

На правах рукописи



РАЗОВА Анна Александровна

**ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ВОЛНОВОДНЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ НА
ОСНОВЕ HgCdTe В СРЕДНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ**

2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники,
квантовых устройств

1.3.19 – Лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2026

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Научный руководитель

Морозов Сергей Вячеславович

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики полупроводниковых гетероструктур и сверхрешеток Института физики микроструктур РАН – филиала ФГБНУ ФИЦ ИПФ им. А. В. Гапонова-Грехова РАН

Научный консультант

Андрианов Алексей Вячеславович

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией квантовой и нелинейной оптики сильно локализованных полей ФГБНУ ФИЦ ИПФ им. А. В. Гапонова-Грехова РАН

Официальные оппоненты

Хохлов Дмитрий Ремович

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор, заведующий кафедрой общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Фирсов Дмитрий Анатольевич

доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Защита состоится 3 декабря 2026 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.02 при ФИЦ ИПФ им. А. В. Гапонова-Грехова РАН по адресу: 603087, г. Нижний Новгород, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ РАН и на сайте ipmras.ru/UserFiles/Diss/2026/razova-anna-aleksandrovna/Diss_Razova_AA.pdf

Автореферат разослан __ октября 2026 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор РАН



Д.Ю. Водолазов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время лазеры являются неотъемлемой частью нашей жизни. Они применяются и в бытовых условиях (например, как лазерные указки), и в медицине (например, как нож в хирургии), и широко используются на производстве и в науке. Как известно, существуют различные типы лазеров, где в качестве активной среды используются твёрдые материалы, газовые смеси, жидкости, которые позволяют получить излучение в широком спектральном диапазоне от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной (ИК) области.

Реализация компактных источников излучения для среднего инфракрасного спектрального диапазона до сих пор остаётся востребованной задачей. В частности, для диапазона длин волн 3 – 5 мкм, который является окном прозрачности атмосферы, такие лазеры нужны для решения исследовательских и прикладных задач, связанных со спектроскопией газов [1] и твёрдых тел [2], проводимой в рамках мониторинга окружающей среды или медицинской диагностики. Как известно, окна прозрачности атмосферы, которые лежат в области 3 – 5 мкм и 8 – 12 мкм, содержат линии поглощения как полезных веществ, таких как карбонатные минералы [2], так и газов-загрязнителей, например, метана [1], чья идентификация важна с точки зрения обеспечения безопасности. Аналогичные потребности возникают и в лазерах с рабочей длиной волны более 20 мкм, которые востребованы для спектроскопии галоген-содержащих органических соединений, детального анализа нефтепродуктов [3] и водяного пара [4], а также для исследований, где важно знание тонкой структуры линий вращательных и колебательных переходов различных молекул, мелких примесей в полупроводниках, межзонных переходов и прочее.

Несомненно, для таких приложений отчасти подойдут газовые лазеры, однако они доступны лишь для отдельных длин волн и имеют достаточно большой размер, что затрудняет при необходимости их быструю транспортировку. Среди полупроводниковых лазеров в настоящий момент лидирующими по характеристикам источниками практически во всём среднем ИК-диапазоне являются квантовые каскадные лазеры (ККЛ) [5] и межзонные каскадные лазеры (МКЛ). МКЛ достигают наилучшие рабочие характеристики в диапазоне 3 – 5 мкм [6], в то время как ККЛ более пригодны для средней и длинноволновой частей ИК-области. Однако эти источники не могут полностью удовлетворить запросы спектроскопии коротковолновой и длинноволновой областей ИК-диапазона. ККЛ и МКЛ достаточно сложны в изготовлении из-за необходимости роста большого массива квантовых ям (КЯ) и барьеров с идентичными параметрами, что приводит к их высокой себестоимости. Помимо этого, они в общем случае не обладают возможностью существенной перестройки рабочей частоты излучения (длины волны). Несомненно, сильной стороной МКЛ на основе A^3B^5 материалов является отработанная технология построения, которая позволяет создавать сложные конструкции лазеров с распределённой обратной

связью (РОС) с одномодовым режимом работы и низкими значениями порогового тока. Однако, из-за высоких требований к технологии роста развитая ростовая технология доступна для ограниченного числа материалов: ККЛ и МКЛ изготавливают в основном на основе соединений GaAs или InP. Это приводит к сложностям при продвижении в диапазон длин волн 20 – 50 мкм из-за сильного фонованого поглощения в этих материалах. На данный момент ККЛ в диапазоне от 20 до 40 мкм продемонстрированы лишь на отдельных длинах волн, соответствующих минимумам решётчатого поглощения, наибольшая из которых ~ 28 мкм [7]. Работы по созданию длинноволновых ККЛ на основе альтернативных материалов ведутся, однако они далеки от завершения. Так, например, для системы GaN/AlGaN рабочая длина волны составила ~ 40 мкм (7 ТГц) [8]. Однако сложности, имеющиеся в технологии роста и формирования нитридных структур, не позволяют сейчас оценить перспективы ККЛ на основе этих материалов. Таким образом, в настоящее время не существует ККЛ доступных в спектральном диапазоне 28 – 40 мкм, диапазон от 20 мкм до 28 мкм перекрыт ими лишь частично. Что же касается диапазона длин волн 3 – 5 мкм, то, несмотря на существование МКЛ, некаскадные межзонные лазеры также представляют интерес, поскольку они имеют более простую конструкцию, которая позволяет точно контролировать параметры выходной структуры, а также обеспечивают настройку длины волны в диапазоне сотен см⁻¹.

Перекрыть полностью длинноволновую область ИК-диапазона от 20 до 50 мкм могли бы межзонные лазеры на основе узкозонных материалов. В этом диапазоне известны межзонные источники когерентного излучения на основе халькогенидов свинца-олова. Обладая от природы квазирелятивистским законом дисперсии носителей [9], материалы типа PbSnSe и PbSnTe реализуют подавление безызлучательной оже-рекомбинации, что является фундаментальной физической основой для реализации межзонного усиления в настолько узкозонных материалах. В отличие от полупроводников группы A³B⁵ полоса остаточных лучей в материалах халькогенидов свинца-олова лежит существенно выше по длине волны, что позволило создать лазерные диоды с рабочей длиной волны до 46 мкм [10]. В последнее десятилетие было достигнуто лишь небольшое продвижение по длине волны: лазерное излучение (ЛИ) было получено до 50 мкм при криогенных рабочих температурах. Однако дальнейшего развития ни по длине волны излучения, ни по температуре (максимальная рабочая температура не превышала 77 К) эти межзонные лазеры не получили. Также остались нерешёнными проблемы, связанные с малой выходной мощностью и с высокой остаточной концентрацией носителей, которая не опускается ниже 10¹⁷ см⁻³.

Аналогичный квазирелятивистский закон дисперсии носителей реализуется в узкозонных квантовых ямах на основе твёрдого раствора HgCdTe (кадмий-ртуть-теллур или КРТ) в окрестности Γ -точки первой зоны Бриллюэна [11], что позволяет рассматривать данный материал как активную среду межзонного лазера, длина волны излучения которого переменна от параметров

структуры и может составлять от 2 до 60 мкм. Верхняя граница доступного диапазона определяется полосой остаточных лучей теллурида кадмия и теллурида ртути, которая расположилась в области длин волн 60 – 90 мкм. Управление энергией межзонных переходов в структурах с HgCdTe квантовыми ямами осуществляется за счёт изменения состава и толщины КЯ, качество которых, как и всей структуры, имеет высокий уровень. Его обеспечивает отработанная в Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН методика роста – молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и подтверждают исследования циклотронного резонанса, оптические исследования, характеристика с помощью просвечивающей электронной микроскопии и исследования энергии Урбаха, проведённые как в Институте физики микроструктур РАН, так и другими независимыми группами. Таким образом, используя гетероструктуры с КЯ HgCdTe/CdHgTe, можно «покрыть» широкую спектральную область среднего ИК-диапазона, охватив и область окна прозрачности атмосферы 3 – 5 мкм, и область длин волн 20 – 50 мкм.

Актуальность исследования волноводных гетероструктур с КЯ на основе КРТ, а также поиска оптимальных дизайнов структур, параметров накачки и методов получения лазерного излучения подтверждают последние результаты по получению стимулированного излучения (СИ). Так в ИК-диапазоне было продемонстрировано СИ на длинах волн 2,45 – 2,75 мкм при комнатной температуре, а в окне прозрачности атмосферы 3 – 5 мкм при термоэлектрическом охлаждении [12]. В длинноволновой области рекордным значением является СИ на длине волны 31 мкм [13], которая недоступна современным ККЛ. Всё это в совокупности указывает на возможность создания лазеров на основе волноводных гетероструктур с КЯ HgCdTe/CdHgTe, работающих при термоэлектрическом охлаждении и обладающих возможностью перестройки длины волны с температурой. Такие лазеры повысят конкурентоспособность межзонных лазеров как в области длин волн 3 – 5 мкм, так и при длине волны более 20 мкм, что позволит предложить альтернативу МКЛ и ККЛ.

Степень разработанности исследования

Ранее основные исследования были направлены на изучение свойств эпитаксиальных плёнок HgCdTe, так как данный материал является одним из основных при создании приёмников среднего ИК-диапазона [14]. Здесь исследования в основном были сосредоточены на транспортных свойствах твёрдых растворов HgCdTe, оптических свойствах эпитаксиальных плёнок и безызлучательных каналах рекомбинации через дефекты структуры.

Предшествующие исследования гетероструктур с КЯ на основе HgCdTe были сосредоточены на исследовании и получении стимулированного излучения преимущественно в коротковолновой области среднего ИК-диапазона. СИ в области длин волн более 10 мкм стали наблюдать около 10 лет назад, повышая со временем длину волны генерации до 20 мкм и далее до 31 мкм [13]. Также уклон был сделан на исследование «специфического» закона дисперсии

носителей [11], который позволяет частично или полностью подавить безызлучательную оже-рекомбинацию.

Возможность создания межзонного лазера на основе HgCdTe структур обсуждалось ещё в 90-х годах. Первый лазер работал при импульсной токовой накачке при температурах от 40 до 90 К, длина волны излучения составила 2,86 мкм при ширине линии 0,3 мэВ при 77 К. Следующее рекордное значение – 5,3 мкм при температуре 60 К – было достигнуто в 1993 году [15]. Однако дальнейшее продвижение было остановлено, во-первых, появлением ККЛ, во-вторых, фундаментальной проблемой с *p*-легированием. Помимо этого, в известных лазерах на основе HgCdTe, излучающих на длине волны около 3 – 5 мкм, в качестве активной среды выступали эпитаксиальные плёнки, в законе дисперсии носителей которых присутствует зона тяжёлых дырок, что уменьшает значение пороговой энергии оже-рекомбинации, и, как следствие, ограничивает длину волны генерации и рабочую температуру лазеров на их основе [11]. Поэтому были начаты поиски альтернативных конструкций лазеров на основе HgCdTe.

В качестве активной среды стали рассматривать гетероструктуры с массивом КЯ HgCdTe/CdHgTe, так как в них пороговая энергия безызлучательной оже-рекомбинации больше, чем в эпитаксиальных плёнках [11]. Одной из первых работ по исследованию структур с КЯ стала работа [16], где исследовались гетероструктуры в широких КЯ при оптической накачке. Здесь было продемонстрировано, что состав барьеров и напряжение КЯ влияет на пороговую мощность накачки, необходимую для генерации СИ. Так для структур с напряжёнными КЯ получено двукратное снижение порога по сравнению с аналогичными структурами без напряжённых КЯ. Это в том числе позволило увеличить температуру наблюдения излучения до 170 К. Однако рассматриваемые КЯ имели достаточно большую долю кадмия, поэтому закон дисперсии носителей данных КЯ мало отличался от объёмных структур КРТ.

В 2019 году был предложен дизайн лазера на основе бесщелевого HgCdTe, излучающего на переходах между уровнями Ландау, возникающими при помещении структуры в магнитное поле [17]. Однако работа такого лазера технически ограничена, что не позволяет использовать его в области длин волн более 20 мкм. Несколько лет назад также была предложена концепция ККЛ на основе HgCdTe для генерации излучения в длинноволновой области ИК-диапазона. Рассчитанные конструкции таких лазеров были представлены в работе [18]. Также последней из предложенных конструкций стала конструкция с вертикальным выводом излучения [19], где в качестве зеркал используются легированная подложка GaAs и металлический слой из алюминия или золота. Однако все последние работы имели только теоретическое описание и не были воплощены практически. Поэтому появляется острая необходимость в реализации какого-то альтернативного метода создания лазеров на основе гетероструктур с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe.

Настоящая работа является естественным продолжением исследований стимулированного излучения в гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe с параметрами, обеспечивающими значение межзонного оптического перехода в диапазоне длин волн более 20 мкм. Основной целью данных исследований является поиск факторов, которые ограничивают усиление КЯ и определяют возможность генерации стимулированного излучения при оптической накачке в непрерывном режиме, а также продвижение по длине волны в длинноволновую область и увеличение максимальной температуры наблюдения СИ. Совершенно новыми задачами в данной работе являются создание и исследование микродисковых резонаторов на основе гетероструктур с HgCdTe квантовыми ямами, получение информации о возможностях структур на основе HgCdTe с точки зрения постростовой обработки: оптимальных режимов ионного травления (ИТ), деградации материала при ИТ и напыления различных покрытий для эффективного вывода излучения. Проведённое диссертационное исследование является актуальным, оригинальным, соответствует современным тенденциям развития оптоэлектроники среднего ИК-диапазона и определяет мировой уровень в направлении генерации когерентного излучения среднего ИК-диапазона в материалах на основе HgCdTe .

Цели и задачи

Основной целью диссертационной работы является получение нового научного знания об излучательной и безызлучательной рекомбинациях неравновесных носителей заряда в длинноволновой ИК-области спектра для длин волн больше 20 мкм при непрерывной оптической накачке в гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe , исследование оптических свойств лазеров среднего инфракрасного диапазона на основе данных гетероструктур. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследование межзонной фотолюминесценции и стимулированного излучения волноводных гетероструктур с квантовыми ямами на основе HgCdTe в длинноволновой части среднего инфракрасного диапазона для осуществления характеристики структур: определения параметров квантовых ям (толщины и состава) и ширины запрещённой зоны.

2. Исследование стимулированного излучения при импульсной и квазинепрерывной оптической накачке в волноводных гетероструктурах с HgCdTe квантовыми ямами. Определение пороговых характеристик. Выявление факторов, определяющих пороговое значение плотности мощности накачки, необходимой для наблюдения стимулированного излучения.

3. Исследование динамики неравновесных носителей заряда с помощью измерений кинетики релаксации фотопроводимости в структурах с одной квантовой ямой на основе HgCdTe . Осуществление сравнения экспериментальных результатов с теоретическими оценками, полученными на основе уравнения динамики неравновесных носителей.

4. Изготовление микродисковых и торцевых гребенчатых резонаторов на основе гетероструктур с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe с шириной запрещённой зоны от 48 до 413 мэВ. Наблюдение лазерного излучения и исследование его пороговых характеристик.

5. Исследование оптических свойств HgCdTe микродисковых и торцевых гребенчатых лазеров от размера, глубины травления (высоты стенок резонаторов) и материала маски, используемой в фотолитографии, для оптимизации параметров технологии изготовления мезаструктур.

