

На правах рукописи



Мельниченко Иван Алексеевич

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ И ДИНАМИКИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА НА
ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОДИСКОВЫХ ЛАЗЕРОВ С КВАНТОВОРАЗМЕРНОЙ
АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ НА ОСНОВЕ InGaAs/GaAs

1.3.11. Физика полупроводников

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2026

Диссертационная работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук».

Научный руководитель:

Крыжановская Наталья Владимировна

доктор физико-математических наук, зав. Международной лабораторией квантовой оптоэлектроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики».

Официальные оппоненты:

Биленко Игорь Антонович – доктор физико-математических наук, профессор физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Ладугин Максим Анатольевич – доктор физико-математических наук, начальник научно-производственного комплекса АО «НИИ Полус им. М.Ф. Стельмаха».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук (НТЦ микроэлектроники РАН).

Защита диссертации состоится 01 октября в 16:00 ч. на заседании диссертационного совета АУ 02.01 СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, корп. 3, литер А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова и на сайте университета www.spbau.ru в разделе «Диссертационный совет» - «Информация о защитах».

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, корп. 3, литер А на имя ученого секретаря диссертационного совета АУ 02.01

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета АУ 02.01



к.ф.-м.н. Шубина К. Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования

Рост требований к скорости и энергоэффективности обработки и передачи информации в современных электронных системах приводит к необходимости поиска альтернатив традиционным электрическим межсоединениям. Передача данных с использованием электрических сигналов ограничена ростом тепловых потерь, паразитными ёмкостями и сопротивлениями, а также увеличением энергопотребления при масштабировании интегральных схем. В этой связи технологии оптической передачи данных рассматриваются как эффективная альтернатива, обеспечивающая высокую пропускную способность, низкие потери и возможность интеграции в составе фотонных платформ.

Ключевым элементом интегральных фотонных систем являются компактные полупроводниковые источники когерентного излучения. Перспективным классом таких источников являются полупроводниковые микрорезонаторы аксиальной симметрии — микродиски, микрокольца и другие структуры, в которых реализуется эффективное ограничение электромагнитного поля в трех измерениях, что позволяет поддерживать высокодобротные моды шепчущей галереи (МШГ). Основными преимуществами таких микрорезонаторов являются их компактность (диаметр в диапазоне нескольких микрон), высокая добротность (порядка 10^5 – 10^6) и возможность эффективного латерального вывода света. При этом полупроводниковые аксиальные микролазеры на основе материалов группы A_3B_5 представляют собой особенно перспективную платформу благодаря хорошо разработанной технологии их выращивания и пост-ростовой обработки. Среди ключевых преимуществ МШГ-микролазеров на основе A_3B_5 можно выделить простоту эпитаксиального синтеза, аналогичную росту традиционных лазеров с резонатором Фабри-Перо, возможность эффективного управления составом и размерами активной области, открывающие широкие возможности управления профилями запрещенной зоны и показателя преломления, а также формирования наноструктур различного типа.

При уменьшении размеров микрорезонаторов существенно возрастает вклад поверхностных эффектов. В микродисковых лазерах и других структурах, изготавливаемых с использованием травления полупроводникового материала, боковые стенки формируют дополнительные каналы безызлучательной рекомбинации. В сочетании с латеральным транспортом носителей заряда это приводит к потерям носителей заряда вблизи периферии резонатора, вызывая изменение характеристик МШГ и рост порогового тока. Это особенно важно в силу того, что для идеального резонатора лазерная генерация реализуется на тех МШГ, у которых максимум интенсивности электромагнитного поля сосредоточен в узкой

области у латеральной стенки резонатора. Поэтому обеднение приповерхностной области носителями заряда обуславливает изменение номера лазерной моды и сдвиг резонанса «вглубь» резонатора, ближе к его центральной части. Таким образом, поверхность может существенно влиять на порядок (номер) лазерной МШГ. Кроме того, взаимодействие моды шепчущей галереи с подложкой может приводить к дополнительным потерям вследствие утекания излучения.

Выбор типа активной области существенно определяет чувствительность характеристик лазеров к безызлучательной рекомбинации. Широко используемые квантовые точки (КТ) InAs/GaAs или InAs/InGaAs, формируемые по механизму Странского-Крастанова, обладают высокой степенью локализации носителей заряда, что снижает влияние поверхностных состояний на характеристики лазерной генерации. Использование КТ позволяет существенно ограничить влияние обеднения носителями заряда приповерхностной области вследствие существенной локализации носителей внутри КТ. В этом случае МШГ, имеющая минимальный радиальный порядок и прижатая к боковой поверхности МДЛ становится очень чувствительной к локальному изменению показателя преломления среды, окружающей резонатор. Эванесцентный характер спада электромагнитного поля МШГ за границей боковой поверхности МДЛ приводит к высокой чувствительности спектрального положения моды к окружению резонатора, благодаря чему может быть реализован компактный и высокочувствительный сенсор изменения показателя преломления окружающей среды. Однако такие КТ, формируемые по механизму Странского-Крастанова, характеризуются сравнительно низкой поверхностной плотностью и ограниченным материальным усилением, что требует складирования большого числа слоёв для достижения необходимого уровня модового усиления и выходной мощности. Это усложняет эпитаксиальный рост и повышает требования к контролю толщин и состава слоёв. В этой связи альтернативной квантоворазмерной областью являются высокоплотные массивы InGaAs/GaAs КТ, формируемых при росте методом металорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) на разориентированных подложках GaAs (001) без реализации классического механизма Странски–Крастанова. Их формирование связано с локальным утолщением слоя InGaAs в области ступеней подложки и перераспределением индия вследствие миграции адатомов, что приводит к образованию высокоплотных островковых структур, промежуточных по свойствам между квантовыми ямами (КЯ) и КТ. Преимущества таких наноструктур обсуждаются в литературе на протяжении нескольких последних лет [1–6], они включают в себя возможность складирования более 5 слоёв без существенного увеличения дефектности структуры и существенное увеличение материального усиления по сравнению с КТ InAs/InGaAs. Такие

плотные массивы КТ часто называют в литературе наноструктуры гибридной размерности или квантовые ямы-точки (КЯТ), поскольку они сочетают в себе некоторые свойства как классических КТ (трехмерную локализацию носителей заряда), так и КЯ (высокое оптическое усиление). Микродисковые лазеры (МДЛ) на основе КЯТ демонстрируют высокие значения выходной мощности и хорошую температурную стабильность [5]. В то же время степень локализации носителей в КЯТ ниже, чем в КТ InAs/InGaAs, что может повышать чувствительность данных структур к поверхностной безызлучательной рекомбинации. Несмотря на активное развитие оптоэлектронных приборов на основе КЯТ InGaAs/GaAs, систематические исследования динамики время-разрешённой фотолюминесценции, включая времена захвата носителей на квантоворазмерные состояния КЯТ и времена спада интенсивности излучения в объёмных и мезаструктурах, в литературе практически отсутствуют. Другой альтернативой является использование КЯ InGaAsN/GaAs в качестве активной области микродисковых лазеров [7,8]. Торцевые лазеры, реализованные на основе КЯ InGaAsN/GaAs, обеспечивают возможность лазерной генерации в широком спектральном диапазоне от 1,1 до 1,6 мкм. Однако, в случае использования КЯ InGaAsN/GaAs остается проблема слабой локализации носителей заряда внутри КЯ и, как следствие, высокая скорость поверхностной рекомбинации.

Цель работы

Определение влияния поверхностных явлений и динамики носителей заряда на характеристики микродисковых лазеров с квантовыми ямами-точками и другими типами квантоворазмерной активной области на основе материалов АЗВ5.

Задачи работы

1. Исследовать кинетику время-разрешённой фотолюминесценции гетероструктур с КЯТ InGaAs/GaAs в диапазоне температур 10-300 К и определить времена жизни и захвата носителей заряда в эпитаксиальной структуре.
2. Определить скорость поверхностной рекомбинации на боковой поверхности микрорезонатора и длину латеральной диффузии в КЯТ InGaAs/GaAs на основе сопоставления экспериментальных данных и численного моделирования люминесцентных характеристик мезаструктур диаметром от 1,25 до 19 мкм.
3. Исследовать влияние пассивации поверхности методами атомно-слоевого осаждения и золь-гель технологии на оптические и лазерные характеристики мезаструктур с различным типом активной области (КТ, КЯТ, КЯ) и микродисковых лазеров (МДЛ) с КЯ InGaAsN/GaAs.

4. Исследовать влияние обеднения приповерхностной области и утекания мод в подложку на азимутальный и радиальный порядок лазерной МШГ в МДЛ с активной областью на основе КЯТ InGaAs/GaAs.
5. Исследовать работу МДЛ с КТ InAs/InGaAs/GaAs в качестве сенсоров изменения показателя преломления окружающей среды.

Научная новизна работы

1. Впервые исследованы фундаментальные временные характеристики гетероструктур с КЯТ InGaAs/GaAs методом время-разрешённой спектроскопии ФЛ с ап-конверсией; определены времена нарастания и спада ФЛ в диапазоне температур 10-300 К для эпитаксиальной гетероструктуры с одиночным слоем КЯТ InGaAs/GaAs.
2. На основе совместного анализа экспериментальных зависимостей интегральной интенсивности ФЛ и времени спада ФЛ от диаметра мезоструктур впервые получено аналитическое выражение для определения скорости поверхностной рекомбинации на латеральных стенках мезоструктур. Определены значения скорости поверхностной рекомбинации, длины диффузии и коэффициента диффузии для структур с КЯТ InGaAs/GaAs.
3. Впервые экспериментально исследована эффективность пассивации мезоструктур диаметром от 1,25 до 19 мкм с активной областью на основе КТ InAs/InGaAs, КЯТ InGaAs/GaAs и КЯ InGaAs/GaAs методами атомно-слоевого осаждения Al_2O_3 и золь-гель технологии SiO_2 .
4. Впервые реализована пассивация МДЛ с активной областью на основе КЯ InGaAsN/GaAs методом золь-гель осаждения SiO_2 .
5. Впервые численно исследовано влияние обеднения носителей в приповерхностном слое, обусловленного поверхностной рекомбинацией, на азимутальный и радиальный порядок лазерных МШГ в МДЛ.
6. Впервые экспериментально получены распределения интенсивности лазерных МШГ в подложке GaAs вблизи МДЛ с активной областью КЯТ InGaAs/GaAs методом сканирующей ближнепольной оптической микроскопии. Численно определён фактор модового усиления для высоких радиальных порядков МШГ и показано его ограничение вследствие утекания излучения в подложку.
7. Впервые продемонстрирована чувствительность МДЛ с активной областью на основе КТ InAs/InGaAs к изменению показателя преломления водных растворов NaCl и глюкозы.

