

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
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук,
доктор физ.-мат. наук, профессор



/В.А.Рябов/

« 11 » сентября 2024 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу Уточкина Владимира Васильевича

Генерация излучения среднего ик-диапазона в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 — Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Диссертационная работа В.В.Уточкина 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.

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 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 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 .

Основной проблемой, требовавшей решения для продвижения межзонных лазеров в сторону длинных волн, была задача ослабления и подавления процессов безызлучательной, прежде всего Оже-рекомбинации, препятствовавших достижению нужной степени инверсной заселенности. В данной работе удалось повысить порог безызлучательной оже-рекомбинации за счет использования особенностей зонной структуры узких квантовых ям $\text{HgTe}/\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с малой шириной запрещенной зоны.

Диссертационная работа В.В.Уточкина состоит из введения, 4 глав, выводов и списка использованных источников литературы, содержащей 159 наименований. Общий объем диссертации составляет 142 страницы, включая 5 таблиц и 37 рисунков. По теме диссертации имеется 11 публикаций.

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследования, 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 информация об исследованных гетероструктурах с квантовыми ямами $\text{HgCdTe}/\text{CdHgTe}$, изложена методика спектральных измерений методами фурье-спектроскопии, а также методика постростовой характеристики гетероструктур $\text{HgCdTe}/\text{CdHgTe}$ посредством спектроскопии фотопроводимости и фотолюминесценции.

Во **второй главе** диссертации представлены результаты исследований длинноволнового стимулированного излучения (в диапазоне 10–31 мкм) в гетероструктурах с квантовыми ямами $\text{HgCdTe}/\text{CdHgTe}$, в том числе и при непрерывной

оптической накачке. Исследуются факторы, ограничивающие рабочую температуру и длину волны стимулированного излучения в длинноволновых лазерах.

Третья глава посвящена исследованиям стимулированного излучения в гетероструктурах 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

Четвертая глава диссертации посвящена спектроскопии лазерного излучения в гребенчатых волноводах с торцевыми резонаторами Фабри-Перо, изготовленных методом ионного травления из волноводных структур с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Основные научные результаты, полученные автором

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

1. Получено стимулированное излучение при непрерывной оптической накачке в узкозонных структурах с КЯ HgCdTe/CdHgTe в диапазоне длин волн 10.3–14 мкм.
2. Продемонстрировано, что в волноводных структурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe при понижении содержания Cd в квантовых ямах 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
3. За счет оптимизации конструкции диэлектрического волновода удалось существенно снизить уровень модовых потерь в диапазоне длин волн 20 - 30 мкм и получить стимулированное излучение на длинах волн 26–27 мкм.
4. 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 внутряямном импульсном оптическом возбуждении
5. Разработано теоретическое описание процессов межзонной рекомбинации носителей заряда в гетероструктурах с множественными квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe, проведены оценки модовых потерь в структурах с длинами волн стимулированного излучения в диапазоне 3–5 мкм и, соответственно, оценки возможностей увеличения максимальной температуры генерации для структур с различным числом квантовых ям.

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 многих международных и Российских конференциях, опубликованы в рецензируемых журналах.

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

Основные результаты диссертации отражены в 11 опубликованных научных трудах в реферируемых научных журналах. Публикации и автореферат достаточно полно отражают содержание диссертации.

Теоретическая и практическая значимость работы

Выполненные исследования характеристик стимулированного излучения в диапазоне длин волн 25–31 мкм в зависимости от параметров квантовых ям HgCdTe/CdHgTe, а также конструкций диэлектрического волновода представляют практическую значимость для разработки межзонных HgCdTe лазеров данного диапазона.

Исследования стимулированного излучения в квантовых ямах HgCdTe/CdHgTe в диапазоне длин волн 2.5–5 мкм – окне прозрачности атмосферы – важны для разработки перестраиваемых HgCdTe лазеров этого диапазона, 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 специальности 2.2.2 — «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Замечания по работе:

1. В главе 1 приведен целый раздел (1.3) с изложением элементарных основ и принципов фурье-спектроскопии. Поскольку эта информация является общеизвестной и изложена в ряде пособий и книг, представляется излишним включать ее в диссертацию.
2. В обзоре существующих генераторов когерентного излучения среднего и дальнего ИК диапазона автор вскользь упоминает об уже существующих и давно разработанных инжекционных лазерах на основе узкозонных полупроводников A^4B^6 , в которых в свое время – и достаточно давно – достигнута генерация вынужденного излучения на длинах волн вплоть до длин волн 30-40 мкм. В то же время никакого сравнения их характеристик, достоинств и недостатков, возможностей и перспектив применения с предлагаемыми в данной работе устройствами на основе квантовых ям HgTe/CdHgTe автор не проводит, что не мешало бы сделать. Следовало бы хотя бы дать ссылки на основополагающие работы в этом направлении (например, И.И. Засавицкий. Труды. ФИАН, 224, 3 (1993); Д.М. Гуреев, О.И. Даварашвили, И.И. Засавицкий, Б.Н. Мацонашвили, А.П. Шотов. ФТП, 13, 1752 (1979)).

Сделанные замечания не умаляют научную и практическую ценность диссертационной работы В.В.Уточкина.

Заключение

Диссертация В.В.Уточкина является законченной научно – исследовательской работой, в которой исследованы оптические свойства гетероструктур с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe, выявлены механизмы безызлучательной рекомбинации в них, продемонстрирована возможность подавления Оже-рекомбинации и получена генерация вынужденного ИК излучения на межзонных переходах в гетероструктурах HgTe/CdHgTe. Диссертационная работа В.В.Уточкина «Генерация излучения среднего ИК-диапазона в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe» 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, В.В.Уточкин, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 — «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники,

квантовых устройств».

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 № 05/24 от 06 сентября 2024 г.

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



В.С.Кривобок

Подписи Митягина Ю.А. и Кривобока В.С. заверяю:
Ученый секретарь ФИАН
кандидат физико-математических наук



А.В.Колобов

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