Научная новизна работы

1. Продemonстрировано, что методы ионного травления и фотолитографии позволяют создать микродисковые и торцевые гребенчатые лазеры из гетероструктур с квантовыми ямами на основе HgCdTe , межзонный оптический переход которых лежит в диапазоне длин волн 3 – 26 мкм. (Специальность 2.2.2 и 1.3.19)

2. Впервые получено лазерное излучение в микродисковых резонаторах диаметром 20 – 50 мкм на основе гетероструктур с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe в области длины волны около 4 мкм с максимальной температурой наблюдения излучения > 200 К, достижимой при охлаждении элементами Пельтье, при оптической накачке с пороговой плотностью мощности ≥ 50 кВт/см². (Специальность 1.3.19)

3. Показано, что основным фактором, ограничивающим максимальную температуру наблюдения лазерного излучения в микродисковых лазерах на основе гетероструктур с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe в диапазоне длин волн 3 – 5 мкм, являются оптические потери на вывод излучения. (Специальность 1.3.19)

4. Впервые продемонстрировано стимулированное излучение в волноводных структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe при квазинепрерывной оптической накачке (длина волны 10,6 мкм) с пороговой плотностью мощности 1,5 – 12 Вт/см² при криогенной температуре на длине волны около 14 – 24 мкм. (Специальность 2.2.2)

5. Экспериментально показано, что режим генерации структур с HgCdTe квантовыми ямами при квазинепрерывной оптической накачке в области длин волн больше 20 мкм при подавлении пороговой оже-рекомбинации определяется безызлучательной рекомбинацией Шокли-Рида-Холла, скорость которой определяется дефектностью материала. (Специальность 2.2.2)

6. Впервые получено лазерное излучение на модах шепчущей галереи в области 20 – 26 мкм в микродисковых HgCdTe лазерах, диаметром 200 мкм. (Специальность 1.3.19)

7. Показано, что при переходе от непротравленной структуры к микродисковому резонатору с высотой боковых стенок ≥ 3 мкм в области длин волн 20 – 26 мкм происходит падение эффективного времени жизни носителей

с увеличением глубины травления, что связано с безызлучательной рекомбинацией через дефекты, создаваемые процессом ионного травления. (Специальность 2.2.2 и 1.3.19)

8. Показано, что в гетероструктурах, выращенных на легированной до $10^{18} \text{ см}^{-3} n^{++}$ -GaAs-подложке, с HgCdTe квантовыми ямами с содержанием кадмия 2,6 %, со стравленными верхним волноводным слоем и половиной массива квантовых ям можно преодолеть соотношение внутренних потерь к фактору оптического ограничения величиной 1500 см^{-1} . (Специальность 2.2.2)

Теоретическая и практическая значимость работы

Научная значимость работы заключается в получении нового научного знания об оптических свойствах и процессах рекомбинации в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе твёрдого раствора HgCdTe в среднем инфракрасном диапазоне, а именно в области длин волн больше 20 мкм. Впервые продемонстрировано стимулированное излучение при квазинепрерывной оптической накачке на длине волны 24 мкм при криогенных температурах. Обнаружена причина, определяющая значение пороговой плотности мощности квазинепрерывной накачки в длинноволновом диапазоне.

Также в диссертации представлены результаты исследований оптических свойств микродисковых и торцевых гребенчатых лазеров на основе гетероструктур с HgCdTe КЯ, сформированных методами ионного травления и фотолитографии. Впервые продемонстрировано лазерное излучение на модах шепчущей галереи при температурах, достигаемых многокаскадными элементами Пельтье, на длине волны около 4 мкм и при криогенных температурах на длине волны 20 – 26 мкм. Продemonстрированы первые результаты исследования влияния ионного травления, материалов маски и глубины травления на поверхность мезоструктур и их оптические свойства. Показано, что, несмотря на ухудшение волноводного слоя и массива квантовых ям с помощью ионного травления, можно преодолеть соотношение внутренних потерь к фактору оптического ограничения размером до 1500 см^{-1} , что указывает на возможность преодоления оценённых значений такого соотношения в оптимизированных структурах с КЯ HgCdTe/CdHgTe и генерации стимулированного излучения в них на длинах волн в диапазоне 33 – 50 мкм. Полученные результаты могут быть напрямую использованы при разработке и изготовлении межзонных лазеров или оптических конвертеров на основе гетероструктур с квантовыми ямами на основе твёрдых растворов HgCdTe.

Методология и методы исследования

В работе были применены апробированные экспериментальные и теоретические методы исследования свойств полупроводниковых структур в среднем инфракрасном диапазоне, отработанные и используемые в Институте физики микроструктур РАН.

Для исследования стимулированного и лазерного излучения в широком температурном диапазоне непротравленных исходных образцов и структур с мезами на основе гетероструктур с квантовыми ямами $\text{HgCdTe}/\text{CdHgTe}$ применялся метод фурье-спектроскопии, осуществляемый с помощью фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v.

Для изучения фотолюминесценции всех исследуемых образцов использовался метод фурье-спектроскопии в широком температурном диапазоне с применением работающих в импульсном или непрерывном режиме источников возбуждения.

Для исследования процессов рекомбинации использовалась прямая методика измерения кинетики фотопроводимости, где в качестве источника возбуждения применялся импульсный параметрический генератор излучения среднего инфракрасного диапазона с перестраиваемой длиной волны и длительностью импульса 15 нс.

Для характеристики поверхности, размеров мезоструктур использовались оптический микроскоп, сканирующий электронный микроскоп и оптическая измерительная система Talysurf.

Расчёты закона дисперсии носителей и пороговой энергии оже-рекомбинации гетероструктур с квантовыми ямами на основе HgCdTe проводились в рамках четырёхзонной модели Кейна 8×8 с помощью программного обеспечения, разработанного профессором, д.ф.-м.н. В. Я. Алёшкиным (ИФМ РАН).

Положения, выносимые на защиту

1. Микродисковые лазеры на основе гетероструктур с квантовыми ямами $\text{HgCdTe}/\text{CdHgTe}$, сформированные с помощью методов фотолитографии и ионного травления, при оптической накачке генерируют излучение на модах шепчущей галереи в окне прозрачности атмосферы (длина волны 3 – 5 мкм) при термоэлектрическом охлаждении ($T \geq 200$ K). (Специальность 2.2.2 и 1.3.19)

2. В волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe возможна генерация стимулированного излучения в области длин волн 14 – 24 мкм при температуре 8 K при оптической квазинепрерывной накачке с длиной волны 10,6 мкм и с пороговой плотностью мощности 1,5 – 12 Вт/см². Возможность генерации стимулированного излучения при квазинепрерывной оптической накачке и значение пороговой плотности мощности накачки, необходимой для генерации стимулированного излучения, в структурах с HgCdTe квантовыми ямами с широкой областью квазигиперболического закона дисперсии носителей в окрестности Γ -точки определяется скоростью рекомбинации Шокли-Рида-Холла. (Специальность 2.2.2)

3. В лазерных мезоструктурах диапазона длин волн 7 – 26 мкм на основе волноводных гетероструктур с HgCdTe квантовыми ямами, созданных методом ионного травления, рост пороговой плотности мощности накачки и уменьшение максимальной температуры наблюдения излучения при увеличении

глубины травления по сравнению с непроцессированными структурами обусловлены уменьшением эффективного времени жизни носителей вследствие безызлучательной рекомбинации на дефектах, создаваемых при травлении. (Специальность 2.2.2 и 1.3.19)

4. В волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe со стравленными верхним волноводным слоем и половиной массива квантовых ям может быть получено стимулированное излучение на длине волны 25 мкм при величине отношения модовых потерь к фактору оптического ограничения 1500 см^{-1} , что позволяет рассчитывать на получение стимулированного излучения в оптимизированных волноводных структурах в более длинноволновом диапазоне 33 – 50 мкм, где нерадиационные потери возрастают вследствие двухфононного решётчного поглощения. (Специальность 2.2.2)

Личный вклад автора

Постановка задач работы осуществлялась совместно диссертантом и его научным руководителем доктором физико-математических наук С. В. Морозовым. Основные экспериментальные результаты данной работы, а именно, спектры фотолюминесценции и спектры стимулированного и лазерного излучения в зависимости от температуры и длины волны накачки, зависимости интенсивности сигнала от плотности мощности накачки в широком температурном диапазоне, температурные зависимости порогов генерации стимулированного и лазерного излучения получены автором лично, либо при его участии. Характеризация структур с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов, интерферометра белого света проводилась диссертанткой самостоятельно или под руководством сотрудников ИФМ РАН, работающих на данном оборудовании. Также автор самостоятельно или совместно с научным руководителем осуществляла взаимодействие с технологами для роста гетероструктур с заданным дизайном и для формирования мезаструктур с определёнными параметрами.