Теоретическая и практическая значимость результатов

1. Теоретически обоснован и экспериментально апробирован подход к определению скорости поверхностной рекомбинации и параметров диффузии носителей заряда, который может быть использован для количественной оценки потерь, связанных с безызлучательной рекомбинацией в мезоструктурах различной геометрии.
2. Экспериментально апробирован метод пассивации поверхности МДЛ с помощью золь-гель метода. Для мезоструктур с КЯ InGaAs/GaAs диаметром 1,25 мкм, пассивированных методом золь-гель SiO₂, продемонстрировано увеличение интегральной интенсивности ФЛ до 50 раз.
3. Продemonстрировано, что пассивация SiO₂ методом золь-гель позволяет получить лазерную генерацию в МДЛ с КЯ InGaAsN/GaAs с оптической накачкой при комнатной температуре, а также снизить более чем в 2 раза порог лазерной генерации для МДЛ с инжекционной накачкой.
4. Апробирована методика визуализации утекания оптической моды МДЛ в подложку посредством сканирования латеральной области МДЛ диаметром 50 мкм с КЯТ InGaAs/GaAs, а также скола поверхности подложки рядом с МДЛ с помощью сканирующей ближнепольной оптической микроскопии.
5. С использованием модельных представлений, вычислено значение модового усиления для МШГ различных радиальных порядков и показано, что радиальный порядок МШГ, через которую происходит генерация, определяется совместным влиянием утекания моды в подложку, ограничивающей генерацию мод высоких радиальных порядков, и снижения концентрации носителей заряда в приповерхностной области, подавляющей возможность лазерной генерации МШГ малых радиальных порядков. Расчётные значения согласуются с экспериментальными данными по распределению интенсивности в дальнем поле и межмодовому расстоянию.
6. Показано, что степень чувствительности микродисковых лазеров на основе материалов АЗВ5 к поверхностной безызлучательной рекомбинации снижается по мере уменьшения квантовой размерности активной области: наибольшая чувствительность характерна для квантовых ям (2D), наименьшая – для квантовых точек (0D), формируемых по механизму Странского-Крастанова; квантовые ямы-точки проявляют промежуточную степень чувствительности, что согласуется с гибридным (2D/0D) характером их размерности.
7. Показана чувствительность МДЛ к изменению показателя преломления окружающей среды, что подтверждает возможность их использования в качестве

компактных рефрактометрических сенсоров. Максимальная чувствительность составила 9,4 нм/RIU.

Методология и методы исследования

1. Молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ) и МОГФЭ: рост полупроводниковых структур с КЯТ InGaAs/GaAs, с КТ InAs/InGaAs, а также КЯ InGaAs/GaAs и InGaAsN/GaAs состава.
2. Методы оптической диагностики: метод время-разрешенной спектроскопии фотолюминесценции с ап-конверсией, спектроскопия фотолюминесценции и электролюминесценции, сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия.
3. Методы формирования микролазеров: жидкостное травление и плазмохимическое травление.
4. Методы формирования пассивирующих слоев: осаждения пассивирующих слоев с помощью атомно-слоевого осаждения и золь-гель технологии.

Положения, выносимые на защиту

1. Время захвата носителей заряда в квантовые яма-точки $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x=0,35-0,45$) из состояний матрицы GaAs не превышает 10 пс при температуре 300 К; время спада фотолюминесценции на основном переходе при температуре 10 К определяется излучательным временем и составляет 0,7 нс, а с увеличением температуры до комнатной возрастает до 4,5 нс вследствие выброса носителей заряда в матрицу GaAs.
2. По характеристикам латерального транспорта структуры с квантовыми яма-точками $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x=0,35-0,45$) занимают промежуточное положение между структурами с квантовыми ямами InGaAs/GaAs ($x=0,15-0,25$) и структурами с квантовыми точками InAs/GaAs: при комнатной температуре скорость поверхностной рекомбинации носителей составляет 3×10^4 см/с, длина амбиполярной диффузии носителей заряда в плоскости слоя квантовых яма-точек 1,3 мкм.
3. В инжекционных дисковых микролазерах на основе квантовых яма-точек $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x=0,35-0,45$) факторами, определяющими порядок лазерной моды шепчущей галереи, являются поверхностная рекомбинация носителей, ограничивающая генерацию мод низких радиальных порядков, и утеkanie электромагнитного поля в подложку, ограничивающее генерацию мод высоких радиальных порядков.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректной постановкой задач, использованием современных и обоснованных экспериментальных методов, внутренней непротиворечивостью полученных результатов, их согласием с известными

модельными представлениями и выполненными расчетами, подтверждается публикациями в рецензируемых научных изданиях. Воспроизводимость данных при повторно проводимых измерениях и внутренняя согласованность результатов также подтверждают достоверность полученных результатов.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук», международной лаборатории квантовой оптоэлектроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», а также в докладах на международных школах, конференциях и симпозиумах:

1. «Генерация лазерного излучения микродисковых резонаторов в растворах NaCl и $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ », 22-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 23-27 ноября 2020, г. Санкт-Петербург;
2. «Исследование фотолюминесценции InGaAs/GaAs квантовых ям-точек с временным разрешением методом ап-конверсии», международная конференция ФизикА.СПб, 17-21 октября 2022, г. Санкт-Петербург;
3. «Исследование пассивации мез с InGaAs/GaAs квантовой ямой с помощью Al_2O_3 слоев нанесенных методом атомно-слоевого осаждения», IX всероссийский молодежный научный форум «Open Science 2022», 16-18 ноября 2022, г. Гатчина;
4. «Пассивация мез с InGaAs/GaAs квантовой ямой с помощью Al_2O_3 слоев нанесенных методом атомно-слоевого осаждения», 65-я всероссийская научная конференция МФТИ, 3-8 апреля 2023, г. Москва;
5. «Optical studies of InGaAs/GaAs quantum well mesa structures treated with hydrogen H_2 plasma and passivated via Al_2O_3 layer», конференция с международным участием "Saint-Petersburg OPEN 2023", 23-26 мая 2023, г. Санкт-Петербург;
6. «Исследование пассивации меза-структур на основе GaAs с помощью водородной плазмы и осаждения слоя Al_2O_3 », российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника 2023», 4-8 сентября 2023, г. Новосибирск;

7. «Температурные зависимости фотолюминесценции InGaAs/GaAs квантовых ям-точек с временным разрешением», международная конференция Физика.СПб/2023, 23-27 октября 2023, г. Санкт-Петербург;
8. «Study of mode leakage into substrate in microdisk lasers», конференция с международным участием "Saint-Petersburg OPEN 2024", 14-17 мая 2024, г. Санкт-Петербург;
9. «Исследование влияния оптических потерь на моды в дисковых микролазерах с плотными массивами квантовых точек InGaAs/GaAs», международная конференция Физика.СПб/2024, 21-25 октября 2024, г. Санкт-Петербург;
10. «Optical studies of InGaAs/GaAs quantum well mesa structures treated with sol-gel SiO₂ layer», конференция с международным участием "Saint-Petersburg OPEN 2025", 19-23 мая 2025, г. Санкт-Петербург;
11. «Влияние золь-гель пассивации SiO₂ на оптические характеристики InGaAsN/GaAs микролазеров», 15-я Международная научно-техническая конференция "Квантовая электроника", 18–20 ноября 2025, г. Минск;
12. «Улучшение характеристик микродисковых лазеров при пассивации их поверхности SiO₂ слоем с помощью золь-гель технологии», 27-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 24 – 28 ноября 2025, г. Санкт-Петербург;

Публикации

По теме диссертации опубликовано 8 работ в журналах, индексируемых в WoS и Scopus. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад

Личный вклад состоял в выработке, совместно с научным руководителем, целей и задач диссертационной работы, анализе литературы по теме диссертации, выработке программы исследований и самостоятельном проведении экспериментов по исследованию спектральных, мощностных и время-разрешенных характеристик исследуемых полупроводниковых мезоструктур и микролазеров, обработке результатов измерений, разработке моделей для описания наблюдаемых процессов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и списка литературы. Работа содержит 125 страниц машинописного текста, включая 51 рисунок, 2 таблицы и библиографию из 190 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, определены цель и задачи работы, приведены теоретическая и практическая значимость полученных результатов, изложена их научная новизна. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, и приведены сведения об апробации работы, а также о структуре и объеме диссертации.

В первой главе представлен обзор литературных источников, посвящённых полупроводниковым микролазерам на основе мод шепчущей галереи (МШГ), особенностям формирования их активной области и современным подходам к пассивации поверхности полупроводниковых структур. Рассмотрены предпосылки развития фотонных интегральных схем и роль компактных источников когерентного излучения в системах оптической передачи и обработки информации. Проанализированы основные типы микрорезонаторов с МШГ, включая микродисковые лазеры (МДЛ) и микрокольцевые лазеры, а также их преимущества, связанные с малыми объёмами мод, высокой добротностью, низким энергопотреблением и возможностью интеграции в планарные фотонные схемы. Отдельное внимание уделено особенностям реализации МШГ микролазеров на основе соединений A_3B_5 , обеспечивающих возможность формирования активных областей с заданными спектральными характеристиками в широком диапазоне длин волн.

