

Фадеев Михаил Александрович

**Исследование магнитопоглощения, спонтанного и
стимулированного излучения в гетероструктурах с
квантовыми ямами Hg(Cd)Te/CdHgTe и
InAs/Ga(In)Sb/InAs**

*Специальность 2.2.2 — Электронная компонентная база микро-
и наноэлектроники, квантовых устройств*

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижегород 2021

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИФМ РАН).

Научный руководитель	Морозов Сергей Вячеславович кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Физики полупроводниковых гетероструктур и сверхрешеток Института физики микроструктур РАН - филиала ФГБНУ ФИЦ ИПФ РАН
Официальные оппоненты	Хохлов Дмитрий Ремович доктор физико-математических наук, член- корреспондент РАН, заведующий кафедрой общей физики и физики конденсированного состояния ФГБОУВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» Фирсов Дмитрий Анатольевич доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники ФГАОУВО «Санкт- Петербургский политехнический университет Петра Великого»
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук

Защита состоится 18 ноября 2021 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.02 при ФИЦ ИПФ 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 http://ipmras.ru/UserFiles/Diss/2021_FadeevMA/Dissertation_FadeevMA.pdf
Автореферат разослан 5 октября 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.238.02
д. ф.-м.н., профессор РАН _____ Д.Ю. Водолазов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Открытие состояния квантового спинового изолятора Холла (КСХИ) в квантовых ямах (КЯ) Hg/HgCdTe [1] стало первой экспериментальной демонстрацией состояния топологического изолятора. Это послужило отправной точкой для развития новой области физики, связанной с топологически нетривиальными фазовыми состояниями материи. Одной из самых примечательных особенностей КСХИ являются его необычные транспортные свойства, которые связаны с тем, что ток передается по спин-поляризованным одномерным краевым каналам.

Транспортные свойства КСХИ представляют большой научный интерес, как с точки зрения фундаментальных эффектов, так и для практического применения. КСХИ могут использоваться для бездиссипативной передачи тока, создания стандартов сопротивления и могут найти приложения в спинтронике и квантовых вычислениях.

Тем не менее, несмотря на большое количество теоретических исследований, посвященных двумерным топологическим изоляторам, экспериментальные свойства таких структур остаются плохо изученными. К настоящему времени, даже наличие краевых транспортных каналов было продемонстрировано, фактически, лишь в трех системах — КЯ $\text{HgTe}/\text{HgCdTe}$ [1], композитных квантовых ямах (ККЯ) InAs/GaSb [2] и двумерных пленках 1T-WTe_2 [3]. Это связано с тем, что для экспериментальных исследований транспортных свойств краевых каналов необходимо, чтобы их вклад в проводимость был существенно выше, чем вклад двумерного электронного газа. В реальности, структуры, обладающие инвертированным порядком зон, необходимым для реализации КСХИ, как правило, имеют сравнительно малую ширину запрещенной зоны (до 16 мэВ в КЯ Hg/HgCdTe , и до 5 мэВ композитных КЯ InAs/GaSb). Малая ширина запрещенной зоны неизбежно приводит к высокой равновесной концентрации носителей, и, как следствие, к высокой проводимости структуры. Поэтому транспорт краевых состояний в вышеупомянутых полупроводниковых системах проявляется лишь при криогенных температурах, существенно ниже 1 К. Это служит препятствием, как для исследований таких структур, так и для их практического применения.

Сейчас активно ведется поиск новых материалов, обладающих большей шириной запрещенной зоны, которые позволили бы реализовать состояние КСХИ

при высоких температурах. Так, в ходе исследований сжато-деформированных КЯ HgTe было показано, что запрещенная зона в них может достигать 55 мэВ [4]. Также следует отметить активно развивающиеся сейчас исследования монослойных структур, в частности, значительным результатом таких исследований является демонстрация краевого транспорта в слоях 1T-WTe₂ при температурах до 100 К [3]. В то же время, монослойные структуры, как правило, неустойчивы к влиянию атмосферы [5–7], и слабо интегрированы в существующую полупроводниковую технологию.

Предложенные в работе [8] структуры с тройными квантовыми ямами (ТКЯ) InAs/GaSb/InAs основаны на хорошо развитой технологии роста структур типа АПВВ и обладают большими возможностями по перестройке зонной структуры за счет изменения параметров КЯ. Расчеты зонной структуры показывают, что в инвертированных ТКЯ можно получить ширину запрещенной зоны 60 до мэВ, что является сопоставимым как с монослойными структурами, так и напряженными структурами Hg/HgCdTe. До настоящего времени зонная структура инвертированных ТКЯ InAs/GaSb/InAs экспериментально не исследовалась. Поэтому задача исследования зонной структуры инвертированных ТКЯ InAs/GaSb/InAs является актуальной для получения высокотемпературного КСХИ.

КЯ на основе HgCdTe являются первой полупроводниковой структурой, в которой было обнаружено состояние КСХИ. В то же время, этот материал незаменим для производства инфракрасных (ИК) детекторов [9]. В связи с этим, зонная структура как твердых растворов HgCdTe, так и гетероструктур с КЯ изучена и описана достаточно хорошо. В то же время, значительно меньшее количество работ рассматривали влияние зонной структуры гетероструктур HgTe/HgCdTe на механизмы рекомбинации носителей, можно выделить лишь несколько работ, посвященных лазерам среднего ИК диапазона [10,11]. Лишь недавно было показано, что благодаря особенностям зонного спектра КЯ на базе HgCdTe могут использоваться для получения вынужденного излучения в среднем и дальнем ИК диапазоне [12].

В настоящее время наиболее эффективными полупроводниковыми источниками для дальнего ИК диапазона являются квантовые каскадные лазеры (ККЛ). Они демонстрируют лучшие характеристики излучения практически во всем ИК диапазоне [13]. Единственная область, недоступная для современных ККЛ, лежит в диапазоне длин волн от 20 до 60 мкм и вызвана сильным поглощением решётки в традиционно используемых для их производства материалах (GaAs и InP). Следует сказать, что ККЛ на основе InAs частично решают эту проблему, продвигаясь в область 20 – 60 мкм со стороны среднего

ИК диапазона [14,15], а со стороны длинных волн были предложены ККЛ на основе GaN, работающие до 5 ТГц [16]. Тем не менее, к настоящему моменту область длин волн от 20 до 60 мкм не полностью охвачена доступными источниками когерентного излучения.