Ввиду обширной направленности работы приведённые результаты было бы невозможно получить без коллектива соавторов.

Рост волноводных гетероструктур с квантовыми ямами на основе HgCdTe , исследованных в диссертации, проводился методом молекулярно-лучевой эпитаксии в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН группой под руководством Н. Н. Михайлова и С. А. Дворецкого.

Формирование мезаструктур осуществлялось методами фотолитографии и ионного травления Д. В. Шенгуровым, Е. Е. Морозовой и Н. С. Гусевым в Институте физики микроструктур РАН.

Расчёты локализации TE_0 -мод волноводных гетероструктур с квантовыми ямами $HgCdTe/CdHgTe$, зависимостей отношения потерь к фактору оптического ограничения от энергии межзонного перехода исследуемых структур проводились А. А. Дубиновым (ИФМ РАН).

Расчёты коэффициентов материального усиления в квантовых ямах при различных температурах, пороговой концентрации носителей и излучательного времени жизни носителей проводились В. Я. Алёшкиным и А. А. Дубиновым (ИФМ РАН).

Расчёты зонного спектра исследуемых гетероструктур и пороговой энергии оже-рекомбинации с участием двух электронов и дырки выполнялись автором диссертационной работы в программном обеспечении, разработанном В. Я. Алёшкиным (ИФМ РАН).

Полный коллектив соавторов, участвовавших в обсуждении полученных результатов и подготовке публикаций, указан в списке публикаций диссертанта А1 — А7.

Степень достоверности и апробации результатов

Полученные в данной работе результаты обладают высокой степенью достоверности, что подкреплено использованием различных апробированных экспериментальных методик исследования полупроводниковых структур в среднем инфракрасном диапазоне и подтверждено хорошим согласием между результатами, полученными в рамках применения этих методик, и хорошим согласием экспериментальных и теоретических данных (в том числе и в случаях, когда теоретическое рассмотрение предшествовало эксперименту). Полученные результаты также согласуются с имеющимися в литературе данными по теме исследования.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Института физики микроструктур РАН, на международных и российских конференциях: XXIII, XXIV, XXV, XXVI, XXVII, XXVIII, XXIX научных конференциях по радиофизике (Нижний Новгород, 2019 – 2025 г.), 8th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (Нижний Новгород, 2019), XXI, XXII, XXIII, XXIV Всероссийских молодёжных конференциях по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2019 – 2022 г.), XXV, XXVI, XXVII, XXVIII, XXIX, XXX Симпозиумах «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2021 – 2026 г.), XXV, XXVI, XXVII Нижегородских сессиях молодых учёных (Нижний Новгород, 2020 – 2022 г.), XV и XVI Российских конференциях по физике полупроводников (Нижний Новгород, 2022 г. и Санкт-Петербург, 2024 г.), Международных конференциях Физика.СПб 2023, 2024 (Санкт-Петербург, 2023 – 2024 г.) и VIII симпозиуме «Полупроводниковые лазеры: физика и технология» (Санкт-Петербург, 2025 г.).

Несколько результатов, вошедших в диссертацию, были включены в список важнейших результатов Института прикладной физики РАН, направляемых в Российскую академию наук.

По теме работы опубликовано 7 статей в рецензируемых журналах Applied Physics Letters, Semiconductor Science and Technology, Applied Optics, Письма в ЖТФ и Журнал прикладной спектроскопии (A1 – A7) и 15 публикаций в сборниках тезисов докладов и трудов конференций и симпозиумов.

Всё вышеперечисленное в совокупности свидетельствует о достоверности полученных результатов и сделанных на их основе выводов.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и списка публикаций автора по теме работы. Объём диссертации составляет 144 страницы, включая 62 иллюстрации и 12 таблиц. Список литературы составляет 146 публикаций, список публикаций автора – 7 статей и 15 тезисов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследования и показана степень её разработанности, изложены цели и задачи работы, представлены научная новизна и практическая и теоретическая значимости работы, изложены методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, отражена степень достоверности полученных результатов и продемонстрирована их апробация, указан личный вклад автора в получение результатов.

Основная часть работы разделена на четыре главы. **Первая глава** диссертации посвящена общей информации об объекте исследования, а именно, волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe, и методах исследования их свойств и характеристик. Основные свойства и механизмы рекомбинации в гетероструктурах с КЯ HgCdTe/CdHgTe описаны в параграфе 1.2. В параграфе 1.3 кратко описываются методики характеристики поверхности мезоструктур. В параграфе 1.4 и 1.5 приводятся схемы экспериментальных установок и подробное описание методов измерения кинетики релаксации фотопроводимости и спектров излучения с помощью фурье-спектроскопии, соответственно.

В начале второй, третьей и четвёртой глав представлены обзоры о состоянии ранее приведённых исследований, в том числе непосредственно предшествующих получению оригинальных результатов данной диссертации (параграфы 2.1 и 2.2, 3.1 и 3.2, 4.1), и параметры исследуемых образцов (параграфы 2.4, 3.3 и 4.2). В конце глав сформулированы заключения, в которых отражены основные результаты (параграфы 2.7, 3.6 и 4.6).

Глава 2 посвящена исследованию микродисковых лазеров, сформированных методами фотолитографии (ФЛГ) и ионного травления (ИТ) на основе

волноводных гетероструктур с КЯ HgCdTe/CdHgTe . В параграфе 2.3 описывается процесс формирования мезаструктур с помощью ФЛГ и ИТ при использовании в качестве маски фоторезиста (ФР) или металла, нанесённого при помощи магнетронного напыления и взрывной литографии.

В параграфе 2.5 представлено лазерное излучение (ЛИ) на модах шепчущей галереи на длине волны около 4 мкм в HgCdTe микродисках диаметрами 20 – 50 мкм с максимальной температурой наблюдения излучения 230 – 250 К (Рисунок 1а) [A1-A4]. Показано, что оптические потери на вывод излучения, которые оцениваются как 81 см^{-1} для микродиска диаметром 20 мкм, 37 см^{-1} для 40 мкм микродиска и 32 см^{-1} для 50 мкм микродиска, являются основной причиной того, что максимальная температура наблюдения ЛИ микродисков меньше максимальной температуры наблюдения СИ непроцессированного исходного образца (НАО), сформированного из той же структуры, и уменьшается с уменьшением диаметра микродиска. Данное утверждение также подтверждают результаты исследования температурного гашения фотолюминесценции (ФЛ) и зависимости интенсивности излучения, попадающего на детектор, от плотности потока фотонов накачки микродисков и НАО. Динамики гашения ФЛ микродисков и НАО совпадают в пределах погрешности экспериментальных измерений и флуктуации состава (Рисунок 1б), а различия в значениях пороговых плотностей потока фотонов накачки наблюдаются лишь при температурах выше 190 К (Рисунок 1в), что указывает на рост пороговой концентрации носителей, необходимой для генерации ЛИ микродиска, по сравнению с пороговой концентрацией носителей, необходимой для генерации СИ НАО, что связано с оптическими потерями на вывод излучения на шероховатостях [A4].

