материалы в современной микро- и наноэлектронике. - Махачкала. - 2020. - С. 109-111.
- 15) **Бутаев, М.Р.** Полупроводниковый лазер с продольной накачкой электронным пучком на основе наноразмерной гетероструктуры ZnCdS/ZnSSe с разрывами зон второго типа / М.Р. Бутаев, В.И. Козловский, Д.А. Санников, Я.К. Скасырский // VIII-я Международная молодежная научная школа-конференция: Современные проблемы физики и технологий. - Москва. - 2019. - С. 187-188.
- 16) Исследование полупроводникового дискового лазера на структуре InGaAs/GaAs при накачке электронным пучком / **М.Р. Бутаев**, А.Ю. Андреев, Т.А. Багаев, Н.А. Гамов, Н.И. Гладышев, М.М. Зверев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский, И.В. Яроцкая // Мокеровские чтения: 10-я Юбилейная Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. - Москва. - 2019. - С. 189-191.
- 17) Исследование полупроводникового лазера с внешним зеркалом на структуре InGaAs/GaAs при продольной накачке электронным пучком / А.Ю. Андреев, Т.А. Багаев, **М.Р. Бутаев**, Н.А. Гамов, Н.И. Гладышев, М.М. Зверев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский, И.В. Яроцкая // VII Международный симпозиум по

когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур. - Москва. - 2019. - С. 23-25.

18) **Бутаев, М.Р.** Полупроводниковый лазер с продольной оптической накачкой на основе наноразмерной гетероструктуры CdS/ZnSe с разрывами зон второго типа / М.Р. Бутаев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский // VII Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур. - Москва. - 2019. - С. 49-50.

19) **Butaev, M.R.** Cathodoluminescence of a multi quantum well heterostructure based on a CdS/ZnSe type-II / M.R. Butaev, V.I. Kozlovsky, Y.K. Skasyrsky // 7th international school and conference on optoelectronics, photonics, engineering and nanostructures «Saint-Petersburg open 2020». - 2020. - PP. 205-206.

20) Исследование поверхностно-излучающего полупроводникового лазера с внешним зеркалом на структуре InGaAs/GaAs при накачке электронным пучком / А.Ю. Андреев, Т.А. Багаев, **М.Р. Бутаев**, Н.А. Гамов, В.Б. Студенов, М.М. Зверев, В.И. Козловский, И.В. Яроцкая, Я.К. Скасырский // 12-й Белорусско-Российский семинар: «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе». - Минск. - 2019. - С. 18-21.

21) Исследование наноразмерной гетероструктуры второго типа CdS/ZnSe, выращенной методом ГФЭ МОС / **М.Р. Бутаев**, В.И. Козловский, В.П. Мартовицкий, Я.К. Скасырский, Д.Е. Свиридов // Мокеровские чтения: 12-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. - Москва. - 2021. - С. 65-66.

22) Electron-beam pumped VECSEL based on an  $Al_xGa_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As$  heterostructure emitting at 780 nm / **M.R. Butaev**, A.Yu. Andreev, I.V. Yarotskaya, A.A. Marmalyuk, V.I. Kozlovsky, Y.K. Skasyrsky // VIII Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (Памяти выдающегося российского физика П.Г. Елисеева). - Москва. - 2021. - С. 56.

23) **Butaev, M.R.** Semiconductor green laser based on MOVPE grown CdS/ZnSe/ZnSSe MQW heterostructure with longitudinal pumping by blue LD / M.R. Butaev, V.I. Kozlovsky, Y.K. Skasyrsky // VIII Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (Памяти выдающегося российского физика П.Г. Елисеева). - Москва. - 2021. - С. 57.

24) **Бутаев, М.Р.** Исследование полупроводникового лазера с продольной оптической накачкой на основе гетероструктуры CdS/ZnSe с разрывами зон второго типа / М.Р. Бутаев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский // VIII Международная конференция: «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2022, посвященная 100-летию со дня рождения лауреата Нобелевской премии по физике Басова Н. Г. - Москва. - 2022. - С. 39.

25) Исследование полупроводникового дискового лазера с внутривибраторным удвоением частоты на основе гетероструктуры InGaAs/AlGaAs, выращенной методом МОСVD / **М.Р. Бутаев**, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский, А.Ю. Андреев, И.В. Яроцкая, А.А. Мармалюк // 13-я Международная Научно-

практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ электроники «Мокеровские чтения», посвященная 80-и летию со дня рождения Мокерова В.Г. - Москва. - 2022. - С. 162.

26) **Бутаев, М.Р.** Наноразмерная гетероструктура с квантовыми ямами CdS/ZnSe для полупроводникового дискового лазера / М.Р. Бутаев, В.И. Козловский // 21-ая Всероссийская молодежная конференция: Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника. - Санкт-Петербург. - 2019. - С. 57.

