

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Гурина Александра Сергеевича «**Исследование полупроводниковых кристаллов и наноструктур A_2B_6 с магнитными примесями методом оптически детектируемого магнитного резонанса**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Гурина А.С посвящена исследованию оптико-радио-спектроскопическими методами наноструктур на основе твердых растворов магнитных полупроводников $Cd_xMn_{1-x}Te$ в области составов, сильно обогащенных кадмием и широкозонного оксидного полупроводника ZnO , содержащего магнитные примеси переходных элементов. Основными направлениями исследований являлись: изучение взаимодействия носителей заряда и магнитных ионов в наноструктурах с квантовыми ямами, изучение зависимых от спина процессов в монокристаллах ZnO с глубокими уровнями $3d$ -ионов, а также развитие метода оптического детектирования магнитного резонанса 3-миллиметрового диапазона длин волн применительно к задачам, сформулированным в работе.

Актуальность темы диссертации

Исследования зависимых от спина электронных явлений в классических полупроводниках в ряде случаев весьма информативны для объяснения механизмов транспорта носителей заряда, процессов излучательной и неизлучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда, рассеяния, взаимодействия с глубокими центрами и т.п. Особую актуальность такие исследования приобретают для магнитных полупроводников и, в частности, для разбавленных магнитных полупроводников (РМП). Такие материалы представляют собой твердые растворы на основе соединений A^3B^5 или A^2B^6 , в которых ионы магнитного компонента (например, Mn) замещают ионы катионной подрешетки. Концентрация замещающих ионов определяет магнитное состояние фазы (парамагнитное, «спиновое стекло»,

антиферромагнитное), значения постоянной решетки и ширины запрещенной зоны, а также другие параметры полупроводника. Магнитные свойства РМП определяются взаимодействием магнитных моментов замещающих ионов друг с другом и с состояниями валентной зоны и зоны проводимости (*d-d*-обмен, *p-d*-обмен и *s-d*-обмен). В связи с этим, развитие в диссертационной работе прямых методов и инструментов исследования зависимых от спина взаимодействий носителей заряда с локализованными магнитными моментами в слоевых наноразмерных структурах с квантовыми ямами $(Cd_xMn_{1-x})Te/(Cd_yMg_{1-y})Te$ представляет несомненный интерес для физики магнитных полупроводников и их применений в активно развивающейся области современной электроники – спинтронике. Актуальными представляются и приведенные в работе результаты исследования методом ОДМР механизмов возбуждения люминесценции ионов железа в перспективном материале оптоэлектроники и спинтронике – оксиде цинка, содержащем примесные ионы переходных элементов.

Следует отметить, что при выполнении диссертационной работы получены новые знания и представления о направлении развития методик ОДМР применительно к изучению спин-зависимых процессов в РМП группы A^2B^6 и наноразмерных структур на их основе. В связи с этим актуальность данной работы не вызывает сомнений.

Характеристика диссертационной работы

Работа А. С. Гурина удачно сочетает фундаментальность решаемых задач и очень хороший экспериментальный уровень исследования особенностей возбуждения и излучения люминесценции в объемных кристаллах и низкоразмерных структурах на основе РМП группы A^2B^6 в условиях парамагнитного резонанса.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Она представляет собой цельное и завершенное исследование. Стержнем

работы является методическая основа, включающая ЭПР, ОДМР, оптическую спектроскопию и широкий круг вспомогательных методик подготовки экспериментальных образцов и их предварительного анализа.

Обзор литературы, приведенный в первой главе работы, представляется логичным и достаточно полным. Главы 2-5 являются результатами оригинальных исследований автора. Вторая глава посвящена методикам измерений ОДМР в Q - и W -диапазонах и описанию образцов структур с квантовыми ямами (КЯ) $(Cd_xMn_{1-x})Te/(Cd_yMg_{1-y})Te$, а также объемных монокристаллов ZnO и наноразмерных кристаллов этого полупроводника, легированных переходными ионами. Особо следует выделить описанную методику ОДМР W -диапазона в безрезонаторном исполнении, которая позволяет измерять спектры магнитного резонанса по интенсивности или поляризации люминесценции образцов относительно больших размеров, что существенно расширяет аналитические возможности этого метода. В главах 3-5 системно представлены результаты исследований анализируемых образцов методами фотолюминесценции, ОДМР и ЭПР в разных диапазонах СВЧ (включая рабочую частоту 94 ГГц) а также результаты измерения спектров послесвечения. В каждом разделе приведена обоснованная и ясная интерпретация экспериментальных результатов. Следует отметить, что все основные исследования, выполненные в работе, проведены на оригинальном оборудовании, разработанном и изготовленном в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН. Таким образом, прослеживается четкое понимание соискателем предмета и методов достижения цели исследований – от постановки задачи до заключительных выводов.

Новизна и достоверность результатов и выводов

В диссертации получен ряд новых научных результатов.

Во-первых, следует отметить разработанную безрезонаторную схему высокочастотного (94 ГГц) ОДМР–спектрометра для исследования низкоразмерных структур. В этой схеме за счет применения согласованной

рупорной антенны и концентратора поля обеспечены повышение чувствительности измерений и возможность регистрации спектров магнитного резонанса наноструктур на основе РМП с латеральным пространственным разрешением.

Во-вторых, приоритетными являются исследования ОДМР в наноструктурах $(Cd_xMn_{1-x})Te/(Cd_yMg_{1-y})Te$ с КЯ, содержащими двумерный дырочный газ в условиях оптической накачки квантами из области собственного поглощения полупроводника. Обнаружено образование в магнитных ямах обменно-связанных комплексов, включающих ионы марганца и локализованные носители заряда – дырки. Определены параметры таких комплексов.

