

На правах рукописи



УТОЧКИН Владимир Васильевич

**ГЕНЕРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА
В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ
НА ОСНОВЕ HgCdTe**

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2024

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

Официальные оппоненты

Хохлов Дмитрий Ремович

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, 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 октября 2024 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, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ РАН и на сайте ipmras.ru/UserFiles/Diss/2024/utochkin-vladimir-vasilevich/Dissertation1.02.pdf

Автореферат разослан __ августа 2024 г.

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



Д.Ю. Водолазов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Создание оптического квантового генератора в 50–60-е гг., больше известного как лазер, по праву считается одним из крупнейших достижений прикладной физики XX века. За счёт когерентности испускаемого лазером излучения и возможности добиться высокой плотности мощности в пучке света, лазеры нашли широчайшее применение в современной науке и технике: от спектроскопии и метрологии до линий передачи данных, сканеров штрих-кодов и лидаров. Первые работы по исследованию лазеров были сконцентрированы в области видимого излучения и ближнем ИК-диапазоне, и одной из актуальных задач прикладной физики является разработка когерентных источников, излучающих в других областях электромагнитного спектра. В данной работе основное внимание будет уделено двум важным диапазонам – окну прозрачности атмосферы 3–5 мкм и т.н. терагерцовому зазору – terahertz gap – диапазону длин волн 5.7–12 ТГц (25–55 мкм), создание компактных когерентных излучателей в котором до сих пор представляет проблему.

Актуальность разработки лазеров в окне прозрачности атмосферы 3–5 мкм обусловлена наличием в нём наиболее сильных линий поглощения различных биологических, промышленных газов и газов-поллютантов, таких как CH_4 , CO , CO_2 , NO_x , SO_x и ряда других важных газов [1]. Реализация лазерной абсорбционной спектроскопии в данном диапазоне является эффективным методом экологического мониторинга качества атмосферного воздуха в городской среде, объектах сельского хозяйства, на промышленных предприятиях, химических производствах, техногенных объектах для добычи и транспортировки минеральных ресурсов. Коммерчески доступные системы мониторинга работают на гораздо меньших длинах волн – до 1.5 мкм. Это связано в первую очередь со сложностью создания перестраиваемых лазеров в диапазоне 3–5 мкм, способных работать при высокой температуре. Обзор существующих полупроводниковых лазеров диапазона 3–5 мкм приведён в обзоре литературы в подразделе 3.2.

Что касается терагерцового зазора, то актуальность разработки когерентных источников в этом диапазоне подтверждается значительным числом различных научных групп, работающих над этой проблемой. Строго говоря, вблизи терагерцового зазора и в нём самом существуют различные классы когерентных излучателей, в том числе лазеров или близких к ним устройств. Так, в субтерагерцовом диапазоне представлены устройства вакуумной электроники: лампы обратной волны, клистроны, лампы бегущей волны, гиротроны и синхротроны. Эти источники обычно имеют высокую мощность [2]. Для конвертации субтерагерцового излучения вакуумных ламп в терагерцовое прорабатывается вопрос использования умножителей частоты [3]. Но устройства вакуумной электроники даже с умножением частоты работают лишь в

длинноволновой части ТГц-диапазона и имеют внушительные габариты, в то время как для многих применений интересны компактные источники ТГц-излучения. Такой выделенный класс вакуумных приборов, как лазеры на свободных электронах, перекрывает весь ТГц-диапазон [4, 5], но из-за габаритов и стоимости говорить о каком-либо их практическом применении не приходится.

С высокочастотной стороны терагерцового зазора представлены различные газовые лазеры, и хотя в некоторых из них можно добиться достаточно высокой мощности генерации при относительно небольших габаритах, длины волн генерации привязаны к конкретной газовой смеси и не подлежат значительной перестройке [6]. Другим известным подходом к разработке излучателей ТГц-диапазона является генерация разностной гармоники лазеров видимого или ближнего инфракрасного диапазонов. При гетеродинировании излучения от двух различных лазеров или различных мод одного лазера разностная частота может находиться в терагерцовом диапазоне. Для компактных дизайнов генераторов разностной частоты рассматривались различные полупроводниковые лазерные источники: диодные лазеры [7], двухмодовые лазеры [8] и даже двухцветный VCSEL [9]. Известны также работы по параметрической генерации излучения терагерцового диапазона в кристаллах LiNbO_3 , накачиваемых Nd:YAG лазерами [10]. Однако несмотря на свои достоинства, генерация терагерцового излучения посредством нелинейно-оптических эффектов, как правило, требует отладки оптических схем, и готовые приборы имеют достаточно сложное устройство.

Для межзонных полупроводниковых лазеров, широко представленных в видимом и ближнем ИК-диапазонах, продвижение в средний ИК- и ТГц-диапазоны сопряжено с рядом трудностей. Основным фундаментальным ограничением является понижение вероятности излучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда и рост вклада безызлучательных каналов рекомбинации – оже-рекомбинации и рекомбинации Шокли-Рида-Холла. Таким образом, конструкции лазеров для коротковолновой области электромагнитного спектра оказываются менее эффективными в среднем ИК- и ТГц-диапазонах, что привело к разработке альтернативных решений, из которых наибольшее распространение в последние десятилетия получили полупроводниковые квантовые каскадные лазеры (ККЛ) и межзонные каскадные лазеры (МКЛ). Подробный обзор существующих полупроводниковых лазеров в среднем ИК- и ТГц-диапазонах приведён в обзоре литературы в подразделе 2.2. Как будет показано в дальнейшем, гетероструктуры с КЯ $\text{HgCdTe}/\text{CdHgTe}$ являются одними из немногих узкозонных полупроводниковых систем, в которых можно эффективно подавить безызлучательную оже-рекомбинацию и получить лазерную генерацию во всём среднем ИК-диапазоне.

Степень разработанности исследования

Твердые растворы HgCdTe – один из основных полупроводниковых материалов для изготовления приёмников среднего ИК-диапазона [11]. Поэтому основное направление исследований твёрдых растворов HgCdTe, в том числе структур с квантовыми ямами, был направлен на совершенствование характеристик приёмников на основе данного полупроводника.

Предшествующие исследования стимулированного и лазерного излучения в HgCdTe структурах среднего ИК-диапазона, пик которых пришёлся на 90-е годы, проводились исключительно в коротковолновой части обозначенного диапазона. Подробный обзор тех исследований приводится в обзоре литературы в Разделе 3. Наиболее длинноволновая генерация была получена на длине волны 5.3 мкм при температурах ниже температуры жидкого азота в инжекционном лазере с активной средой на основе объёмных эпитаксиальных плёнок HgCdTe [12]. За исключением работ научной группы, в которую входит автор диссертации, ранее в HgCdTe структурах на длинах волн более 5.3 мкм систематически проводились исследования лишь спонтанной фотолуминесценции (ФЛ).

