



В диссертационный совет
24.1.238.02
при ФИЦ ИПФ РАН

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Отзыв

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора, профессора Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого Фирсова Дмитрия Анатольевича на диссертационную работу **Морозова Сергея Вячеславовича** "Стимулированное излучение в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2 - Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

Актуальность. Область применения полупроводниковых лазеров чрезвычайно широка. Некоторое время основные усилия исследователей были направлены на разработку полупроводниковых лазеров ближнего инфракрасного диапазона, в результате физика и технология таких источников находятся сейчас на довольно высоком уровне. Важной задачей остается разработка полупроводниковых источников излучения более длинноволновых среднего и дальнего инфракрасного диапазонов для использования в спектроскопии, мониторинге окружающей среды, диагностике, связи в окнах прозрачности атмосферы, медицине и пр. Считается, что наиболее совершенными полупроводниковыми источниками в этой спектральной области являются квантовокаскадные лазеры (ККЛ). Широкое применение квантовокаскадных лазеров ограничено не только сложной и дорогой технологией их изготовления, но и невозможностью создать ККЛ на основе полярных полупроводников на спектральную область сильного решеточного поглощения (30–50 мкм). Исследования, выполненные, в том числе, автором настоящей работы, показали, что перспективным материалом для длинноволновых лазеров являются твердые растворы в системе CdHgTe, в которых решеточное поглощение наблюдается в области 60-80 мкм. Особый интерес вызывают структуры с квантовыми ямами на основе этих твердых растворов. Именно в этих материалах в настоящей работе изучается стимулированное длинноволновое излучение при межзонных переходах электронов.

Получение стимулированного излучения в длинноволновой области спектра требует глубокого изучения рекомбинационных процессов в объемных твердых растворах CdHgTe и в квантовых ямах на их основе. Значительная часть представленной диссертационной работы посвящена изучению фотопроводимости и фотолюминесценции в узкозонных твердых растворах CdHgTe и в гетероструктурах с квантовыми ямами на их основе. Большое внимание также

уделено исследованию точечных дефектов в указанных структурах, в значительной степени определяющих время жизни неравновесных носителей заряда.

Опираясь на вышеизложенное, можно сделать вывод о несомненной актуальности темы диссертационной работы.

Новизна результатов. В работе получено значительное количество новых важных научных результатов. Приведу лишь некоторые из них, представляющиеся мне наиболее важными и интересными.

Как уже отмечалось, значительная часть работы посвящена исследованию физических свойств объемных (эпитаксиальных) слоев узкозонного CdHgTe и гетероструктур HgCdTe/CdHgTe, включая свойства акцепторных состояний, с помощью изучения спектров фотопроводимости и фотолюминесценции. Результаты по этой части:

При исследовании спектров магнитопоглощения за счёт изменения эффективной ширины запрещенной зоны удалось реализовать переход от инвертированной к нормальной зонной структуре в материале с нулевой щелью и установить таким образом достоверность псевдорелятивистского описания электронов и легких дырок как фермионов Кейна.

На примере структур с шириной запрещенной зоны порядка 100 мэВ показано, что возможно существенное подавление оже-рекомбинации в структурах с квантовыми ямами с низким содержанием кадмия в квантовой яме за счет модификации энергетического спектра электронов в валентной зоне.

Времена жизни неравновесных электронов, определенные по методике межзонного поглощения "pump-probe" в структуре с КЯ Cd_{0.65}Hg_{0.35}Te/Hg_{0.17}Cd_{0.83}Te, имеющей ширину запрещенной зоны 20 мэВ, составили величину порядка 100 пс, что позволило определить интенсивность накачки, требуемую для получения инверсии населенности, как 10 кВт/см², что является достижимой величиной.

Детально исследованы особенности фотопроводимости и фотолюминесценции в эпитаксиальных пленках CdHgTe и в гетероструктурах с квантовыми ямами, связанные с наличием акцепторов. Показано, что в этом качестве выступают вакансии ртути. Получены спектры терагерцовой фотолюминесценции, связанной с переходами дырок в состояния мелких акцепторов в структурах с квантовой ямой. Путем сравнения интенсивности примесной и межзонной фотолюминесценции продемонстрировано насыщение межзонной рекомбинации Шокли-Рида-Холла с ростом накачки.

В другой части работы проводились исследования стимулированного излучения в гетероструктурах с КЯ на основе HgCdTe. Значительное внимание в работе уделено разработке конструкции структур, предназначенных для генерации длинноволнового излучения. В частности, для генерации излучения с максимальной длиной волны был разработан волновод, в котором локализация излучения обеспечивалась за счет резкого скачка диэлектрической проницаемости в области фоновонного поглощения в подложке GaAs.

