

Институт физики микроструктур РАН — филиал
Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии наук»

На правах рукописи

Фадеев Михаил Александрович

Научный доклад

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

05.27.01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и
наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Научный руководитель:
зав.лаб. отдела физики полупроводников ИФМ РАН, к.ф.-м.н.,
Морозов Сергей Вячеславович

Рецензент:
с.н.с. отдела технологии наноструктур и приборов ИФМ РАН, к.ф.-м.н.,
Дроздов Михаил Николаевич

Нижний Новгород – 2020

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 HgTe/HgCdTe [1], композитных квантовых ямах (ККЯ) InAs/GaSb[2] и двумерных пленках 1T-WTe₂[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 $1T-WTe_2$ 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 $A_{III}B_V$ 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, и 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 узкозонных 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 инфракрасном 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 "слепая зона" ККЛ, вызванная сильным поглощением решетки в традиционно используемых для их производства материалах ($GaAs$ и InP), лежит в диапазоне длин волн от 20 до 60 мкм. 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 $A_{III}B_V$ [17]. Главным преимуществом гетероструктур с КЯ HgTe/HgCdTe как материала для создания межзонных источников является подавление оже-рекомбинации, которая является краеугольным камнем 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 состояния 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 мкм), 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 зонная структура таких структурах были проведены спектры. 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 магнитоспектроскопии 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 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 составляет всего 0.1 кВт/см² при 20 К. Этот результат говорит о возможности создания структур для длинноволновой области ИК спектра. Поэтому данная работа является естественным продолжением исследований СИ в гетероструктурах с КЯ HgTe/CdHgTe с различным дизайном активной области для оптимизации структуры и увеличения максимальной длины волны и температурного порога СИ.

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 $\text{InAs}/\text{Ga}(\text{In})\text{Sb}/\text{InAs}$ с инвертированной зонной структурой методами спектроскопии магнитопоглощения 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 $\text{HgTe}/\text{HgCdTe}$ методом спектроскопии магнитопоглощения. Определение ширины запрещенной зоны и положения подзон размерного квантования
- 3) Исследования спектров фотолюминесценции и стимулированного излучения в волноводных гетероструктурах с КЯ $\text{HgTe}/\text{HgCdTe}$ при различных температурах и мощностях оптического возбуждения. Систематический анализ результатов и выявление связи между параметрами КЯ и характеристиками стимулированного излучения.
- 4) Исследования зависимости интегральной интенсивности и спектров стимулированного излучения волноводных гетероструктур с КЯ $\text{HgTe}/\text{HgCdTe}$ от энергии кванта возбуждающего излучения. Анализ разогрева носителей интенсивной оптической накачкой.

Научная новизна работы

Научная новизна работы состоит в следующем:

- 1) В магнитных полях до 16 Тл исследованы спектры магнитопоглощения гетероструктуры $\text{InAs}/\text{GaSb}/\text{InAs}$, 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 16 мэВ. Результаты измерений, проведенных при различных температурах, указывают на слабую температурную зависимость запрещенной зоны, характерную для гетероструктур $\text{InAs}/\text{GaSb}/\text{InAs}$.
- 2) Исследованы спектры магнитопоглощения напряженных гетероструктур $\text{InAs}/\text{Ga}(\text{In})\text{Sb}/\text{InAs}$ с инвертированной зонной структурой. Показано, что при определенных значениях состава и ширины слоев в напряженных структурах происходит переход топологический изолятор - полуметалл. В структуре $\text{InAs}/\text{GaInSb}/\text{InAs}$ получена ширина запрещенной зоны до 30 мэВ.
- 3) Исследованы спектры ТГц фотолюминесценции гетероструктур $\text{InAs}/\text{GaSb}/\text{InAs}$ 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) Исследованы зависимости интегральной интенсивности и спектров излучения волноводных гетероструктур с КЯ HgTe/CdHgTe в зависимости 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 получении нового знания об оптических свойствах и зонной структуре гетероструктур с КЯ HgTe/CdHgTe и гетероструктур InAs/Ga(In)Sb/InAs с тройными КЯ.