Генерацию стимулированного излучения в гораздо более длинноволновом диапазоне (в окрестности длины волны 10 мкм) удалось получить уже в первых работах нашей группы по исследованию гетероструктур с узкими КЯ HgCdTe/CdHgTe [13]. Кроме того, было определено, что температурный предел генерации в исследованных структурах лежит выше 77 К, а порог по мощности накачки при 20 К по порядку величины равен всего лишь 0.1 кВт/см². В последующих работах удалось увеличить длину волны генерации СИ при низких температурах до 14 мкм [14], 19.5 мкм [15] и 31 мкм [16]. При этом диапазон длин волн вплоть до ~25 мкм непрерывно перекрывался различными конструкциями HgCdTe лазеров, в диапазоне длин волн от 25 до 31 мкм генерацию СИ пронаблюдать не удалось, а результат на 31 мкм не имел температурного сдвига, более подробно полученный результат обсуждается в подразделе 2.5.

Что касается альтернативных конструкций лазеров среднего ИК-диапазона на основе твёрдых растворов HgCdTe, то можно выделить два направления исследований. Недавно нашей группой была предложена концепция квантово-каскадного лазера на основе HgCdTe, и представлены рассчитанные конструкции активной области такого лазера для генерации излучения в терагерцовом зазоре [17].

Также не так давно в журнале Nature Photonics появилась работа, в которой рассматривается возможность создания лазера на переходах между уровнями Ландау в бесщелевом HgCdTe, помещенном в магнитное поле [18]. Авторы приводят оценку инверсии населенностей для получения усиления, но в работе представлены лишь спектры спонтанного излучения при температуре 4.2 К. Кроме того, очевидно, что для получения длинноволновой генерации

потребуется магнитные поля выше 4 Тл, что накладывает существенные ограничения на предложенный дизайн лазера.

Настоящая работа является естественным продолжением исследований стимулированного излучения в гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe с различными параметрами квантовых ям и конструкций диэлектрического волновода, в частности, таких его характеристик как максимальной температуры наблюдения, пороговых интенсивностей генерации, спектральных особенностей. Основной целью данных исследований является продвижение максимальной длины волны генерации вглубь терагерцового зазора и улучшение характеристик стимулированного 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 о процессах стимулированного излучения в структурах с КЯ HgCdTe/CdHgTe, улучшение характеристик СИ в них и разработка основ технологии изготовления лазеров среднего инфракрасного диапазона на основе гетероструктур HgCdTe с узкими КЯ, обогащёнными ртутью. Вышеперечисленное можно разбить на следующие задачи:

1. Постростовая характеристика волноводных гетероструктур с КЯ HgTe/HgCdTe методом спектроскопии фотолуминесценции в широком диапазоне температур. Определение ширины запрещенной зоны и параметров КЯ в структурах.
2. Исследование стимулированного излучения в непрерывном режиме в волноводных HgCdTe структурах среднего ИК-диапазона с квантовыми ямами при оптическом возбуждении. Определение оптимальных параметров КЯ и волновода для генерации СИ в непрерывном режиме.
3. Исследование стимулированного излучения в HgCdTe гетероструктурах с улучшенными конструкциями диэлектрического волновода, снижающими модовые потери в диапазоне длин волн 24–31 мкм, плохо покрываемого каскадными лазерами и межзонными HgCdTe лазерами на GaAs подложке с неоптимальным дизайном волновода и высокими модовыми потерями.
4. Исследование стимулированного излучения в HgCdTe гетероструктурах с КЯ в диапазоне длин волн 2.5–5 мкм – окне прозрачности атмосферы 3–5 мкм и прилегающей к нему спектральной области для разработки методов увеличения температуры генерации СИ до комнатной температуры.

5. Изготовление гребенчатых резонаторов с модами Фабри-Перо на поверхности волноводных гетероструктур с КЯ HgCdTe/CdHgTe среднего ИК-диапазона с последующим исследованием в них лазерного излучения при оптической накачке.

Научная новизна работы

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые получено стимулированное излучение в структурах с КЯ HgCdTe/CdHgTe при непрерывном оптическом возбуждении на длине волны больше 10 мкм при температурах, близких к температурам жидкого гелия. Показано, что для генерации СИ в непрерывном режиме предпочтительны КЯ с ненулевым остаточным содержанием Cd за счёт уменьшения неоднородности параметров КЯ и сопутствующего ей неоднородного уширения спектра усиления.
2. Впервые предложены и исследованы дизайны диэлектрических волноводов с увеличенной толщиной CdTe буфера или сильнолегированной GaAs подложкой для лазерных структур с КЯ HgCdTe/CdHgTe для диапазона длин волн генерации 24–31 мкм, обеспечивающие подавление модовых потерь (параметр α/Γ) за счёт уменьшения «вытекания» лазерной моды в GaAs подложку. В структурах, выращенных на основе предложенных дизайнов волноводов, впервые наблюдалось СИ на длинах волн до 26–27 мкм, не покрываемых структурами с толщиной буфера CdTe 10 мкм, в которых модовые потери высокие. Более того, за счёт уменьшения модовых потерь на полтора порядка в структурах с новым дизайном волновода наблюдается сравнимое снижение пороговых интенсивностей генерации СИ.
3. Экспериментально подтверждено, что в структурах с КЯ HgCdTe/CdHgTe, рассчитанных на генерацию СИ в диапазоне $\lambda > 20$ мкм при понижении остаточного содержания кадмия в КЯ с ~6 % до ~2.5 %, за счёт увеличения пороговой энергии оже-рекомбинации (которое подавляет разогрев носителей заряда при большой разнице в энергии квантов накачки и стимулированного излучения), наблюдается увеличение максимальной температуры генерации стимулированного излучения с 70–80 К до значений в 100 К и выше.
4. Впервые получено СИ в HgCdTe структуре на длине волны 2.75 мкм при комнатной температуре. Для структур, рассчитанных на генерацию СИ в диапазоне пропускания атмосферы 3–5 мкм, впервые были проведены экспериментальные оценки величины модовых потерь и оценено оптимальное число КЯ для реализации оптических конвертеров излучения HgCdTe лазеров с оптической накачкой.
5. Впервые получена лазерная генерация среднего ИК-диапазона при оптической накачке (длина волны излучения – 9 мкм и короче при

криогенных температурах) в мезаструктуре, изготовленной из волноводной гетероструктуры с КЯ HgCdTe/CdHgTe методом ионного травления в гребенчатой геометрии с модами Фабри-Перо. В отличие от предшествующих работ других научных групп, лазеры изготавливались из волноводных структур с активной областью в виде массива узких квантовых ям с минимальным остаточным содержанием Cd, что накладывало ограничения на постростовую обработку структур.

