

Отзыв официального оппонента
на диссертацию Кадыкова Александра Михайловича
«Фотоотклик и стимулированное излучение в структурах на основе соединений HgCdTe в среднем и дальнем ИК диапазонах»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Полупроводниковые соединения HgCdTe уже в конце 20-го века нашли широкое применение в науке и технике, что связано, в первую очередь, с возможностью изготовления высококачественных твердых растворов с различной шириной запрещенной зоны. На основе этих соединений созданы детекторы ИК излучения, а также матрицы фотодетекторов, работающие в окнах прозрачности атмосферы 3–5 и 8–14 мкм. Микроструктуры на основе HgCdTe представляются также перспективными с точки зрения создания источников ИК излучения. В последние два десятилетия интенсивно ведутся исследования квантовых ям HgTe/HgCdTe, которые характеризуются весьма специфической зонной структурой: она может быть либо нормальной, либо инвертированной в зависимости от ширины квантовой ямы и температуры. Именно в квантовых ямах HgTe/HgCdTe с инвертированной зонной структурой было впервые экспериментально обнаружено состояние двумерного топологического изолятора. Однако до сих пор остается недостаточно изученным фазовый переход из состояния топологического изолятора в состояние тривиального изолятора, в частности, под воздействием таких внешних факторов, как температура, давление, электрическое поле. В то же время подобные исследования открывают возможности для создания перспективных приборов нового типа, работающих с использованием краевых каналов проводимости. Диссертация А.М. Кадыкова посвящена исследованию различных физических явлений в структурах на основе узкозонных соединений HgCdTe, которые могут стать фундаментом создания новых детекторов и источников излучения ИК- и терагерцового диапазона. Среди задач, поставленных в работе, во-первых, выделим исследование фотолюминесценции в микро- и наноструктурах на основе HgCdTe, в том числе в режиме эмиссии стимулированного ИК излучения. Во-вторых, – исследование фотоотклика и кинетических явлений в квантовых ямах HgTe/HgCdTe в квантовых магнитных полях и изучение условий фазового перехода от инвертированной зонной структуры к нормальной. В связи с вышесказанным **актуальность темы** диссертационной работы не вызывает сомнений.

Диссертация включает введение, два раздела, посвященные двум направлениям работы, заключение, список цитируемой литературы, список публикаций автора по теме диссертации, список рисунков и перечень таблиц.

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные научные положения, выносимые на защиту.

Раздел 1 посвящен исследованиям фотоотклика гетероструктур с квантовыми ямами HgTe/HgCdTe, а также изучению кинетических явлений в этих структурах в

квантующих магнитных полях. Сначала дается обзор литературы (подразделы 1.1 и 1.2), охватывающий целый ряд аспектов проводимых исследований. В их числе – зонная структура твердых растворов HgCdTe, двумерные топологические изоляторы на основе квантовых ям HgTe/HgCdTe, полевые транзисторы на основе квантовых ям, основные механизмы детектирования терагерцового излучения. Оригинальная часть изложена в подразделах 1.3 – 1.6. Детально описаны исследуемые гетероструктуры, используемые методы их характеристики, а также постростовые операции при изготовлении полевого транзистора и холловского мостика с затвором. Представляется, что наиболее важные результаты, полученные в этом разделе работы, связаны с экспериментальными исследованиями на холловском мостике. Во-первых, были получены карты уровней Ландау в широком диапазоне магнитных полей и затворных напряжений. Эксперименты были проведены в диапазоне температур 1,7–40 К, причем тремя методами: (1) исследование поперечной (холловской) проводимости, (2) исследование продольного удельного сопротивления, (3) исследование фотоотклика на терагерцовое излучение. Было установлено, что первые два метода обеспечивают большую точность в определении уровней Ландау по сравнению с третьим. Анализ температурной зависимости критического магнитного поля, соответствующего пересечению (антипересечению) нижнего уровня Ландау зоны проводимости и верхнего уровня Ландау валентной зоны, позволил установить критическую температуру, при которой происходит топологический фазовый переход от инвертированной зонной структуры к нормальной. Для исследованной в работе квантовой ямы HgTe шириной 6,5 нм критическая температура составила 27 К. Следует особо подчеркнуть, что автору диссертации принадлежит приоритет в экспериментальном наблюдении топологического фазового перехода в квантовой яме HgTe/HgCdTe под воздействием температуры.

В Разделе 2 проведены исследования спектров фотолюминесценции эпитаксиальных плёнок HgCdTe с узкой запрещенной зоной и гетероструктур с квантовыми ямами HgTe/HgCdTe, нацеленные на получение эмиссии стимулированного ИК излучения. В обзоре литературы по этому направлению исследований (подраздел 2.1) анализируются уже существующие твердотельные лазеры среднего/дальнего ИК и терагерцового диапазонов, обсуждаются перспективы создания длинноволновых ($\lambda > 5,3$ мкм) лазеров на основе соединений HgCdTe, описываются механизмы излучательной и безызлучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда. В подразделах 2.2 и 2.3 даны подробные описания исследуемых образцов и методики экспериментальных исследований, подразделы 2.4 – 2.7 посвящены оригинальным новым результатам. В одной из исследуемых структур активным слоем служил эпитаксиальный слой $\text{Hg}_{0,78}\text{Cd}_{0,22}\text{Te}$, локализация ТЕ-моды в активном слое обеспечивалась с помощью широкозонного буферного слоя. В этой структуре удалось получить стимулированное ИК излучение на длине волны 8,4 мкм (при импульсной оптической накачке). Исследования, проведенные на гетероструктурах с квантовыми ямами HgTe/HgCdTe и специально созданными волноводными слоями, позволили ещё дальше продвинуться в длинноволновую область. Рекордный результат достигнут на структуре с 5 квантовыми ямами HgTe шириной 3,65 нм: получена эмиссия стимулированного излучения на длине волны 10,2 мкм (при температуре 18 К). Согласно проведенным экспериментам, использование структур с квантовыми ямами HgTe/HgCdTe позволяет уменьшить пороговый уровень оптической накачки на порядок и более по отношению к объемным

слоям HgCdTe с той же шириной запрещенной зоны. В диссертации показано, что указанный выигрыш обусловлен более низкой скоростью оже-рекомбинации для двумерных носителей заряда по сравнению с трехмерными.

В **Заключении** сформулированы основные научные результаты работы.

Научное значение работы заключается в получении новых знаний об оптических свойствах микро- и наноструктур на основе узкозонных соединений HgCdTe, а также о топологическом фазовом переходе в квантовых ямах HgTe/HgCdTe. Экспериментально доказано положение о подавлении процессов оже-рекомбинации в узкозонных квантовых ямах HgTe/HgCdTe по сравнению с объемными слоями HgCdTe. Экспериментально продемонстрирована возможность фазового перехода из состояния топологического изолятора в состояние тривиального изолятора под воздействием температуры.

Результаты диссертационной работы имеют большую **практическую значимость**: они могут быть использованы для создания новых источников стимулированного излучения ИК диапазона на основе узкозонных структур HgCdTe, а также для разработки детекторов излучения терагерцового диапазона. Важное значение имеют также реализованные в работе методики экспериментальных исследований фотолюминесценции в микро- и наноструктурах. Особую ценность для последующих исследований имеют представленный в диссертации сопоставительный анализ трех способов получения карт уровней Ландау и обоснование оптимального алгоритма решения этой задачи.

Перечисленные выше основные результаты диссертационной работы получены впервые. **Достоверность результатов** обеспечивается применением адекватных теоретических моделей и подтверждается сравнением с экспериментальными и теоретическими данными из работ других авторов. Основные научные положения и выводы непротиворечивы и научно обоснованы.

К изложенному в диссертации материалу имеются следующие **замечания**:

1. При описании методики эксперимента (на страницах 93–94) автор указывает: "... фотоотклик на ТГц излучение может состоять из суперпозиции симметричной по направлению тока части (фотопроводимость) и антисимметричной (фотоэдс). Для эффективного разделения этих двух явлений, направление пропускаемого тока изменялось с частотой 0.6 – 2.5 Гц." Аналогичный текст помещен на странице 66. К сожалению, в диссертации не представлены результаты экспериментов по выделению вкладов фотопроводимости и фотоэдс в измеряемый сигнал, что важно для интерпретации результатов. Не указано также, какая именно компонента фотоотклика представлена на рис. 33, 50 и 51.