Межзонные лазеры на основе HgCdTe представляют интерес в качестве альтернативы ККЛ, так как они являются менее требовательными с технологической точки зрения и обладают большими возможностями по перестройке длины волны, а частоты оптических фононов в КРТ ниже чем в материалах АШВВ [17]. Главным преимуществом гетероструктур с КЯ HgTe/HgCdTe как материала для создания лазеров среднего ИК диапазона является подавление оже-рекомбинации, которая считается камнем преткновения межзонных источников среднего и дальнего ИК диапазона. Первые результаты, по получению СИ в волноводных гетероструктурах с КЯ на основе HgCdTe были обнадеживающими [12], поэтому развитие источников излучения длинноволнового ИК диапазона на основе КРТ и оптимизация параметров гетероструктур для продвижения в длинноволновую область является актуальной задачей.

Степень разработанности исследования

Как твердые растворы HgCdTe, так и гетероструктуры второго типа на основе InAs/GaSb — важные полупроводниковые материалы в первую очередь для производства детекторов ИК диапазона [9,18]. Поэтому основной вектор исследований этих гетероструктур был направлен на улучшение характеристик для создания эффективных приемников, однако, открытие состояний двумерного топологического изолятора в этих системах привело к более детальному исследованию их зонной структуры.

Исследования двойных квантовых ям InAs/GaSb в инвертированном режиме активно велись в течение последних десяти лет. Прямые исследования свойств краевых состояний проводились транспортными методами в нескольких группах [2,19,20]. Помимо транспортных измерений, краевые токи измерялись с помощью микроскопической петли СКВИДа (Superconducting Quantum Interference Device)[21], которая позволяет измерять малые магнитные поля в структуре и соответственно извлекать распределение токов с высокой точностью. Удивительно, но для КЯ InAs/GaSb ток протекал вдоль края образца даже тогда, когда его длина была значительно больше баллистического предела (около 2 мм),

а температуры значительно выше, чем используемые в прямых транспортных измерениях (до 30 К).

Тройные квантовые ямы (ТКЯ) InAs/GaSb/InAs активно исследовались в качестве материала для лазерных диодов ближнего ИК диапазона [22], в связи с чем, в таких структурах как правило исследовались спектры электролюминесценции. Однако, до недавнего времени тройные КЯ не рассматривались как потенциальная система для состояния топологических изоляторов.

Впервые идея конструирования на основе ТКЯ InAs/GaSb/InAs структур с инвертированным порядком зон была высказана в статье Криштопенко [8], что положило начало исследованиям ТКЯ с «экзотическими» зонными спектрами. Так, была проведена серия магнитооптических экспериментов в ТКЯ со специфической зонной структурой, соответствующей бесщелевому состоянию с дираковским конусом в центре зоны Бриллюэна [23,24]. В работе [23] существование безмассовых фермионов Дирака в квантовых ямах InAs/GaSb/InAs специфической конструкции было обнаружено путем измерения циклотронного резонанса при различных концентрациях электронов. В работе было показано, что экспериментальная зависимость циклотронной массы от концентрации носителей хорошо согласуется с коническим законом дисперсии, полученным в результате расчетов. Этот результат позднее был подтвержден [24] результатами магнитооптической спектроскопии в магнитных полях до 34 Т. В сильных квантующих магнитных полях была обнаружена линия поглощения, связанная с переходами с нижних уровней Ландау электронов с "конической" дисперсионной зависимостью.

Таким образом, до сих пор экспериментально изучались только трехслойные гетероструктуры InAs/GaSb/InAs с нормальным порядком зон и бесщелевые структуры, в то время как структуры с инвертированной зонной структурой ранее не исследовались.

Что же касается исследований, посвященных исследованиям генерации излучения в структурах на основе КРТ, то они ведутся достаточно давно и наибольшее развитие получили в конце 90х годов применительно к лазерам ближнего ИК диапазона [25,26]. В то же время, в большинстве конструкций этих лазеров использовались либо объемные слои, либо широкие потенциальные ямы, а длина волны излучения была ограничена ближним и средним ИК диапазоном, наиболее длинноволновая генерация была получена на длине волны 5.3 мкм [27]. Значительно большие длины волн (до 10.2 мкм) удалось получить в первых работах нашей группы по исследованию СИ в гетероструктурах с КЯ [12,28].

Кроме того, было определено, что температурный порог генерации в исследованных структурах лежит выше 77 К, а порог по мощности накачки при 20 К составляет всего 0.1 кВт/см². Эти результаты демонстрируют возможность создания источников излучения на основе HgCdTe в среднем ИК диапазоне и поднимают вопрос о возможности увеличения длины волны генерации и повышении температурного порога таких источников. Данная работа является естественным продолжением исследований стимулированного излучения в гетероструктурах с КЯ Hg_{1-x}Cd_xTe/Cd_{1-y}Hg_yTe/Hg_{1-x}Cd_xTe с различным дизайном активной области для оптимизации структуры и увеличения максимальной длины волны и температурного порога стимулированного излучения.

Цели и задачи

Основной целью диссертационной работы является получение нового научного знания о зонном спектре гетероструктур InAs/Ga(In)Sb/InAs с инверсией зон и разработка физических основ для создания источников стимулированного излучения дальнего инфракрасного диапазона на основе гетероструктур HgCdTe. Это включает следующие задачи:

1. Исследование серии гетероструктур InAs/Ga(In)Sb/InAs с инвертированной зонной структурой методами спектроскопии магнитооптического поглощения в квантующих магнитных полях и фотолюминесценции при различных температурах. Определение ширины запрещенной зоны и порядка зон. Выявление отличительных признаков, определяющих инверсию зонной структуры.
2. Исследование волноводных гетероструктур с КЯ HgTe/HgCdTe методом спектроскопии магнитооптического поглощения и фотолюминесценции. Определение ширины запрещенной зоны и положения подзон размерного квантования
3. Исследования стимулированного в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами Hg(Cd)Te/CdHgTe под действием оптической накачки. Выявление связи между параметрами квантовых ям и характеристиками стимулированного излучения.
4. Исследования зависимости интегральной интенсивности и спектров стимулированного излучения волноводных гетероструктур с КЯ HgTe/HgCdTe от энергии кванта возбуждающего излучения. Анализ разогрева носителей интенсивной оптической накачкой.

Научная новизна работы

1. Впервые исследованы спектры магнитооптического поглощения гетероструктуры InAs/GaSb/InAs, с инвертированной зонной структурой при температурах 2, 20 и 100 К. На спектрах поглощения обнаружены как внутризонные, так и межзонные переходы между уровнями Ландау валентной зоны и зоны проводимости. Показано, что в исследованной структуре достигается ширина запрещенной зоны 17 мэВ. Результаты измерений, проведенных при различных температурах, указывают на слабую температурную зависимость запрещенной зоны, характерную для гетероструктур InAs/GaSb/InAs.