Теоретическая и практическая значимость работы

Научная значимость работы заключается в расширении знаний об оптических свойствах гетероструктур с КЯ HgTe/CdHgTe . Представленные во втором разделе исследования влияния параметров квантовых ям HgCdTe/CdHgTe , а также конструкций диэлектрического волновода на характеристики стимулированного излучения в диапазоне длин волн 25–31 мкм представляют практическую значимость для разработки межзонных HgCdTe лазеров или оптических конвертеров для данного диапазона, работающих при температурах, превышающих температуру жидкого азота. Разработка таких лазеров позволит перекрыть часть терагерцового зазора, не покрываемую существующими конструкциями ККЛ.

Проводимые в третьем разделе исследования стимулированного излучения в квантовых ямах HgCdTe/CdHgTe в диапазоне длин волн 2.5–5 мкм важны для разработки HgCdTe лазеров этого диапазона, перестраиваемых в широком интервале длин волн и работающих при комнатной температуре или температурах, доступных при термоэлектрическом охлаждении. Компактные межзонные лазеры в окне прозрачности атмосферы 3–5 мкм могут найти широкое применение в спектроскопии газовых смесей, экологическом мониторинге и контроле производственных процессов.

В четвёртой главе представлены результаты первых опытов по изготовлению гребенчатых мезаструктур с модами Фабри-Перо на основе волноводных гетероструктур с узкими квантовыми ямами HgCdTe с высоким содержанием ртути и рассчитанными на генерацию стимулированного излучения вблизи длины волны 10 мкм. Полученные результаты могут быть напрямую использованы при разработке и изготовлении упомянутых ранее межзонных лазеров или оптических конвертеров на основе твёрдых растворов HgCdTe .

Методология и методы исследования

В работе использовались апробированные методы исследования оптических свойств полупроводниковых структур, используемые в Институте физики микроструктур, г. Нижний Новгород:

1. Исследование спектров фотопроводимости в терагерцовом и среднем ИК-диапазонах проводилась методом фурье-спектроскопии.

2. Исследования стационарной фотолюминесценции в среднем ИК-диапазоне в широком температурном диапазоне осуществлялись методом фурье-спектроскопии.
3. Исследования стимулированного излучения среднего ИК-диапазона в широком температурном диапазоне при оптическом возбуждении осуществлялись методами времязрешённой фурье-спектроскопии.
4. Расчеты зонного спектра гетероструктур с КЯ HgCdTe/CdHgTe проводились в рамках четырехзонной модели Кейна 8×8 .

Положения, выносимые на защиту

1. В гетероструктурах с КЯ HgCdTe/CdHgTe, выращенных методом МПЭ и рассчитанных на генерацию стимулированного излучения в диапазоне 10–14 мкм при гелиевых температурах, снижение порогового уровня возбуждения и генерация стимулированного излучения при непрерывной оптической накачке наблюдается в структурах с большей шириной КЯ (и, соответственно, с ненулевой долей Cd в яме), а не в структурах с более узкими КЯ HgTe/CdHgTe, в которых флуктуации ширины КЯ приводят к более сильному размытию плотности состояний и, соответственно, к уменьшению коэффициента усиления.
2. В гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe, рассчитанных на генерацию в диапазоне $\lambda > 20$ мкм, при оптимизации параметров квантовых ям и волноводных слоёв наблюдается генерация стимулированного излучения при температурах, превышающих температуру жидкого азота.
3. В гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe при импульсном внутриямном оптическом возбуждении наблюдается генерация стимулированного излучения на длинах волн вплоть до 2.75 мкм при комнатной температуре.
4. Увеличение числа квантовых ям HgCdTe/CdHgTe в пучности волноводной моды позволяет увеличить температуру генерации СИ в диапазоне 3–5 мкм при внутриямной оптической накачке и имеет оптимум в 15–30 КЯ, выше которого добавление большего количества квантовых ям не приводит к пропорциональному росту температуры генерации вследствие установления баланса между оптическим усилением и потерями.

Личный вклад автора

Постановка задач работы осуществлялась совместно диссертантом и его научным руководителем, С. В. Морозовым. Рост структур на основе HgCdTe, исследованных в работе, проводился в ИПФ СО РАН им. Ржанова группой под руководством Н. Н. Михайлова. Формирование резонаторных мезоструктур

тур методом лазерной литографии и ионного травления осуществлялось в ИФМ РАН Д. В. Шенгуровым, Е. Е. Морозовой и Н. С. Гусевым. Микроскопия изготовленных лазерных мез на сканирующем электронном микроскопе проводилась А. А. Разовой, С. А. Гусевым и Е. В. Скороходовым (ИФМ РАН). Расчёты зонного спектра исследуемых гетероструктур выполнялись автором диссертационной работы в программном обеспечении, разработанном В. Я. Алёшкиным (ИФМ РАН). Расчёт локализации мод TE_0 в волноводных структурах и оценка коэффициентов материального усиления в квантовых ямах проводились А. А. Дубиновым (ИФМ РАН). Все основные экспериментальные результаты данной работы, включая, но не ограничиваясь: спектры фотопроводимости, фотолюминесценции, стимулированного и лазерного излучения, зависимости интегрального излучения от мощности накачки, температурные зависимости порогов генерации СИ, получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Коллектив, участвовавший в обсуждении полученных результатов и подготовке публикаций указан в качестве соавторов в работах А1 – А11.

Степень достоверности и апробации результатов

Представленные в настоящей работе результаты обладают высокой степенью достоверности, что подкрепляется использованием для их получения ряда апробированных в ИФМ РАН и других лабораториях экспериментальных методик и подтверждается хорошим согласием между результатами, полученными в рамках применения этих методик, а также хорошим согласием эксперимента и теории (в том числе и в случаях, когда теоретическое рассмотрение предшествовало эксперименту). Полученные результаты также согласуются и с изложенными в литературе данными по теме исследования.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на XXIII, XXIV, XXV, XXVI, XXVII, XXVIII Международных симпозиумах «Нанофизика и нанoeлектроника» (Нижний Новгород 2019 – 2024 г.), XIV и XV Российских конференциях по физике полупроводников (Новосибирск, 2019 г. и Нижний Новгород, 2022 г.), 44th и 46th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (Париж, Франция, 2019 и Чэнду, Китай, 2021), 8th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies & GDR-I FIR-LAB Workshop (Нижний Новгород, 2019), ALT19 Advanced Laser Technologies (Прага, Чехия, 2019), XXI, XXII, XXIII Всероссийских молодежных конференциях по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и нанoeлектронике (Санкт-Петербург, 2019, 2020, 2021), VIII Международном симпозиуме по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (Москва, 2021), Международной конференции Физика.СПб, 2021, 2022 (Санкт-Петербург, 2021, 2022). По теме научно-квалификационной работы опубликовано 48 печатных работ, в том числе 17 статей в рецензируе-

мых журналах и 31 публикация в сборниках тезисов докладов и трудов конференций и симпозиумов.