Впервые проведены исследования гетероструктур InAs/GaSb/InAs с инвертированной зонной структурой. Методами спектроскопии магнитопоглощения и фотолюминесценции было определено наибольшее значение запрещенной зоны, возможное в структурах такого вида, которое составляет 17 мэВ. Показано, что с изменением температуры ширина запрещенной зоны не меняется. Выработаны критерии, позволяющие определить знак запрещенной зоны (наличие/отсутствие инверсии зон).

Методами магнитопоглощения и фотолюминесценции исследованы напряженные гетероструктуры InAs/Ga(In)Sb/InAs. Продемонстрировано, что использование напряженных структур позволяет увеличить ширину запрещенной зоны до 35 мэВ.

В волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами продемонстрировано стимулированное излучение на длинах волн до 18 мкм. Показано, что наиболее оптимальным для получения стимулированного излучения является дизайн квантовых ям из чистого HgTe.

Продemonстрировано, 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:

- 1) Фурье-спектроскопия магнитопоглощения в ТГц диапазоне с разверткой по магнитному полю при различных температурах
- 2) Фурье-спектроскопия фотолюминесценции в дальнем ИК и ТГц диапазонах при различных температурах
- 3) Исследование фотопроводимости при температурах жидкого азота (77 К) и жидкого гелия (4.2 К) методом фурье-спектроскопии

Положения, выносимые на защиту

- 1) Совместное исследование спектров фотолюминесценции и спектров магнитопоглощения, 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 состояния бесщелевого двумерного полуметалла до топологического изолятора с шириной запрещенной зоны, недоступной в двойных квантовых ямах InAs/Ga(In)Sb.
- 3) Изменение параметров квантовых ям и барьерных слоев, составляющих активную область узкозонных волноводных гетероструктур на основе $Hg_xCd_{1-x}Te/Hg_yCd_{1-y}Te$, предназначенных для получения стимулированного излучения на межзонных переходах,

позволяет регулировать скорость безызлучательной оже-рекомбинации, и, тем самым, расширить диапазон длин волн и интервал температур, в которых возможно получить стимулированное излучение.

- 4) Использование длинноволновой межзонной накачки для получения стимулированного излучения в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}/\text{Hg}_y\text{Cd}_{1-y}\text{Te}$ позволяет уменьшить разогрев неравновесных носителей и получить стимулированное излучение на больших длинах волн, чем при использовании коротковолновой накачки.

Степень достоверности и апробации результатов

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием апробированных в ИФМ РАН и других лабораториях методик для их получения.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на XX, XXI и 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 53 печатных работы, в том числе 18 статей в реферируемых журналах и 35 публикаций в сборниках тезисов докладов и трудов конференций и симпозиумов.

Структура работы

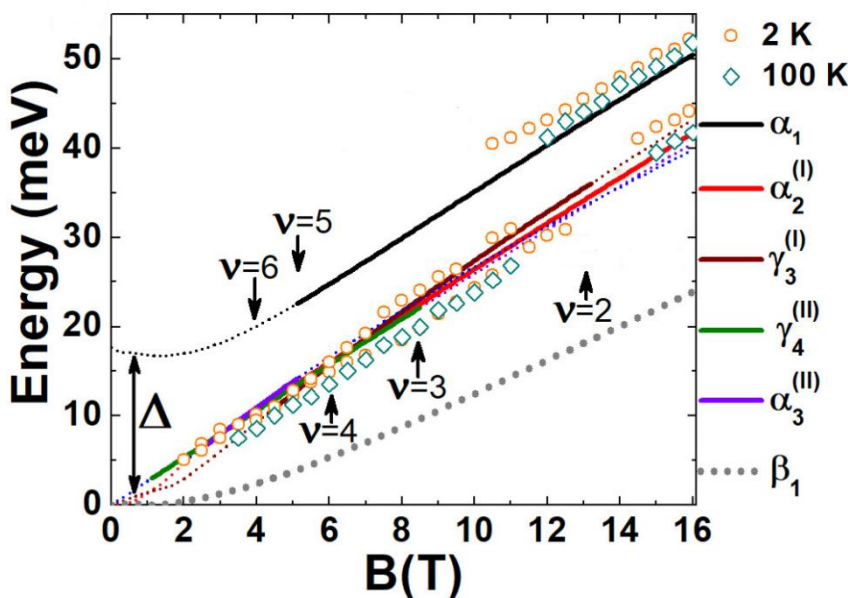
Научно-квалификационная работа (диссертация) состоит из введения, основной части, состоящей из 3 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем научно-квалификационной работы составляет 100 страницы, включая 36 иллюстраций и 5 таблиц. Список цитируемой литературы составляет 101 публикацию.

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 три главы, **первая** из которых посвящена обзору литературы по теме исследования. В разделе 1.1 выполнен обзор литературы по исследованиям состояний квантового спинового холловского изолятора (КСХИ) в гетероструктурах HgTe/CdHgTe и InAs/GaSb, обозначена проблема наблюдения состояний КСХИ 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. Раздел 1.2 посвящен обзору литературы по проблеме создания полупроводниковых лазеров дальнего инфракрасного диапазона.

Глава 2 посвящена спектральным исследованиям магнитопоглощения и фотолюминесценции гетероструктур InAs/Ga(In)Sb/InAs. В разделе 2.1 дается описание методики магнитопоглощения, используемой для получения информации о зонной структуре исследуемых структур. В разделе 2.2 дается краткое описание исследуемых в главе 2 структур. Раздел 2.3 посвящен исследованиям спектров магнитопоглощения структуры InAs/GaSb/InAs, выращенной на подложке GaSb с параметрами, соответствующими инвертированному зонному спектру. Раздел 2.4 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. В разделе 2.5 представлены исследования фотолюминесценции гетероструктур InAs/Ga(In)Sb/InAs. В подразделе 2.5.1 описана методика измерения фотолюминесценции. Подраздел 2.5.2 посвящен результатам спектроскопии фотолюминесценции исследуемых гетероструктур InAs/GaSb/InA, выращенных на подложках GaSb и AlSb.

На основании расчетов силы осциллятора основных

переходов между уровнями Ландау показано, что наличие в спектрах магнитопоглощения 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. Обнаружено, что спектры поглощения содержат линии поглощения, связанные как внутризонными, так и с межзонными уровнями Ландау, что свидетельствует об инвертированной зонной структуре и позволяет определить ширину запрещенной зоны образцов в магнитном поле. 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 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 определяется разностью энергий между межзонным переходом и внутризонным переходом и составляет 8 мэВ. По мере уменьшения магнитного поля ширина запрещенной зоны увеличивается до 16 мэВ из-за нелинейной зависимости энергии перехода от магнитного поля. Аналогичные измерения, проведенные для напряженной гетероструктуры с тройной квантовой ямой InAs/Ga_{0.65}In_{0.35}Sb/InAs демонстрируют увеличение ширины запрещенной зоны до 35 мэВ. Полученная величина сопоставима с лучшими (наибольшими) результатами, полученными в напряженных двойных квантовых ямах InAs/Ga(In)Sb и квантовых ямах HgTe/CdHgTe{ }.

Одновременно со спектрами магнитопоглощения в тех же образцах были исследованы исследования спектры длинноволновой фотолюминесценции при температурах 20 и 50 К. На спектрах помимо линий люминесценции дефектов замещения Ga в GaSb-буфере [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, измеренные 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.

В главе 3 представлены исследования волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами Hg(Cd)Te/CdHgTe в качестве основы для источников излучения дальнего инфракрасного диапазона. В разделе 3.1 обсуждается возможность подавления оже-рекомбинации в квантовых ямах Hg(Cd)Te/CdHgTe. В разделе 3.2 изложены методические особенности исследования

