ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
Физический институт имени П.Н.Лебедева
Российской академии наук
Ф И А Н
119991, Москва, ГСП–1
Ленинский проспект, 53, ФИАН
Телефоны: +7 (499) 135 14 29
+7 (499) 132 65 54
Телефакс: +7 (499) 135 78 80
E-mail: office@sci.lebedev.ru
www.lebedev.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, кандидат физ.-мат. наук,

_____/ А.В.Колобов /

«___» _____ 2026 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу Разовой Анны Александровны.

Лазерная генерация в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe в среднем инфракрасном диапазоне

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям
2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств
1.3.19 – Лазерная физика.

Диссертационная работа А.А.Разовой посвящена исследованию процессов стимулированного излучения в гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe с различными параметрами квантовых ям и конструкциями диэлектрического волновода, основной целью которых является продвижение максимальной длины волны генерации в сторону длинноволнового инфракрасного диапазона спектра, а также повышение излучательных характеристик исследуемых структур. Работа А.А.Разовой лежит в русле систематических исследований излучательных и генерационных характеристик структур с квантовыми ямами на основе HgCdTe/CdHgTe , проводимых в последние годы в Институте физики микроструктур РАН.

Актуальность темы исследования.

Проявляемый в последние годы интерес к структурам с квантовыми ямами на основе твердых растворов $Hg_{1-x}Cd_xTe$ обусловлен как прогрессом в технологии молекулярно-лучевой эпитаксии, позволяющей получать структуры достаточно высокого качества, так и

рядом особенностей их электронного спектра, таких, как состояние топологического изолятора, бесщелевая структура зон с линейным спектром и.т.п. Возможность вариации ширины запрещенной зоны изменением состава $Hg_{1-x}Cd_xTe$ делает эти соединения основным и широко применяемым материалом для детекторов и детектирующих матриц среднего ИК диапазона.

Достигнутый в последние годы прогресс в технологии молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктур HgCdTe, обусловил интерес к структурам с квантовыми ямами HgCdTe с малой шириной запрещенной зоны, поскольку за счет изменения ширины и состава квантовых ям возможно в широких пределах управлять энергией межзонных переходов, делая её соответствующей энергии квантов излучения среднего и дальнего инфракрасного диапазонов. Дополнительным достоинством этой системы является еще и то обстоятельство, что фононные частоты в HgCdTe сдвинуты в низкочастотную область по сравнению с широко используемыми при разработке ИК лазеров соединениями A^3B^5. Кроме того, особенности зонной структуры узких квантовых ям HgTe /$Hg_{1-x}Cd_xTe$ с малой шириной запрещенной зоны могут быть использованы для повышения порога безызлучательной оже-рекомбинации, препятствующей достижению нужной степени инверсной заселенности

Диссертационная работа А.А.Разовой состоит из введения, 4 глав, выводов и списка использованных источников литературы, содержащей 146 наименований. Общий объем диссертации составляет 144 страницы, включая 12 таблиц и 62 рисунка. По теме диссертации имеется 7 публикаций в реферируемых журналах и 15 докладов на научных конференциях.

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследования, степень разработки поставленной в диссертации проблемы, изложены цели и задачи работы, методы исследования, показана научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации приведена общая информация о волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe, и методах исследования их свойств и характеристик. Описаны основные свойства и механизмы рекомбинации в гетероструктурах с КЯ HgCdTe/CdHgTe. Дано также краткое описание используемых методик характеризации поверхности мезаструктур, методов измерения кинетики релаксации фотопроводимости и спектров излучения исследуемых структур.

Во **второй главе** посвящена исследованию микродисковых лазеров, сформированных методами фотолитографии и ионного травления на основе гетероструктур с КЯ HgCdTe/CdHgTe. Описан процесс формирования мезаструктур с помощью фотолитографии и ионного травления при использовании в качестве маски фоторезиста или металла. Приведены данные об лазерном

излучении 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. Показано, что максимальная температура наблюдения лазерного излучения ограничивается оптическими потерями в микрорезонаторах.

Отдельно изучена возможность использования металлических масок для формирования резонаторных мезаструктур методом взрывной фотолитографии.

Третья глава посвящена исследованию стимулированного излучения в гетероструктурах с КЯ HgCdTe/CdHgTe в диапазоне 14 – 24 мкм при квазинепрерывной накачке излучением CO_2-лазера.

В **главе 4** представлены результаты исследования параметров стимулированного и лазерного излучения структур с микродисковыми резонаторами разной высоты. Здесь же продемонстрировано лазерное излучение HgCdTe-микродисков в диапазоне длин волн 20 – 26 мкм, достигнутое, по-видимому, впервые.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

Основные научные результаты, полученные автором

К наиболее значимым **новым** результатам работы можно отнести следующие:

1. Продемонстрирована возможность создания микродисковых и гребенчатых лазерных структур с квантовыми ямами на основе HgCdTe методами ионного травления и фотолитографии.
2. Впервые получено лазерное излучение в микродисковых резонаторах на основе гетероструктур с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe в области длин волн ~ 4 мкм при оптичесой накачке с достаточно высокой максимальной температурой.
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.
4. Впервые продемонстрировано стимулированное излучение в волноводных структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe при квазинепрерывной оптической накачке (длина волны 10,6 мкм) при температуре на в диапазоне длин волн 14 – 24 мкм.
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.
6. Впервые получено лазерное излучение на модах шепчущей галереи в области 20 – 26 мкм в микродисковых HgCdTe лазерах, диаметром 200 мкм.
7. Показано, что при формировании микродискового резонатора происходит падение эффективного времени жизни носителей с увеличением глубины травления, что связано с безызлучательной рекомбинацией через дефекты, создаваемые процессом ионного травления

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность научных положений, результатов и выводов обусловлена применением общепризнанных современных, и во многом оригинальных экспериментальных методов. Интерпретация результатов измерений основана на фундаментальных физических принципах, и полученные данные не противоречат данным других научных групп. Полученные результаты неоднократно докладывались на ряде международных и Российских конференций, опубликованы в рецензируемых журналах.

Положения, вынесенные на защиту, достаточно четко сформулированы и обоснованы на основе результатов диссертационной работы.

Публикации и автореферат достаточно полно отражают содержание диссертации.

Теоретическая и практическая значимость работы

Научная значимость работы заключается в получении информации об оптических свойствах и процессах рекомбинации в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе твёрдого раствора HgCdTe в длинниволновой части среднего ИК диапазона. Впервые продемонстрировано стимулированное излучение при квазинепрерывной оптической накачке на длине волны 24 мкм при криогенных температурах.

Важным практическим результатом является также достижение генерации в лазерах на основе гетероструктур с HgCdTe с микродисковыми резонаторами в области прозрачности атмосферы (~4 мкм) при относительно высоких и практически достижимых температурах. Изучено влияние ионного травления, материалов маски и глубины травления на оптические свойства формируемых микрорезонаторов.

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, которые могут найти широкое применение в газовой спектроскопии, экологическом мониторинге и контроле производственных процессов.

Диссертация, автореферат, количество опубликованных по теме диссертации печатных работ ***соответствуют*** требованиям ВАК, предъявленным к кандидатским диссертациям. Представленных в диссертации и автореферате данных достаточно для понимания заявленных элементов научной новизны и практической значимости, личного вклада соискателя, и иных результатов представленной работы.

Тема диссертационной работы и ее содержание соответствуют специальностям 2.2.2 — «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств» **и** 1.3.19 – «Лазерная физика»**.**

Замечания по работе:

1. При исследовании лазерного излучения структур в области 4 мкм (Глава 2) автор приходит к выводу, что ограничение мощности генерации и температурного диапазона обусловлено оптическими потерями ввиду недостаточной добротности резонатора, а не связано с процессами безызлучательной рекомбинации в самой структуре. В то же время при рассмотрении процессов лазерной генерации в области 14 – 24 мкм в микродисках большего диаметра (200 мкм) с, по-видимому, большей добротностью, обнаружено ограничение характеристик безызлучательной рекомбинацией Шокли-Рида-Холла за счет дефектов, вносимых в процессе фотолитографии, ионного травления и т.п. Напрашивается вывод, что для повышения характеристик генерации в области ~4 мкм следует перейти к более добротным дисковым резонаторам, например, микродискам большего диаметра, а селекцию мод при необходимости осуществлять внешними устройствами. Почему-то в диссертации этот вывод не сделан.
2. Автор несколько злоупотребляет сокращениями, не являющихся общепринятыми, например, «ИТ» вместо «ионное травление», «ФЛГ» вместо «фотолитография», «ЛИ» вместо лазерное излучение и т.п., что затрудняет чтение текста диссертации. Поскольку экономия места и бумаги не является первостепенной целью при написании диссертации, этого можно бы и не делать.

Сделанные замечания не умаляют научную и практическую ценность диссертационной работы А.А.Разовой.

Заключение

Диссертация А.А.Разовой является законченной научно – исследовательской работой, в которой исследованы оптические свойства гетероструктур с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe, выявлены механизмы безызлучательной рекомбинации в них и получена генерация лазерного ИК излучения на межзонных переходах в гетероструктурах HgTe/CdHgTe, помещенных в микродисковые и гребенчатые резонаторы. Диссертационная работа А.А.Разовой «**Лазерная генерация в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe в среднем инфракрасном диапазоне**» выполнена на высоком

научном уровне и удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, А.А.Разова, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 2.2.2 — «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств» и 1.3.19 –« Лазерная физика».

Отзыв составил:

Ведущий научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего Лабораторией терагерцовой спектроскопии твердых тел Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.03– радиофизика, включая квантовую радиофизику

Ю.А.Митягин

Настоящий отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого Совета Отделения физики твердого тела Физического института им. П.Н.Лебедева РАН,

протокол № 12/26 от 17 октября 2026 г.

Председатель Ученого Совета ОФТТ ФИАН,
главный научный сотрудник, исполняющий
обязанности руководителя ОФТТ ФИАН,
доктор физико-математических наук В.С.Кривобок

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФГБУН ФИ РАН), Россия, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53, тел. 8(499)135-42-64, факс 8(499)135-78-80, http://www.lebedev.ru/; postmaster@lebedev.ru