



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, С.-Петербург, 195251
Телефон (812) 297-20-95, факс 552-60-80
E-mail: office@spbstu.ru

_____ № _____

на № _____ от _____

Г

Г

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

ФГАОУ ВО "СПбПУ"

_____ О.Н. Остапенко

_____ декабря 2015 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации — Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО "СПбПУ") 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.

Актуальность темы диссертации

Тема работы относится к изучению кристаллов и наноструктур на основе материалов, сочетающих в себе полупроводниковые и магнитные свойства (разбавленные магнитные полупроводники), методом оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР). Разбавленные магнитные полупроводники являются важным материалом, перспективным для применений в спинтронике, в основе которой лежит идея использования спина электрона для переноса, обработки и хранения информации, что приводит к ряду преимуществ по сравнению с современной микроэлектроникой. Получение новых знаний о процессах взаимодействия носителей и локализованных магнитных моментов примесных ионов переходных металлов в кристаллах и наноструктурах на основе полупроводников A_2B_6 с магнитными примесями, а также о спин-зависимых рекомбинационных процессах в таких системах, представляет большой интерес как для развития фундаментальных основ физики конденсированного состояния, так и для практического применения.

Выбранный автором диссертационной работы метод исследования – оптически детектируемый магнитный резонанс (ОДМР) зарекомендовал себя как эффективный инструмент для исследований в области физики твердого тела и физики полупроводников, позволяющий получить детальную информацию об электронной структуре дефектов и экситонов, а также о спин-зависимых рекомбинационных процессах. Высокая чувствительность, хорошее разрешение по энергии и пространственная селективность позволяют эффективно использовать метод ОДМР для изучения наноструктур.

Все вышесказанное указывает на то, что тема диссертационной работы является актуальной.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 106 страницах машинописного текста. Диссертация включает в себя 34 рисунка и список литературы из 84 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цели диссертационной работы, приведены положения, выносимые на защиту, а также информация об апробации работы и структуре диссертации.

В первой главе представлен обзор литературы, посвященной методу ОДМР, а также исследованиям низкоразмерных полупроводниковых структур с квантовыми ямами (CdMn)Te/(CdMg)Te и кристаллических подложек ZnO, содержащих примеси переходных металлов.

Вторая глава посвящена методике эксперимента. Дается описание исследованных образцов и экспериментальных установок. Особо следует отметить примененную автором оригинальную квазиоптическую схему высокочастотного ОДМР-спектрометра.

В третьей главе описаны результаты исследования структур (CdMn)Te/(CdMg)Te с одиночными квантовыми ямами, содержащими двумерный дырочный газ (2DHG). Обнаруженные в них новые спектры ОДМР сравниваются со спектрами, полученными в аналогичных квантовых ямах без дырочного газа, и обосновывается вывод об образовании в квантовых ямах с избыточной концентрацией дырок обменно-связанных комплексов, образованных дыркой, которая локализована на неоднородностях интерфейсов, и ионами марганца.

В четвертой главе приведены экспериментальные результаты по исследованию спектров ОДМР систем (CdMn)Te/(CdMg)Te с множественными квантовыми ямами различной ширины и показано, что в наиболее узких ямах структуры создается избыточная концентрация дырок. Этот вывод подтвержден спектрами ОДМР, зарегистрированными в двух частотных диапазонах (94 и 35 ГГц) для каждой квантовой ямы.

Пятая глава посвящена исследованиям ОДМР монокристаллических подложек ZnO, содержащих примесные ионы железа. Впервые зарегистрирован ОДМР Fe^{3+} в ZnO и убедительно показано, что люминесценция железа возбуждается за счет передачи энергии спин-зависимой рекомбинации мелких доноров и глубоких акцепторов Li_{Zn} .

В заключении приводятся основные результаты и выводы работы, которые представляются надежно обоснованными.

Новизна выполненных исследований и полученных результатов

Все основные результаты работы являются новыми. К наиболее значимым результатам, полученным в ходе проведенного Гуриным А.С. диссертационного исследования, следует отнести следующие:

- Применена новая схема высокочастотного (94 ГГц) ОДМР спектрометра для исследования низкоразмерных структур, обеспечивающая повышение чувствительности и развита методика регистрации ОДМР в квантовых ямах на основе магниторазбавленных полупроводников.
- Впервые исследован ОДМР в наноструктурах $(CdMn)Te/(CdMg)Te$ с квантовыми ямами, содержащими двумерный дырочный газ (2DHG) и показано, что в таких ямах создаются обменно-связанные комплексы, образованные ионами марганца и локализованными дырками, оценены их параметры.
- В структурах $(CdMn)Te/(CdMg)Te$ с множественными квантовыми ямами различной ширины методом ОДМР обнаружено создание избыточной концентрации дырок в наиболее узких квантовых ямах вследствие направленного туннелирования электронов в сторону более широких ям.
- В монокристаллах ZnO, содержащих примесь железа, впервые зарегистрирован ОДМР ионов железа и установлено, что люминесценция ионов Fe^{3+} возбуждается вследствие переноса энергии рекомбинации мелких доноров и глубоких акцепторов лития. Этот вывод подтвержден наблюдением излучения ионов Fe^{3+} в спектрах послесвечения кристаллов ZnO:Fe.