стимулированного излучения. В разделе 3.3 описаны исследуемые структуры, а в разделе 3.4 описан метод из характеристики с помощью спектроскопии фотолюминесценции. Раздел 3.5 посвящен сравнению излучения структур, содержащих одиночную потенциальную яму и серию узких квантовых ям. В разделе 3.5 представлены исследования зависимости характеристик стимулированного излучения от параметров квантовых ям. В разделе 3.6 представлены исследования влияния длины волны оптической накачки на стимулированное излучение в гетероструктурах с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe. Результаты исследований показали, что гетероструктуры с квантовыми ямами являются более перспективными для использования в качестве лазеров дальнего инфракрасного диапазона, чем структуры с потенциальными ямами, так как в последних в одинаковых условиях стимулированное излучение не может быть получено уже на длинах волн более 6.5 мкм. В волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами $\text{Hg}_{1-y}\text{Cd}_y\text{Te}/\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с составом квантовых ям $x_{\text{Cd}} \approx 0.1$ и составом барьеров $x_{\text{Cd}} \approx 0.65$ получено стимулированное излучение вплоть до длины волны $\lambda = 18$ мкм. По мере увеличения длины волны температура гашения стимулированного излучения уменьшается со 100 К в структуре, излучающей на длине волны 10.9 мкм при 20 К до 40 К в структуре, излучающей на длине волны 18 мкм. Расчеты пороговой энергии оже-рекомбинации в исследуемых гетероструктурах показали, что экспериментально полученная температура гашения стимулированного излучения составляет половину от величины пороговой энергии в температурном эквиваленте. 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). На основании расчетов зонного спектра и исследования стимулированного излучения в пробных структурах определен оптимальный дизайн квантовых ям ($\text{HgTe}/\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$), который обеспечивает наибольшую пороговую энергию оже-рекомбинации. Пользуясь эмпирической зависимостью температуры гашения стимулированного излучения от пороговой энергии ($T_{\text{max}} \approx E_{\text{th}}/2$) определена максимальная температура гашения стимулированного излучения на длине волны 14 мкм, составляющая 175 К. Исследованы зависимости интегральной интенсивности и спектров излучения волноводной гетероструктуре с шириной запрещенной зоны в зависимости от мощности накачки при использовании накачки на длинах волн 2.3 и 10.6 мкм. 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 наблюдалось уменьшение интенсивности излучения, сопровождающееся смещением линии стимулированного излучения в сторону меньших длин волн на более чем 10 мЭВ при 10^{24}

фотонов в импульсе, которое вызвано разогревом носителей в квантовой яме при использовании коротковолновой оптической накачки. Отмечено отсутствие разогрева носителей при использовании оптического возбуждения на длине волны 10.6 мкм.

В Заключении сформулированы основные результаты работы

Основные результаты работы

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

2) Впервые проведены исследования магнитопоглощения и фотолюминесценции гетероструктур с тройными квантовыми ямами InAs/GaSb/InAs и InAs/Ga_{0.65}In_{0.35}Sb/InAs с инвертированной зонной структурой, соответствующей состоянию двумерного топологического изолятора. На спектрах магнитопоглощения обнаружены линии, соответствующие как внутризонным переходам в зоне проводимости, так и межзонному переходу. Определенная на основании полученных спектров ширина запрещенной зоны в структуре 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. В структуре InAs/Ga_{0.65}In_{0.35}Sb/InAs ширина запрещенной зоны достигает 30 мэВ и также не меняется с температурой. Такие структуры являются кандидатом на реализацию состояния квантового спинового холловского изолятора при высоких температурах.

3) Проведен анализ влияния параметров квантовых ям, лежащих в активной области 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.

4) 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.

5) 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/см^2 на длине волны 10.9 мкм до 5 кВт/см^2 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. Konig 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.
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.
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.J.-L. Room-temperature optically pumped CdHgTe vertical-cavity surface-emitting laser for the 1.5 μm range // Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 75, № 12. P. 1661.
 26. Hadji E. et al. 3.2 Mm Infrared Resonant Cavity Light Emitting Diode // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 67, № 18. P. 2591–2593.
 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.
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.

