

Отзыв

официального оппонента Тарасенко Сергея Анатольевича на диссертацию Козырева Николая Владимировича «Спиновая и энергетическая динамика носителей заряда и магнитных ионов марганца в квантовых ямах на основе разбавленного магнитного полупроводника (Cd,Mn)Te», представленную в диссертационный совет ФТИ 34.01.02 на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников

Диссертационная работа Н.В. Козырева посвящена экспериментальному изучению оптических и магнитооптических свойств структур с квантовыми ямами на основе разбавленного магнитного полупроводника (Cd,Mn)Te. Методами поляризованной фотолюминесценции, комбинационного рассеяния света и магнитооптического эффекта Керра выполнены исследования оптической ориентации и спиновой динамики экситонов, трионов, свободных носителей заряда и магнитных ионов, эффектов обменного взаимодействия электронов и дырок с электронами d оболочек магнитных атомов. **Актуальность** темы диссертации не вызывает сомнений, поскольку физика спиновых явлений в последние десятилетия является одним из основных направлений развития физики полупроводников. Гетероструктуры на основе разбавленных магнитных полупроводников, сочетающие полупроводниковые и магнитные свойства и демонстрирующие эффект гигантского зеемановского расщепления зонных состояний, представляют особый интерес. **Новизна** диссертационного исследования состоит в изучении взаимодействия экситонов и трионов с подсистемой магнитных атомов, резонансного комбинационного рассеяния света в условиях гигантского спинового расщепления.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения, списка публикаций автора по теме диссертации и списка литературы.

Во Введении обоснованы актуальность и научная новизна исследований, сформулированы цели работы и положения, выносимые на защиту, описаны практическая значимость работы, методология и используемые методы исследования, личный вклад автора.

Первая глава диссертации носит обзорный характер. Представлен краткий обзор современного состояния дел в области разбавленных магнитных полупроводников, дано представление о s - d и p - d обменном взаимодействии и гигантском зеемановском расщеплении зонных состояний, обусловленном

обменным взаимодействием. Описан магнитополяронный эффект, дан обзор оптических методов исследования полупроводниковых структур.

Во второй главе диссертации описаны экспериментальные методики, используемые в работе, дана характеристика исследуемых образцов.

Третья глава диссертации посвящена экспериментальному исследованию фотолюминесценции квантовых ям $(\text{Cd,Mn})\text{Te}/\text{CdMgTe}$ в области трионного и экситонного резонансов. Выполнены измерения и подробный анализ спектров фотолюминесценции и спектров возбуждения фотолюминесценции в продольном и поперечном магнитном поле (геометрии Фарадея и Фойгта), а также спектров комбинационного рассеяния света с переворотом спина. Анализ оптических спектров в поперечном магнитном поле выявил неустранимый сдвиг между энергией возбуждения и полосой фотолюминесценции, который интерпретирован в терминах формирования магнитного полярона. Выполнен анализ магнитополяронного сдвига полос экситонной и трионной фотолюминесценции. Предложен микроскопический механизм формирования магнитополяронного сдвига в квантовых ямах на основе разбавленных магнитных полупроводников в условиях возбуждения триплетных трионов.

Четвертая глава диссертации посвящена изучению комбинационного рассеяния света на продольных оптических фононах. Исследования выполнены в магнитном поле в геометрии Фарадея для различных поляризационных конфигураций возбуждающего и детектируемого света. Обнаружено усиление резонансного комбинационного рассеяния света, которое связано с возникновением двойных резонансов. Продемонстрировано, что подстройка спиновых уровней экситонов, сформированных тяжелыми и легкими дырками, в магнитном поле за счет эффекта гигантского спинового расщепления позволяет реализовать условие двойного резонанса.

В пятой главе диссертации представлены результаты исследования оптических спектров структуры, состоящей из близко расположенных немагнитной и магнитной квантовых ям, разделенных немагнитным барьером. Методами магнитооптического эффекта Керра с временным разрешением выполнены исследования спиновой динамики электронов в условиях импульсной оптической накачки. Обнаружен эффект близости, проявляющийся в виде перенормировки g -фактора электронов в немагнитной квантовой яме. Описана зависимость перенормировки от расстояния между немагнитной и магнитной ямами и от температуры.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы и положений, выносимых на защиту, обеспечивается проведением подробных экспериментальных исследований на современном оборудовании, воспроизводимостью результатов, тщательным критическим анализом полученных экспериментальных данных, качественным и количественным сопоставлением результатов с имеющимися литературными данными.

Полученные результаты являются **научно значимыми** и вносят вклад в развитие оптики полупроводниковых низкоразмерных систем. Несомненна также и **практическая значимость** работы: результаты могут быть использованы для определения и уточнения параметров разбавленных магнитных полупроводников, таких как константы обменного взаимодействия, профиль распределения магнитных примесей, а также при разработке магнитооптических приборов на основе магнитных полупроводников.

По диссертации имеются следующие замечания:

1. На рис. 3.7 представлена зависимость сдвигов полос экситонной и трионной фотолюминесценции от энергии возбуждения в поперечном магнитном поле, на основе которой сделан вывод о формировании магнитных поляронов. Было бы полезно привести для сравнения аналогичную зависимость для продольного магнитного поля.
2. Количественный анализ перенормировки электронного g -фактора в разделе 5.2 позволил определить туннельное проникновение электронов из немагнитной ямы в близко расположенную магнитную яму. Было бы полезно оценить реалистичность этих значений для известных зонных параметров и профиля гетероструктуры.
3. Имеются некоторые несогласованности и неточности в теоретических формулах. В частности, гамильтониан обменного взаимодействия в разбавленных магнитных полупроводниках [формулы (1.1) и (1.2)] отличается от обычно используемого в литературе знаком «-», см. например, книгу Spin Physics in Semiconductors, Ed. M.I. Dyakonov (Springer, 2008). В формуле (1.12) для среднего спина ионов марганца в магнитном поле пропущен знак «-».

Указанные выше замечания носят главным образом рекомендательный характер и не влияют на общую, положительную, оценку диссертации.

В целом, диссертационная работа Н.В. Козырева выполнена на высоком научном уровне и вносит вклад в развитие современной физики полупроводников. Результаты, составившие основу диссертации,

опубликованы в четырех статьях в рецензируемых научных изданиях, в том числе три статьи – в авторитетном международном журнале *Physical Review B*. Основное содержание и выводы диссертации адекватно и достаточно полно отражены в автореферате.

Считаю, что диссертационная работа Н.В. Козырева «Спиновая и энергетическая динамика носителей заряда и магнитных ионов марганца в квантовых ямах на основе разбавленного магнитного полупроводника (Cd,Mn)Te» полностью удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, и её автор – Козырев Николай Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

05 июня 2025

Тарасенко Сергей Анатольевич

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, зав. Сектором теории квантовых когерентных явлений в твердом теле Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26,
post@mail.ioffe.ru, <http://www.ioffe.ru>, тел.: (812) 297-2245

Контактные данные:

эл. почта: tarasenko@coherent.ioffe.ru

тел. 7(812) 292-7155

Подпись С.А. Тарасенко удостоверяю:

Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе

кандидат физ.-мат. наук

М.И. Патров