Структура работы

Работа состоит из введения, основной части, состоящей из 4 разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка цитируемой литературы и списка основных публикаций автора по теме работы. Объем диссертации составляет 142 страницы, включая 60 иллюстраций и 6 таблиц. Список цитируемой литературы составляет 160 публикаций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы цели и задачи, решаемые в рамках работы, приведены положения, выносимые на защиту.

Основная часть работы разделена на четыре раздела. **Раздел 1** посвящён описанию исследованных в работе структур и описанию методики эксперимента. В подразделе 1.2 обсуждаются свойства твёрдых растворов HgCdTe, квантовых ям HgCdTe/CdHgTe, конструкции исследованных структур с КЯ HgCdTe/CdHgTe и особенности их роста. В подразделах 1.3 и 1.4 рассматриваются общие вопросы о фурье-спектроскопии и особенности использованного в работе фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v. Методики спектроскопии фотопроводимости, фотолюминесценции и стимулированного излучения (СИ) описываются в подразделе 1.5, включая обсуждение параметров использованных в работе источников оптического возбуждения. Наконец, в подразделе 1.6 обсуждается методика постростовой характеристики структур с КЯ HgCdTe/CdHgTe для уточнения параметров ям, предоставленных технологами.

Раздел 2 настоящей работы посвящён исследованиям длинноволнового стимулированного излучения (в диапазоне 10–31 мкм) в гетероструктурах с КЯ HgCdTe/CdHgTe. В подразделах 2.1 и 2.2 актуализируется проблема разработки полупроводниковых лазеров в диапазоне, не покрываемом современными квантово-каскадными лазерами из-за сильного решёточного поглощения в $A^{III}B^V$ материалах, на основе которых их изготавливают, и приводится обзор литературы по сформулированной проблеме. В подразделе 2.3 даётся краткое описание исследуемых во втором разделе гетероструктур с КЯ на основе HgCdTe, которые растились на подложках двух типов (i-GaAs или n^{++} -GaAs) с различной толщиной CdTe буфера (10 или 15 мкм). Различные конструкции диэлектрического волновода были направлены на подавление модовых потерь (параметра α/Γ , коэффициент поглощения в пассивных слоях, делённый на Γ -фактор).

Раздел 2.4 посвящен исследованию генерации стимулированного излучения в непрерывном режиме, предпочтительном для прикладной спектроскопии. В двух гетероструктурах с широкими (~6 нм) КЯ с содержанием Cd порядка 10%, рассчитанных на генерацию на длинах волн 10.3 и 14 мкм наблюдалось стимулированное излучение при непрерывном оптическом возбуждении с плотностью мощности ~2 Вт/см² (см. Рисунок 1). Данный результат более чем в пять раз по длине волны улучшает опубликованные в литературе результаты предыдущих научных групп по генерации в HgCdTe лазерах в непрерывном режиме [19].

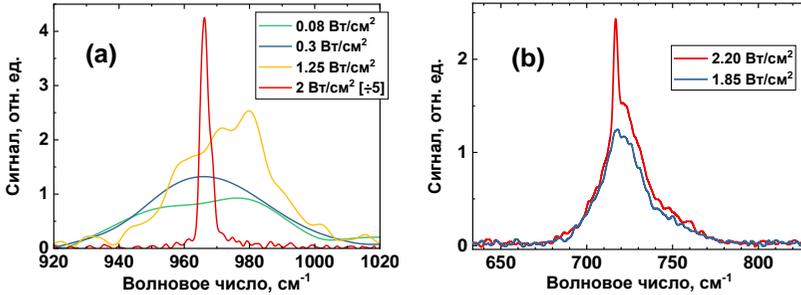


Рисунок 1. Спектры излучения структур 161222 (a) и 1170127 (b) при 8 К и различных интенсивностях непрерывной оптической накачки

Показано, что для генерации СИ в непрерывном режиме предпочтительными оказываются структуры, КЯ которых содержат ненулевое остаточное содержание Cd. Использование более широких HgCdTe КЯ при той же E_g позволяет уменьшать влияние флуктуаций толщины ямы на энергию межзонного перехода в ней по сравнению с узкими ямами с меньшим содержанием Cd. Полученный результат интересен тем, что известный способ увеличить температуру генерации СИ путём увеличения пороговой энергии оже-рекомбинации заключается в переходе к наиболее узким КЯ с как можно более низким, в идеале – нулевым – содержанием Cd несколько диссонирует с ним. Таким образом, получается, что в зависимости от целевой особенности дизайна лазера – генерации в непрерывном режиме или высокой рабочей температуры – параметры КЯ должны оптимизироваться по разным направлениям, и единого универсального дизайна не существует.

В подразделе 2.5 исследуются факторы, ограничивающие рабочую температуру и длину волны стимулированного излучения в длинноволновых лазерах на основе КЯ HgCdTe/CdHgTe. Показано, что за счёт оптимизации дизайна волновода возможно получение СИ на длинах волн 25–31 мкм, и демонстрируются предпосылки для получения СИ в более длинноволновом диапазоне. Также проведено исследование пороговой плотности мощности

накачки и максимальной температуры, при которой возможна генерация на межзонных переходах в гетероструктурах с КЯ HgTe/CdHgTe.

Рисунок 2 обобщает результаты по исследованию стимулированному излучению, полученные в данном подразделе. Сплошными кривыми показаны рассчитанные модовые потери (α/Γ) для каждого экспериментально исследованного типа конструкции диэлектрического волновода – на подложке i-GaAs с 10 мкм буфером CdTe, i-GaAs с 15 мкм буфером CdTe и легированной подложке n⁺⁺-GaAs с 10 мкм буфером CdTe. Выраженный максимум модовых потерь для стандартного дизайна волновода (красная кривая) в диапазоне 25–31 мкм препятствует генерации СИ в структурах с таким волноводом. Точками на рисунке приведены экспериментальные значения пороговых интенсивностей генерации СИ для исследуемых структур.