В параграфе 2.6 приведены исследования оптических свойств мезаструктур, при формировании которых использовались металлические маски. Интерес к получению микродисковых лазеров на основе гетероструктур с HgCdTe КЯ с помощью ФЛГ, где в качестве маски будет выступать металл, обусловлен возможностями улучшения «вертикальности» стенок мезаструктур и увеличения глубины травления, так как селективность травления металла больше, чем ФР. Показано, что металлические маски из Ni/V и Al подходят в качестве масок при проведении взрывной литографии и ИТ для формирования мезаструктур на основе волноводных гетероструктур с КЯ HgCdTe : продемонстрированы одномодовое ЛИ при 60 К в 50 мкм микродиске (Рисунок 2а), сформированном с помощью маски Ni/V , и ЛИ на модах шепчущей галереи в кольцевом резонаторе, сформированном с помощью Al маски (Рисунок 2б, в) [A1]. При использовании металлических масок улучшилась вертикальность стенок: при использовании ФР наклон составляет $78^\circ - 80^\circ$, а в случае металла – $80^\circ - 83^\circ$.

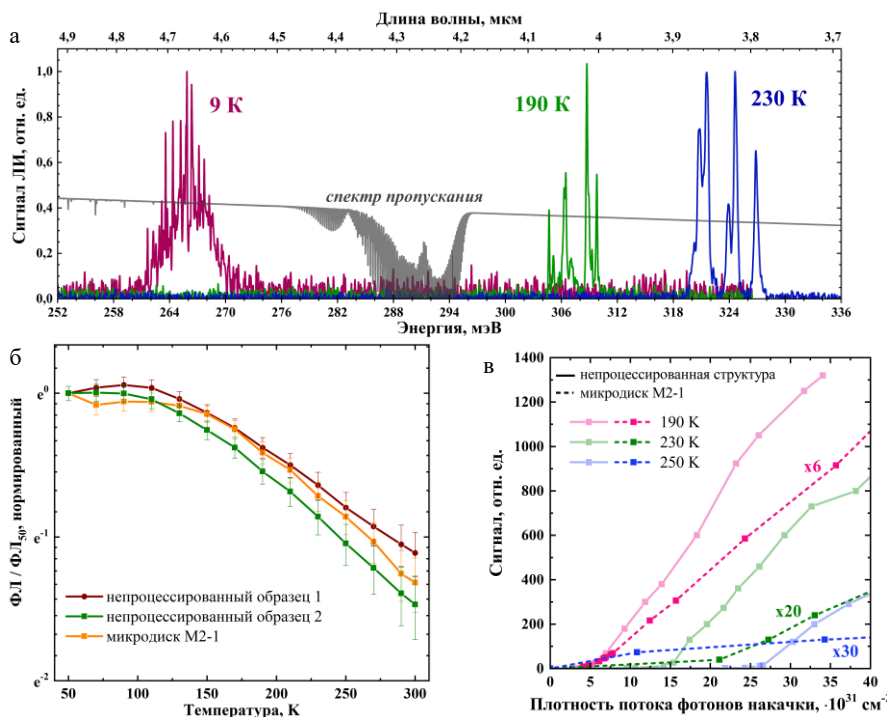


Рисунок 1 – а) Спектры лазерного излучения 50 мкм HgCdTe микродискового лазера при различной температуре и спектр пропускания. Разрешение спектров составляет 0,062 мэВ. Спектры нормированы на максимум сигнала. б) Температурные зависимости интегральной фотолюминесценции микродискового лазера M2-1 (диаметр 50 мкм) и двух макроскопических непротесированных образцов, полученных из одной ростовой пластины, нормированные на значение при 50 К. в) Зависимость интенсивности излучения от плотности потока фотонов накачки для непротесированного образца и микродиска M2-1 при различных температурах. Множители показывают усиление сигнала микродиска, усиление сигнала непротесированной структуры равно 1.

Глава 3 посвящена исследованию стимулированного излучения в гетероструктурах с КЯ HgCdTe/CdHgTe в диапазоне 14 – 24 мкм при квазинепрерывной накачке CO₂-лазером с длиной волны 10,6 мкм. Под квазинепрерывным режимом возбуждения подразумевается возбуждение со скважностью не более 100 и длительностью импульса не менее 50 мкс. За такое время достигается тепловое равновесие электронов и дырок, поэтому с этой точки зрения режим можно рассматривать как непрерывный. Исследуемые структуры отличаются дизайном (*A* и *B* – структуры с 10 и 15 мкм CdTe-буфером, соответственно, и полуизолирующей GaAs-подложкой, *N* – структура с 10 мкм CdTe-буфером и *n*⁺⁺-GaAs-подложкой) и длиной волны излучения (в названии структуры – это цифра рядом с буквой).

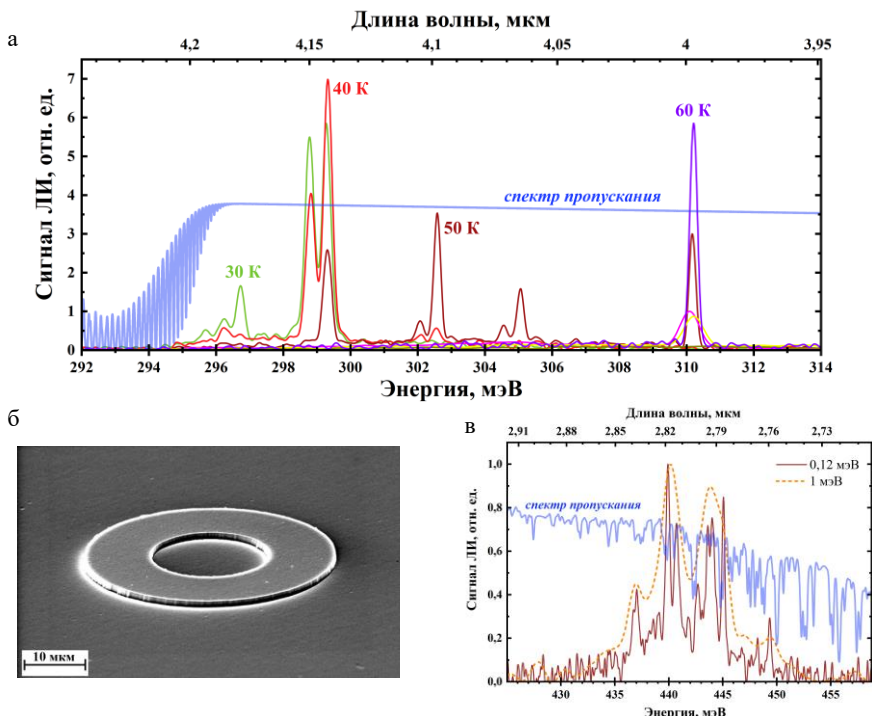


Рисунок 2 – а) Спектры лазерного излучения при различных температурах микродиска, при формировании которого использовалась Ni/V маска. Спектральное разрешение составляет 0,12 мэВ. Кольцевой резонатор, сформированный с помощью Al маски: б) СЭМ-снимок, в) спектры лазерного излучения (нормированные на максимум сигнала) при 210 К с разным спектральным разрешением и спектр пропускания со спектральным разрешением 0,12 мэВ.

В параграфе 3.4 представлены спектры стимулированного излучения гетероструктур с HgCdTe КЯ, полученные при квазинепрерывной оптической накачке с пороговой плотностью мощности $1,5 - 12 \text{ Вт/см}^2$ при температурах $8 - 20 \text{ К}$ (Рисунок 3а) [A5]. Пороговая плотность мощности у структур разная (Таблица 1), и эту разницу нельзя объяснить соотношением модовых потерь к фактору оптического ограничения ($\alpha_{\text{внут}}/\Gamma$) (Рисунок 3б): пороговая плотность мощности для A22 незначительно отличается от пороговой плотности мощности для N21, в то время как их $\alpha_{\text{внут}}/\Gamma$ отличаются в 40 раз.