2. Впервые исследованы спектры магнитооптического поглощения напряженных гетероструктур InAs/Ga(In)Sb/InAs с инвертированной зонной структурой. Показано, что при определенных значениях состава и ширины слоев в напряженных структурах происходит переход топологический изолятор-полуметалл. В структуре InAs/GaInSb/InAs получена ширина запрещенной зоны до 30 мэВ.

3. Впервые исследованы спектры ТГц фотолюминесценции гетероструктур InAs/GaSb/InAs с инвертированной зонной структурой. На спектрах фотолюминесценции выявлены линии, связанные с переходами с участием примесных уровней и переходами между различными подзонами размерного квантования.

4. Исследованы спектры ТГц фотолюминесценции и стимулированного излучения серии волноводных гетероструктур с КЯ HgTe/CdHgTe в диапазоне длин волн от 7 до 18 мкм. Продемонстрировано, что использование КЯ с различным содержанием кадмия в материале ям и барьеров приводит к изменениям зонного спектра структуры и определяет характеристики стимулированного излучения. Установлено, что наибольшая температура гашения стимулированного излучения достигается при использовании квантовых ям из бинарного материала HgTe с барьерами, содержащими ~70 % кадмия.

5. Впервые исследованы зависимости интегральной интенсивности и спектров излучения волноводных гетероструктур с КЯ HgTe/CdHgTe от мощности накачки при использовании накачки на длинах волн 2.3 и 10.2 мкм. Обнаружен разогрев носителей, возникающий при использовании коротковолновой оптической накачки, который приводит к смещению линии СИ в сторону больших энергий и уменьшению его интегральной интенсивности. Увеличение мощности накачки выше $\sim 10^{23}$ фотонов в импульсе при высоких температурах приводит к разрушению СИ и появлению на спектрах широкой линии спонтанной ФЛ. При использовании оптического возбуждения на длине

волны 10.6 мкм разогрев носителей проявляется слабее, и увеличение мощности накачки приводит к монотонному увеличению интенсивности СИ.

Теоретическая и практическая значимость работы

Научная значимость работы заключается в расширении знаний об оптических свойствах и зонной структуре гетероструктур с КЯ HgTe/CdHgTe и гетероструктур InAs/Ga(In)Sb/InAs с тройными КЯ.

В ходе работы проведены исследования гетероструктур InAs/GaSb/InAs с инвертированной зонной структурой. Методами спектроскопии магнитооптического поглощения и фотолуминесценции было определено наибольшее значение запрещенной зоны, возможное в таких структурах, которое составляет 17 мэВ. Показано, что с изменением температуры ширина запрещенной зоны не меняется. Выработаны критерии, позволяющие магнитооптическими методами определить знак запрещенной зоны (наличие/отсутствие инверсии зон). Продемонстрировано, что использование напряженных структур позволяет увеличить ширину запрещенной зоны до 35 мэВ.

В волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe получено стимулированное излучение на длинах волн до 18 мкм. Определен дизайн квантовых ям, оптимальный для получения стимулированного излучения. Показано, что использование накачки на длине волны 10.6 мкм не вызывает гашения стимулированного излучения из-за разогрева носителей в структурах на длинах волн до 18 мкм, в отличие от накачки на длине волны 2.3 мкм

Полученные результаты могут быть использованы в будущих исследованиях состояний квантового спинового холловского изолятора при высоких температурах и для создания полупроводниковых лазеров дальнего инфракрасного диапазона.

Методология и методы исследования

В работе использовались апробированные методы исследования, применяемые в ИФМ РАН, Нижний Новгород, Россия и лаборатории Шарля Кулона, Монпелье, Франция:

Исследования магнитооптического поглощения в терагерцовом и инфракрасном диапазонах проводились методом фурье-спектроскопии с разверткой по магнитному полю при различных температурах

Исследования стационарной фотолюминесценции в инфракрасном и терагерцовом диапазонах при различных температурах проводились методом фурье-спектроскопии

Исследования стимулированного излучения под действием оптической накачки в инфракрасном диапазоне проводились методом фурье-спектроскопии с разрешением по времени

Расчеты зонного спектра гетероструктур выполнялись в рамках четырехзонной модели Кейна

Положения, выносимые на защиту

1. Совместное исследование спектров фотолюминесценции и спектров магнитооптического поглощения, содержащих межзонные и внутризонные переходы между уровнями Ландау, позволяет определить как ширину запрещенной зоны, так и порядок зон гетероструктур с квантовыми ямами InAs/GaSb/InAs, ограниченными слоями широкозонного полупроводника AlSb.

2. Изменение толщин слоев в напряженных гетероструктурах с тройными квантовыми ямами InAs/GaSb/InAs позволяет перестраивать энергетический спектр структуры от фазы топологического изолятора с шириной запрещенной зоны, превосходящей запрещенную зону в двойных квантовых ямах InAs/GaSb, до состояния бесщелевого двумерного полуметалла.

3. Основные параметры гетероструктур с квантовыми ямами Hg(Cd)Te/HgCdTe (ширина и состав твердого раствора в квантовой яме) могут быть определены по температурной зависимости спектров фотолюминесценции и спектрам магнитооптического поглощения.

4. Использование длинноволновой межзонной накачки с длиной волны 10.6 мкм для получения стимулированного излучения в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами $Hg_xCd_{1-x}Te/Hg_yCd_{1-y}Te$ позволяет получить стимулированное излучение в диапазоне уровней возбуждения, который значительно (на два порядка) больше, чем при использовании коротковолновой накачки с длиной волны 2 мкм, что обусловлено разогревом неравновесных носителей в последнем случае.

5. Максимальная температура, при которой возможно возникновение стимулированного излучения в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами $Hg_xCd_{1-x}Te/Hg_yCd_{1-y}Te$ при импульсном оптическом возбуждении определяется эффективностью оже-рекомбинации, которая качественно характеризуется энергетическим порогом трехчастичного процесса. Изменение

параметров квантовых ям и барьерных слоев, составляющих активную область узкозонных волноводных гетероструктур на основе $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}/\text{Hg}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}$, предназначенных для получения стимулированного излучения на межзонных переходах в диапазоне длин волн от 7 до 18 мкм, позволяет более чем двукратно увеличить порог безызлучательной оже-рекомбинации и расширить интервал температур, в которых возможно получить стимулированное излучение.