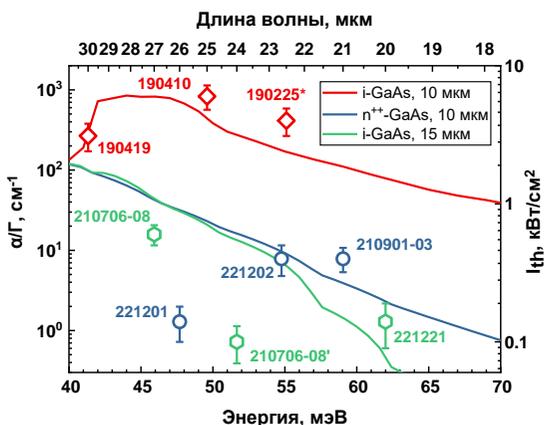


Рисунок 2. Сплошные линии – модовые потери α/Γ (левая ось) в HgCdTe структурах с различными дизайнами волновода. Символами приведены измеренные пороговые интенсивности генерации СИ для различных структур (правая ось)

Из рисунка видно, что оба предложенных варианта оптимизации диэлектрического волновода обеспечили существенное подавление модовых потерь. За счёт этого в структурах 210706-08 (с утолщённым CdTe буфером) и 221201 (с n⁺⁺-GaAs подложкой) удалось продемонстрировать генерацию СИ в диапазоне 26–27 мкм, на который приходится максимум модовых потерь стандартной конструкции волновода.

Хотя конструкция диэлектрического волновода на легированной подложке обладает несколько более высокими модовыми потерями в диапазоне длин волн 25–17 мкм относительно конструкции с толстым CdTe буфером, оба метода оптимизации волновода обеспечивают снижение пороговой интенсивности генерации СИ при 8 К до уровня в десятки – сотни Вт/см², что на

порядок ниже значений в структурах со стандартным волноводом (10 мкм CdTe буфер на подложке i-GaAs).

В настоящем подразделе также описывается результат по увеличению температуры генерации СИ за счёт снижения остаточной доли Cd в КЯ до уровня 2.5–2.8 %, которое обеспечило полуторакартный рост пороговой энергии оже-рекомбинации E_{th} . Для иллюстрации связи между параметром E_{th} и максимальной температурой генерации СИ T_{max} были построены экспериментально полученные значения T_{max} в зависимости от параметра E_{th} (см. Рисунок 3). На построенном графике явно прослеживается корреляция между обозначенными параметрами, и исследованные структуры с меньшей долей Cd укладываются в линию тренда [16]: температура T_{max} растёт с увеличением пороговой энергии E_{th} . Видно, что температура активации оже-рекомбинации в HgCdTe структурах с КЯ непрерывно растёт с понижением остаточного содержания Cd в КЯ до уровней меньше 3%. Это свидетельствует в пользу пороговой энергии как ключевого фактора, определяющего скорость оже-рекомбинации, а влияние эффектов экранировки не играет существенной роли в диапазоне содержания Cd в КЯ 2.5–6.5 %.

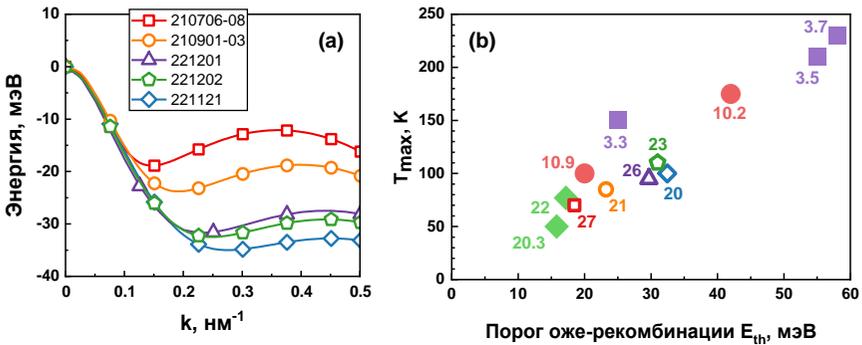


Рисунок 3. Основная валентная подзона исследованных гетероструктур при 8 К (а), боковые максимумы в КЯ с меньшей долей Cd лежат ниже. Зависимость температуры T_{max} от пороговой энергии оже-рекомбинации E_{th} (б). Числами показана длина волны СИ при 8–10 К. Полые символы соответствуют структурам на левой панели

Раздел 3 посвящён исследованиям стимулированного излучения в гетероструктурах с КЯ HgCdTe/CdHgTe в диапазоне прозрачности атмосферы 3–5 мкм при температурах, достижимых при использовании термоэлектрического охлаждения, а также близком к нему диапазоне 2.5–3 мкм при комнатной температуре. В подразделах 3.1 и 3.2 актуализируется проблема разработки полупроводниковых лазеров в окне прозрачности атмосферы 3–5 мкм, обсуждаются конкурирующие подходы к разработке лазеров в данном диапазоне, и обзревается результаты исследований предшествующих научных групп по лазерной генерации в HgCdTe. В подразделе 2.3 даётся краткое опи-

сание исследуемых в третьем разделе структур с КЯ на основе HgCdTe, рассчитанных на генерацию в окне прозрачности атмосферы 3–5 мкм.

В подразделе 3.4 описываются результаты по наблюдению стимулированного излучения на длине волны 2.75 мкм при комнатной температуре. В качестве источников возбуждения использовались два различных ПГС ближнего ИК-диапазона, и проводилось сравнение спектров СИ и его характеристик. Полученные результаты сравнивались с предшествующим рекордным по длине волны результатом нашей группы по генерации СИ на 2.45 мкм при комнатной температуре [21], логическим продолжением которого они и являются.

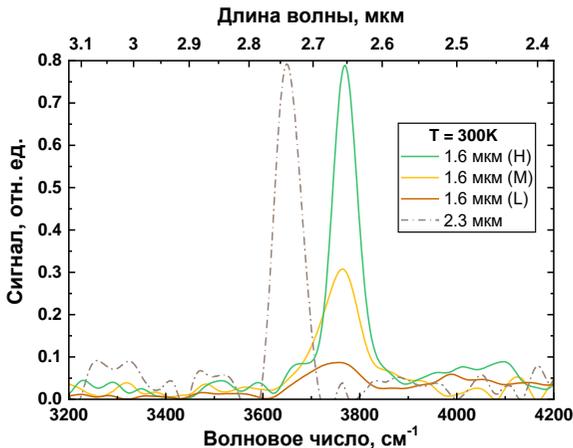


Рисунок 4. Сплошные линии – спектры стимулированного излучения в 2.5 мм образце на длине волны 2.65 мкм при импульсном возбуждении с длиной волны 1.6 мкм и различной интенсивностью, штрихпунктир – при 2.3 мкм возбуждении

В подразделе 3.5 рассматривалась проблема улучшения параметров СИ в HgCdTe лазерах с оптической накачкой за счёт увеличения числа квантовых ям в активной области. Сравнивались пороги генерации СИ в выращенных структурах с различным числом квантовых ям (3, 5 и 10), но одинаковым дизайном диэлектрического волновода, и оценивался диапазон оптимальных значений числа ям для условий оптической внутриямной накачки. Было показано, что отношение пороговых интенсивностей структур с различным числом квантовых ям (k и l) имеет вид:

$$\frac{I_k}{I_l} \cong \left(\frac{n^{tr} + \frac{\alpha}{Q\Gamma_k}}{n^{tr} + \frac{\alpha}{Q\Gamma_l}} \right)^m \quad (1)$$

где α – общий коэффициент потерь в структуре, n^{tr} – концентрация просветления, Q – некоторая константа, Γ – гамма-фактор. Показатель степени m варьируется от одного до трёх, в зависимости от доминирующего канала рекомбинации. Хотя оже-рекомбинация и подавляется в HgCdTe гетероструктурах, она всё равно становится доминирующим каналом рекомбинации при высоких температурах из-за экспоненциальной температурной зависимости скорости рекомбинации.

