

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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 01.04.10 – физика конденсированного состояния.

Полупроводниковые кристаллы, легированные ионами переходных металлов, сочетают в себе свойства обычных и магнитных полупроводников. Период бурного исследования разбавленных магнитных полупроводников начался с публикаций по кристаллам CdTe, легированных ионами марганца. Именно в этих работах впервые сообщается о наблюдении гигантских спиновых расщеплений зонных состояний электронов и дырок. Основное качественное отличие между разбавленными магнитными полупроводниками и обычными полупроводниками состоит в существенности для первых сильного обменного взаимодействия между магнитными ионами и зонными носителями заряда, которое начинает проявляться при наложении внешнего магнитного поля. Важным преимуществом разбавленных магнитных полупроводников A_2B_6 является возможность независимо изменять концентрации носителей и магнитных примесных ионов, и тем самым управлять магнитными свойствами материала. Величина гигантского спинового расщепления определяется спиновой температурой ионов марганца, поэтому изменение спиновой поляризации этих ионов при электронном парамагнитном резонансе проявляется в сдвиге линии люминесценции и может использоваться для оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР). Высокая чувствительность и пространственная селективность ОДМР позволяет эффективно исследовать наноструктуры, которые представляют особый интерес благодаря возможности использования эффектов пространственного ограничения для изменения их характеристик. Несмотря на многочисленные исследования, внимание к изучению наноструктур (CdMn)Te, как к важному модельному объекту спинтроники, не ослабевает. В частности, актуальным представляется исследование особенностей обменных взаимодействий в квантовых ямах (CdMn)Te с двумерным дырочным газом, варьирование плотности которого может использоваться для управления магнитными свойствами квантовых ям.

Интерес к исследованию кристаллов и наноструктур ZnO обусловлен как уже имеющимися многочисленными применениями этого материала (сенсоры, прозрачное покрытие солнечных элементов, акустические устройства), так и перспективами его применения в оптоэлектронике и спинтронике. Рекордная энергии связи экситонов в ZnO и их высокая стабильность обещает обеспечить высокую эффективность УФ светодиодов. ZnO рассматривается также как перспективный материал спинтроники, обсуждается вопрос о возможности получения в нем ферромагнетизма при комнатной температуре. Большое время когерентности примесных ионов Fe^{3+} в ZnO позволило предложить их использование в качестве спиновых кубитов.

Таким образом, тема диссертации и цели работы, состоящие в исследовании методом ОДМР взаимодействия носителей и примесных магнитных ионов в наноструктурах $(CdMn)Te/(CdMg)Te$ и изучении спин-зависимых процессов в монокристаллах ZnO, содержащих примесные магнитные ионы, **являются актуальными** и затрагивают важные проблемы физики конденсированного состояния.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи, указана научная новизна, изложены выносимые на защиту положения, а также представлено краткое описание структуры диссертации.

Первая глава представляет собой обзор литературы. В ней рассматриваются основы метода ОДМР, а также его применение для изучения полупроводниковых структур с квантовыми ямами на основе разбавленных магнитных полупроводников, и исследования кристаллов оксида цинка.

Во второй главе дается описание исследуемых образцов и использованных экспериментальных установок. Предложен новый вариант безрезонаторного спектрометра ОДМР 94 ГГц, позволившего увеличить чувствительность.

Третья глава посвящена исследованию методом ОДМР квантовых ям $(CdMn)Te/(CdMg)Te$, в которых, благодаря захвату фотоиндуцированных электронов поверхностными состояниями, создается двумерный дырочный газ, а также аналогичных ям без двумерного дырочного газа.

В четвертой главе приведены результаты исследования наноструктуры, состоящей из трех квантовых ям $(CdMn)Te/(CdMg)Te$ различной ширины и показано, что в наиболее узких квантовых ямах создается избыточная концентрация дырок. Исследуется форма сигналов ОДМР и ее изменение при изменении микроволновой мощности.

Пятая глава посвящена ОДМР-исследованиям спин-зависимых процессов в кристаллических подложках ZnO, содержащих примесные ионы Fe^{3+} .

В заключении приведены основные результаты.