Личный вклад автора

Постановка задач работы осуществлялась научными руководителями автора, Морозовым С.В. и Теппе Ф. Рост структур на основе InAs/GaSb проводился в Институте электроники и систем (Institut d'Electronique et des Systemes, IES) университета Монпелье, рост структур на основе HgCdTe проводился в ИПФ СО РАН им. Ржанова. Расчеты зонного спектра исследуемых гетероструктур выполнялись, соответственно, Криштопенко С.С. и В.Я. Алешкиным. Коллектив, участвовавший в обсуждении результатов и подготовке публикаций указан в качестве соавторов в работах [A1] – [A17]. Все основные результаты, изложенные в данной диссертации, получены автором лично.

Степень достоверности и апробации результатов

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием апробированных в ИФМ РАН и других лабораториях методик для их получения. Полученные экспериментальные результаты сопоставляются с расчетами и литературными данными.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на XX, XXI, XXII, XXIV Международных симпозиумах «Нанофизика и нанoeлектроника» (Нижний Новгород 2016 – 2020 г.), XIII Российской конференции по физике полупроводников (Екатеринбург, 2017 г.), и международных конференциях: 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (Copenhagen, Denmark, 2016), International Conference on Mid-Infrared Optoelectronics: Materials and Devices (Beijing, China 2016), 5th Russia-Japan-USA-Europe Symp. On Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (Sendai, Japan 2016), 5th EOS Topical Meeting on Terahertz Science and technology (Pecs, Hungary 2016), 4th Int. Conf. “Nanostructures: physics and technologies”, (Санкт Петербург, Россия, 2016 г.), 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (Paris, France, 2019).

По теме научно-квалификационной работы опубликовано 52 печатных работы, в том числе 17 статей в рецензируемых журналах и 35 публикаций в сборниках тезисов докладов и трудов конференций и симпозиумов.

Структура работы

Работа состоит из введения, основной части, состоящей из 4 глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка основных публикаций автора по теме работы. Объем диссертации составляет 146 страниц, включая 48 иллюстраций и 6 таблиц. Список цитируемой литературы составляет 129 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 главы. **Глава 1** посвящена обзору литературы по теме исследования. В разделе 1.1 выполнен обзор литературы по проблеме создания полупроводниковых лазеров инфракрасного диапазона, описаны основные механизмы рекомбинации носителей и обозначены перспективы источников излучения на основе твердого раствора HgCdTe. Раздел 1.2 посвящен обзору литературы по исследованиям состояний двумерного топологического изолятора в гетероструктурах HgTe/CdHgTe и InAs/GaSb, обозначена проблема наблюдения состояний квантового спинового эффекта Холла при высоких температурах и обозначены подходы для ее решения, использованные в предыдущих работах, дается теоретическое описание класса гетероструктур InAs/GaSb/InAs, исследуемых в данной работе.

Глава 2 настоящей диссертации посвящена спектральным исследованиям гетероструктур InAs/Ga(In)Sb/InAs. В разделах 2.1 и 2.2 дается описание основных экспериментальных методик, используемых в работе — спектроскопии магнитооптического поглощения и спектроскопии фотолуминесценции. В разделе 2.3 дается краткое описание исследуемых в главе 2 структур, которые представляют собой тройные квантовые ямы InAs/Ga(In)Sb/InAs, окруженные барьерами из AlSb. Основным отличием между структурами помимо толщины слоев является использование различных буферов, которые определяют деформацию структуры. Раздел 2.4 посвящен исследованиям спектров магнитооптического поглощения структуры InAs/GaSb/InAs, выращенной на

буферном слое GaSb с параметрами, соответствующими инвертированному зонному спектру. Обнаружено, что спектры поглощения содержат линии поглощения, связанные как внутризонными, так и с межзонными переходами между уровнями Ландау. На основании расчетов силы осциллятора основных переходов между уровнями Ландау показано, что наличие на спектрах магнитооптического поглощения линии, соответствующей межзонным переходам, является критерием инвертированной зонной структуры образца, поскольку в неинвертированном режиме сила осциллятора всех внутризонных переходов пренебрежимо мала по сравнению с межзонными переходами.

На Рис. 1. сравниваются энергии линий поглощения, полученные из спектров магнитопоглощения ненапряженной гетероструктуры с тройной квантовой ямой InAs/GaSb/InAs, выращенной на подложке GaSb при температурах 2 К и 100 К с результатами расчета энергии наиболее интенсивных переходов между УЛ (Расчеты выполнены С.С. Криштопенко [8]). Как видно из рисунка, теоретические значения энергии перехода хорошо описывают экспериментальные данные. В высоких магнитных полях ширина запрещенной зоны определяется разностью энергий между наблюдаемыми межзонным и внутризонными переходами и составляет 8 мэВ. По мере уменьшения магнитного поля ширина запрещенной зоны увеличивается до значения 17 мэВ, которое сохраняется при разогреве структуры с 2 К до 100 К.

Раздел 2.5 посвящен исследованию гетероструктуры с тройной квантовой ямой InAs/GaSb/InAs, выращенной на буфере AlSb, с зонной структурой, соответствующей переходу между состояниями двумерного топологического изолятора и полуметалла. В разделе 2.6 представлены исследования спектроскопии магнитопоглощения при температурах 10 и 50 К напряженной гетероструктуры с тройной квантовой ямой InAs/Ga_{0,65}In_{0,35}Sb/InAs, выращенных на буфере AlSb. Аналогичные измерения, демонстрируют увеличение ширины запрещенной зоны до 30 мэВ. Полученная величина сопоставима с лучшими (наибольшими) результатами, полученными в напряженных двойных квантовых ямах InAs/Ga(In)Sb и квантовых ямах HgTe/CdHgTe [4].

В разделе 2.7 представлены исследования спектров фотолюминесценции гетероструктур с квантовыми ямами InAs/GaSb/InAs, выращенных на буферных слоях GaSb и AlSb. На спектрах помимо линий люминесценции дефектов замещения Ga в GaSb-буфере и покровном слое [29,30] были обнаружены линии с меньшей энергией, соответствующей переходам между различными подзонами размерного квантования тройных квантовых ям. Для ненапряженной структуры со слоями InAs/GaSb/InAs, обнаруженные линии имеют энергии 8 и 17 мэВ, а для

напряженной структуры, выращенной на буфере AlSb - 14.5 и 24.5 мэВ. Результаты исследований фотолюминесценции согласуются с положением подзон, полученным на основании результатов спектроскопии магнитопоглощения и подтверждают зонную структуру исследованных образцов.