Проведён анализ различных типов квантоворазмерных активных областей, используемых в микролазерах с МШГ. Рассмотрены преимущества и ограничения квантовых ям (КЯ) InGaAs/GaAs, квантовых точек (КТ) InAs/InGaAs и квантовых яма-точек (КЯТ) на основе системы материалов InGaAs/GaAs. Показано, что КЯ InGaAs/GaAs обеспечивают высокий коэффициент усиления, однако характеризуются высокой чувствительностью к поверхностной рекомбинации и ограниченной температурной стабильностью. КТ InAs/InGaAs обладают лучшей локализацией носителей заряда и меньшей чувствительностью к дефектам поверхности, но имеют сравнительно низкое материальное усиление. В качестве перспективной альтернативы рассмотрены КЯТ InGaAs/GaAs, представляющие собой выращенные с помощью металлоорганической газофазной эпитаксии модулированные по толщине и составу КЯ InGaAs/GaAs на GaAs (100) подложке, разориентированной на 6° в направлении $[1-10]$ [2]. Такие КЯТ InGaAs/GaAs демонстрируют высокое материальное усиление, а также возможность реализации лазерной генерации при повышенных температурах.

Также в главе обсуждается, что при уменьшении размеров микролазеров с МШГ существенным становится влияние безызлучательной поверхностной рекомбинации,

связанной с дефектами, возникающими при пост-ростовой обработке. Пассивация поверхности в этом случае позволяет снизить плотность поверхностных состояний и повысить эффективность излучения. Существующие методы пассивации, включая сульфидирование, плазменную обработку и атомно-слоевое осаждение (АСО), демонстрируют положительные результаты, однако обладают рядом недостатков, связанных с деградацией свойств, недостаточной стабильностью или возможным повреждением структуры. Альтернативным вариантом является использование золь-гель метода формирования пассивирующих покрытий, обеспечивающих конформное нанесение слоёв, не требующий воздействия плазмы и высоких температур. Продemonстрировано, что такая пассивация позволяет улучшить оптические характеристики полупроводниковых микроструктур.

На основании проведённого литературного анализа сформулированы основные нерешённые задачи, связанные с выбором активной области, разработкой стабильных методов пассивации и исследованием влияния поверхности на оптические и лазерные характеристики микродисковых резонаторов.

Во второй главе представлены основные методики эпитаксиального роста гетероструктур с квантоворазмерной активной областью, а также методы исследования их спектральных и временных характеристик и использованные методы пассивации поверхности полупроводниковых мезоструктур и микролазеров.

В начале главы рассмотрены методы молекулярно-пучковой эпитаксии и металлоорганической газофазной эпитаксии, применявшиеся для выращивания исследуемых гетероструктур на основе материалов A_3B_5 . Для синтеза исследуемых структур с КТ InAs/InGaAs, КЯТ InGaAs/GaAs и КЯ InGaAs/GaAs применялись методы молекулярно-пучковой и металлоорганической газофазной эпитаксии, обеспечивающие формирование слоев с заданным составом, профилем легирования и толщиной.

Для определения оптических свойств структур применялся набор взаимодополняющих методов, включающий спектроскопию ФЛ, время-разрешённую спектроскопию ФЛ методом ап-конверсии, использованную для исследования кинетики неравновесных носителей заряда и процессов рекомбинации в квантоворазмерных структурах, а также спектроскопию электролюминесценции и метод сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ). Используемый комплекс методов обеспечивает получение информации о спектральных, временных и пространственных характеристиках излучения, включая кинетику рекомбинационных процессов и распределение оптического сигнала с субволновым разрешением, что позволяет всесторонне исследовать свойства микроструктур.

Рассмотрены методы осаждения пассивирующих слоев, включая метод АСО и золь-гель технологию. Показано, что АСО обеспечивает высокоточный контроль толщины и состава слоев, тогда как золь-гель метод позволяет формировать конформные покрытия при комнатной температуре без плазменного воздействия.

В третьей главе представлены результаты исследования с помощью время-разрешенной спектроскопии ФЛ методом ап-конверсии полупроводниковых гетероструктур с активной областью на основе одиночного слоя КЯТ InGaAs/GaAs. Гетероструктура была выращена методом МОГФЭ на вицинальных (6° наклона в направлении $\langle 111 \rangle$) подложках GaAs (100). КЯТ InGaAs/GaAs были сформированы с помощью осаждения тонкого слоя $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ толщиной 8 монослоев в центре слоя GaAs (матрицы) толщиной 600 нм. Схематическое изображение слоев исследуемой структуры с КЯТ InGaAs/GaAs показано на рисунке 1.

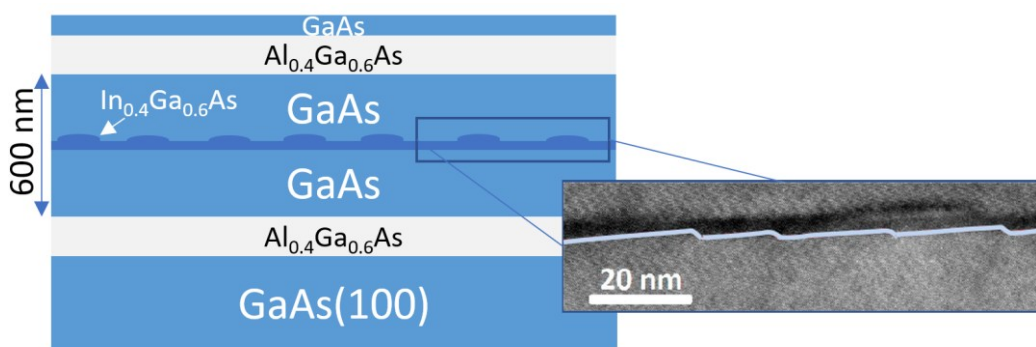


Рисунок 1 – Схема гетероструктуры с одиночным слоем КЯТ InGaAs/GaAs. На вставке приведено изображение просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) сечения слоя с КЯТ InGaAs/GaAs в направлении $[1-10]$, [2].

В процессе исследования было установлено, что на начальной стадии временной эволюции ФЛ (~ 50 пс) захват свободных фотоиндуцированных носителей заряда из матрицы GaAs происходит одновременно в состояния лёгких и тяжёлых дырок (lh и hh) КЯТ InGaAs/GaAs (рисунок 2).

Кинетику нарастания интенсивности сигнала ФЛ оптических переходов $e1-hh1$ и $e1-lh1$ КЯТ InGaAs/GaAs для первых 50 пс на рисунке 2 (а) можно описать экспоненциальной функцией $I_{PL}(t) = A(1 - e^{-t/\tau_{rise}})$. Определено время нарастания для переходов $e1-lh1$ и $e1-hh1$ сигнала ФЛ, которое составило при комнатной температуре ~ 10 пс для обоих переходов, что указывает на относительно медленный процесс одновременного захвата носителей на все состояния КЯТ InGaAs/GaAs. Увеличенное время нарастания по сравнению с литературными данными было объяснено более длительной диффузией

носителей заряда через относительно широкую (300 нм) GaAs-матрицу к активной области КЯТ InGaAs/GaAs.

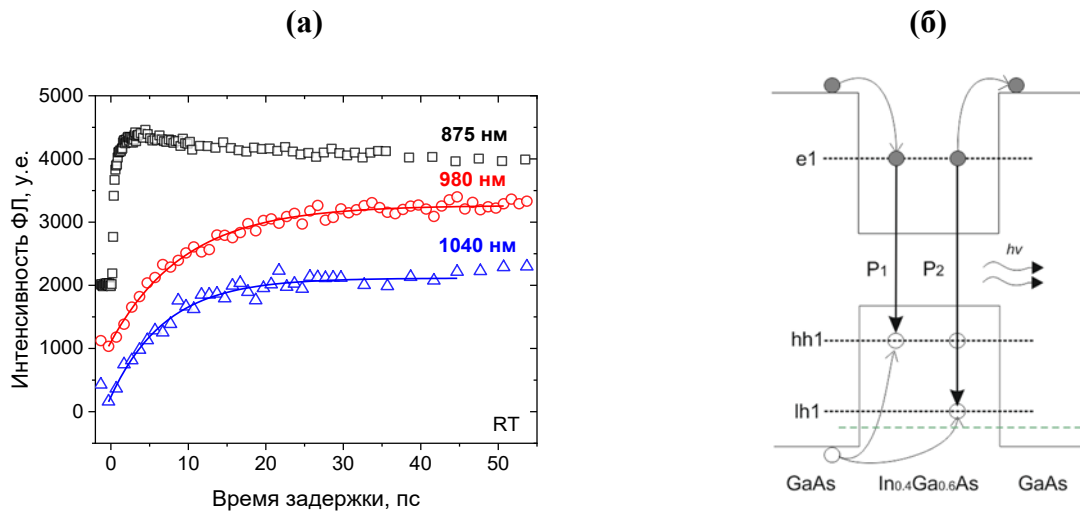


Рисунок 2 – Участок кинетики интенсивности сигнала ФЛ в диапазоне от 0 до 50 пс для матрицы GaAs (875 нм) и переходов InGaAs/GaAs КЯТ (980 нм и 1040 нм) при комнатной температуре (а). Символы - экспериментальные данные, линии - подгонка с помощью моноэкспоненциальной зависимости, кривые смещены по вертикальной оси для наглядности. Схематичное изображение структуры уровней в КЯТ InGaAs/GaAs с излучательными переходами e1-hh1 и e1-lh1 (б).

После завершения процесса захвата носителей заряда наблюдается протяжённый временной интервал с практически постоянной интенсивностью сигнала ФЛ (плато), длящийся в диапазоне от 50 пс до 2,5-3 нс, характерный для КЯТ InGaAs/GaAs (рисунок 3). Формирование данного плато постоянной интенсивности сигнала ФЛ было связано с заполнением доступных квантованных состояний КЯТ InGaAs/GaAs вследствие быстрого обмена носителями с матрицей GaAs. В этих условиях носители заряда внутри КЯТ InGaAs/GaAs образуют единую термализованную систему, описываемую квазиуровнем Ферми. На заключительной стадии временной кинетики интенсивности сигнала ФЛ (после 3 нс) наблюдается спад интенсивности сигнала ФЛ, обусловленный излучательной рекомбинацией носителей заряда в КЯТ InGaAs/GaAs. Установлено, что характерное время спада для переходов e1-hh1 составляет при комнатной температуре около 4,5 нс.

Невысокое значение времени спада сигнала GaAs ($\tau_{\text{decay}} \sim 1,4$ нс), а также отсутствие плато сигнала интенсивности ФЛ матрицы позволяет предположить, что неравновесные носители заряда из матрицы GaAs в основном диффундируют и захватываются в КЯТ InGaAs/GaAs. При понижении температуры до менее 100 К время спада люминесценции на основном переходе КЯТ InGaAs/GaAs уменьшается до примерно 0,7 нс.

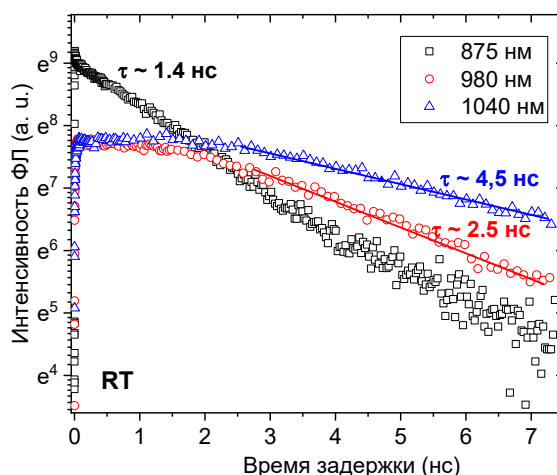


Рисунок 3 – Кинетика интенсивности сигнала ФЛ в широком диапазоне времени задержки после импульса оптической накачки для излучательных переходов в матрице GaAs и InGaAs/GaAs КЯТ, полученная при комнатной температуре. Символы демонстрируют полученные экспериментальные данные, линии - подгонка с помощью эмпирических уравнений.

Полученные зависимости спада сигнала ФЛ от температуры удовлетворительно описываются двухуровневой моделью скоростных уравнений без учета безызлучательной рекомбинации, описывающих изменение носителей заряда в матрице и в состояниях КЯТ InGaAs/GaAs относительно времени.

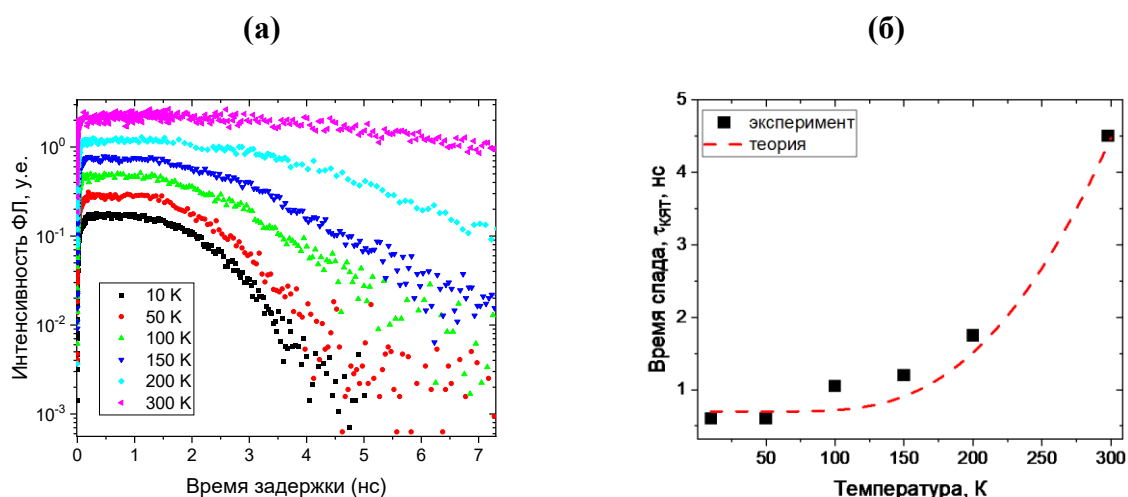


Рисунок 4 – Кинетика ФЛ КЯТ при различных температурах, кривые смещены по вертикали для наглядности (а). Экспериментальная зависимость (черные точки) и модельная зависимости (красная линия) времени спада сигнала ФЛ основного перехода КЯТ InGaAs/GaAs для разных температур (б).

В результате подгонки результатов моделирования к экспериментально полученным данным (рисунок 4 (б)), с использованием полученного выражения из скоростных уравнений были определены следующие фундаментальные параметры для КЯТ InGaAs/GaAs: время излучательной рекомбинации в InGaAs/GaAs КЯТ (0,7 нс), энергетический барьер для электронов (глубина электронного уровня) в InGaAs/GaAs КЯТ (50 мэВ), и энергетический барьер для дырок (150 мэВ). Время спада люминесценции через оптический переход КЯТ при низких температурах совпадает с временем излучательной рекомбинации, а с повышением температуры растет вследствие увеличения темпа обратного выброса носителей заряда из КЯТ в матрицу по отношению к темпу захвата.

Полученные значения характерного времени захвата и спада интенсивности сигнала ФЛ, а также параметры излучательного времени жизни и энергетических барьеров для электронов и дырок важны для понимания кинетики носителей заряда в InGaAs/GaAs КЯТ и могут быть использованы при проектировании микролазеров и быстродействующих оптоэлектронных устройств на их основе, а также при оценке предельных скоростных характеристик таких структур. Также знание времени спада сигнала ФЛ в исходной структуре необходимо для последующей оценки влияния боковой поверхности, формируемой травлением. По результатам исследований, описанных в настоящей главе, было сформулировано первое выносимое на защиту положение.

В четвертой главе диссертации представлен экспериментальный и теоретический анализ влияния поверхностной безызлучательной рекомбинации на оптические свойства мезоструктур с учётом латерального транспорта носителей заряда. Мезоструктуры представляют собой сформированные с помощью фотолитографии и плазмохимического травления из описанной в третьей главе эпитаксиальной структуры цилиндры высотой ~ 1 мкм и диаметром от нескольких единиц до нескольких десятков микрон (рисунок 5, а) и представляют интерес для исследования влияния боковой поверхности на оптические характеристики структуры.

С использованием модели диффузии носителей в цилиндрической мезоструктуре и экспериментальных данных время-разрешенной спектроскопии ФЛ, был разработан метод определения величины диффузионной длины и скорости поверхностной рекомбинации. Были получены следующие выражения для зависимости интенсивности ФЛ и времени спада интенсивности ФЛ в зависимости от радиуса мезоструктур: $I_{PL} \propto \exp\left(-\frac{\frac{4}{X}}{S^{-1}+1}\right)$ и $\frac{1}{\tau_{PL}} \approx \frac{2}{\tau_0} \left[1 + \left(\frac{5L_D}{d}\right)^2\right]$, где $S = L_D \frac{v_s}{D}$ безразмерный параметр, обобщающий эффект скорости рекомбинации v_s , длины диффузии L_D , и коэффициента амбиполярной латеральной

диффузии D , $X = \frac{R}{L_D}$ где R это радиус мезаструктур; τ_0 – время жизни носителей заряда в отсутствие поверхностной рекомбинации. Аппроксимация полученных экспериментальных данных нормированной интегральной интенсивности ФЛ и времени спада ФЛ от диаметра мезаструктур с помощью представленных теоретических выражений представлена на рисунке 5. С помощью данной аппроксимации были получены значения параметров, характеризующих поверхностную рекомбинацию: диффузионная длина $L_D = 1,3$ мкм и время жизни $\tau_0 = 4,6$ нс (соответствующий коэффициент амбиполярной диффузии $D = 3,7$ см²/с), скорость поверхностной рекомбинации $v_s = 2,8 \cdot 10^4$ см/с, критический диаметр мезаструктур, при достижении которого вклад поверхностной безызлучательной рекомбинации становится доминирующим $d_{cr} \approx 2,6$ мкм.

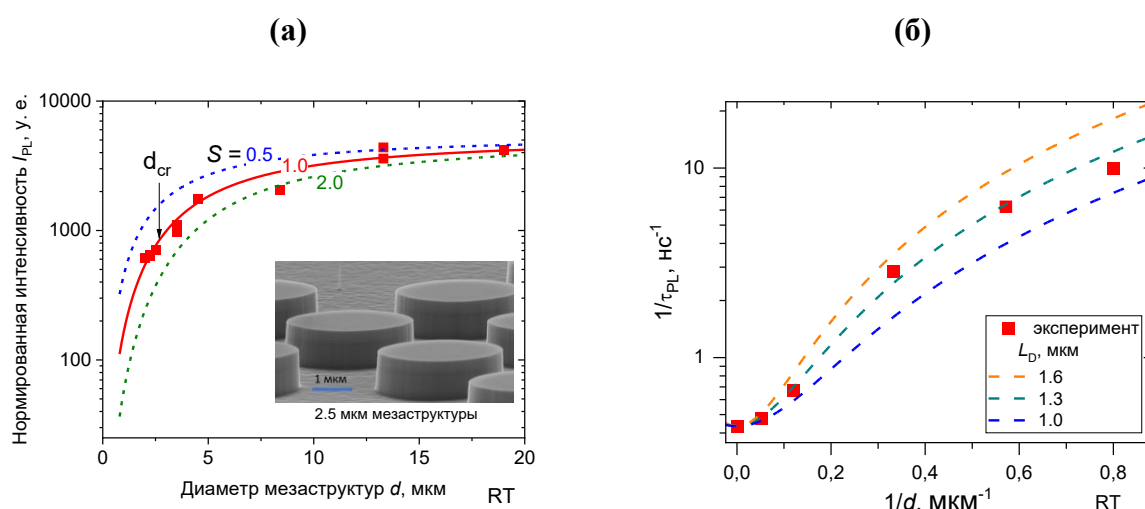


Рисунок 5 – Нормированная интенсивность сигнала ФЛ в зависимости от диаметра мезаструктур; символы – эксперимент, линия – аппроксимация для $L_D = 1,3$ мкм и $S = 1$ (а). Зависимость обратного времени спада от обратного диаметра мезаструктур: точки – эксперимент, линии – аппроксимация (б).

Показано, что дальнейшее уменьшение диаметра мезаструктур приводит к заметному снижению интенсивности ФЛ вследствие усиления рекомбинации на боковых стенках. Разработанный метод обладает универсальностью и может быть применим для оценки перечисленных параметров и для других полупроводниковых составов наноструктурной излучающей области мезаструктур.

Описанная высокая скорость поверхностной рекомбинации обуславливает необходимость обработки поверхности с помощью пассивации широкозонными слоями диэлектрика. Поэтому было экспериментально исследовано влияние пассивации поверхности мезаструктур с КЯ InGaAs/GaAs с использованием диэлектрических слоёв Al_2O_3 , нанесённых методом атомно-слоевого осаждения. Эпитаксиальная структура для

последующего формирования мезоструктур была создана на подложке GaAs(100) с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии, в активной области которой размещался слой КЯ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$, толщиной 10 нм, и 10 периодов сверхрешетки (СР), состоящей из слоев GaAs/AlAs с толщинами 2 нм/2 нм. Перед пассивацией часть мезоструктур была обработана в водородной (H^*) плазме в камере установки. Толщины осажденного слоя составляли 2 нм и 10 нм и оценивались по количеству проведенных циклов открытия/закрытия заслонок прекурсоров.

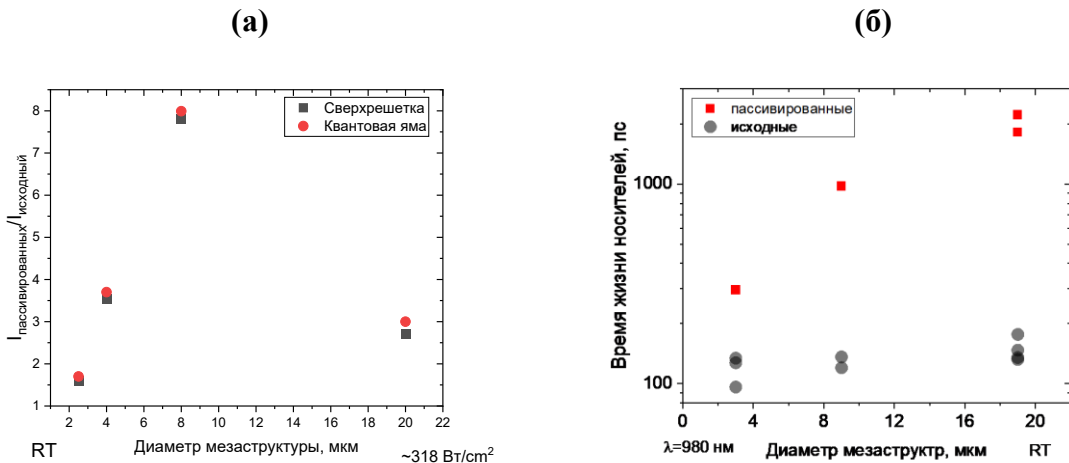


Рисунок 6 – Фактор увеличения интенсивности ФЛ от КЯ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ и СР GaAs/AlAs в результате пассивации (I_{PL}/I_0) в зависимости от диаметра мезоструктур для 10 нм слоя Al_2O_3 с предварительной обработкой в плазме (а). Время спада ФЛ в исходных и пассивированных мезоструктурах различного диаметра (б).

Наблюдается, что в результате пассивации поверхности мезоструктур происходит увеличение интенсивности ФЛ как линии СР, так и КЯ примерно в 8 раз (рисунок 6). С уменьшением диаметра мезоструктур наблюдается падение интенсивности ФЛ, которое может быть объяснено увеличением вклада безызлучательной рекомбинации на боковой поверхности мезоструктур. На рисунке 6 (б) показаны зависимости спада интенсивности ФЛ КЯ $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ от времени при комнатной температуре. В результате пассивации наблюдается значительное увеличение времени спада ФЛ для мезоструктуры по сравнению с исходной структурой, в особенности для диаметров мезоструктур 8,4 и 19 мкм: с $\sim 0,14$ нс до ~ 1 либо $\sim 2,3$ нс. Такое увеличение может быть связано со снижением плотности поверхностных состояний оборванных связей на поверхности латеральных стенок мезоструктур, в результате чего носители заряда дольше живут в активной области, и излучательно рекомбинируют.

Другим рассмотренным вариантом пассивации стал синтез пассивирующего покрытия с помощью золь-гель метода SiO_2 , который позволил осадить пленку толщиной порядка 10 нм без воздействия плазмы и высоких температур.

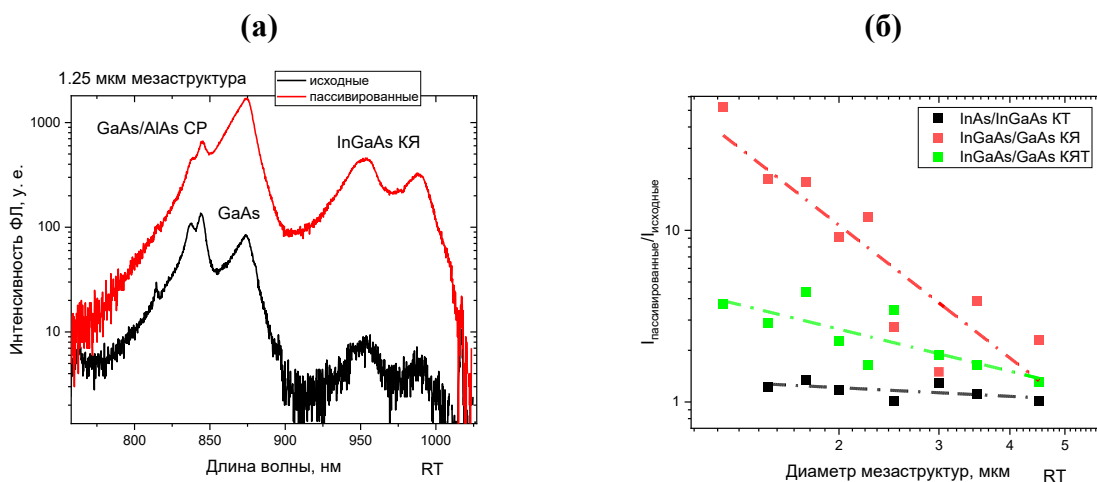


Рисунок 7 – Спектр ФЛ мезоструктур, содержащих КЯ InGaAs/GaAs, диаметром 1,25 мкм до и после пассивации (а). Зависимость отношения интенсивности сигнала ФЛ мезоструктур до и после пассивации от диаметра для трех типов активной области (б).

На рисунке 7 (а) представлены спектры ФЛ массива мезоструктур диаметром 1,25 мкм, содержащих InGaAs/GaAs КЯ, до пассивации золь-гель SiO_2 , непосредственно после неё. Как для КЯ InGaAs/GaAs, так и для CP AlAs/GaAs наблюдалось существенное увеличение интенсивности после пассивации. Наибольшее усиление интегральной интенсивности сигнала ФЛ КЯ InGaAs/GaAs наблюдается для мезоструктур наименьшего диаметра 1,25 мкм; оно составило примерно 50 раз; максимальное усиление сигнала ФЛ сигнала CP AlAs/GaAs для мезоструктур диаметром 1,25 мкм составило около 5,7 раз. С увеличением диаметра мезоструктур вклад безызлучательной рекомбинации в сигнал ФЛ уменьшается, вследствие чего наиболее эффект усиления интенсивности в результате пассивации оказывается не столь выраженным. Этот характерный диаметр хорошо коррелирует с диффузионной длиной носителей заряда в КЯ InGaAs/GaAs, составляющей порядка 2–3 мкм [9]. Полагая, что диффузионная длина амбиполярной диффузии остается неизменной, скорость поверхностной рекомбинации после пассивации мезоструктур с КЯТ методом золь-гель была оценена равной $1.4 \cdot 10^4$ см/с, т.е. упала примерно вдвое по сравнению с непассивированной поверхностью.

Для исследования пассивации с помощью золь-гель SiO_2 слоя были рассмотрены структуры с различной активной областью: КЯ InGaAs/GaAs, которые были охарактеризованы выше, КЯТ InGaAs/GaAs, а также КТ InAs/InGaAs. Протокол пассивации

поверхности всех мезоструктур с помощью золь-гель слоя оставался одинаковым. Как видно из рисунка 7 (б), пассивация обладает разной эффективностью в зависимости от типа активной области: усиление сигнала ФЛ максимально для мезоструктур с квантовой ямой, заметно для мезоструктур с КЯТ InGaAs/GaAs и практически отсутствует для мезоструктур с КТ InAs/GaAs. Ключевым является различие в интенсивности латерального транспорта в мезоструктурах различного состава: для КТ InAs/InGaAs характерно максимальное подавление транспорта носителей заряда в латеральной плоскости активной области, что обусловлено 0-мерным характером локализации и наибольшей глубиной локализации носителей заряда. Для КЯТ также характерен 0D характер локализации носителей заряда, однако энергия локализации меньше, чем в КТ, что позволяет носителям заряда более эффективно перемещаться по слою матрицы. В случае же двумерной КЯ транспорт носителей заряда в латеральной плоскости не ограничен, что и ведет к наиболее сильной зависимости свойств от пассивации боковой поверхности, хотя энергия локализации сравнима с локализацией в КЯТ.