Новизна полученных результатов состоит в том, что в работе:

1. Квантовые ямы (CdMn)Te/(CdMg)Te, содержащие двумерный дырочный газ, впервые исследованы методом ОДМР. Обнаруженные особенности поведения сигналов ОДМР свидетельствуют об образовании в таких ямах обменно-связанных комплексов, в состав которых входит локализованная дырка и ионы марганца. Оценены параметры этих комплексов.
2. В наноструктурах с несколькими квантовыми ямами (CdMn)Te различной ширины, разделенными барьерами (CdMg)Te, обнаружены сигналы ОДМР обменно-связанных комплексов локализованная дырка - ионы марганца, что свидетельствует о создании в этих ямах избыточной концентрации дырок вследствие туннелирования электронов от наиболее узких к широким ямам. Показано, что существует распределение комплексов, состоящих из локализованной дырки и нескольких ионов марганца.
3. Впервые исследован ОДМР ионов железа в ZnO и установлен механизм возбуждения фотолюминесценция и послесвечения ионов Fe^{3+} за счет передачи энергии рекомбинации мелких доноров и глубоких акцепторов.

Достоверность результатов работы обусловлена применением современных методов исследования и анализа полученных результатов, а также воспроизводимостью результатов и их сравнением для различных образцов. Достоинством диссертационного исследования является то, что для решения поставленных задач в работе применяется современная высокоинформативная методика оптического детектирования магнитного резонанса. Надежность результатов обеспечивается использованием для регистрации спектров ОДМР двух частотных диапазонов, в том числе высокочастотного диапазона 94 ГГц, тщательным изучением ориентационных и спектральных зависимостей спектров ОДМР, их анализа с использованием специализированных компьютерных программ и корректной интерпретации.

Научная значимость работы заключается в том, что в ней получены новые данные о взаимодействии дырок и примесных магнитных ионов наноструктурах с квантовыми ямами (CdMg)Te, обнаружены обменно-связанные комплексы, образованные дырками и ионами марганца. Показано, что в наноструктурах с асимметричными множественными квантовыми ямами двумерный дырочный газ может создаваться в наиболее узких ямах. Такие структуры представляют альтернативу известным системам, в которых избыточная концентрация дырок при оптическом возбуждении создается из-за захвата электронов на поверхностных состояниях. Новым научным результатом является выяснение механизма возбуждения ионов железа в практически важных кристаллах оксида цинка.

Практическая значимость работы заключается в использовании безрезонаторной схемы микроволнового тракта высокочастотного (94 ГГц) спектрометра ОДМР, которая позволяет значительно повысить чувствительность измерений и расширить круг исследуемых объектов, а также может применяться для исследования ОДМР эпитаксиальных структур с пространственным разрешением и использоваться на более высоких частотах.

Результаты диссертации **могут быть использованы** в Институте общей физики РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Политехническом университете Петра Великого, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, Институте физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Институте физики твердого тела РАН, Казанском Физико-техническом институте им. Е.К. Завойского, Казанском федеральном университете и других научных институтах и центрах.

По содержанию работы и оформлению имеются следующие **замечания**.

1. В работе многократно приводятся спектры фотолюминесценции, однако не указывается, исправлялись ли они с учетом спектральной чувствительности регистрирующей аппаратуры.
2. Не обсуждается изменение ширины линии ОДМР, приписанной обменно-связанным комплексам, при изменении ориентации образца в магнитном поле.
3. Следовало бы рассмотреть предлагавшиеся ранее механизмы возбуждения люминесценции Fe^{3+} в полупроводниках A_2B_6 .
4. Имеется ряд неточностей и опечаток в тексте диссертации и в подписях к рисункам: отсутствует упоминание в тексте Рис 12, на Рис. 14 приведены не описанные в подписи кривые, имеются опечатки в подписях к рисункам 33, 34 и ряд опечаток в тексте.

Высказанные замечания не являются существенными и не влияют на общую положительную оценку работы. Она представляет собой выполненное на высоком уровне законченное научное исследование по актуальной тематике, основные результаты которого опубликованы в высокорейтинговых научных журналах из Перечня ВАК и представлены на ведущих конференциях по ее проблематике.

Диссертационная работа А.С. Гурина оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ. Автореферат достаточно полно отражает основные положения диссертации.

Считаю, что диссертация соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно п. 9 "Положения о порядке присуждения ученых

степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор Александр Сергеевич Гурин заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Дата 21.12.15

Доктор физико-математических наук,

Демихов Евгений Иванович

профессор

.....

учреждение ФГБУН Физический Институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук