

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Физический ИНСТИТУТ



имени
П.Н. Лебедева

Российской академии наук

Ф И А Н

119991, ГСП-1, Москва,
Ленинский проспект, 53, ФИАН

Телефоны: (499) 135 1429
(499) 135 4264

Телефакс: (499) 135 7880

<http://www.lebedev.ru>
postmaster@lebedev.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор
государственного
учреждения науки
институт им. П.Н. Лебедева

Федерального
бюджетного
Физический

Российской академии наук,
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

Н.Н. Колачевский



2021г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Фадеева Михаила Александровича «Исследование магнитопоглощения, спонтанного и стимулированного излучения в гетероструктурах с квантовыми ямами $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}/\text{CdHgTe}$ и $\text{InAs}/\text{Ga}(\text{In})\text{Sb}/\text{InAs}$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. — Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств

Одной из самых примечательных особенностей квантового спинового изолятора Холла являются его необычные транспортные свойства, а именно то, что ток передается по спин-поляризованным одномерным краевым каналам. Это представляет немалый интерес как с фундаментальной точки зрения, так и возможных практических применений, в частности, для бездиссипативной передачи спин-поляризованного тока и иных приложений в спинтронике. Проблемой, однако является то обстоятельство, что транспорт краевых состояний в имеющихся структурах, реализующих квантовый спиновый изолятор Холла, может наблюдаться при весьма низких температурах, что является следствием малой ширины запрещенной зоны этих структур и, как следствие, высокой их собственной проводимости. Поэтому проблема поиска структур, реализующих квантовый спиновый изолятор Холла и при этом имеющих достаточно большую ширину запрещенной зоны **весьма актуальна**. Именно поиск путей решения этой проблемы и является одной из задач диссертации М.А.Фадеева.

Межзонные лазеры на основе квантовых ям HgCdTe имеют ряд преимуществ по сравнению с лазерами на гетероструктурах A3B5 . Прежде всего это возможность подавления Оже-рекомбинации, фактора, препятствующего продвижению инжекционных лазеров в средний и дальний ИК диапазоны. Кроме того, частоты оптических фононов в

HgCdTe ниже, нежели в АЗВ5. Поэтому задача разработки источников излучения длинноволнового ИК диапазона на основе гетероструктур HgCdTe и оптимизация их параметров для продвижения в длинноволновую область, чему посвящена вторая часть работы М.А.Фадеева, вполне **актуальна**.

Диссертационная работа М.А.Фадеева состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во **введении** дано обоснование актуальности выбранной темы, сформулирована цель диссертационной работы, поставлены задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена обзору литературы по теме исследования. Дан обзор литературы по проблеме создания полупроводниковых лазеров ИК диапазона, описаны основные механизмы рекомбинации носителей и обозначены перспективы источников излучения на основе твердого раствора HgCdTe. Приведён обзор литературы по исследованиям состояний двумерного топологического изолятора в гетероструктурах HgTe/CdHgTe и InAs/GaSb, сформулирована проблема наблюдения состояний квантового спинового эффекта Холла при высоких температурах и обозначены подходы для ее решения, использованные в предыдущих работах, дается теоретическое описание класса исследуемых гетероструктур InAs/GaSb/InAs.

Глава 2 посвящена спектральным исследованиям гетероструктур InAs/Ga(In)Sb/InAs. Приведено описание основных экспериментальных методик, используемых в работе — спектроскопии магнитооптического поглощения и спектроскопии фотолюминесценции. Дано краткое описание исследуемых структур — тройных квантовых ям InAs/Ga(In)Sb/InAs, окруженных барьерами из AlSb. Приведены результаты исследований спектров магнитооптического поглощения структуры InAs/GaSb/InAs с инвертированным зонным спектром.

Здесь же представлены данные спектроскопии магнитопоглощения напряженной гетероструктуры с тройной квантовой ямой InAs/Ga_{0.65}In_{0.35}Sb/InAs показавшие увеличение ширины запрещенной зоны структуры до 30 мэВ.

В этой же главе приведены результаты исследования спектров фотолюминесценции гетероструктур с квантовыми ямами InAs/GaSb/InAs, и дана интерпретация наблюдаемых в спектрах переходов.

Глава 3 посвящена характеристике волноводных гетероструктур с квантовыми ямами на основе твердых растворов HgCdTe.

В главе 4 представлены результаты исследования стимулированного излучения волноводных гетероструктур с квантовыми ямами $\text{Hg}(\text{Cd})\text{Te}/\text{CdHgTe}$. Описаны используемые экспериментальные методики исследования спектров стимулированного излучения и спонтанной фотолюминесценции. Представлены данные исследования зависимости характеристик стимулированного излучения от параметров квантовых ям. Изучены зависимости интенсивности генерации стимулированного излучения от длины волны и энергии накачки.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Наиболее значимыми научными результатами диссертационной работы М.А.Фадеева являются следующие:

1. Исследованы – по-видимому, впервые – спектры магнитооптического поглощения тройных квантовых ям $\text{InAs}/\text{GaSb}/\text{InAs}$ с инвертированной зонной структурой и обнаружены как внутризонные, так и межзонные переходы между уровнями Ландау. Показано, что в исследованной структуре достигается ширина запрещенной зоны 17 мэВ, при этом обнаружена сравнительно слабая зависимость ширины запрещенной зоны от температуры.
2. В напряженных гетероструктурах $\text{InAs}/\text{Ga}(\text{In})\text{Sb}/\text{InAs}$ экспериментально показано, что при увеличении концентрации индия в слое происходит переход топологический изолятор-полуметалл, при этом ширину запрещенной зоны удалось увеличить до 30 мэВ.
3. Впервые исследованы спектры терагерцовой фотолюминесценции гетероструктур $\text{InAs}/\text{GaSb}/\text{InAs}$ с инвертированной зонной структурой, в которых, наряду с примесными полосами, наблюдались переходы между подзонами размерного квантования.
4. Исследованы спектры ТГц фотолюминесценции и стимулированного излучения волноводных гетероструктур с КЯ $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ в диапазоне длин волн от 7 до 18 мкм. Показано, что основным механизмом подавления стимулированного излучения в этих структурах является Оже-рекомбинация неравновесных носителей. Посредством варьирования состава ям и барьеров удалось целенаправленно повысить порог Оже-рекомбинации и тем самым существенно поднять температуру гашения стимулированного излучения. Показано, что оптимальной в этом плане является структура, включающая квантовую яму из чистого HgTe с барьерами, содержащими ~70% кадмия.
5. Проведенные исследования зависимости интегральной интенсивности и спектров излучения волноводных гетероструктур с квантовыми ямами $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$ от мощности накачки на различных длинах волн возбуждения обнаружили разогрев носителей при коротковолновой ($\lambda=2.3$ мкм) накачке, что приводило к снижению интенсивности

генерации при повышении уровня возбуждения. Этот эффект оказался существенно слабее при длинноволновом ($\lambda=10.2$ мкм) возбуждении, при котором наблюдался монотонный рост интенсивности генерации от энергии накачки.

Научная значимость работы заключается в получении новых данных о структуре зон и оптических характеристиках гетероструктур с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe и InAs/Ga(In)Sb/InAs с тройными КЯ.

Практическая значимость работы. В гетероструктурах InAs/GaSb/InAs с инвертированной зонной структурой экспериментально получено наибольшее значение запрещенной зоны, составляющее 17 мэВ. Продемонстрирована возможность определения наличия/отсутствия инверсии зон магнитооптическими методами. Показана возможность увеличения ширины запрещенной зоны посредством использования напряженных структур.

В волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe определен дизайн квантовых ям, позволяющий существенно ослабить роль Оже-рекомбинации и получить генерацию вынужденного излучения с длинами волн вплоть до 18 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.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов работы достигнуты использованием современного научного оборудования, физической обоснованностью используемых автором подходов, а также согласованностью полученных данных с известными результатами теоретического моделирования структур, равно как и с данными экспериментальных исследований других научных групп.

Материалы диссертации прошли апробацию на международных и российских конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах из перечня, утвержденного ВАК.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для использования в исследованиях состояний квантового спинового холловского изолятора, а также и для создания полупроводниковых лазеров дальнего инфракрасного диапазона. В частности, в Физическом институте РАН, Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ», Физико-техническом институте им. Иоффе РАН, ИФП СО РАН, АО «НПО «Орион», и других.

По работе необходимо сделать следующие замечания:

1. В главе 1 в обзоре литературы слишком много внимания уделено изложению общеизвестных элементарных сведений о кинетике неравновесных носителей в полупроводниках, которые можно легко найти в любом учебнике по физике полупроводников. Было бы целесообразнее включить в обзор более подробные данные по зонной структуре исследуемых гетероструктур InAs/GaSb/InAs, ее трансформации в магнитном поле, инверсии зон и влияния на нее параметров структуры. Это существенно облегчило бы чтение диссертации и понимание полученных автором результатов.
2. Автором обойдено вниманием и никак не обсуждается наблюдаемое в спектрах магнитопоглощения отсутствие температурной зависимости ширины линий поглощения от температуры – ширины линий при $T=2\text{K}$ и $T=100\text{K}$ практически не различаются!
3. Насколько корректно проводимое автором сопоставление интенсивностей линий фотолюминесценции, измеренных в существенно различных диапазонах терагерцового спектра, где целый ряд факторов – спектральные зависимости эффективности светоделителя, чувствительности детектора, пропускания фильтров и т.п. могут существенно исказить эти данные.
4. В тексте имеется ряд стилистических погрешностей и опечаток – путаница с обозначением исследуемых образцов – в одних местах V2561 (Таблица 2, Рис 11, 12, 15), в других - V2651 (Рис. 10, в тексте на стр. 53,58), сокращения без расшифровки (СИ, МОП), неточные ссылки на формулы и т.п.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. В целом, диссертационная работа Фадеева М.А. является законченным научным исследованием, содержит новые результаты, имеющие большую научную значимость и практическую ценность. Основные результаты работы опубликованы в виде 16 статей в ведущих рецензируемых журналах (входящих в список журналов ВАК, индексируемых в базах РИНЦ, Web of Science и Scopus) и ряде тезисов международных и российских конференций.

Автореферат и публикации достоверно и достаточно полно отражают содержание диссертации.

Доклад по материалам диссертации и настоящий отзыв заслушаны и обсуждены 01 октября 2021 года на совместном заседании семинара и учёного совета Отделения физики твёрдого тела Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук. Состав Ученого совета – 37 человек, протокол заседания Ученого совета Отделения физики твердого тела ФИАН № 10/21 от 01.10.2021 г., присутствовали 29 членов Ученого совета. Результаты голосования: «за» - 29, «против» - нет, «воздержались» - нет.

Работа М.А. Фадеева на тему «Исследование магнитопоглощения, спонтанного и стимулированного излучения в гетероструктурах с квантовыми ямами Hg(Cd)Te/CdHgTe и InAs/Ga(In)Sb/InAs» является логически завершенным исследованием и удовлетворяет требованиям пункта № 9 Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, утвержденных постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., № 842, а ее автор, Фадеев Михаил Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. — «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

Отзыв составил:

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

Митягин Юрий Алексеевич

Главный научный сотрудник, исполняющий обязанности руководителя ОФТТ ФИАН, председатель Ученого совета ОФТТ доктор физико-математических наук

Демихов Евгений Иванович

Подписи Митягина Ю.А. и Демихова Е. И. заверяю:

ученый секретарь ФИАН кандидат физико-математических наук

Колобов Андрей Владимирович

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