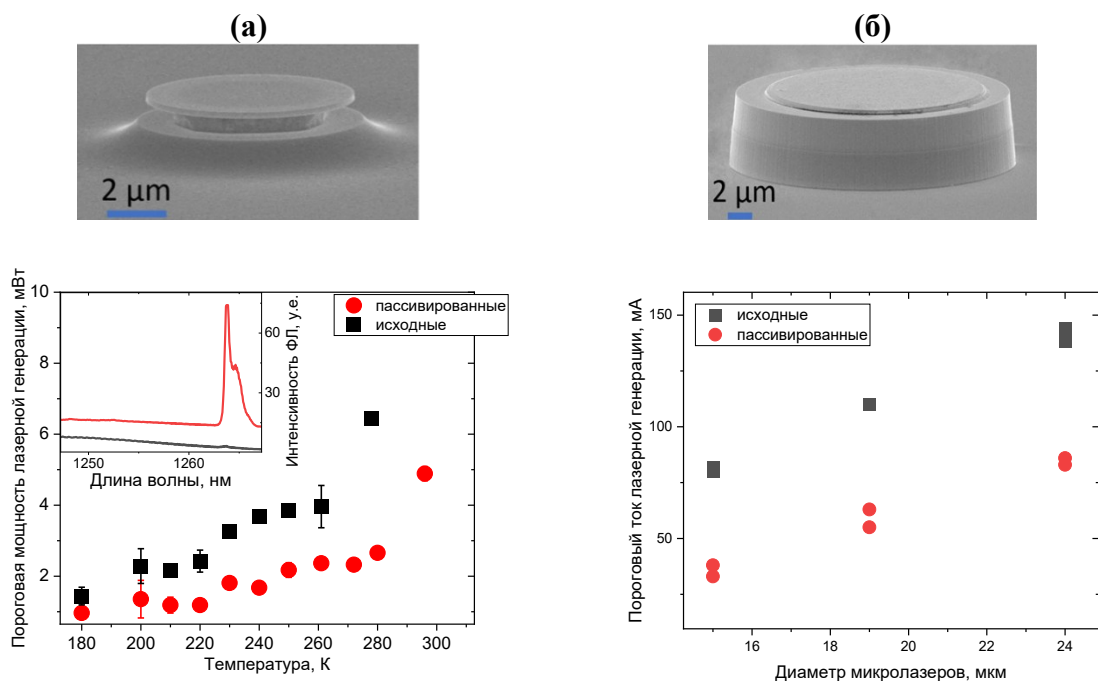


Рисунок 8 – Изображение сканирующей электронной микроскопии МДЛ диаметром 8 мкм и зависимость пороговой плотности мощности для МДЛ 8 мкм до и после пассивации от температуры; на вставке приведен спектр ФЛ МДЛ 8 мкм до и после пассивации (а). Изображение сканирующей электронной микроскопии МДЛ диаметром 31 мкм и зависимость порогового тока лазерной генерации для МДЛ различного диаметра до и после пассивации (б).

Так как мезаструктуры с КЯ InGaAs/GaAs продемонстрировали наибольшую чувствительность к пассивации, с помощью золь-гель методики были пассивированы МДЛ с МШГ, работающие при оптической и инжекционной накачке с активной областью на основе КЯ InGaAsN/GaAs.

После пассивации золь-гель SiO₂ слоем МДЛ, работающих при оптической накачке, наблюдалась генерация в МДЛ при комнатной температуре: стимулированное излучение сконцентрировано в лазерной моде одной частоты на длине волны 1265 нм (продемонстрировано на вставке к рисунку 8 (а)). Порог лазерной генерации составил 77 кВт/см². Исследование температурной динамики порога лазерной генерации для пассивированных и исходных МДЛ диаметром 8 мкм продемонстрировано на рисунке 8 (а). Наблюдается снижение порога лазерной генерации во всем диапазоне исследованных температур. Не считая комнатной температуры, при которой без пассивации лазерная генерация вообще отсутствовала, максимальное снижение пороговой плотности мощности после пассивации по сравнению с исходными МДЛ достигло 2,43 раза при 280 К.

Разработанная золь-гель SiO₂ пассивация была применена также для МДЛ с инжекционной накачкой различного диаметра с длиной волны генерации в диапазоне 1,2 – 1,3 мкм. На рисунке 8 (б) приведена зависимость порогового тока лазерной генерации для МДЛ различного диаметра до и после пассивации. После пассивации золь-гель слоем SiO₂ наблюдается существенное снижение порогового тока: для МДЛ диаметром 16 мкм плотность порогового тока снижена более чем в два раза — с ~ 45,8 кА/см² до ~ 20,1 кА/см². МДЛ также демонстрируют более низкие абсолютные значения порогового тока во всем исследуемом диапазоне размеров (15 - 31 мкм) и кратное увеличение внешней дифференциальной эффективности после пассивации слоем SiO₂.

Результаты, полученные в данной главе, демонстрируют ключевую роль поверхностных эффектов в формировании оптических характеристик мезаструктур и лазерных параметров микролазеров на основе GaAs при уменьшении их характерных размеров. Показано, что применение различных методов пассивации поверхности позволяет эффективно снижать вклад поверхностной безызлучательной рекомбинации и существенно улучшать излучательные свойства мезаструктур и микролазеров на основе GaAs.

В пятой главе экспериментально и теоретически исследованы факторы, которые могут влиять на порядок моды лазерной генерации в МДЛ, а также продемонстрирована функциональная роль латеральной поверхности МДЛ для задач оптического детектирования.

Показано, что лазерная генерация в инжекционных МДЛ с активной областью на основе КЯТ InGaAs/GaAs осуществляется не на модах первого радиального порядка. Экспериментальные измерения углового распределения интенсивности лазерного излучения [10] и последующий аналитический расчет продемонстрировали, что азимутальный порядок лазерной моды оказывается в 2 – 3 раза меньше ожидаемого для МШГ первого радиального порядка, что означает, что лазерная генерация происходит на МШГ с более высоким радиальным порядком.

Установлено, что выбор радиального порядка лазерной МШГ определяется конкуренцией нескольких факторов. Поверхностная безызлучательная рекомбинация носителей приводит к существенному снижению усиления для МШГ с малыми радиальными порядками, локализованных вблизи боковой поверхности МДЛ.

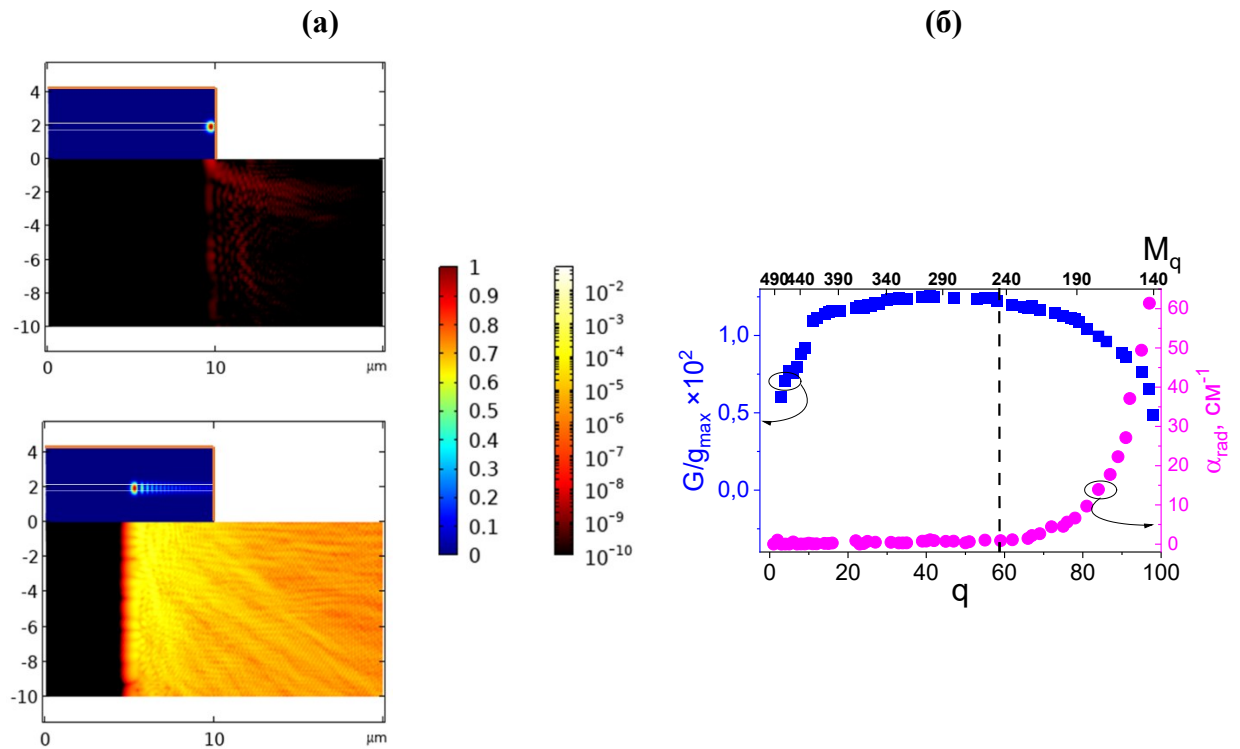


Рисунок 9 – Пространственные распределения интенсивности МШГ радиальных порядков $q=1$ (сверху) и $q=20$ (снизу) в МДЛ радиусом 50 мкм (а). Зависимость модового усиления и излучательных потерь от радиального порядка МШГ для МДЛ 50 мкм (б).