На Рисунке 5 приведены значения пороговых интенсивностей генерации СИ при температуре решётки 150 К (близкой к температуре гашения СИ в структурах с 5 и 10 квантовыми ямами), нормированных на интенсивность прозрачности $I_{tr} = c \cdot (n^{tr})^3$ для структур с различным числом КЯ.

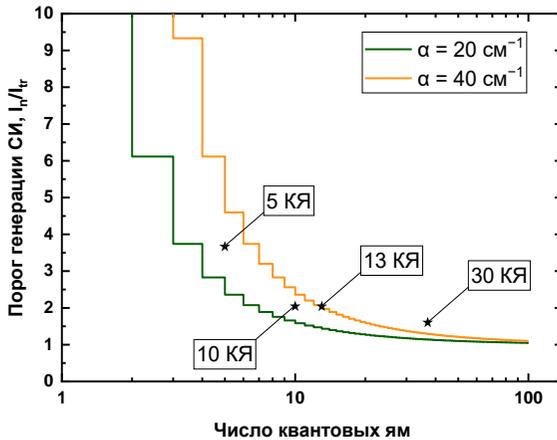


Рисунок 5. Нормированные пороговые интенсивности генерации СИ при 150 К для структур с различным числом КЯ. Сплошные линии показывают расчётные пороги СИ для значений коэффициента потерь α , соответствующих границам измеренного в эксперименте диапазона

Звёздами на рисунке представлены экспериментальные значения, полученные для структур с пятью и десятью КЯ (исследовались в работе), 13 КЯ (структура из работы [22]) и 30 КЯ ($c \Gamma_{30} = 0.063$). Приведённые результаты показывают, что в пределе малого числа КЯ каждая дополнительная яма может в разы снизить пороговую интенсивность генерации СИ, но относительная выгода от добавления каждой новой КЯ стремится к нулю в пределе большого их числа.

Важно отметить, что наблюдаемое в эксперименте и предсказываемое теорией уменьшение порогов генерации СИ может быть транслировано в повышение максимальной температуры генерации СИ. В работе приводится оценка оптимального количества КЯ в гетероструктурах HgCdTe/CdHgTe для

условий внутриманной оптической накачки, лежащая в диапазоне от 15 до 30.

В разделе 4 представлена спектроскопия лазерного излучения в гребенчатых волноводах с торцевыми резонаторами Фабри-Перо, изготовленными методом ионного травления из волноводных структур с КЯ HgCdTe/CdHgTe. В подразделах 4.1 и 4.2 обсуждаются подходы к процессингу лазерных структур на основе твёрдых растворов HgCdTe, представленные в работах предшествующих научных групп, и актуализируется проблема разработки технологии изготовления лазерных мез в гетероструктурах с КЯ. В подразделе 4.3 даётся краткое описание волноводной гетероструктуры, из которой были изготовлены образцы с лазерными мезами. Описание методики ионного травления, применённой в работе, приводится в подразделе 4.4.

Подраздел 4.5 посвящён спектроскопии излучения в двух изготовленных лазерных мезаструктурах. На Рисунке 6 приведён спектр излучения массива гребенчатых мез при температуре 8 К и импульсном оптическом возбуждении в сравнении с излучением из той же волноводной гетероструктуры, не подвергнутой ионному травлению.

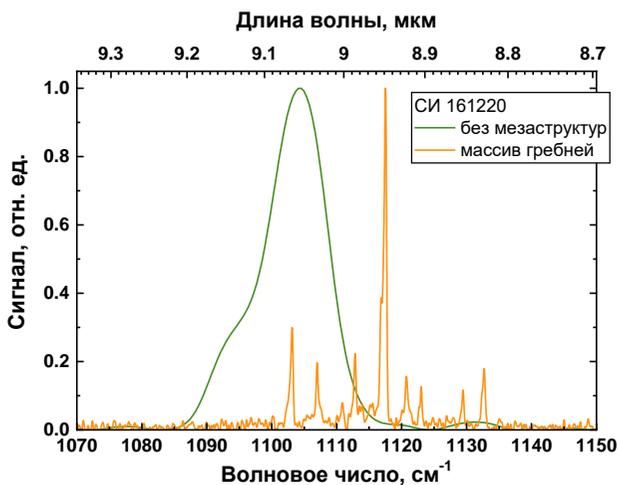


Рисунок 6. Сравнение нормированных спектров стимулированного излучения в образце без изготовленных мез и в массиве гребенчатых резонаторов при 8 К

Образцы выкалывались из разных частей выращенной шайбы, что объясняет различие в положении спектров. Отчётливо прослеживается обужение спектра стимулированного излучения непротравленного образца до набора отдельных узких линий при изготовлении лазерных мез. Достигнутое в работе отношение $\Delta\lambda/\lambda \sim 0.0004$ соответствует лучшим лазерным структурам,

изготовленным ранее другими группами с использованием мокрого химического травления [12].

В отличие от предшествующих работ, лазерная генерация в гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe была продемонстрирована до температуры в 120 К в диапазоне 7–9 мкм при оптической накачке. Изготовленные гребни обеспечивали генерацию с максимальной температурой ниже максимальной температуры в необработанной структуре (150 К). Таким образом, процесс ионного травления оказывает влияние на критическую температуру генерации СИ и его пороговые характеристики. Представляется вероятным, что для перехода к большому диапазону длин волн, необходимо разработать технологию пассивации краев для структур HgCdTe.

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Получено стимулированное излучение при непрерывной оптической накачке в узкозонных структурах с КЯ HgCdTe/CdHgTe в диапазоне длин волн 10.3–14 мкм. Показано, что для получения СИ в непрерывном режиме предпочтительными являются структуры с большей шириной КЯ (~6 нм), поскольку использование таких квантовых ям позволяет подавить влияние флуктуаций толщины ямы на размытие энергии основного межзонного перехода в ней по сравнению с более узкими ямами (~3.5 нм) с той же E_g [A1].
2. Продемонстрировано, что в волноводных структурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe, рассчитанными на генерацию стимулированного излучения в диапазоне $\lambda > 20$ мкм при уменьшении содержания Cd в КЯ с ~6% до ~2.5% наблюдается увеличение пороговой энергии оже-рекомбинации, что подавляет нежелательный разогрев носителей заряда при большой разнице в энергии квантов накачки и стимулированного излучения и обеспечивает увеличение температуры генерации стимулированного излучения с 70–80 К до значений в 100 К и выше [A2].
3. Показано, что увеличение толщины буфера CdTe до 15 мкм или рост структур на n^{++} -GaAs подложке позволяют снизить уровень модовых потерь (α/L) не менее чем на порядок во всём диапазоне длин волн от 20 до 30 мкм по сравнению с дизайном диэлектрического волновода на нелегированной подложке с толщиной CdTe буфера 10 мкм. Уменьшение модовых потерь в структурах транслируется в сопоставимое понижение пороговых интенсивностей накачки для генерации стимулированного излучения – более чем на порядок до значений ~1 кВт/см² при 77 К [A2, A3, A7].