Основными конкурентами излучательной рекомбинации являются безызлучательные процессы – оже-рекомбинация и рекомбинация Шокли-Рида-Холла (ШРХ). В работе показано, что для исследуемых структур оже-рекомбинация будет подавлена, так как 1) начальная кинетическая энергия дырки после генерации CO_2 -лазером электронно-дырочной пары меньше пороговой энергии оже-рекомбинации – кинетической энергии системы из трёх частиц, необходимой для начала оже-процесса; 2) пороговая концентрация носителей

составляет $(8 \pm 2) \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$, что меньше концентрации носителей, необходимой для превалирования оже-рекомбинации над излучательной рекомбинацией [20]; 3) использовалась длинноволновая накачка 10,6 мкм, которая при плотности мощности менее кВт/см² не приводит к разогреву носителей [21], следовательно, эффективная температура носителей не превышала 20 К, максимальной температуры наблюдения СИ в этом режиме.

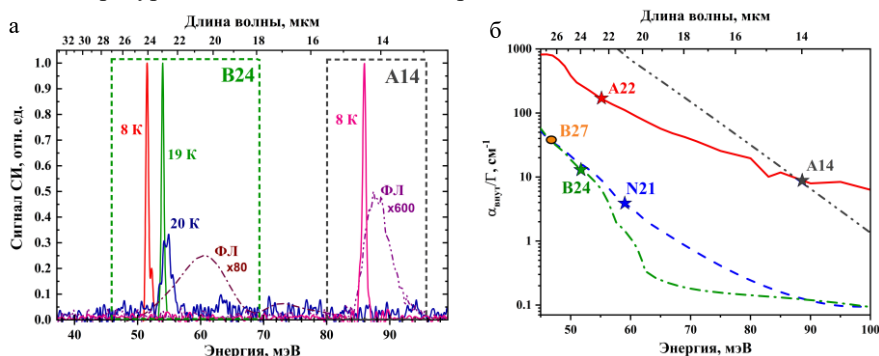


Рисунок 3 – а) Спектры стимулированного излучения при накачке с длиной волны 10,6 мкм и фотолуминесценции при накачке с длиной волны 808 нм структур A14 и B24. б) Зависимость $\alpha_{\text{изл}}/\Gamma$, которую необходимо преодолеть для достижения оптического усиления, от длины волны излучения для различных конструкций структур. Звёздами указаны значения для структур, в которых получено СИ при квазинепрерывной накачке, и жёлтой точкой указано расчётное значение для структуры B27, в которой не получено СИ при квазинепрерывной накачке. Данные значения рассчитаны при 8 К.

Таблица 1 – Характеристики КРТ структур с квантовыми ямами при квазинепрерывной оптической накачке. Обозначения: № – номер структуры, $P_{\text{пор}}$ – пороговая плотность мощности накачки при 8 К, $\tau_{\text{эфф}}$ – эффективное время жизни носителей, оценённое с помощью формулы (1); $\tau_{\text{изл}}$ – время излучательной рекомбинации, рассчитанное в модели [22].

№	$P_{\text{пор}}, \text{ Вт/см}^2$	$\tau_{\text{эфф}}, \text{ нс}$	$\tau_{\text{изл}}, \text{ нс}$
A14	$1,5 \pm 1$	40 ± 20	40
A22	12 ± 1	5 ± 2	45
B24	2 ± 1	30 ± 15	35
N21	8 ± 1	8 ± 2	40

В параграфе 3.5 приводится расчёт времени жизни носителей по формуле:

$$\tau_{\text{эфф}} = \frac{c \cdot h \cdot n_{\text{пор}}}{\alpha \cdot \lambda \cdot P_{\text{пор}}}, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме, h – постоянная Планка, λ – длина волны накачки, α – коэффициент поглощения излучения накачки в КЯ, который составляет 0,5 %, $P_{\text{пор}}$ – пороговая плотность мощности накачки при 8 К, $n_{\text{пор}}$ – пороговая концентрация носителей. Результаты представлены в таблице 1. Сравнение $\tau_{\text{эфф}}$ с $\tau_{\text{изл}}$ показывает, что по порядку величины эти времена сходятся для структур A14 и B24, где пороговые плотности мощности были наименьшими, в то время как для структур A22 и N21 экспериментальные времена оказываются ниже теоретических. Так как пороговая оже-рекомбинация

в данных структурах подавлена, то падение времени жизни может происходить только из-за рекомбинации ШРХ, эффективность которой зависит от дефектности структур: чем выше дефектность, тем эффективнее ШРХ и тем ниже время жизни носителей. Также в параграфе 3.5 исследуется кинетика релаксации фотопроводимости (ФП) структур с одиночными КЯ, которая демонстрирует доминирование механизма рекомбинации ШРХ. Для одних структур $\tau_{ФП}$ приближается к $\tau_{изл}$, для других – сильно отличается, что также указывает на различную дефектность структур с одиночными КЯ. Полученное значение времени жизни носителей структур с множественными КЯ $\tau_{эфф}$ в целом соответствуют результатам прямых измерений кинетики носителей ($\tau_{ФП}$), выполненных с помощью исследований спада ФП, в образцах с одной квантовой ямой с близкими значениями шириной запрещённой зоны. Это, а также продемонстрированное подавление оже-рекомбинации в данных структурах и разное значение $\alpha_{анул}/Г$ указывают на то, что значение пороговой плотности мощности квазинепрерывной оптической накачки при генерации СИ определяется различной дефектностью материала, что приводит к разной эффективности механизма рекомбинации ШРХ [A5]. В лучших структурах рекомбинация ШРХ не оказывает заметного влияния на общий темп рекомбинации и времена жизни носителей приближаются к излучательному времени. Также наиболее вероятно, что именно процесс рекомбинации ШРХ может ограничивать получение СИ на длинах волн более 24 мкм в квазинепрерывном режиме. Структуры В24 и В27 схожи по дизайну и по величине потерь (Рисунок 3б), однако СИ в квазинепрерывном режиме возбуждения в В27 не наблюдалось.

В главе 4 представлены исследования параметров СИ и ЛИ структур с микродисковыми резонаторами разной высоты. Так как мезоструктуры формировались методами ФЛГ и ИТ на основе структуры с HgCdTe КЯ, выращенной на легированной n^{++} -GaAs-подложке, то даже при стравливании вне микродиска покровного слоя, верхнего волноводного слоя и половины массива КЯ из области вне микродиска наблюдалось СИ (Рисунок 4а). Для уменьшения вклада СИ в спектр излучения и выделения спектров ЛИ при оптическом возбуждении была использована диафрагма. Методика исследования СИ и ЛИ в данных структурах описана в параграфе 4.3.

В параграфе 4.4 представлено впервые полученное ЛИ HgCdTe микродисков в диапазоне длин волн 20 – 26 мкм (Рисунок 4б) [A6]. Показано, что при увеличении глубины травления (высоты резонатора) происходит уменьшение максимальной температуры наблюдения СИ из области вне микродиска и ЛИ микродиска, а также увеличение пороговой плотности мощности накачки и для области вне микродиска, и для микродиска. При этом ЛИ из микродиска при стравливании вне микродиска волноводного слоя с массивом КЯ не наблюдается. Проведённый анализ значений модовых потерь в волноводе и пороговых плотностей мощности накачки возникновения СИ из области вне микродиска и ЛИ микродиска позволили с помощью формулы (1) оценить эффективное время жизни носителей, которое составило 150 пс для НИО, 8 пс для области

вне микродиска и $\sim 2\text{--}5$ пс для микродиска. Уменьшение времени жизни носителей на 1,5 порядка указывает на эффективную безызлучательную рекомбинацию на дефектах, создаваемых при ИТ [А6]. Различие в пороговых мощностях накачки для СИ НИО и ЛИ микродисков, по-видимому, связано с разной плотностью дефектов, вносимых ИТ, что также приводит к различной скорости уменьшения максимальных температур наблюдения СИ и ЛИ при увеличении глубины травления. Аналогичные исследования были проведены в торцевых гребенчатых лазерах, где наблюдалось только ЛИ на модах Фабри-Перо в области длин волн 7 – 9 мкм. Здесь тенденция уменьшения времени жизни носителей аналогична уменьшению времени жизни носителей в микродисках с увеличением глубины травления: при переходе от НИО к образцу с резонатором время жизни носителей падает на порядок [А7].