27) **Бутаев, М.Р.** VECSEL зеленого диапазона (522 нм) с оптической накачкой / М.Р. Бутаев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский // 7-й симпозиум: Полупроводниковые лазеры: физика и технология. - Санкт-Петербург. - 2022. - С. 39.

28) Самосогласованное решение уравнений Шредингера и Пуассона в квантоворазмерной гетероструктуре 2-го типа CdS/ZnSe / Н.Р. Юнусова, В.И. Козловский, **М.Р. Бутаев**, Я.К. Скасырский // II Всероссийской научно-технической конференции, посвященной памяти д.ф.-м.н., профессора Б.А. Билалова: Полупроводниковые материалы в современной микро- и наноэлектронике. - Махачкала. - 2022. - С. 109.

### Список литературы

1. Okhotnikov, O.G. Semiconductor Disk Lasers. Physics and Technology: monography / O.G. Okhotnikov ; Wiley-VCH. - 2010. - 330 p.
2. Guina, M. Optically pumped VECSELs: review of technology and progress / M. Guina, A. Rantamaki, A. Harkonen // J. Phys. D: Appl. Phys. - 2017. - 50. - 383001.
3. Rahimi-Iman, A. Recent advances in VECSELs / A. Rahimi-Iman // Journal of Optics. - 2016. - 18 (9). - 093003.
4. Jetter, M. Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers. VECSEL Technology and Applications: monography / M. Jetter, P. Michler ; Wiley-VCH. - 2022. - 410 p.
5. 106 W continuous-wave output power from vertical-external-cavity surface-emitting laser / B. Heinen [et al.] // Electronics Letters. - 2012. - Vol. 48. - No. 9.
6. DBR-free optically pumped semiconductor disk lasers / Z. Yanga [et al.] // Proc. SPIE 9349, Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELs). - 2015. - V. 934905.
7. Comparison of single-side and double-side pumping of membrane external-cavity surface-emitting lasers / H. Kahle [et al.] // Optics Letters. - 2019. - 44 (5). - PP. 1146-1149.
8. The optically pumped semiconductor membrane external-cavity surface-emitting laser (MECSEL): A concept based on a diamond-sandwiched active region / H. Kahle [et al.] // Proc. of SPIE. - 2017. - Vol. 10087.
9. High-Power DBR-Free Membrane Semiconductor Disk Lasers / Z. Yang, D. Follman, A. R. Albrecht, P. Heu, G. D. Cole, M. Sheik-Bahae // Conference Paper. - 2018.

10. 16 W DBR-free membrane semiconductor disk laser with dual-SiC heatspreader / Z. Yang [et al.] // Electronics letters. - 5th April 2018. - Vol. 54. - No. 7. - PP. 430-432.
11. Phung, H.-M. Semiconductor Membrane External-Cavity Surface-Emitting Lasers (MECSELs): Academic dissertation / Hoy-My Phung. - Tampere University, 2021.
12. Ivanov, S.V. Molecular Beam Epitaxy of Wide Gap II-VI Laser Heterostructures / S.V. Ivanov, S.V. Sorokin, I.V. Sedova // Elsevier Inc., article in the book «Molecular Beam Epitaxy». - 2018.
13. Дискковый полупроводниковый лазер на гетероструктуре Zn(Cd)Se/ZnMgSSe с накачкой электронным пучком / В.И. Козловский, П.И. Кузнецов, Д.Е. Свиридов, Г.Г. Якущева // Квантовая электроника. - 2012. - Т. 42. - № 7. - С. 583-587.
14. Наноструктура на основе ZnSe/ZnMgSSe для лазерной электронно-лучевой трубки в синей области спектра / И.П. Казаков, В.И. Козловский, В.П. Мартовицкий [и др.] // Квантовая электроника. - 2007. - Т. 37. - № 9. - С. 857-862.
15. Козловский, В. И. Полупроводниковый лазер на основе квантоворазмерных гетероструктур с продольной накачкой электронным пучком: Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Козловский Владимир Иванович. - Москва, 2009. - 300 с.
16. Salazar-Tovar, M. U. / Observation of a non-constant Cd diffusion coefficient during the thermal annealing of Zn<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Se quantum wells / M. U. Salazar-Tovar, F. S. I. Hernansez-Calderon // J. of Alloys and Compounds. - 2020. - 846. - 155698.
17. Оптические свойства полупроводников: учеб. пособие / В.И. Гавриленко, А.М. Грехов, Д.В. Корбутяк, В.Г. Литовченко ; Киев, Наукова думка. - 1987. - 429 с.