4. За счёт снижения модовых потерь в структурах с толщиной CdTe буфера 15 мкм и структурах, выращенных на n^{++} -GaAs подложке было получено стимулированное излучение на длинах волн 26–27 мкм, недоступных для структур с CdTe буфером толщиной 10 мкм [A2, A3, A7].
5. Получено стимулированное излучение при комнатной температуре в волноводной структуре с квантовыми ямами $\text{Hg}_{0.82}\text{Cd}_{0.18}\text{Te}/\text{Cd}_{0.6}\text{Hg}_{0.4}\text{Te}$ в диапазоне 2.65–2.75 мкм при внутриямном импульсном оптическом возбуждении с характерной плотностью мощности в 200–300 кВт/см² [A4, A8].
6. С использованием ABC-модели было разработано теоретическое описание процессов межзонной рекомбинации носителей заряда в гетероструктурах с множественными квантовыми ямами $\text{HgCdTe}/\text{CdHgTe}$. На основе экспериментальных данных приведены оценки модовых потерь (α/Γ) в структурах с длинами волн стимулированного излучения в диапазоне 3–5 мкм, которые составили $30 \pm 10 \text{ см}^{-1}$, и предполагаемого увеличения максимальной температуры генерации для структур с различным числом квантовых ям. Определено, что оптимальное количество квантовых ям $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}/\text{HgCdTe}$ для условий внутриямной оптической накачки находится в диапазоне от 15 до 30 [A5, A9].
7. В изготовленных резонаторных мезаструктурах с квантовыми ямами $\text{HgCdTe}/\text{CdHgTe}$ наблюдалась генерация лазерного излучения, при этом достигнутое в работе отношение $\Delta\lambda/\lambda \sim 0.0004$ соответствует лучшим дизайнам лазерных структур на основе HgCdTe в более коротковолновом диапазоне, изготовленным ранее другими группами с использованием химического травления [A6, A10, A11].

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Popa, D. Towards Integrated Mid-Infrared Gas Sensors / D. Popa, F. Udreă // Sensors. – 2019. – Vol. 19, № 9. – P. 2076.
2. Vacuum Electronic High Power Terahertz Sources / J. H. Booske, R. J. Dobbs, C. D. Joye [et al.] // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 54–75.
3. Generation of Terahertz Radiation in InP:Fe Crystals Due to Second-Order Lattice Nonlinearity / V. V. Rumyantsev, K. V. Maremyanin, A. P. Fokin [et al.] // Semiconductors. – 2021. – Vol. 55, № 10. – Generation of Terahertz Radiation in InP. – P. 785–789.
4. Terahertz-range free-electron laser electron spin resonance spectroscopy: Techniques and applications in high magnetic fields / S. A. Zvyagin, M. Ozerov, E. Čížmár [et al.] // Review of Scientific Instruments. – 2009. –

- Vol. 80, № 7. – Terahertz-range free-electron laser electron spin resonance spectroscopy. – P. 073102.
5. Knyazev, B. A. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements / B. A. Knyazev, G. N. Kulipanov, N. A. Vinokurov // *Measurement Science and Technology*. – 2010. – Vol. 21, № 5. – Novosibirsk terahertz free electron laser. – P. 054017.
 6. Dodel, G. On the history of far-infrared (FIR) gas lasers: Thirty-five years of research and application / G. Dodel // *Infrared Physics & Technology*. – 1999. – Vol. 40, № 3. – On the history of far-infrared (FIR) gas lasers. – P. 127–139.
 7. Precisely tunable continuous-wave terahertz source with interferometric frequency control / A. J. Deninger, T. Göbel, D. Schönherr [et al.] // *Review of Scientific Instruments*. – 2008. – Vol. 79, № 4. – P. 044702.
 8. Generation of coherent terahertz radiation by photomixing of dual-mode lasers / M. Tani, P. Gu, M. Hyodo [et al.] // *Optical and Quantum Electronics*. – 2000. – Vol. 32, № 4/5. – P. 503–520.
 9. Room temperature continuous wave milliwatt terahertz source / M. Scheller, J. M. Yarborough, J. V. Moloney [et al.] // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18, № 26. – P. 27112.
 10. Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO₃ with monolithic grating coupler / K. Kawase, M. Sato, T. Taniuchi, H. Ito // *Applied Physics Letters*. – 1996. – Vol. 68, № 18. – P. 2483–2485.
 11. Rogalski, A. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook / A. Rogalski // *Reports on Progress in Physics*. – 2005. – Vol. 68, № 10. – HgCdTe infrared detector material. – P. 2267–2336.
 12. HgCdTe infrared diode lasers grown by MBE / J. M. Arias, M. Zandian, R. Zucca, J. Singh // *Semiconductor Science and Technology*. – 1993. – Vol. 8, № 1S. – P. S255–S260.
 13. Long wavelength stimulated emission up to 9.5 μm from HgCdTe quantum well heterostructures / S. V. Morozov, V. V. Romyantsev, A. M. Kadykov [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2016. – Vol. 108, № 9. – P. 092104.
 14. Carrier Recombination, Long-Wavelength Photoluminescence, and Stimulated Emission in HgCdTe Quantum Well Heterostructures / V. Romyantsev, M. Fadeev, V. Aleshkin [et al.] // *physica status solidi (b)*. – 2019. – Vol. 256, № 6. – P. 1800546.
 15. Stimulated emission from HgCdTe quantum well heterostructures at wavelengths up to 19.5 μm / S. V. Morozov, V. V. Romyantsev, M. A. Fadeev [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2017. – Vol. 111, № 19. – P. 192101.
 16. Coherent Emission in the Vicinity of 10 THz due to Auger-Suppressed Recombination of Dirac Fermions in HgCdTe Quantum Wells / S. V. Morozov, V. V. Romyantsev, M. S. Zholudev [et al.] // *ACS Photonics*. – 2021. – Vol. 8, № 12. – P. 3526–3535.
 17. HgCdTe-based quantum cascade lasers operating in the GaAs phonon Reststrahlen band predicted by the balance equation method / D. Ushakov,