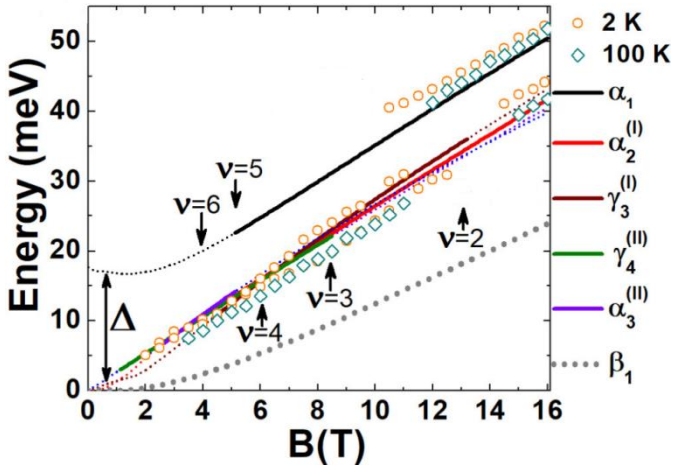


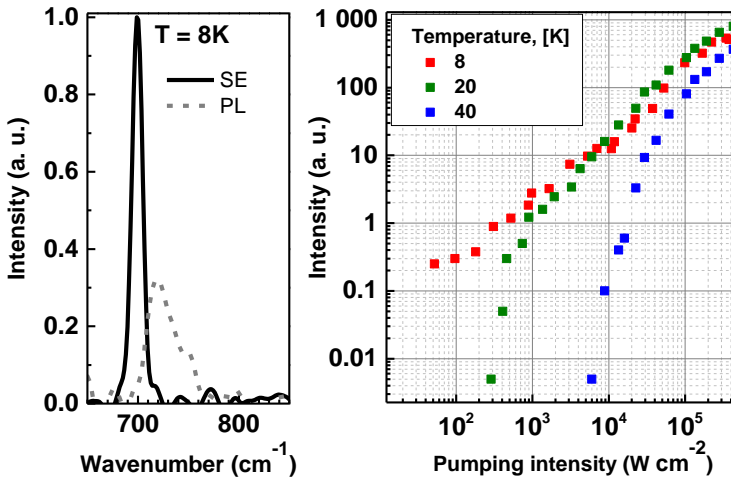
Рис. 1. Энергии наиболее интенсивных переходов между УЛ, наблюдаемых на спектрах поглощения ненапряженной гетероструктуры InAs/GaSb/InAs с инвертированным порядком зон в сопоставлении с расчетами в зависимости от магнитного поля. Экспериментальные данные при различных температурах представлены символами. Стрелками обозначены магнитные поля, соответствующие целочисленным факторам заполнения УЛ (ν) при 2 К.

Глава 3 посвящена характеристике волноводных гетероструктур с квантовыми ямами на основе твердых растворов HgCdTe. Раздел 3.1 кратко описывает основные задачи, которые решаются в рамках пост-ростовой характеристики гетероструктур: определение ширины запрещенной зоны и параметров квантовых ям. В разделе 3.2 дается краткое описание и приводятся ростовые параметры гетероструктур, исследуемых в главах 3 и 4. Раздел 3.3 посвящен исследованию спектров фотолюминесценции гетероструктур на основе HgCdTe. Во всех исследуемых структурах обнаружен сигнал межзонной фотолюминесценции при комнатной температуре, при этом положение красной границы спектральных линий лежит в относительно узком диапазоне от 1000 до 2200 см^{-1} и позволяет определить ширину запрещенной зоны по положению красной границы фотолюминесценции. Быстрое температурное изменение

ширины запрещенной зоны в структурах с узкими квантовыми ямами $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Hg}_{1-y}\text{Cd}_y\text{Te}/\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ позволяет выделить межзонные переходы при низких температурах и уточнить значение ширины запрещенной зоны. Показано, что на основе анализа температурного сдвига линии межзонной фотолюминесценции и сравнения полученных значений с расчетами зонной структуры определения параметров квантовых ям можно грубо оценить содержания проведен анализ оценить содержание кадмия u_{Cd} во внутреннем слое квантовых ям $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Hg}_{1-y}\text{Cd}_y\text{Te}/\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Раздел 3.4 посвящен исследованиям спектров магнитооптического поглощения волноводных гетероструктур на основе HgCdTe . Представлено сравнение карты магнитооптического поглощения с теоретическими расчетами для структуры с шириной запрещенной зоны ~ 85 мэВ. Результаты «подгонки» расчетных параметров квантовой ямы подтверждают вывод, сделанный по температурной эволюции спектров фотолюминесценции — лучшее согласие между экспериментом и теорией достигается при моделировании квантовых ям $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Hg}_{1-y}\text{Cd}_y\text{Te}/\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с содержанием кадмия во внутреннем слое $u_{\text{Cd}} \approx 0.1$. В разделе 3.5 приводятся уточненные параметры структур, которые используются для расчетов зонной структуры и пороговой энергии оже-рекомбинации в главе 4.

В главе 4 представлены исследования стимулированного излучения волноводных гетероструктур с квантовыми ямами $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}/\text{CdHgTe}$. В разделе 4.2 обсуждаются основные отличия методики исследования спектров стимулированного излучения от методики исследования спектров спонтанной фотолюминесценции. Раздел 4.3 посвящен сравнению излучения структур, содержащих одиночную потенциальную яму и серию узких квантовых ям. Подтверждено, что гетероструктуры с квантовыми ямами являются более перспективными для использования в качестве основы для лазеров среднего и дальнего инфракрасного диапазона, чем структуры с потенциальными ямами, так как в одинаковых условиях в последних стимулированное излучение не может быть получено уже на длинах волн более 6.5 мкм. В разделе 4.4 представлены исследования зависимости характеристик стимулированного излучения от параметров квантовых ям. Приведены В волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Hg}_{1-y}\text{Cd}_y\text{Te}/\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с составом квантовых ям $u_{\text{Cd}} \approx 0.1$ и составом барьеров $x_{\text{Cd}} \approx 0.65$ получено стимулированное излучение вплоть до длины волны $\lambda = 18$ мкм. Обнаружено, что по мере увеличения длины волны пороговая интенсивность накачки при температуре 20 К растет от 120 Вт/см² в структуре, излучающей на длине волны 10.9 мкм до 7 КВт/см² в

структуре, излучающей на длине волны 18 мкм. В то же время, показано экспериментально полученная температура гашения стимулированного излучения составляет половину от расчетной величины пороговой энергии оже-рекомбинации в температурном эквиваленте и не обязательно растет с увеличением длины волны излучения. Сравнение структур с различным составом квантовых ям показало, что использование квантовых ям из бинарного материала HgTe вместо $\text{Hg}_{0.9}\text{Cd}_{0.1}\text{Te}$ позволяет поднять пороговую энергию оже-рекомбинации и увеличить температуру гашения стимулированного излучения (экспериментальные данные демонстрируют рост температуры гашения со 100 К до 175 К в структурах, излучающих на длине волны ~ 10 мкм при 20 К). На основании расчетов зонного спектра и исследования стимулированного излучения в пробных структурах определен оптимальный дизайн квантовых ям ($\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}/\text{HgTe}/\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$), который обеспечивает наибольшую пороговую энергию оже-рекомбинации для фиксированной длины волны излучения. Пользуясь эмпирической зависимостью температуры гашения стимулированного излучения от пороговой энергии ($T_{\text{max}} \approx E_{\text{th}}/2$) проведена оценка максимальной температуры гашения стимулированного излучения на длине волны 14 мкм, которая составляет 175 К.