2. При анализе выражения, описывающего рекомбинацию по модели Шокли–Рида–Холла (стр. 111), автор приходит к ошибочному утверждению: "... *наименьшее* время жизни в случае рекомбинации ШРХ достигается в случае, когда энергия ловушки располагается посередине между зоной проводимости и валентной зоной." Корректный анализ приводит к противоположному выводу: в указанных условиях время жизни *максимально* (см., например, Дж. Блекмор. Статистика электронов и дырок в полупроводниках. М.: Мир, 1964. Стр. 278).

3. Оценивая пороговый уровень накачки гетероструктур с квантовыми ямами HgTe/HgCdTe (стр.130), автор декларирует: "Если принять коэффициент поглощения излучения слоем КЯ равным 1 %, то можно оценить, что критическая концентрация неосновных носителей в КЯ составляет ... $\approx 1.4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$." Однако в диссертации нет независимых данных о том, что коэффициент поглощения именно такой, поэтому трудно судить о достоверности указанного значения пороговой концентрации.

4. Следует отметить, что в тексте диссертации присутствует заметное число небрежно составленных фраз, которые затрудняют восприятие работы, а порой и вводят в заблуждение. Например, на с. 49 говорится: "Спектры магнитопоглощения были получены нормированием спектров *поглощения* в ненулевом магнитном поле на калибровочные спектры *поглощения* в отсутствие магнитного поля". Видимо, речь идет о нормировании спектров *пропускания* в магнитном поле на спектры *пропускания* в отсутствие поля. На рис. 18, очевидно, показан спектр *пропускания*, но при этом на оси ординат стоит надпись "*Absorption*", и в подписи к рисунку говорится не о пропускании, а о *поглощении*. Поскольку свойства квантовых ям HgTe/HgCdTe существенно зависят и от ширины ямы, и от температуры, при анализе свойств ям необходимо указывать оба этих параметра. К сожалению, в диссертации часто указывается лишь один из них (рис. 5 и 62, Табл. 1, 1-й абзац на с. 21). В последних абзацах на с. 87 и 90, где анализируются результаты магнитотранспортных экспериментов, допущен ряд опечаток при указании значений температуры и критического магнитного поля, из-за чего текст не вполне соответствует рисункам 47 – 49. На рис. 61 (с. 123) цвет штриховых линий, показывающих показатель преломления в активном слое для уровней возбуждения $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, не соответствует легенде в поле рисунка. На с. 127 утверждается: "... после трёхкратного превышения плотности мощности возбуждения над пороговым значением интенсивность линии СИ увеличивается *на три порядка*", что противоречит рис. 66, где при увеличении мощности накачки от 1 до 3 кВт/см² интенсивность излучения возрастает *в 106 раз*. В диссертации имеются большие повторы (на с. 93 и 112), а также пропущенные слова. Вместо термина "поглощение на оптических фононах" используется словосочетание "поглощение оптических фононов" (с. 49 и 51), вместо "экстраполяция" – "интерполяция" (с. 85), вместо "продольное удельное сопротивление" – "продольная удельная проводимость" (с. 91), вместо "неравновесные носители" – "неосновные носители" (с. 104 и 111). Качество текста в автореферате значительно выше, но в нем также встречаются опечатки.

Указанные замечания не имеют решающего значения и не ставят под сомнение основные результаты диссертационной работы.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить высокий научный уровень ее выполнения, цельность работы, большой объем проведенных экспериментов, применение самых современных теоретических моделей для интерпретации результатов. Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в 10 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК России и индексируемых в базах данных WoS и Scopus, докладывались на многих российских и международных конференциях (имеется 22 публикации в сборниках тезисов докладов и трудов конференций, симпозиумов, совещаний). В опубликованных статьях полностью изложены основные результаты работы. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее содержание.

Таким образом, диссертация «Фотоотклик и стимулированное излучение в структурах на основе соединений HgCdTe в среднем и дальнем ИК диапазонах» полностью удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней (постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Кадыков Александр Михайлович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Доктор физико-математических наук,
профессор кафедры физики
полупроводников и нанoeлектроники
Федерального государственного
автономного образовательного
учреждения высшего образования «Санкт-
Петербургский политехнический
университет Петра Великого»

Адрес: ул. Политехническая 29
Санкт-Петербург, 195251
Телефон: +7 812 552 9671
E-mail: shalygin@rphf.spbstu.ru

Шалыгин Вадим Александрович

04.12.2018