Достоверность полученных результатов

подтверждается использованием самых современных экспериментальных методов, применением при исследовании ОДМР различных высокочастотных диапазонов, использованием образцов, полученных из различных источников, анализом результатов исследований, проведенных в различных экспериментальных условиях и согласованностью с результатами, полученными с помощью других методов, а также их соответствием теоретическим расчетам, выполненным с помощью специальных компьютерных программ.

Научная и практическая значимость полученных в работе результатов

Полученные результаты исследования квантовых ям $(\text{CdMn})\text{Te}/(\text{CdMg})\text{Te}$ значительно расширили круг знаний об их спектроскопических свойствах и процессах, происходящих в этих наноструктурах при создании в них избыточной концентрации дырок. Особый интерес представляют обнаружение обменно-связанных комплексов, образованных локализованными дырками и ионами марганца, а также создания избыточной концентрации дырок в более узких квантовых ямах в структурах с множественными асимметричными квантовыми ямами в результате направленного туннелирования электронов.

Результаты исследований монокристаллов оксида цинка, содержащих примесь железа, позволили установить связь между процессами спин-зависимой рекомбинации глубоких акцепторов Li и мелких доноров и внутрицентральной люминесценцией ионов железа. Fe^{3+} в ZnO рассматриваются как перспективный кубит для квантовых компьютеров, а кристаллы ZnO являются перспективным материалом для микроэлектроники, оптоэлектроники и спинтроники.

Повышение рабочей частоты спектрометров магнитного резонанса является современной тенденцией радиоспектроскопии. Разработанная в диссертации новая безрезонаторная схема регистрации ОДМР на частоте 94 ГГц позволила значительно повысить чувствительность измерений и расширить круг исследуемых объектов. Такая схема может использоваться при исследовании ОДМР кристаллов и наноструктур на более высоких частотах.

Рекомендации по использованию

Полученные в работе результаты могут оказаться полезными и быть использованы в исследовательских организациях, ведущих фундаментальные исследования в области изучения полупроводниковых кристаллов и наноструктур на основе полупроводников A_2B_6 , среди которых можно выделить Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Политехнический университет Петра Великого, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Институт физики твердого тела РАН, Казанский Физико-технический институт им. Е.К. Завойского и др.

Все задачи, поставленные в диссертационной работе, успешно решены. Однако к ее содержанию и оформлению имеется ряд **критических замечаний:**

- 1) В литературном обзоре недостаточно отражены результаты более ранних исследований ОДМР кристаллов и квантовых ям (CdMn)Te.
- 2) Следовало бы более детально обосновать применение в работе двух частотных диапазонов и подробнее обсудить результаты исследования спектров, зарегистрированных на частотах – 35 и 94 ГГц.
- 3) Имеется также ряд замечаний к оформлению работы. Например, на стр. 48, в первом предложении последнего параграфа, содержится текст, относящийся к рисунку 17, который приводится намного позднее. В следующей фразе вместо ссылки на Рис. 12 дана ссылка на Рис. 17. В подписи к Рис. 14 отсутствует описание узких линий над экспериментальными спектрами.

Отмеченные недостатки не влияют на общую **положительную оценку работы**, которая выполнена на высоком научном уровне с использованием самых современных экспериментальных методов и необходимых теоретических расчетов и представляет собой законченное исследование, которое вносит существенный вклад в развитие физики конденсированного состояния и ОДМР спектроскопии полупроводниковых кристаллов и наноструктур на их основе.

Результаты диссертационного исследования отражены в 5 публикациях в ведущих научных журналах и многократно докладывались на всероссийских и международных научных конференциях.

Автореферат соответствует всем требованиям ВАК Минобрнауки РФ и полностью отражает содержание диссертации.

Рецензируемая работа «Исследование полупроводниковых кристаллов и наноструктур A_2B_6 с магнитными примесями методом оптически детектируемого магнитного резонанса» соответствует требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Гурин Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Отзыв составил:

Профессор кафедры экспериментальной физики ФГАОУ ВО "СПбПУ",

доктор физико-математических наук

Б.П. Попов

тел.: (812) 234-31-64.

Доклад А.С. Гурина, отражающий основные результаты диссертации, был заслушан на научном семинаре кафедры экспериментальной физики ФГАОУ ВО "СПбПУ", 9 декабря 2015 г. Работа получила положительную оценку участников семинара. Настоящий отзыв заслушан и одобрен на заседании кафедры экспериментальной физики ФГАОУ ВО "СПбПУ" 25 декабря 2015г. (Протокол № 4 от 25 декабря 2015 г.).

Заведующий кафедрой экспериментальной
физики ФГАОУ ВО "СПбПУ",
доктор физико-математических наук,
профессор,
тел.: (812) 552-7790

В.К. Иванов