а) Спектры ФЛ и СИ структуры 170127 при 8 К. Спектр ФЛ записывался при квазинепрерывной накачке ККЛ с длиной волны 8.2 мкм и мощностью 95 мВт. СИ было получено при импульсной оптической накачке с длиной волны 2.3 мкм и пиковой мощностью 100 Вт в импульсе длительностью 10 нс. б) Пороговая зависимость интенсивности СИ от мощности оптической накачки при различных температурах.

В разделе 4.5 представлены исследования влияния длины волны оптической накачки на стимулированное излучение в гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe. Исследованы зависимости интегральной интенсивности и спектров излучения в волноводной гетероструктуре с шириной запрещенной зоны ~ 85 мэВ в зависимости от мощности накачки при использовании накачки на длинах волн 2.3 и 10.6 мкм. Обнаружено, что при использовании накачки на длине волны 2.3 мкм интенсивность сигнала растет с мощностью накачки до $\sim 9 \cdot 10^{22}$ фотонов в импульсе. При дальнейшем увеличении мощности возбуждения интенсивность излучения уменьшается, и сопровождающееся смещением линии стимулированного излучения в сторону меньших длин волн на более чем 10 мэВ при количестве фотонов в импульсе 10^{24} . Этот эффект объясняется разогревом носителей в квантовой яме при использовании коротковолновой оптической накачки, что подтверждается спектрами фотolumинесценции с шириной более 60 мэВ, полученными в импульсном режиме. Продемонстрировано уменьшение разогрева носителей при использовании оптического возбуждения на длине волны 10.6 мкм, благодаря которому удается стабильно получать стимулированное излучение в структуре с шириной запрещенной зоны ~ 65 мэВ.

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

Основные результаты:

1. Исследованы спектры терагерцовой ФЛ и МОП в гетероструктуре InAs/GaSb/InAs, с зонной структурой, соответствующей точке перехода между состояниями двумерного топологического изолятора и полуметалла. На спектрах фотolumинесценции обнаружены линии, соответствующие переходам между подзонами размерного квантования. Результаты исследований спектров МОП подтверждают бесщелевую зонную структуру исследуемых квантовых ям InAs/GaSb/InAs.

2. Впервые проведены исследования МОП и фотolumинесценции гетероструктур с тройными квантовыми ямами InAs/Ga(In)Sb/InAs с инвертированной зонной структурой, соответствующей состоянию двумерного топологического изолятора. На спектрах МОП обнаружены линии, соответствующие как внутризонным переходам в зоне проводимости, так и межзонному переходу. Определенная на основании полученных спектров ширина запрещенной зоны в структуре с ТКЯ InAs/GaSb/InAs составляет 17 мэВ и находится в хорошем согласии с теоретическими предсказаниями. Показано, что в

диапазоне температур от 2 до 100 К ширина запрещенной зоны остается неизменной. Показано, что в структуре с ТКЯ InAs/Ga_{0.65}In_{0.35}Sb/InAs ширина запрещенной зоны достигает 35 мэВ и также не меняется с температурой.

3. Проведена характеристика серии волноводных гетероструктур с КЯ HgCdTe/CdHgTe методами спектроскопии фотолюминесценции и МОП. Показано, что КЯ с номинально бинарным составом содержат долю [Cd] в диапазоне от 0 до 10 %. Обнаружено, что в структурах с меньшей долей кадмия в КЯ температурное смещение линий ФЛ больше. По спектрам МОП и ФЛ восстановлены параметры исследованных гетероструктур.

4. Проанализировано влияние параметров квантовых ям, лежащих в активной области волноводных гетероструктур, на характеристики стимулированного излучения. Показано, что наибольшая температура гашения стимулированного излучения достигается в структурах, использующих ямы из бинарного материала HgTe и барьеры с высоким (~0.7) содержанием кадмия.

5. Исследовано влияние длины волны оптической накачки на характеристики стимулированного излучения в гетероструктурах HgCdTe. Использование коротковолнового оптического излучения при высоких ($>10^{23}$ фотонов в импульсе) мощностях приводит к разогреву носителей и гашению стимулированного излучения. В то же время, накачка с длиной волны 10.6 мкм не вызывает разогрева носителей даже при $3 \cdot 10^{24}$ фотонов в импульсе, поэтому она является предпочтительной для получения стимулированного излучения в длинноволновом диапазоне.

6. В волноводных гетероструктурах на основе HgCdTe с квантовыми ямами толщиной от 6.1 нм до 7.6 нм получено стимулированное излучения на длинах волн до 18 мкм. Несмотря на рост пороговой интенсивности накачки с длиной волны излучения от 0.2 кВт/см² на длине волны 10.9 мкм до 5 кВт/см² на длине волны 18 мкм, в абсолютном выражении эта величина остается достаточно малой и более чем на 2 порядка меньше порога прочности гетероструктур на основе HgCdTe, который определяет максимальную мощность оптического возбуждения. Таким образом, полученные результаты демонстрируют возможность дальнейшего увеличения длины волны и температуры гашения излучения в гетероструктурах с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe.

Список цитируемой литературы

1. König M. et al. Quantum spin hall insulator state in HgTe quantum wells // Science (80-.). 2007. Vol. 318, № 5851. P. 766–770.
2. Knez I., Du R.R., Sullivan G. Evidence for helical edge modes in inverted