С другой стороны, для МШГ с высокими радиальными порядками возрастает вклад утечки электромагнитного поля в подложку GaAs, что приводит к снижению коэффициента вертикального ограничения и росту излучательных потерь (рисунок 9 (а)). На основе численного моделирования показано существование «оптимального» радиального порядка лазерной МШГ, при котором достигается максимум модового усиления G при допустимых

оптических потерях (рисунок 9 (б)). Полученные расчётные значения радиальных и азимутальных порядков лазерных МШГ находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными для МДЛ [11], а также объясняют отсутствие лазерной генерации в МДЛ малого размера.

С использованием методики СБОМ впервые экспериментально исследована утечка лазерных МШГ из МДЛ на основе InGaAs/GaAs КЯТ в подложку GaAs (рисунок 10). Показано, что интенсивность утечки существенно зависит от радиального порядка моды и возрастает для МШГ с более высоким радиальным порядком. Экспериментально подтверждено, что характер пространственного распределения утекающего излучения хорошо согласуется с результатами численного моделирования, что подчёркивает необходимость учёта утечки МШГ в подложку при анализе лазерных характеристик МДЛ, а также обеспечивать хорошее оптическое ограничение моды со стороны подложки.

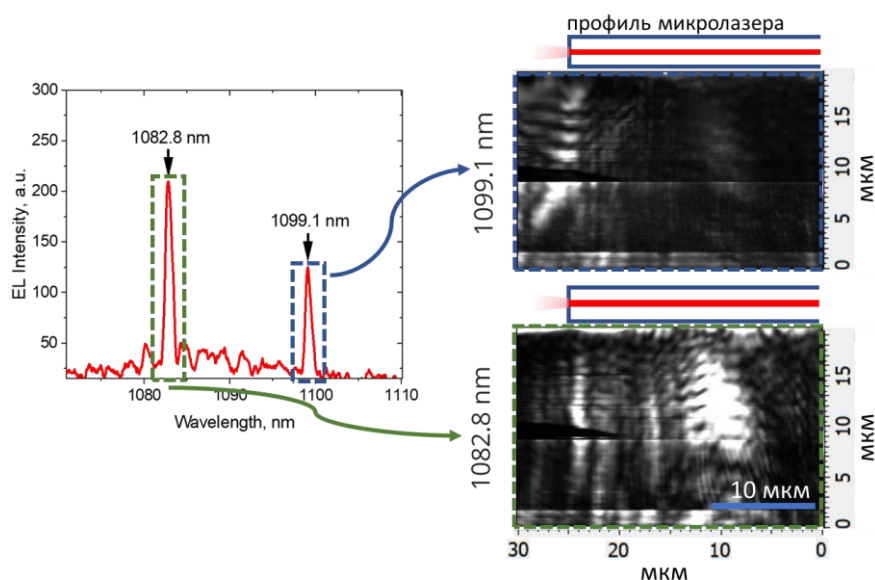


Рисунок 10 – Спектр лазерного излучения, полученный в режиме СБОМ с бокового скола GaAs подложки под половиной МДЛ. Карты пространственного распределения интенсивности МШГ с длинами волн 1099,1 нм (синяя рамка) и 1082,8 (зеленая рамка).

Была также экспериментально показана возможность использования МДЛ с оптической накачкой в качестве сенсоров, работающих в жидких средах. Эванесцентный характер электромагнитного поля лазерной МШГ вблизи боковой поверхности МДЛ приводит к перекрытию с окружающей средой, благодаря чему МДЛ и оказывается чувствительным к изменению показателя преломления окружающей его среды. Активной областью МДЛ являлся массив КТ InAs/InGaAs, полученных методом Странского-Крастанова. На рисунке 11 (а) изображены спектры лазерной генерации, полученные для МДЛ диаметром 10 мкм для различных концентраций растворов соли. Смещение в

длинноволновую область спектра происходит линейно в зависимости от концентрации соли. В совокупности с литературными данными изменения показателя преломления для водных растворов NaCl и C₆H₁₂O₆ [12,13], эти зависимости позволяют определить чувствительность МДЛ к изменению показателя преломления как $S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}$. Таким образом можно оценить максимальную чувствительность МДЛ различного диаметра к изменению показателя преломления в соли как 7 нм/RIU, и в глюкозе как 9,4 нм/RIU (рисунок 11 (б)).

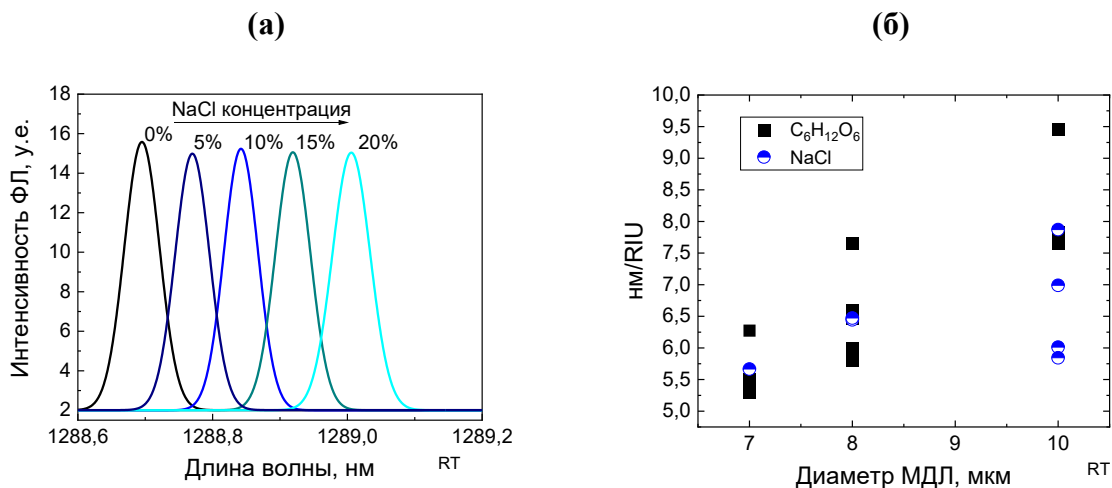


Рисунок 11 – Спектры лазерной генерации МДЛ диаметром 10 мкм, полученные при погружении в водные растворы соли различной концентрации (а). Значения чувствительности различных МШГ для МДЛ различного диаметра для водных растворов соли и глюкозы (б).

Различие в величинах чувствительности зависит от радиального порядка МШГ и степени перекрытия эванесцентного поля с внешней окружающей средой. Полученные экспериментальные значения демонстрируют возможность использования МДЛ для оптического биодетектирования.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Проведено комплексное исследование кинетики ФЛ гетероструктур с КЯТ InGaAs/GaAs методом время-разрешённой спектроскопии с ап-конверсией. Характерное время захвата носителей из матрицы GaAs составило при комнатной температуре ~10 пс для одиночного слоя КЯТ InGaAs/GaAs. Наблюдаемый временной интервал с постоянной интенсивностью сигнала ФЛ (плато) КЯТ InGaAs/GaAs, длящийся в диапазоне от 50 пс до 2,5-3 нс, связан с заполнением доступных квантованных состояний КЯТ InGaAs/GaAs вследствие быстрого обмена носителями с матрицей GaAs. Характерное время спада сигнала люминесценции для КЯТ InGaAs/GaAs после обеднения носителей заряда в

матрице GaAs составляет при комнатной температуре около 3 нс. При уменьшении температуры время спада снижается, приближаясь к величине около 0,7 нс.

2. Экспериментально полученные результаты кинетики ФЛ гетероструктур с КЯТ InGaAs/GaAs и их изменение с температурой удовлетворительно описаны с помощью двухуровневой модели скоростных уравнений. Показано, что при низких температурах время спада отражает время излучательной рекомбинации, а при увеличении температуры время спада возрастает вследствие увеличения темпа выброса носителей заряда из состояний КЯТ InGaAs/GaAs в матрицу GaAs. В результате аппроксимации результатов моделирования были определены время излучательной рекомбинации в КЯТ InGaAs/GaAs 0,7 нс, энергетический барьер для электронов (глубина электронного уровня) в КЯТ InGaAs/GaAs 50 мэВ, а энергетический барьер для дырок — 150 мэВ.

3. Разработан метод определения величины длины латеральной амбиполярной диффузии носителей заряда и скорости поверхностной рекомбинации, основанный на совместном анализе экспериментальных результатов спектроскопии ФЛ и время-разрешенной спектроскопии ФЛ в цилиндрических мезаструктурах различного диаметра. Для мезаструктур с КЯТ InGaAs/GaAs получено значение скорости поверхностной рекомбинации $\sim 2,8 \cdot 10^4$ см/с, а диффузионная длина составила $L_D = 1,3$ мкм при комнатной температуре.

4. Выполнено исследование влияния пассивации поверхности мезаструктур с активными областями на основе КЯ InGaAs/GaAs с использованием методов АСО слоев Al_2O_3 . Показано, что пассивация приводит к существенному увеличению интегральной интенсивности ФЛ; для цилиндрических мезаструктур диаметром 9 мкм усиление составило 8 раз. В результате пассивации также наблюдается значительное увеличение времени жизни носителей заряда, так, для мезаструктур диаметром 9 мкм его увеличение составило с $\sim 0,14$ нс до ~ 1 нс.