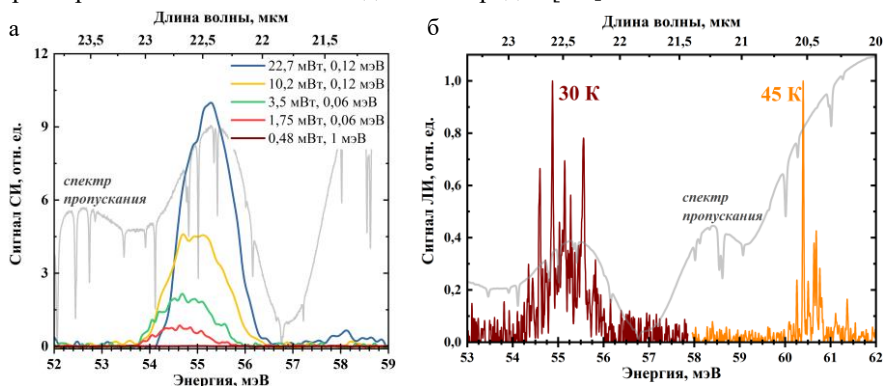


Рисунок 4 – а) Спектры стимулированного излучения образца № 1201с при 35 К при разной плотности мощности накачки импульсным CO_2 -лазером с длиной волны 10,6 мкм и разным спектральным разрешением. б) Спектры лазерного излучения микродиска № 1201с при 30 К и 45 К и спектральном разрешении 0,012 мЭВ. Для образца № 1201с сравнены покровный слой, верхний волноводный слой и половина массива квантовых ям.

В следующем параграфе 4.5 показано, что возможно получить СИ в гетероструктурах с КЯ HgCdTe/CdHgTe в области длин волн 33 – 50 мкм, в которой на данный момент не продемонстрировано СИ из-за большого соотношения внутренних потерь $\alpha_{\text{внут}}$ к фактору оптического ограничения Γ ($700\text{--}4000\text{ см}^{-1}$), определяемого двухфононным поглощением в теллуриде кадмия (CdTe) и теллуриде ртути (HgTe). В предыдущем параграфе было продемонстрировано, что в структуре со сравненными покровным слоем, верхним волноводным слоем и половиной массива КЯ из области вне микродиска наблюдается СИ. При этом $\alpha_{\text{внут}}/\Gamma$ достигает величины 1500 см^{-1} [А6]. Это означает, что для генерации СИ на отдельных длинах волн в области 33 – 50 мкм необходимо сконструировать структуру, в которой материальное усиление G будет превосходить уровень $700\text{ см}^{-1} \leq \alpha_{\text{внут}}/\Gamma \leq 1500\text{ см}^{-1}$. Используя работы [23, 24], можно показать, что теоретически в оптимизированной структуре с $\Gamma = 0,01$ можно достичь материального усиления размером 4000 см^{-1} в области 33 – 50 мкм, а, следовательно,

можно достичь и уровня 1500 см^{-1} , которые экспериментально удалось преодолеть в данной работе.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Пр продемонстрировано, что методы фотолитографии и ионного травления позволяют создать микродисковые и торцевые гребенчатые лазеры из гетероструктур с квантовыми ямами на основе HgCdTe , межзонный оптический переход которых лежит в диапазоне длин волн $4 - 26\text{ мкм}$ [A1, A2, A3, A4, A6, A7]. (Специальность 2.2.2 и 1.3.19)

2. В микродисковых лазерах на основе гетероструктур с HgCdTe квантовыми ямами лазерное излучение на модах шепчущей галереи в области 4 мкм возникает при оптической накачке с пороговой плотностью мощности до 50 кВт/см^2 при температурах $\leq 190\text{ К}$, что, во-первых, в пределах погрешности не отличается от пороговой интенсивности исходной непротсессированной структуры, во-вторых, при токовом возбуждении соответствует плотности тока 500 А/см^2 [A3, A4]. (Специальность 1.3.19)

3. Показано, что максимальная температура наблюдения генерации HgCdTe микродисковых лазеров диаметром $20 - 50\text{ мкм}$ в окне прозрачности атмосферы $3 - 5\text{ мкм}$ составляет $230 - 260\text{ К}$, что достижимо при охлаждении элементами Пельтье. Значение максимальной температуры генерации лазерного излучения определяется в первую очередь оптическими потерями на вывод излучения, а не безызлучательной оже-рекомбинацией [A2, A3, A4]. (Специальность 1.3.19)

4. Впервые продемонстрировано стимулированное излучение в волноводных структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe с 15 мкм CdTe -буфером при квазинепрерывной оптической накачке с пороговой плотностью мощности 2 Вт/см^2 при температуре 8 К на длине волны около 24 мкм [A5]. (Специальность 2.2.2)

5. Впервые получено лазерное излучение на модах шепчущей галереи в области $20 - 26\text{ мкм}$ в микродисковых HgCdTe лазерах, диаметром 200 мкм при криогенных температурах [A6]. (Специальность 1.3.19)

6. Показано, что при переходе от непротсессированной структуры к микродисковому резонатору, а также с увеличением высоты стенок резонатора, то есть глубины травления вне области микродиска, эффективное время жизни носителей уменьшается на $1,5$ порядка, что связано с увеличением эффективности безызлучательных процессов рекомбинации через дефектные центры, возникшие в результате ионного травления [A6, A7]. (Специальность 2.2.2 и 1.3.19)

7. Экспериментально показано, что квазинепрерывный режим генерации структур с HgCdTe квантовыми ямами при оптической накачке в области длин

волн больше 20 мкм при подавлении пороговой оже-рекомбинации ограничивается безызлучательной рекомбинацией Шокли-Рида-Холла, скорость которой определяется дефектностью материала [A5]. (Специальность 2.2.2)

8. Продemonстрировано, что в гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe , выращенных на легированной $\text{GaAs } n^{++}$ -подложке (с концентрацией носителей 10^{18} см^{-3}) и содержащих 2,6 % кадмия в квантовых ямах, при стравливании верхнего волноводного слоя и половины массива квантовых ям удастся преодолеть отношение модовых потерь к фактору оптического ограничения, составляющее 1500 см^{-1} , и наблюдать стимулированное излучение при оптической накачке импульсным CO_2 -лазером (длина волны 10,6 мкм) с пороговой плотностью мощности 10 кВт/см^2 [A6]. Теоретические оценки показывают, что преодоления таких потерь должно быть достаточно для генерации на длинах волн в области 33 – 50 мкм. (Специальность 2.2.2)

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Farmer, C. B. Simultaneous spectroscopic measurements of stratospheric species: O_3 , CH_4 , CO , CO_2 , N_2O , H_2O , HCl , and HF at northern and southern mid-latitudes / C. B. Farmer, O. F. Raper, B. D. Robbins, R. A. Toth, C. Mulle // *Journal of Geophysical Research*. – 1980. – Vol. 85. – № C3. – P. 1621-1632.
2. Коровкин, М. В. Инфракрасная спектроскопия карбонатных минералов: учебное пособие / М. В. Коровкин, Л. Г. Ананьева; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 96 с.
3. Al-Douseri, F. M. THz wave sensing for petroleum industrial applications / F. M. Al-Douseri, Y. Chen, X. C. Zhang // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. – 2006. – Vol. 27. – № 4. – P. 481.
4. Koroleva, A. O. The foreign-continuum absorption of water vapour in the far-infrared ($50\text{--}500 \text{ см}^{-1}$) / A. O. Koroleva, T. A. Odintsova, M. Y. Tretyakov, O. Pirali, A. Campargue // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2021. – Vol. 261. – P. 107486.
5. Razeghi, M. Quantum cascade lasers: from tool to product / M. Razeghi, Q. Y. Lu, N. Bandyopadhyay [et al.] // *Optics express*. — 2015. — Vol. 23. — № 7. — P. 8462-8475.
6. Deng, Y. Narrow linewidth characteristics of interband cascade lasers / Y. Deng, B.-B. Zhao, X.-G. Wang, C. Wang // *Applied Physics Letters*. – 2020. – Vol. 116. – № 20. – P. 201101.
7. Ohtani, K. Far-Infrared Quantum Cascade Lasers Operating in the AlAs Phonon Reststrahlen Band / K. Ohtani, M. Beck, M. J. Süess [et al.] // *ACS Photonics*. — 2016. — Vol. 3. — № 12. — P. 2280-2284.
8. Anwar, M. F. GaN-based terahertz quantum cascade lasers / M. F. Anwar, T. W. Crowe, T. Manzur, W. Terashima, H. Hirayama // *Proc. SPIE*. — 2015. — Vol. 9483. — P. 948304.

