



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

В диссертационный совет
24.1.238.02
при ФИЦ ИПФ РАН

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 **Фадеева Михаила Александровича** "Исследование магнитопоглощения, спонтанного и стимулированного излучения в гетероструктурах с квантовыми ямами Hg(Cd)Te/CdHgTe и InAs/Ga(In)Sb/InAs", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 - Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

Актуальность. В последнее время сложился устойчивый интерес к объектам, проявляющим свойства топологического изолятора. Многочисленные теоретические работы свидетельствуют об интересной физике явлений, протекающих в топологических изоляторах, также есть основания полагать, что такие структуры имеют широкий круг практических применений и могут, например, использоваться для создания электронных схем с малыми потерями и квантовых компьютеров.

Экспериментальные исследования топологических изоляторов сдерживаются сложностями с поиском материалов, в которых влияние краевых состояний на проводимость проявляется наиболее ярко. С этой точки зрения большой интерес вызывают структуры с квантовыми ямами, имеющие инвертированный энергетический спектр. Одной из задач настоящей работы являлось исследование зонной структуры инвертированных квантовых ям InAs/Ga(In)Sb/InAs и ее оптимизация, позволяющая получить структуры со свойствами топологического изолятора, проявляющимися не только при низких, но и при высоких температурах.

Углубленное изучение зонной структуры требуется и для квантовых ям CdHgTe, в которых также наблюдаются состояния топологического изолятора. Интерес к таким структурам вызван продемонстрированными недавно возможностями наблюдения стимулированного излучения в среднем инфракрасном диапазоне и перспективами продвижения в более длинноволновую область спектра. Препятствует такому продвижению, в частности, усиливающаяся с уменьшением ширины запрещенной зоны оже рекомбинация. В задачи настоящей

работы входило изучение особенностей энергетического спектра квантовых ям HgTe/CdHgTe, оптимизация параметров структур, направленная на подавление оже-рекомбинации, и реализация на их основе длинноволновых лазеров с оптической накачкой.

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

Новизна и достоверность результатов. В работе получен ряд новых научных результатов. Приведу лишь некоторые из них, представляющиеся мне наиболее важными и интересными.

Первая часть работы посвящена исследованию спектров магнитопоглощения и фотолюминесценции в гетероструктурах с квантовыми ямами InAs/Ga(In)Sb/InAs. Отметим, что ранее такие структуры экспериментально изучались только в топологически тривиальных фазах. В диссертации приводятся результаты первых исследований указанных оптических явлений в гетероструктурах с W-образными квантовыми ямами InAs/Ga(In)Sb/InAs с инвертированной зонной структурой, обеспечивающей наличие состояний двумерного топологического изолятора.

На основе экстраполяции спектров магнитопоглощения в область слабых магнитных полей была определена ширина запрещенной зоны, что подтвердилось спектрами фотолюминесценции. Спектрами магнитопоглощения было также подтверждено наличие инвертированной зонной структуры.

Показано, что выбором буфера и состава центрального слоя структуры InAs/GaInSb/InAs удастся получить ширину запрещенной зоны около 35 мэВ, что является хорошей перспективой для изучения состояний топологического изолятора в таких структурах.

Во второй части работы приводятся результаты исследования структур с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe методами спектроскопии магнитопоглощения и фотолюминесценции.

По спектральному сдвигу линии фотолюминесценции удалось определить содержание кадмия в квантовой яме. Эти результаты подтверждаются сравнением расчетных и экспериментальных спектров магнитопоглощения. Используемые методики позволяют также определить ширину квантовой ямы.

Особо хотелось бы выделить результаты по исследованию стимулированного излучения в структурах с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe. В работе удалось существенно расширить спектральный диапазон лазеров с оптической накачкой на основе этих структур в длинноволновую область. Оптимизация зонного спектра структур, направленная на минимизацию оже-рекомбинации, позволила также существенно увеличить максимальную рабочую температуру лазеров на этих структурах.

Исследования стимулированного излучения и фотолюминесценции при различных длинах волн излучения накачки позволили обнаружить эффекты разогрева неравновесных электронов светом и определить их влияние на характеристики стимулированного излучения.

Достоверность основных результатов работы не вызывает сомнений. Это определяется использованием современных высокоточных экспериментальных методик. Результаты, полученные при изучении магнитопоглощения и

фотолюминесценции, взаимно подтверждают и дополняют друг друга. Следует особо отметить согласие экспериментальных результатов с результатами расчетов, выполненных другими авторами, и литературными данными, что также подтверждает правильность основных выводов работы.

Научная и практическая значимость работы высока и несомненна. Она отражена в предыдущих разделах отзыва. Представляют интерес выработанные критерии, позволяющие по магнитооптическим исследованиям определить наличие инвертированной зонной структуры. Хотелось бы отметить также исследования по генерации стимулированного излучения в квантовых ямах HgTe/CdHgTe, выполненные для разных длин волн излучения накачки, что позволяет оптимизировать параметры исследуемого лазера.

Замечания и вопросы.

1. В работе показано, что ширина запрещенной зоны исследованных структур InAs/GaSb/InAs и InAs/GaInSb/InAs в диапазоне 2 – 100 К не зависит от температуры, однако причина этого явления не обсуждается.

2. Автором проводится сравнение результатов для структур InAs/Ga(In)Sb/InAs V2561, V2554 и V2808. Первая структура выращена на буфере GaSb, следующие две - на буфере AlSb. При этом в диссертации первая структура считается ненапряженной, а две другие – напряженными. Действительно ли это так?

3. Структуру V2808 InAs/GaInSb/InAs, имеющую инвертированный спектр и максимальную величину ширины запрещенной зоны можно считать оптимизированной для изучения состояний топологического изолятора, однако для этой структуры, в отличие от остальных изученных структур, в диссертации не приводятся спектры фотолюминесценции.

4. На рис. 40 приведены зависимости интенсивности стимулированного излучения в структурах HgTe/CdHgTe от мощности накачки для разных температур. Желательно пояснить, почему при температуре 8 К, в отличие от 20 и 40 К отсутствует четкий порог.

5. В диссертации и автореферате присутствует заметное количество опечаток, стилистических погрешностей, пропусков слов.

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, большой объем проведенных экспериментальных исследований, новизну полученных результатов. Работа является цельным и законченным исследованием. Несомненно, эта работа открывает новые перспективы дальнейшего исследования структур со свойствами топологического изолятора и расширения спектра генерации полупроводниковых лазеров на основе твердых растворов CdHgTe в длинноволновую область.

Автореферат и значительное количество статей, опубликованных в ведущих научных журналах, правильно и достаточно полно отражают содержание

диссертации. Результаты работы были представлены на ведущих российских и международных конференциях.

Таким образом, диссертация Фадеева Михаила Александровича является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную для современной физики полупроводников, микро- и наноэлектроники тему, и полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013, ред. от 30.07.2014), а он сам, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

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

Дмитрий Анатольевич Фирсов

25.10.2021

Согласен на обработку персональных данных

Д.А.Фирсов

25.10.2021

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