Публикации по теме работы

Статьи:

1. Utochkin V. V. et al. 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.* – 2019. – Т. 53. – №. 9. – С. 1154-1157
2. Rumyantsev V. et al. Carrier Recombination, Long-Wavelength Photoluminescence, and Stimulated Emission in HgCdTe Quantum Well Heterostructures // *physica status solidi (b).* – 2019. – Т. 256. – №. 6. – С. 1800546.
3. Kozlov D. V. et al. Features of photoluminescence of double acceptors in HgTe/CdHgTe heterostructures with quantum wells in a terahertz range // *JETP Letters.* – 2019. – Т. 109. – №. 10. – С. 657-662.
4. Zholudev M. S. et al. Experimental Observation of Temperature-Driven Topological Phase Transition in HgTe/CdHgTe Quantum Wells // *Condensed Matter.* – 2019. – Т. 4. – №. 1. – С. 27.
5. Fadeev M. A. et al. Effect of Cd content in barriers on the threshold energy of Auger recombination in waveguide structures with HgTe/Cd_xHg_{1-x}Te quantum wells, emitting at a wavelength of 18 μm // *Quantum Electronics.* – 2019. – Т. 49. – №. 6. – С. 556.
6. Krishtopenko S. S. et al. Terahertz spectroscopy of two-dimensional semimetal in three-layer InAs/GaSb/InAs quantum well // *JETP Letters.* – 2019. – Т. 109. – №. 2. – С. 96-101.
7. Kozlov D. V. et al. Terahertz Photoluminescence of Double Acceptors in Bulky Epitaxial HgCdTe Layers and HgTe/CdHgTe Structures with Quantum Wells // *Journal of Experimental and Theoretical Physics.* – 2018. – Т. 127. – №. 6. – С. 1125-1129.
8. Aleshkin V. Y. et al. Radiative recombination in narrow gap HgTe/CdHgTe quantum well heterostructures for laser applications // *Journal of Physics: Condensed Matter.* – 2018. – Т. 30. – №. 49. – С. 495301.
9. Rumyantsev V. V. et al. Effect of features of the band spectrum on the characteristics of stimulated emission in narrow-gap heterostructures with HgCdTe quantum wells // *Semiconductors.* – 2018. – Т. 52. – №. 11. – С. 1375-1379

10. Kozlov D. V. et al. Calculation of Multiply Charged States of Impurity-Defect Centers in Epitaxial Hg $1-x$ Cd x Te Layers //Semiconductors. – 2018. – Т. 52. – №. 11. – С. 1369-1374.
 11. Krishtopenko S. S. et al. Temperature-dependent terahertz spectroscopy of inverted-band three-layer InAs/GaSb/InAs quantum well //Physical Review B. – 2018. – Т. 97. – №. 24. – С. 245419.
 12. Fadeev M. A. et al. Stimulated emission in the 2.8–3.5 μm wavelength range from Peltier cooled HgTe/CdHgTe quantum well heterostructures //Optics express. – 2018. – Т. 26. – №. 10. – С. 12755-12760.
 13. Rumyantsev V. V. et al. Magneto-optical Studies and Stimulated Emission in Narrow Gap HgTe/CdHgTe Structures in the Very Long Wavelength Infrared Range //Semiconductors. – 2018. – Т. 52. – №. 4. – С. 436-441.
 14. Dubinov A. A. et al. Radiative recombination in narrow gap HgTe/CdHgTe quantum well heterostructures for laser applications //Journal of physics: Condensed matter. 2018. Vol. 30, № 49. P. 495301 (1-6). – 2018
 15. Rumyantsev V. V. et al. Investigation of HgCdTe waveguide structures with quantum wells for long-wavelength stimulated emission //Semiconductors. – 2017. – Т. 51. – №. 12. – С. 1557-1561.
 16. Morozov S. V. et al. Stimulated emission from HgCdTe quantum well heterostructures at wavelengths up to 19.5 μm //Applied Physics Letters. – 2017. – Т. 111. – №. 19. – С. 192101.
 17. Rumyantsev V. V. et al. Terahertz photoconductivity of double acceptors in narrow gap HgCdTe epitaxial films grown by molecular beam epitaxy on GaAs (013) and Si (013) substrates //Semiconductor Science and Technology. – 2017. – Т. 32. – №. 9. – С. 095007.
 18. Ruffenach S. et al. HgCdTe-based heterostructures for terahertz photonics //APL Materials. – 2017. – Т. 5. – №. 3. – С. 035503.
 19. Rumyantsev V. V. et al. Long-wavelength stimulated emission and carrier lifetimes in HgCdTe-based waveguide structures with quantum wells //Semiconductors. – 2016. – Т. 50. – №. 12. – С. 1651-1656.
- Другие публикации:**
20. Длинноволновая фотолюминесценция и стимулированное излучение в структурах на основе твердых растворов HgCdTe. 17 Всеросс. молодежная конф. по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. СПб., 23-27 ноября 2015 г., с.47.
 21. Длинноволновая фотолюминесценция и стимулированное излучение в структурах на основе твердых растворов HgCdTe. Российская конференция по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники, с участием иностранных ученых "Фотоника 2015", Новосибирск, 12-16 октября 2015, с. 62.
 22. Investigation of possibilities of WLWIR in HgCdTe based heterostructures. 19th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Salamanca, 2015