- A. Afonenko, R. Khabibullin [et al.] // Optics Express. – 2020. – Vol. 28, № 17. – P. 25371.
18. 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.
 19. Stimulated emission from a $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ epilayer grown by molecular beam epitaxy / K. K. Mahavadi, J. Bleuse, X. Chu, J. P. Faurie // Applied Physics Letters. – 1989. – Vol. 55, № 13. – P. 1285–1286.
 20. Optical Studies and Transmission Electron Microscopy of HgCdTe Quantum Well Heterostructures for Very Long Wavelength Lasers / V. V. Rumyantsev, A. A. Razova, L. S. Bovkun [et al.] // Nanomaterials. – 2021. – Vol. 11, № 7. – P. 1855.
 21. Mid-infrared stimulated emission in $\text{HgCdTe}/\text{CdHgTe}$ quantum well heterostructures at room temperature / M. A. Fadeev, A. O. Troshkin, A. A. Dubinov [et al.] // Optical Engineering. – 2021. – Vol. 60, № 8. – P. 082006.
 22. 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.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Уточкин, В. В. Непрерывное стимулированное излучение в области 10–14 μm при оптической накачке в структурах с квантовыми ямами $\text{HgCdTe}/\text{CdHgTe}$ с квазирелятивистским законом дисперсии / В. В. Уточкин, В. Я. Алёшкин, А. А. Дубинов, В. И. Гавриленко, Н. С. Куликов, М. А. Фадеев, В. В. Румянцев, Н. Н. Михайлов, С. А. Дворецкий, А. А. Разова, С. В. Морозов // Физика и техника полупроводников. – 2020. – Т. 54. – № 10. – С. 1169.
- A2. Мажукина, К. А. Генерация длинноволнового стимулированного излучения в квантовых ямах HgCdTe с увеличенным энергетическим порогом оже-рекомбинации / К. А. Мажукина, В. В. Румянцев, А. А. Дубинов, В. В. Уточкин, А. А. Разова, М. А. Фадеев, К. Е. Спириин, М. С. Жолудев, Н. Н. Михайлов, С. А. Дворецкий, В. И. Гавриленко, С. В. Морозов // Письма в ЖЭТФ. – 2023. – Т. 118. – № 5–6 (9). – С. 311–316.
- A3. 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, M. A. Fadeev, V. Ya. Aleshkin, A. A. Razova, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretzky, V. I. Gavrilenko, S. V. Morozov // Applied Physics Letters. – 2022. – Vol. 121. – no. 18. – P. 182103.
- A4. Utochkin, V. V. *Stimulated Emission up to 2.75 μm from $\text{HgCdTe}/\text{CdHgTe}$ QW Structure at Room Temperature* / V. V. Utochkin, K. E. Kudryavtsev,

- A. A. Dubinov, M. A. Fadeev, V. V. Rumyantsev, A. A. Razova, E. V. Andronov, V. Ya. Aleshkin, V. I. Gavrilenko, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretzky, F. Teppe, S. V. Morozov // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12. – no. 15. – P. 2599.
- A5. Fadeev, M. A. *Balancing the Number of Quantum Wells in HgCdTe/CdHgTe Heterostructures for Mid-Infrared Lasing* / M. A. Fadeev, A. A. Dubinov, A. A. Razova, A. A. Yantser, V. V. Utochkin, V. V. Rumyantsev, V. Ya. Aleshkin, V. I. Gavrilenko, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretzky, S. V. Morozov // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12. – no. 24. – P. 4398.
- A6. Utochkin, V. *Mid-IR lasing in HgCdTe multiple quantum well edge-emitting ridges* / V. Utochkin, K. Kudryavtsev, V. Rumyantsev, M. Fadeev, A. Razova, N. Mikhailov, D. Shengurov, S. Gusev, N. Gusev, S. Morozov // *Applied Optics*. – 2023. – Vol. 62. – no. 32. – P. 8529.
- A7. *Стимулированное излучение в диапазоне длин волн 24–31 мкм в структурах с квантовыми ямами на HgCdTe* / В. В. Румянцев, А. А. Дубинов, В. В. Уточкин, А. А. Разова, М. А. Фадеев, К. А. Мажукина, Н. Н. Михайлов, С. А. Дворецкий, С. В. Морозов // *Труды XXVII Международного симпозиума "Нанозфизика и нанозлектроника"*, Т. 2. – Нижний Новгород, 13–16 марта 2023. – С. 739–740.
- A8. *Стимулированное излучение на длинах волн 2.45 и 2.75 мкм в HgCdTe-структурах с КЯ при комнатной температуре* / В. В. Уточкин, М. А. Фадеев, В. В. Румянцев, С. В. Морозов, В. И. Гавриленко, К. Е. Кудрявцев, Н. Н. Михайлов, С. А. Дворецкий // *Тезисы докладов XV Российской конференции по физике полупроводников*. – Нижний Новгород, 3–7 октября 2022. – С. 324.
- A9. *Критическая температура генерации стимулированного излучения среднего ИК диапазона в серии HgCdTe структур с различным числом квантовых ям* / В. В. Уточкин, С. В. Морозов, М. А. Фадеев, Н. Н. Михайлов // *Тезисы докладов международной конференции Физика.СПб 2021*. – Санкт-Петербург, 18–22 октября 2021. – С. 474–475.
- A10. *Межзонный лазер на 9 мкм из структуры с КЯ HgCdTe/CdHgTe с оптической накачкой* / В. В. Уточкин, М. А. Фадеев, В. В. Румянцев, С. В. Морозов, В. И. Гавриленко, Н. Н. Михайлов, Д. В. Шенгуров, Е. Е. Морозова, М. А. Калинин, Н. С. Гусев, С. А. Гусев // *Тезисы докладов международной конференции Физика.СПб 2022*. – Санкт-Петербург, 17–21 октября 2022. – С. 85.
- A11. *Исследование длинноволнового лазерного излучения в микродисковых и гребешковых мезоструктурах с HgCdTe квантовыми ямами* / В. В. Уточкин, М. А. Фадеев, А. А. Разова, В. В. Румянцев, К. Е. Кудрявцев, К. А. Мажукина, А. А. Янцер, Н. Н. Михайлов, С. А. Дворецкий, Д. В. Шенгуров, Н. С. Гусев, В. И. Гавриленко, С. В. Морозов // *Труды XXVIII Международного симпозиума "Нанозфизика и нанозлектроника"*. Т. 2. – Нижний Новгород, 11–15 марта 2023. – С. 840–841.

УТОЧКИН Владимир Васильевич

**ГЕНЕРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА
В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ
НА ОСНОВЕ HgCdTe**

Автореферат

Подписано к печати 15.07.2024 г.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 65 экз. Заказ № 67(2024).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46