5. Выполнено исследование влияния пассивации поверхности с помощью золь-гель технологии SiO_2 для цилиндрических мезаструктур с активными областями различной квантовой размерности и при этом близких полупроводниковых материалов: на основе КЯ InGaAs/GaAs, КТ InAs/InGaAs и КЯТ InGaAs/GaAs. Максимальный эффект усиления ФЛ наблюдается для структур с КЯ InGaAs/GaAs, минимальный — для структур с КТ InAs/InGaAs, что было связано с различным характером локализации носителей заряда. Для мезаструктур с активной областью на основе КЯ InGaAs/GaAs показано значительное усиление интенсивности ФЛ при комнатной температуре до 50 раз для диаметров мезаструктур 1,25 мкм.

6. Впервые продемонстрирована лазерная генерация при комнатной температуре в МДЛ с активной областью на основе КЯ InGaAsN/GaAs после пассивации поверхности золь-гель слоем SiO₂ при оптической накачке. Для МДЛ без пассивации при комнатной температуре лазерной генерации не наблюдалось. Максимальное снижение пороговой плотности мощности после пассивации по сравнению с исходными МДЛ достигло 2,4 раза при 280 К.

7. Для МДЛ с инжекционной накачкой после пассивации золь-гель слоем SiO₂ показано существенное снижение пороговых характеристик: для МДЛ диаметром 16 мкм плотность порогового тока снижена более чем в два раза — с ~45,8 кА/см² до ~20,1 кА/см². МДЛ демонстрируют более низкие абсолютные значения порогового тока во всем исследуемом диапазоне размеров (15-31 мкм) и кратное увеличение внешней дифференциальной эффективности после пассивации слоем SiO₂.

8. Установлено, что порядок лазерной МШГ в МДЛ на основе КЯТ InGaAs/GaAs определяется конкуренцией нескольких факторов. С одной стороны, для мод с низкими радиальными порядками, локализованным вблизи боковой поверхности МДЛ, существенно снижено усиление из-за поверхностной безызлучательной рекомбинации. С другой стороны, для МШГ с высокими радиальными порядками возрастает вклад утечки электромагнитного поля в подложку GaAs, что приводит к снижению коэффициента вертикального ограничения и росту излучательных потерь. С помощью моделирования продемонстрирована существование «оптимального» радиального порядка лазерной МШГ, при котором достигается максимум модового усиления G при допустимых оптических потерях.

9. Экспериментально исследовано пространственное распределение излучения МШГ на сколе подложки GaAs в непосредственной близости (5 мкм) от МДЛ диаметром 50 мкм. Впервые экспериментально продемонстрировано утеkanie излучения МШГ в подложку GaAs и количественно подтверждены результаты численного моделирования. С помощью СБОМ было также продемонстрировано распределение МШГ на латеральной стенке МДЛ диаметром 50 мкм и оценено межмодовое расстояние, позволившее экспериментально установить азимутальный порядок лазерной моды.

10. Продemonстрирована возможность использования МДЛ с активной областью на основе КТ InAs/InGaAs в качестве чувствительных оптических сенсоров показателя преломления. Исследования МДЛ, помещенных в водные растворы NaCl и глюкозы различной концентрации достигнута чувствительность до 9,4 нм/RIU.

Вся совокупность полученных результатов показывает, что поверхностная рекомбинация является одним из ключевых факторов, определяющих оптические

характеристики микродисковых резонаторов, МДЛ и иных формируемых глубоким травлением мезоструктур на основе квантоворазмерных гетероструктур InGaAs; её подавление является необходимым условием как для реализации интенсивной ФЛ в случае мезоструктур, так и для реализации эффективной лазерной генерации в случае МДЛ. Полученные результаты открывают возможности для дальнейшего повышения эффективности МДЛ на основе таких гетероструктур и их интеграции в состав фотонных интегральных схем. Полученные значения параметров, характеризующих динамические процессы и поверхностные явления в структурах с новым типом активной области – квантовыми яма-точками InGaAs (плотными массивами КТ, формируемыми не по механизму Странского-Крастанова), также важны для разработки и оптимизации свойств оптических сенсоров, фотоприемников, оптопар, волноводов и иных полупроводниковых приборов на их основе.

Список публикаций по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 8 работ в журналах, индексируемых в WoS и Scopus:

1. Крыжановская Н.В., Мельниченко И.А., Букатин А.С., Корнев А.А., Филатов Н.А., Щербак С.А., Липовский А.А., Драгунова А.С., Кулагина М.М., Лихачев А.И., Фетисова М.В., Редутто И.В., Максимов М.В., Жуков А.Е. Исследование чувствительности микродискового лазера к изменению показателя преломления окружающей среды // Письма в Журнал технической физики. – 2022. – Т. 48. – №. 2. – С. 74-77.
2. Надточий, А. М., Мельниченко, И. А., Иванов, К. А., Минтаиров, С. А., Калюжный, Н. А., Максимов, М. В., Крыжановская Н.В., Жуков А.Е. Температурные зависимости излучательного и безызлучательного времени жизни носителей в квантовых яма-точках InGaAs. Физика и техника полупроводников. – 2022. – Т. 56. – №. 10. – С. 993-996.
3. Ivanov K. A., Nadtochiy A. M., Kryzhanovskaya N. V., Mintairov S. A., Kalyuzhnyy N. A., Melnichenko I. A., Maximov M. V., Zhukov, A. E. Time-resolved temperature-dependent photoluminescence spectroscopy of InGaAs/GaAs quantum well-dots // Journal of Luminescence. – 2023. – Т. 255. – С. 119620.
4. Melnichenko I.A., Nadtochiy A.M., Ivanov K.A., Makhov I.S., Maksimov M.V., Mintairov S.A., Kalyuzhnyy N.A., Kryzhanovskaya N.V., Zhukov A.E. Time-resolved photoluminescence study of InGaAs/GaAs quantum well-dots with upconversion method. // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2023. – Т. 16. – No 1.1. – С. 22–27.

5. Мельниченко И. А., Крыжановская Н.В., Иванов К.А., Надточий А.М., Махов И.С., Козодаев М.Г., Хакимов Р.Р., Маркеев А.М., Воробьев А.А., Можаров А.М., Гусева Ю.А., Лихачев А.И., Колодезный Е.С., Жуков А.Е. Влияние пассивации поверхности цилиндрических меза-структур на основе GaAs на их оптические свойства. // Оптика и спектроскопия. – 2023. – Т. 131. – №. 8 – С. 1112-1117.
6. Melnichenko I. A., Moiseev E.I., Ivanov K.A., Kryzhanovskaya N.V., Vainilovich A.G., Nahorny A.V., Lutsenko E.V., Zhukov A.E. Mode leakage into substrate in microdisk lasers //St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics. – 2024. – Т. 76. – №. 3.2. – С. 212-216.
7. Ivanov K.A., Zhukov A.E., Moiseev E.I., Melnichenko I.A., Makhov I.S., Kryzhanovskaya N.V. Analysis of factors determining the azimuthal and radial order of lasing mode in III–V quantum dot disk microlasers //Journal of Applied Physics. – 2025. – Т. 138. – №. 10.
8. Melnichenko I.A., Shugabaev T., Fominykh N.A., Makhov I.S., Moiseev E.I., Gridchin V.O., Zhukov A.E., Kulagina M., Kryzhanovskaya N.V. Optical properties of InGaAsN quantum well-based microlasers passivated by SiO₂ sol–gel film //Optics Letters. – 2025. – Т. 50. – №. 21. – С. 6819-6822.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Kryzhanovskaya N. V. и др. A Micro Optocoupler Based on a Microdisk Laser and a Photodetector with an Active Region Based on Quantum Well-Dots // *Tech. Phys. Lett.* 2020. Т. 46, № 7. С. 629–632.
2. Maximov M. V. и др. Light Emitting Devices Based on Quantum Well-Dots // *Applied Sciences*. 2020. Т. 10, № 3. С. 1038.
3. Mintairov S. A. и др. Hybrid InGaAs quantum well–dots nanostructures for light-emitting and photo-voltaic applications // *Nanotechnology*. 2015. Т. 26, № 38. С. 385202.
4. Mintairov S. A. и др. GaAs quantum well-dots solar cells with spectral response extended to 1100 nm // *Electronics Letters*. 2015. Т. 51, № 20. С. 1602–1604.
5. Moiseev E. и др. Highly efficient injection microdisk lasers based on quantum well-dots // *Opt. Lett.* 2018. Т. 43, № 19. С. 4554.
6. Nadtochiy A. M. и др. Saturated layer gain in waveguides with InGaAs quantum well-dot heterostructures // *J. Lightwave Technol.* 2021. С. 1–1.
7. Tansu N., Mawst L. J. Current injection efficiency of InGaAsN quantum-well lasers // *Journal of applied physics*. AIP Publishing, 2005. Т. 97, № 5.
8. Korpijärvi V.-M. и др. High-power temperature-stable GaInNAs distributed Bragg reflector laser emitting at 1180 nm // *Optics letters*. Optical Society of America, 2016. Т. 41, № 4. С. 657–660.
9. Fiore A. и др. Carrier diffusion in low-dimensional semiconductors: A comparison of quantum wells, disordered quantum wells, and quantum dots // *Phys. Rev. B*. American Physical Society, 2004. Т. 70, № 20. С. 205311.
10. Moiseev E. I. et al. Investigation of far-field patterns of semiconductor microlasers with an active region based on InGaAs/GaAs quantum well-dots // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 2022. Т. 15, № 3.2. С. 25-30.
11. Ivanov K. A. et al. Analysis of factors determining the azimuthal and radial order of lasing mode in III–V quantum dot disk microlasers // *Journal of Applied Physics*, 2025. Т. 138, №. 10, С. 103104.
12. Shekaari H., Kazempour A. Thermodynamic properties of d-glucose in aqueous 1-hexyl-3-methylimidazolium bromide solutions at 298.15 K // *Fluid phase equilibria*. Elsevier, 2012. Т. 336. С. 122–127.
13. Li H. H. Refractive index of alkali halides and its wavelength and temperature derivatives // *Journal of physical and chemical reference data*, 1976. Т. 5, №. 2, С. 329-528.