23. Long-wavelength stimulated emission in HgCdTe quantum well waveguide heterostructures. Extended Abstracts of 41th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016), Copengahen, Denmark, 25 - 30 September 2016, W5P.08.03.
24. THz magnetospectroscopy of double HgTe quantum well, 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz 2016), Copengahen, Denmark, 25 - 30 September 2016,
25. Long-wavelength stimulated emission from HgCdTe quantum well waveguide heterostructures. Program&Abstracts of 13th International Conference on Mid-Infrared Optoelectronics: Materials and Devices, Beijing, China, 18 – 22 September 2016, p. 64.
26. Experimental Observation of Long-Wavelength Stimulated Emission, Photoluminescence and Proposal of THz Lasers in HgCdTe Quantum Well Waveguide Heterostructures. 5th Russia-Japan-USA-Europe Symp. On Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies. . Technical Digest. Oct. 31 – Nov. 4, 2016, Tohoku University, Sendai, Japan, pp. 92-94
27. Двухчастотная генерация стимулированного излучения на межзонных и примесно-зонных переходах в гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/HgTe. 18 Всеросс. молодежная конф. по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. 28 ноября – 2 декабря 2016 г., СПб. Тез.докл.
28. Длинноволновое стимулированное излучение в волноводных структурах на основе твердых растворов HgCdTe. Тез.докл. II Юбилейной всеросс. конф. «Импульсная сильноточная вакуумная и полупроводниковая электроника» (ИСВПЭ-2016), Москва, 29-30 сентября 2016 г., с. 142.
29. Long-wavelength stimulated emission in HgCdTe quantum well waveguide heterostructures. 5th EOS Topical Meeting on Terahertz Science and technology, Pecs, Hungary 8 May 2016 - 11 May 2016, Paper ID 27
30. Релаксация носителей заряда в узкозонных эпитаксиальных слоях и структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe при различных уровнях возбуждения. Межд. научно-техническая конф., школа молодых специалистов и выставка по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, 24-27 мая 2016 г., стр. 150.
31. Длинноволновая фотолюминесценция и стимулированное излучение в структурах на основе твердых растворов HgCdTe. Межд. научно-техническая конф., школа молодых специалистов и выставка по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, 24-27 мая 2016 г. стр. 26.
32. Long-wavelength stimulated emission in HgCdTe quantum well heterostructures. Proc. 24th Int. Conf. “Nanostructures: physics and technologies”, June 27 – July 1, 2016, St. Petersburg, Academic University Publishing, pp.210-211. 1 стр
33. Влияние концентрации вакансий ртути на спектр терагерцовой фотопроводимости КРТ пленок. Труды XXI Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2017, т.2, стр.618-619. 2 стр.