В третьих, впервые изучено влияние эффектов пространственного ограничения на анизотропию спектров ОДМР в наноструктурах $(Cd_xMn_{1-x})Te/(Cd_yMg_{1-y})Te$ с несколькими магнитными КЯ различной ширины, разделенными широкими немагнитными барьерами. Обнаружен эффект накопления дырок в более узких ямах структуры вследствие направленного туннелирования электронов в сторону более широких ям.

Далее, при исследовании ОДМР в монокристаллах ZnO впервые зарегистрирован спектр ионов железа. Показано, что люминесценция ионов Fe^{3+} возбуждается за счет передачи энергии, отдаваемой в результате рекомбинации неравновесных носителей заряда через донорно-акцепторные пары в полупроводнике. В спектрах послесвечения кристаллов $ZnO:Fe$ обнаружено излучение ионов Fe^{3+} . Установлен механизм их возбуждения.

Достоверность полученных в работе результатов и сформулированных в заключении выводов подтверждается хорошим согласием экспериментальных данных с теоретическими оценками, результатами моделирования, с известными из литературы результатами, полученными на близких по свойствам системам, а также серьезной апробацией результатов работы на конференциях и опубликованием их в научной печати.

Научная и практическая значимость работы

Разработанная безрезонаторная схема регистрации ОДМР на частоте 94 ГГц позволила значительно повысить чувствительность измерений и расширить круг исследуемых объектов, снять существующие для этого частотного диапазона ограничения по размерам образцов и проводить измерения спектров магнитного резонанса низкоразмерных структур с латеральным пространственным разрешением.

Полученные результаты исследований КЯ $(Cd_xMn_{1-x})Te/(Cd_yMg_{1-y})Te$ значительно расширили представления об их спектроскопических свойствах и процессах, происходящих в исследуемых наноструктурах в условиях оптической накачки КЯ неравновесными электрон-дырочными парами.

Результаты исследований монокристаллов оксида цинка с примесными ионами железа, которые являются перспективным материалом для создания нового класса РМП, позволили установить связь между процессами спин-зависимой рекомбинации носителей заряда с участием глубоких Li -акцепторов и мелких доноров с внутрицентральной люминесценцией ионов железа.

Исследования наноструктур на основе твердых растворов магнитных полупроводников $Cd_xMn_{1-x}Te$ в области составов, сильно обогащенных кадмием и широкозонного полупроводника ZnO , содержащего магнитные примеси переходных элементов обладают несомненной научной значимостью благодаря новизне полученных результатов и изученных эффектов. Полученные в работе результаты будут весьма полезны при создании оптоэлектронных приборов нового поколения, а также при разработке приборов спиновой электроники и новых информационных сред для квантовых компьютеров.

По диссертационной работе следует сделать следующие замечания

1. В разделе 4.1 («ОДМР в структуре с тремя квантовыми ямами различной ширины») автор анализирует спектры низкотемпературной

фотолюминесценции и спектры ОДМР, зарегистрированные по люминесценции трех квантовых ям в исследуемой структуре. Образование обменно-связанных комплексов «локализованная дырка – ион Mn » в КЯ только со значениями ширины 4 нм и 6 нм объясняется эффектом накопления дырок в этих ямах за счет туннелирования электронов в направлении более широких КЯ. Интерпретация могла быть более ясной в рамках хотя бы одномерной модели энергетической диаграммы полупроводниковой структуры с учетом основных параметров слоев (состав, ширина запрещенной зоны, положение уровня Ферми), температуры и напряженности внешнего магнитного поля.

2. Обнаруженные в работе новые спектры ОДМР, приписанные обменно-связанным комплексам «локализованная дырка – ионы Mn », наблюдались в квантовых ямах состава $Cd_{0,98}Mn_{0,02}Te$, в которых создавался оптически индуцированный двумерный дырочный газ. Очевидно, что в квазиравновесных условиях концентрация комплексов должна зависеть от уровня мощности оптической накачки и, следовательно, концентрации неравновесных электронов и дырок. Однако в работе недостаточно проработан вопрос о концентрации дырок и не приводятся зависимости амплитуд спектров ОДМР от интенсивности оптического возбуждения.

3. В тексте диссертации, в целом хорошо оформленном, встречаются терминологические неточности. Например, часто используется термин «избыточные дырки» (хотя речь идет о генерируемых светом неравновесных носителях заряда, избыточных по своей природе). Ионы Mn в позициях замещения катионной подрешетки магнитного полупроводника $Cd_xMn_{1-x}Te$ в тексте называются примесными, тогда как эти ионы являются основными компонентами твердого раствора РМП. Встречаются и другие подобные неточности.

Приведенные замечания ни в коей мере не умаляют ценности проведенных исследований. Характеризуя работу в целом, можно отметить высокий научно - методический уровень ее выполнения. Поставленные в

диссертации задачи решены полностью. Автореферат и опубликованные статьи правильно и достаточно полно отражают содержание работы.

Таким образом, содержание диссертационной работы А. С. Гурина в полной мере соответствует специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния и требованиям ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности. Автор работы – А. С. Гури́н – заслуживает присвоения искомой степени.

Кандидат физико – математических наук,
доцент кафедры микро- и нанoeлектроники
ФГАОУВО «Санкт-Петербургский
государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова
(Ленина)»

Ильин Владимир
Алексеевич

29 декабря 2015 г.

ул. Профессора Попова, д.5, Санкт-Петербург, 197376
cmid@eltech.ru, тел.: +7 (812) 234 27 57

Подпись Ильина В.А. заверяю
Начальник отдела диссертационных
советов СПбГЭТУ (ЛЭТИ), к.э.н.

Русяева Т. Л.