

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию 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 твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Одним из наиболее быстро развивающихся направлений современной физики конденсированного состояния является физика топологически нетривиальных материалов. К этому классу веществ относятся, в частности, системы с состояниями квантового спинового изолятора Холла. В таких структурах наблюдаются необычные свойства, к которым, в частности относится протекание спин-поляризованного тока по краевым каналам. Предполагается, что указанные структуры могут быть с успехом использованы в спинтронике, что важно с точки зрения перспектив практического использования. Одной из систем, в которых могут наблюдаться соответствующие эффекты, являются гетероструктуры с квантовыми ямами типа InAs/Ga(In)Sb/InAs. Следует отметить, однако, что сама идея о том, что спин-поляризованные краевые состояния могут реализовываться в данных структурах, появилась совсем недавно и требует дальнейшей разработки.

Еще одним типом структур с реализацией топологически нетривиальных состояний являются гетероструктуры на основе квантовых ям теллурида ртути Hg(Cd)Te/CdHgTe. Вообще говоря, теллурид ртути является одним из базовых материалов современной инфракрасной и терагерцовой оптоэлектроники, которая также является одним из важнейших направлений современной электроники. Это, в том числе, обусловлено огромными возможностями для практического применения инфракрасной техники – от медицинских приложений до систем безопасности и инфракрасной астрономии космического базирования. Особое место в существующей проблематике занимает разработка чувствительных приемников излучения инфракрасного диапазона, а также компактных твердотельных излучателей, которые являются ключевыми элементами любых оптоэлектронных систем. В последнее время наблюдается значительный подъем интереса к изучению свойств полупроводниковых твердых растворов на основе HgCdTe, а также низкоразмерных структур на их основе. Указанные материалы обладают низкими значениями характерных энергий электронного спектра, соответствующими инфракрасному спектральному диапазону. Успехи современных технологий позволяют синтези-

ровать структуры на основе HgCdTe с очень высокой степенью структурного совершенства и, как следствие, с низкой концентрацией свободных носителей заряда. Данное обстоятельство открывает новые возможности для создания эффективных приемников и излучателей инфракрасного диапазона. Помимо этого, создаются условия для углубленного изучения свойств данного класса материалов, что позволяет получать новые красивые фундаментальные результаты. Именно указанным вопросам посвящена диссертационная работа М.А. Фадеева.

Диссертация состоит из введения, четырех оригинальных глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 146 страницы текста, 48 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 129 наименований.

В работе получено большое количество новых красивых результатов. Из числа этих результатов хотелось бы особо выделить следующие, определяющие научную новизну работы.

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.

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.

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.

Исследованы спектры ТГц фотолюминесценции и стимулированного излучения серии волноводных гетероструктур с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe в диапазоне длин волн от 7 до 18 мкм. Продемонстрировано, что использование квантовых ям 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.

Достоверность полученных М.А. Фадеевым результатов не вызывает сомнений и определяется тем, что все экспериментальные данные получены с использованием современной экспериментальной техники и апробированных методик измерений. Полученные в работе данные согласуются с известными экспериментальными результатами других авторов и не противоречат современным представлениям. Положения диссертации вполне обоснованы полученными экспериментальными и расчетными результатами.

Научные результаты, составляющие основу диссертации, опубликованы в наиболее авторитетных российских и международных научных журналах и многократно докладывались на российских и международных научных конференциях самого высокого уровня.

Результаты исследований, проведенных М.А. Фадеевым, представляют несомненный практический интерес. Работа может быть использована в организациях, занимающихся технологиями создания элементов инфракрасной оптоэлектроники.

Вместе с тем, по диссертации можно высказать некоторые замечания, которые, впрочем, имеют скорее характер пожеланий.

1) Из текста работы не вполне понятно, как именно работает система стабилизации температуры образца в установке для исследования магнитопоглощения (стр. 45). Если имеется постоянный приток газообразного гелия в антикриостат, то как обеспечивается его отток? Кроме того, неочевидно, что при включении источника освещения (глобара или ртутной лампы) температура образца не будет меняться в процессе снятия интерферограммы.

2) Можно ли на основе результатов, описанных в главе 2, смоделировать идеальную структуру, в которой наблюдалось бы максимальное значение ширины запрещенной зоны, в терминах состав слоев – толщина слоев? Это мог бы быть очень сильный вывод в работе.

3) На температурной зависимости спектров люминесценции образцов на основе HgTe (рис. 30) явно выделяются две линии, причем если более длинноволновая гасится с ростом температуры, то более коротковолновая, наоборот, возгорается. Хотелось бы увидеть пояснение того, с чем это могло бы быть связано.

4) Можно ли ожидать, что лазерные структуры, излучающие на длинах волн порядка 20 мкм, смогут работать не при оптической, а при токовой накачке?

5) При описании различных образцов хотелось бы, чтобы при их обозначении использовались какие-то реальные параметры структур, а не кодовые аббревиатуры (которые, насколько мне известно, просто обозначают дату синтеза соответствующего образца). Все же сравнение различных образцов должно происходить не по дате синтеза, а по их характеристикам.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не влияют на достоверность и значимость полученных результатов и выводов. Автореферат и опубликованные работы отражают содержание диссертации. В целом диссертация М.А. Фадеева удовлетворяет всем критериям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней, а сам автор, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. - электронная компонентная база твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Официальный оппонент

заведующий кафедрой физического факультета МГУ

член-корр. РАН, профессор, доктор физ.-мат. наук

Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва 119991, тел. (495)-939-11-51

E-mail: khokhlov@mig.phys.msu.ru

Хохлов Дмитрий Ремович

Согласен на обработку персональных данных

«11» октября 2021 г.

Хохлов Дмитрий Ремович

Декан физического факультета МГУ

профессор

«11» октября 2021 г.



Н.Н. Сысоев