- InAs/GaSb quantum wells // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 107, № 13. P. 1–5.
3. Wu S. et al. Observation of the quantum spin Hall effect up to 100 kelvin in a monolayer crystal // *Science* (80-). 2018. Vol. 359, № 6371. P. 76–79.
 4. Leubner P. et al. Strain Engineering of the Band Gap of HgTe Quantum Wells Using Superlattice Virtual Substrates // *Phys. Rev. Lett.* 2016. Vol. 117, № 8. P. 1–5.
 5. Cao Y. et al. Quality Heterostructures from Two-Dimensional Crystals Unstable in Air by Their Assembly in Inert Atmosphere // *Nano Lett.* 2015. Vol. 15, № 8. P. 4914–4921.
 6. Wang L. et al. Tuning magnetotransport in a compensated semimetal at the atomic scale // *Nat. Commun.* 2015. Vol. 6. P. 1–7.
 7. Ye F. et al. Environmental Instability and Degradation of Single- and Few-Layer WTe₂ Nanosheets in Ambient Conditions // *Small.* 2016. Vol. 12, № 42. P. 5802–5808.
 8. Krishtopenko S.S., Teppe F. Quantum spin Hall insulator with a large bandgap, Dirac fermions, and bilayer graphene analog // *Sci. Adv.* 2018. Vol. 4, № 4. P. eaap7529.
 9. Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: History, status and outlook // *Reports Prog. Phys.* 2005. Vol. 68, № 10. P. 2267–2336.
 10. Vurgaftman I., Meyer J. High-temperature HgTe/CdTe multiple-quantum-well lasers // *Opt. Express.* 1998. Vol. 2, № 4. P. 137.
 11. Jiang Y., Teich M.C., Wang W.I. Carrier lifetimes and threshold currents in HgCdTe double heterostructure and multi-quantum-well lasers // *J. Appl. Phys.* 1991. Vol. 69, № 10. P. 6869–6875.
 12. Morozov S. V. et al. Long wavelength stimulated emission up to 9.5 μ m from HgCdTe quantum well heterostructures // *Appl. Phys. Lett.* 2016. Vol. 108, № 9. P. 092104.
 13. Vitiello M.S. et al. Quantum cascade lasers: 20 years of challenges // *Opt. Express.* 2015. Vol. 23, № 4. P. 5167.
 14. Ohtani K. et al. Far-Infrared Quantum Cascade Lasers Operating in the AlAs Phonon Reststrahlen Band // *ACS Photonics.* 2016. Vol. 3, № 12. P. 2280–2284.
 15. Bahriz M. et al. High temperature operation of far infrared ($\lambda \approx 20 \mu\text{m}$) InAs/AlSb quantum cascade lasers with dielectric waveguide // *Opt. Express.* 2015. Vol. 23, № 2. P. 1523.
 16. Terashima W., Hirayama H. GaN-based terahertz quantum cascade lasers // *Terahertz Physics, Devices, Syst. IX Adv. Appl. Ind. Def.* 2015. Vol. 9483, № May 2015. P. 948304.
 17. Talwar D.N., Vandevyver M. Vibrational properties of HgCdTe system // *J. Appl. Phys.* 1984. Vol. 56, № 6. P. 1601–1607.
 18. Rogalski A., Martyniuk P., Kopytko M. InAs/GaSb type-II superlattice infrared

- detectors: Future prospect // *Appl. Phys. Rev.* 2017. Vol. 4, № 3.
19. Suzuki K. et al. Edge channel transport in the InAs/GaSb topological insulating phase // *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* 2013. Vol. 87, № 23. P. 1–6.
 20. Mueller S. et al. Edge transport in InAs and InAs/GaSb quantum wells // *Phys. Rev. B.* 2017. Vol. 96, № 7. P. 1–6.
 21. Spanton E.M. et al. Images of edge current in InAs/GaSb quantum wells // *Phys. Rev. Lett.* 2014. Vol. 113, № 2. P. 1–5.
 22. Canedy C.L. et al. High-power continuous-wave midinfrared type-II ‘w’ diode lasers // *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 86, № 21. P. 1–3.
 23. Krishtopenko S.S. et al. Cyclotron resonance of Dirac fermions in InAs/GaSb/InAs quantum wells // *Semiconductors.* 2017. Vol. 51, № 1. P. 38–42.
 24. Ruffenach S. et al. Magnetoabsorption of Dirac Fermions in InAs/GaSb/InAs “Three-Layer” Gapless Quantum Wells // *JETP Lett.* 2017. Vol. 106, № 11. P. 727–732.
 25. Roux C., Hadji E., Pautrat J.L. Room-temperature optically pumped vertical-cavity surface-emitting laser for the 1.5 μm range // *Appl. Phys. Lett.* 1999. Vol. 75, № 12. P. 1661–1663.
 26. Hadji E. et al. 3.2 Mm Infrared Resonant Cavity Light Emitting Diode // *Appl. Phys. Lett.* 1995. Vol. 67, № 18. P. 2591.
 27. Zandian M. et al. HgCdTe double heterostructure injection laser grown by molecular beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.* 1991. Vol. 59, № 9. P. 1022–1024.
 28. Кадыков А.М. Фотоотклик и стимулированное излучение в структурах на основе соединений HgCdTe в среднем и дальнем ИК диапазонах : дис. ... канд. физ. - мат. наук : 05.27.01 : защищена 20.12.2018 : утв. 18.10.2018 / А. М. Кадыков. – ФГБУН «Физический институт им. П.Н. Лебедева. 2018. 261 p.
 29. Ling C.C. et al. Nature of the acceptor responsible for p-type conduction in liquid encapsulated Czochralski-grown undoped gallium antimonide // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 85, № 3. P. 384–386.
 30. Segercrantz N. et al. Point defect balance in epitaxial GaSb // *Appl. Phys. Lett.* 2014. Vol. 105, № 8.

Список основных публикаций автора по теме диссертации:

[A1] В.В. Румянцев, М.А. Фадеев, С.В. Морозов, А.А. Дубинов, К.Е. Кудрявцев, А.М. Кадыков, И.В. Тузов, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, В.И. Гавриленко, Ф. Терре. *Длинноволновое стимулированное излучение и времена*

жизни носителей в волноводных структурах с квантовыми ямами на основе $HgCdTe$. Физика техника полупроводников, 50(12), 1679 (2016).

[A2] В.В. Румянцев, А.М. Кадыков, М.А. Фадеев, А.А. Дубинов, В.В. Уточкин, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, С.В. Морозов, В. И. Гавриленко *Исследования волноводных структур с квантовыми ямами на основе $HgCdTe$ для получения длинноволнового стимулированного излучения.* Физика и техника полупроводников. 51(12), 1616-1620 (2017)

[A3] S.V. Morozov, V.V. Rummyantsev, M.A. Fadeev, M.S. Zholudev, K.E. Kudryavtsev, A.V. Antonov, A.M. Kadykov, A.A. Dubinov, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, and V.I. Gavrilenko. *Stimulated emission from $HgCdTe$ quantum well heterostructures at wavelengths up to $19.5\ \mu\text{m}$,* Applied Physics Letters 111(19), 192101 (2017)

[A4] S. Ruffenach, A. Kadykov, V.V. Rummyantsev, J. Torres, D. Coquillat, D. But, S.S. Krishtopenko, C. Consejo, W. Кнап, S. Winner, M. Helm, M.A. Fadeev, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, V.I. Gavrilenko, S.V. Morozov, and F. Tepe. *$HgCdTe$ -based heterostructures for Terahertz photonics.* APL Materials.5(3), 035503 (2017).