Другие результаты по этой части:

Экспериментально продемонстрировано влияние содержания кадмия на пороговую интенсивность стимулированного излучения в структурах с близкими ширинами запрещенной зоны. Эффект объясняется подавлением оже-рекомбинации за счет модификации зонного спектра валентной зоны.

Установлена связь между максимальной температурой, при которой наблюдается длинноволновое стимулированное излучение, и пороговой энергией оже-рекомбинации, которая определяется законом дисперсии валентной зоны.

С помощью исследования стимулированного излучения при различных энергиях кванта излучения накачки обнаружено влияние разогрева электронного газа на такие характеристики стимулированного излучения как пороговые уровни накачки и максимальная рабочая температура.

Достоверность основных результатов работы не вызывает сомнений. Используются современные высокоточные экспериментальные методики. Результаты исследования энергии Урбаха, характеризующей уширение красной границы межзонной фотопроводимости в экспериментальных образцах, продемонстрировали высокое качество структур. Результаты, полученные при изучении магнитопоглощения и фотолуминесценции, взаимно подтверждают и дополняют друг друга. Следует особо отметить согласие экспериментальных результатов с результатами расчетов и литературными данными (в тех случаях, когда подобные данные имелись), что также подтверждает правильность основных выводов работы.

Научная и практическая значимость работы высока и несомненна. Она частично отражена в предыдущих разделах отзыва. Особо хотелось бы отметить полученное автором стимулированное излучение с длиной волны 31 мкм, что на настоящий момент недоступно для конкурентов – квантовокаскадных лазеров. Методики контроля качества структур, развитые в работе, могут быть использованы для совершенствования технологии создания оптоэлектронных приборов на основе CdHgTe. Результаты исследования времен жизни неравновесных носителей заряда представляют интерес для совершенствования параметров детекторов излучения на основе CdHgTe.

Замечания и вопросы.

1. Структуры, исследованные в работе, выращены на подложке GaAs ориентации (013). С чем связан такой выбор кристаллографической ориентации?

2. Одним из результатов работы является вывод о необходимости снижения доли кадмия в твердом растворе квантовой ямы для ослабления оже рекомбинации. Однако узкозонная структура ($E_g = 20$ мэВ), в которой методом pump-probe были исследованы времена жизни неравновесных носителей заряда, содержала довольно большую долю кадмия – 65%. Чем это вызвано?

3. Ряд результатов, полученных в работе, связывается с разогревом электронного газа. Проводились ли теоретические оценки степени разогрева в зависимости от энергии кванта излучения накачки?

4. В результатах работы упоминается об исследовании качества структур методом просвечивающей электронной микроскопии, однако в диссертации нет подробного описания результатов такого исследования. Приводится лишь ссылка на оригинальную публикацию автора, в которой эти исследования подробно описаны.

5. Замечания по оформлению:

- в работе исследовано довольно много образцов, но ссылки в тексте на образцы часто даются только по их номеру, что затрудняет чтение, поскольку требует частого обращения к таблице параметров;

- в тексте диссертации имеется незначительное количество опечаток.

Указанные замечания не являются принципиальными и не влияют на общую высокую оценку работы.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить высокий научно-методический уровень выполнения работы, внимание автора к деталям эксперимента, большой объем проведенных экспериментальных исследований на структурах различных типов, новизну полученных результатов. Работа является цельным и законченным исследованием. Несомненно, эта работа открывает дальнейшие перспективы разработки оптоэлектронных приборов и расширения спектра генерации полупроводниковых лазеров на основе твердых растворов CdHgTe в длинноволновую область.

Совокупность опубликованных работ автора представляет собой крупное достижение в области оптики полупроводниковых структур, имеющее большое научное и прикладное значение. Диссертация имеет четкую структуру, основные результаты четко сформулированы и опубликованы в ведущих научных журналах. Автореферат и опубликованные статьи правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации. Результаты работы были представлены на ведущих российских и международных конференциях.

Таким образом, диссертация Морозова Сергея Вячеславовича является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную для современной физики полупроводников тему, и полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (Положение о присуждении ученых степеней, утвержденное Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013, ред. от 30.07.2014), а он сам несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2 «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Профессор Высшей инженерно-физической школы,
профессор, доктор физ.-мат. наук

Дмитрий Анатольевич Фирсов

21.10.2022

Согласен на обработку персональных данных

Д.А.Фирсов

21.10.2022

Контактные данные:

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Адрес: 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

E-mail: dmfir@rphf.spbstu.ru

Тел.: +7-921-798-8231