9. Dimmock, J. Band Structure and Laser Action in $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ / J. Dimmock, I. Melngailis, A. Strauss // *Physical Review Letters*. — 1966. — Vol. 16. — № 26. — P. 1193-1196.
10. Курбатов, Л. Н. Перестраиваемые гетеролазеры дальнего ИК диапазона с длиной волны до 46,2 мкм / Л. Н. Курбатов, А. Д. Бритов, С. М. Караваев [и др.] // *Письма в ЖЭТФ*. — 1983. — Т. 37. — № 9. — С. 422-424.
11. Alymov, F. Z. Nonparabolicity Effects on Carrier Lifetimes in Bulk $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Alloys and Mid-Infrared 2D $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}$ Single Quantum Well Lasers / F. Z. Alymov, A. Kadri, N. Mokdad, K. Zitouni // *Superlattices Microstructure*. — 2021. — Vol. 150. — P. 106780.
12. Kudryavtsev, K. E. Temperature limitations for stimulated emission in 3–4 μm range due to threshold and non-threshold Auger recombination in $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ quantum wells / K. E. Kudryavtsev, V. V. Rumyantsev, V. Ya. Aleshkin [et al.] // *Applied Physics Letters*. — 2020. — Vol. 117. — № 8. — P. 083103.
13. Rumyantsev, V. V. Stimulated emission in 24–31 μm range and «Reststrahlen» waveguide in HgCdTe structures grown on GaAs / V. V. Rumyantsev, A. A. Dubinov, V. V. Utochkin [et al.] // *Applied Physics Letters*. — 2022. — Vol. 121. — № 18. — P. 182103.
14. Rogalski, A. History of infrared detectors / A. Rogalski // *Opto-Electronics Review*. — 2012. — Vol. 20. — № 3. — P. 279-308.
15. Bernevig, B. A. Quantum spin Hall effect and topological phase transition in HgTe quantum wells / B. A. Bernevig, T. L. Hughes, S. C. Zhang [et al.] // *Science*. — 2006. — Vol. 314. — № 5806. — P.1757-1761.
16. Bleuse, J. Laser emission in HgCdTe in the 2–3.5 μm range // J. Bleuse, J. Bonnet-Gamard, G. Mula, N. Magnea, J.-L. Pautrat // *Journal of Crystal Growth*. — 1999. — Vol. 197. — № 3. — P. 529-536.
17. But, D. B. Suppressed Auger scattering and tunable light emission of Landau-quantized massless Kane electrons / D. B. But, M. Mittendorff, C. Consejo [et al.] // *Nature Photonics*. — 2019. — Vol. 13. — № 11. — P. 783-787.
18. Dubinov, A. A. Thin active region HgCdTe -based quantum cascade laser with quasi-relativistic dispersion law / A. A. Dubinov, D. V. Ushakov, A. A. Afonenko [et al.] // *Optics Letters*. — 2022. — Vol. 47. — № 19. — P. 5048.
19. Dubinov, A. A. Feasibility of a 9 THz $\text{HgTe}/\text{HgCdTe}$ quantum-well vertical-cavity surface-emitting laser / A. A. Dubinov, V. Ya. Aleshkin // *Journal of Computational Electronics*. — 2024. — Vol. 23. — P. 986–990.
20. Aleshkin, V. Ya. Auger recombination in narrow gap $\text{HgCdTe}/\text{CdHgTe}$ quantum well heterostructures / V. Ya. Aleshkin, V. V. Rumyantsev, K. E. Kudryavtsev [et al.] // *Journal of Applied Physics*. — 2021. — Vol. 129. — № 13. — P. 133106.
21. Rumyantsev, V. V. Terahertz Emission from HgCdTe QWs under Long-Wavelength Optical Pumping / V. V. Rumyantsev, M. A. Fadeev, V. Ya. Aleshkin [et al.] // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. — 2020. — Vol. 41. — № 7. — P. 750-757.

22. Aleshkin, V. Ya. Radiative recombination in narrow gap HgTe/CdHgTe quantum well heterostructures for laser applications / V. Y. Aleshkin, A. A. Dubinov, V. V. Rumyantsev [et al.] // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2018. — Vol. 30. — № 49. — P. 495301.

23. Морозов, С. В. Исследования времен жизни и релаксации фотопроводимости в гетероструктурах с квантовыми ямами $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ / С. В. Морозов, М. С. Жолудев, А. В. Антонов [и др.] // Физика и техника полупроводников. — 2012. — Т. 46. — № 11. — С. 1388-1392.

24. Dubinov, A. A. Calculation of Modal Gain for Terahertz Lasers Based on HgCdTe Heterostructures with Quantum Wells / A. A. Dubinov, V. Ya. Aleshkin // International Journal of High Speed Electronics and Systems. — 2016. — Vol. 25. — № 3 & 4. — P. 1640018.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

[A1] Разова, А. А. Оптические свойства лазерных мезоструктур с квантовыми ямами HgCdTe, сформированных методом ионного травления / А. А. Разова, В. В. Румянцев, Д. В. Шенгуров [и др.] // Письма в ЖТФ. — 2025. — Т. 51. — № 19. — С. 7-10.

[A2] Разова, А. А. Лазерная генерация в гетероструктурн с квантовыми ямами $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-y}\text{Te}$ с микродисковыми резонаторами в диапазоне длин волн 4.1 — 5.1 мкм / А. А. Разова, В. В. Уточкин, М. А. Фадеев [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. — 2022. — Т. 89. — № 5. — С. 632-637.

[A3] Razova, A. A. Whispering gallery mode HgCdTe laser operating near 4 μm under Peltier cooling / A. A. Razova, M. A. Fadeev, V. Ya. Aleshkin [et al.] // Applied Physics Letters. — 2023. — Vol. 123. — № 16. — P. 161105.

[A4] Razova, A. A. Microdisk lasers based on heterostructures with HgCdTe quantum wells: technology and optical properties / A. A. Razova, V. V. Rumyantsev, D. V. Shengurov [et al.] // Semiconductor Science and Technology. — 2025. — Vol. 40. — № 12. — P. 125008.

[A5] Rumyantsev, V. V. Optically pumped stimulated emission in HgCdTe-based quantum wells: Toward continuous wave lasing in very long-wavelength infrared range / V. V. Rumyantsev, V. Ya. Aleshkin, K. A. Mazhukina [et al.] // Applied Physics Letters. — 2024. — Vol. 124. — № 16. — P. 161111.

[A6] Razova, A. A. Microdisk HgCdTe lasers operating at 22 – 25 μm under optical pumping / A. A. Razova, A. A. Dubinov, V. V. Rumyantsev [et al.] // Applied Physics Letters. — 2024. — Vol. 126. — № 12. — P. 121102.

[A7] Utochkin, V. V. Mid-IR lasing in HgCdTe multiple quantum well edge-emitting ridges / V. V. Utochkin, K. E. Kudryavtsev, V. V. Rumyantsev [et al.] // Applied Optics. — 2023. — Vol. 62. — № 32. — P. 8529-8534.

РАЗОВА Анна Александровна

**ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В ВОЛНОВОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ
С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ НА ОСНОВЕ HgCdTe В
СРЕДНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 01.10.2026 г.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 70 экз. Заказ № ИП990 (2026).

Отпечатано в «Нижегородской Типографии»
г. Нижний Новгород, ул. Пискунова, 25/10