[A5] V.Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov, V.V. Rummyantsev, M.A. Fadeev, O.L. Domnina, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, F. Tepe, V.I. Gavrilenko and S.V. Morozov. *Radiative recombination in narrow gap $HgTe/CdHgTe$ quantum well heterostructures for laser applications.* Journal of Physics: Condensed Matter 30(49), 495301 (2018)

[A6] В.В. Румянцев, Н.С. Куликов, А.М. Кадыков, М.А. Фадеев, А.В. Иконников, А.С. Казаков, М.С. Жолудев, В.Я. Алешкин, В.В. Уточкин, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, С.В. Морозов, В.И. Гавриленко. *Влияние особенностей зонного спектра на характеристики стимулированного излучения в узкозонных гетероструктурах с квантовыми ямами на основе $HgCdTe$.* Физика и техника полупроводников. 52(11), 1263-1267 (2018)

[A7] V.V. Rummyantsev, L.S. Bovkun, A.M. Kadykov, M.A. Fadeev, A.A. Dubinov, V.Ya. Aleshkin, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, B. Piot, M. Orlita, M. Potemski, F. Tepe, S.V. Morozov and V.I. Gavrilenko. *Magneto-optical Studies and Stimulated*

Emission in Narrow Gap HgTe/CdHgTe Structures in the Very Long Wavelength Infrared Range, Semiconductors 52(4), 436 – 441 (2018)

[A8] M.A. Fadeev, V.V. Romyantsev, A.M. Kadykov, A.A. Dubinov, A.V. Antonov, K.E. Kudryavtsev, S.A. Dvoretiskii, N.N. Mikhailov, V.I. Gavrilenko, and S.V. Morozov. *Stimulated emission in the 2.8–3.5 μm wavelength range from Peltier cooled HgTe/CdHgTe quantum well heterostructures*, Optics Express 26(10), 12755-12760 (2018)

[A9] S.S. Krishtopenko, S. Ruffenach, F. Gonzalez-Posada, G. Boissier, M. Marcinkiewicz, M.A. Fadeev, A.M. Kadykov, V.V. Romyantsev, S.V. Morozov, V.I. Gavrilenko, C. Consejo, W. Desrat, B. Jouault, W. Кнап, E. Tournié, and F. Teppe. *Temperature-dependent terahertz spectroscopy of inverted-band three-layer InAs/GaSb/InAs quantum well*, Physical Review B 97(24), 245419 (2018)

[A10] С.С. Криштопенко, С. Руфенах, Ф. Гонзалез-Посада, К. Консейон, В. Десра, Б. Жуо, В. Кнап, М.А. Фадеев, А.М. Кадыков, В. В. Румянцев, С. В. Морозов, Г. Буасье, Э. Турнье, В. И Гавриленко, Ф. Теппе. *Терагерцовая спектроскопия “двумерного полуметалла” в трехслойных квантовых ямах InAs/GaSb/InAs*. Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, 109(2), 91-97 (2019)

[A11] M.S. Zholudev, A.M. Kadykov, M. A. Fadeev, M. Marcinkiewicz, S. Ruffenach, C. Consejo, W. Кнап, J. Torres, S.V. Morozov, V.I. Gavrilenko, N.N. Mikhailov, S.A Dvoretiskii and F. Teppe. *Experimental Observation of Temperature-Driven Topological Phase Transition in HgTe/CdHgTe Quantum Wells*. Condensed Matter, 4(1), 27 (2019)

[A12] V.V. Romyantsev, M.A. Fadeev, V.Ya. Aleshkin, N. Kulikov, V. Utochkin, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretiskii, S. Pavlov, H.W. Hubers, V.I. Gavrilenko, and S.V. Morozov. *Carrier Recombination, Long-wavelength Photoluminescence and Stimulated Emission in HgCdTe Quantum Well Heterostructures*. Physica Status Solidi B: Basic Solid State 256(6), 1800546 (2019)

[A13] V.V. Utochkin, V.Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov, V.I. Gavrilenko, N.S. Kulikov, M.A. Fadeev, V.V. Romyantsev, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretiskii and S.V. Morozov.

Study of the Auger Recombination Energy Threshold in a Series of Waveguide Heterostructures with HgTe/Cd_{0.7}Hg_{0.3}Te QWs Near 14 μm. Semiconductors, 53(9), 1154 (2019).

[A14] M.A. Fadeev, A.A. Dubinov, V.Ya. Aleshkin, V.V. Rummyantsev, V.V. Utochkin, V.I. Gavrilenko, F. Teppe, H-W Hübers, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretiskii, S.V. Morozov. *Effect of Cd content in barriers on the threshold energy of Auger recombination in waveguide structures with HgTe/CdxHg_{1-x}Te quantum wells, emitting at a wavelength of 18 μm.* Quantum Electronics, 49(6), 556 (2019)

[A15] V.V. Rummyantsev, M.A. Fadeev, V.Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov, V.V. Utochkin, A.V. Antonov, D.A. Ryzhov, D.I. Kuritsin, V.I. Gavrilenko, Z.F. Krasilnik, C. Sirtori, F. Teppe, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, S.V. Morozov. *Terahertz emission from HgCdTe QWs under long-wavelength optical pumping.* Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 41, 750-757 (2020)

[A16] V.V. Rummyantsev, A.A. Razova, M.A. Fadeev, V.V. Utochkin, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, V.I. Gavrilenko, S.V. Morozov. *Urbach tail and nonuniformity probe of HgCdTe thin films and quantum well heterostructures grown by molecular beam epitaxy.* Optical Engineering, 60(8), 082007 (2020)

[A17] S.V. Morozov, V.V. Utochkin, V.V. Rummyantsev, M.A. Fadeev, A.A. Razova, V.Ya. Aleshkin, V.I. Gavrilenko, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky. *Express Characterization of the HgCdTe/CdHgTe Quantum Well Waveguide Heterostructures with the Quasi-Relativistic Carrier Dispersion Law by Room-Temperature Photoluminescence Spectroscopy.* Technical Physics Letters, 47(2), 154-157 (2021)

Фадеев Михаил Александрович

**Исследование магнитопоглощения, спонтанного и
стимулированного излучения в гетероструктурах с квантовыми
ямами Hg(Cd)Te/CdHgTe и InAs/Ga(In)Sb/InAs**

Автореферат

Подписано к печати 16.09.2021г. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН –
филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук»

603950, Нижний Новгород, ГСП-105