34. Особенности фотолюминесценции глубоких центров в структурах с квантовыми ямами n и p-типа на основе твердых растворов HgCdTe. Труды XXI Межд. Симп. «Нанопфизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2017, т.2, стр.705-706.
35. Релаксация носителей заряда в узкозонных эпитаксиальных слоях и структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe с использованием метода терагерцовой pump-probe спектроскопии. Труды XXI Межд. Симп. «Нанопфизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2017, т.2, стр.707-708.
36. Длинноволновое стимулированное излучение на межзонных переходах и переходах с участием глубоких примесных центров в волноводных структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe. Труды XXI Международного симпозиума «Нанопфизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2017, т.2, стр.703-704.
37. Релаксация носителей заряда в узкозонных эпитаксиальных слоях и структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe. XIII Российской конференции по физике полупроводников "Полупроводники-2017" Екатеринбург, 02-06 октября 2017 г. Стимулированное излучение в гетероструктурах на основе HgCdTe при температурах до 250 К. XIII Российской конференции по физике полупроводников "Полупроводники-2017" Екатеринбург, 02-06 октября 2017 г.
38. Исследование мелких акцепторных центров в Hg_{1-x}Cd_xTe. XIII Российской конференции по физике полупроводников "Полупроводники-2017" Екатеринбург, 02-06 октября 2017 г.
39. Стимулированное излучение вплоть до 20 мкм на межзонных переходах в волноводных структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe Сборник трудов XIII Российской конференции по физике полупроводников "Полупроводники-2017". Екатеринбург, 1-6 октября 2017 г.
40. Стимулированное излучение в гетероструктурах на основе HgCdTe при температурах до 250 К. XIII Российская конференция по физике полупроводников "Полупроводники-2017". Екатеринбург, 1-6 октября 2017 г.
41. Длинноволновое стимулированное излучение в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe. Int. Conf. Physica.SPb/2017, St.-Petersburg, October, 24-26, 2017
42. Stimulated emission and photoluminescence from narrow gap HgCdTe based heterostructures in the very longwavelength IR range. Proc. 25th Int. Conf. "Nanostructures: physics and technologies", June 26 – 30, 2017, St. Petersburg, Academic University Publishing, pp.19-20.
43. Наблюдение стимулированного излучения вплоть до 20 мкм в волноводных структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe. Тез. докл. Росс. конф. по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника 2017», 11-15 сентября 2017 г., Новосибирск, ИФП СО РАН, с.39. 2 стр

44. Релаксация носителей заряда в узкозонных эпитаксиальных слоях и структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe. Тез. докл. XIII Росс. конф. по физике полупроводников, 1-6 октября 2017 г., Екатеринбург, ИФМ УрО РАН, с.62.
45. Стимулированное излучение вплоть до 20 мкм на межзонных переходах в волноводных структурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe. Тез. докл. XIII Росс. конф. по физике полупроводников, 1-6 октября 2017 г., Екатеринбург, ИФМ УрО РАН, с.401.
46. Длинноволновая примесная фотолюминесценция из объемных Hg_{1-x}Cd_xTe пленок и гетероструктур Hg_{1-x}Cd_xTe/HgTe с квантовыми ямами, Труды XXII Межд. Симп. «Нанофизика и нанoeлектроника», Нижний Новгород, 2018, т.2, стр.650-651.
47. Расчеты состояний многозарядных примесно-дефектных центров в эпитаксиальных слоях Hg_{1-x}Cd_xTe, Труды XXII Межд. Симп. «Нанофизика и нанoeлектроника», Нижний Новгород, 2018, т.2, стр.652-653.
48. Стимулированное излучение вплоть до 20 мкм на межзонных переходах в волноводных структурах с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe, Труды XXII Межд. Симп. «Нанофизика и нанoeлектроника», Нижний Новгород, 2018, т.2, стр.747-748.
49. Релаксация носителей заряда в узкозонных эпитаксиальных слоях HgCdTe и структурах с квантовыми ямами на основе HgTe/HgCdTe, Труды XXII Межд. Симп. «Нанофизика и нанoeлектроника», Нижний Новгород, 2018, т.2, стр.749-750.
50. Стимулированное излучение в диапазоне 2,8-3,5 мкм в структурах с КЯ на основе HgCdTe при термоэлектрическом охлаждении; Труды XXV международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2018, т.1 стр. 321-323.
51. Гетероструктуры с квантовыми ямами на основе HgCdTe для длинноволновых лазеров на диапазон 5-15 ТГц; Труды XXV международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2018, т.1 стр. 323-327.
52. Topological phase transitions in double quantum wells of HgTe; Proc “French-German THz conference 2019”, 02 to 05 April, Kaiserslautern, 2019, S02-7
53. Far and Mid IR Stimulated Emission in HgCdTe QW Heterostructures; Proc. 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) 1-6 September 2019, Paris, 2019, Tu-AM-5-3