



ОТЗЫВ

ведущей организации – ФГБОУ ВО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова на диссертационную работу Калитухо Инны Викторовны «Ферромагнитный эффект близости в гибридной структуре ферромагнетик – полупроводниковая квантовая яма», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния».

В настоящее время значительное внимание уделяется теоретическим и экспериментальным исследованиям спин зависимых явлений в низкоразмерных твердотельных структурах. Это обусловлено значительным влиянием спиновой степени свободы на оптические, электрические и магнитные свойства твердотельных структур. Исследование основ физики спин-зависимых явлений является важным и перспективным не только с фундаментальной, но и с прикладной точки зрения, поскольку спин частицы можно рассматривать в качестве физического носителя информации. Значительный интерес к исследованию фундаментальных особенностей спин-зависимых явлений в твердотельных наноструктурах обусловлен успешным опытом разработки твердотельных устройств на их основе, таких как записывающие и считающие элементы, а также спиновые переключатели. Среди наиболее интересных и активно изучаемых систем особо стоит отметить гибридные структуры ферромагнетик - полупроводник, которые могут быть применены для кодирования и записи информации. Такие системы являются перспективными, поскольку позволяют сохранить высокую подвижность носителей заряда в полупроводнике и добавить магнитные свойства ферромагнитной подсистемы, что должно позволить объединить полупроводниковую логику и магнитную память в одном устройстве.

Диссертационная работа И.В. Калитухо посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия спиновых систем ферромагнетика и полупроводника в гибридных структурах ферромагнетик – полупроводниковая квантовая яма. В работе определена природа

взаимодействия, его типы и параметры, а также предложен способ управления величиной взаимодействия. Диссертационная работа является актуальной как с фундаментальной точки зрения, так и с точки зрения возможности практического применения полученных результатов. Достоверность результатов обеспечена тщательно выполненным комплексным экспериментальным анализом особенностей взаимодействия ферромагнитной и полупроводниковой подсистем, качественным согласованием полученных результатов с известными экспериментальными данными, а также многократной апробацией результатов работы на научных семинарах, всероссийских и международных конференциях. Автором получен ряд новых и оригинальных результатов. К ним можно отнести следующее:

1. Экспериментальное обнаружение дальнодействующего эффекта близости в гибридной структуре Co/CdMgTe/CdTe с характерным масштабом 30 нм и установление его природы.
2. Экспериментальная демонстрация возможности управления эффективным обменным взаимодействием в гибридной структуре Co/CdMgTe/CdTe статическим электрическим полем.
3. Обнаружение сосуществования дальнодействующего и короткодействующего эффектов близости в гибридной структуре Fe/CdMgTe/CdTe и выявление природы обоих эффектов.

К достоинствам работы также следует отнести аккуратное и последовательное сравнение результатов экспериментов, полученных с применением различных экспериментальных методик.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 145 страниц, включая 70 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 70 наименований.

В введении сформулированы цель и основные задачи работы, обоснованы актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены структура и краткое содержание диссертационной работы, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведено описание экспериментальных методик, использованных в работе, представлены схемы экспериментальных установок, описаны особенности проведения экспериментальных измерений. Также в первой главе приведена информация об исследуемых образцах.

Во второй главе исследована гибридная структура Co/CdMgTe/CdTe и продемонстрировано существование ферромагнитного эффекта близости, связанного со

взаимодействием спиновой системы ферромагнетика и носителей в квантовой яме. На основе результатов, полученных методом поляризационной спектроскопии фотолюминесценции с временным разрешением обнаружено, что в ферромагнитном эффекте близости участвуют дырки, локализованные на акцепторах в квантовой яме. При исследовании зависимости ферромагнитного эффекта близости от толщины барьера показано, что амплитуда эффекта не изменяется до толщин барьера в 30 нм, что значительно превышает характерный масштаб перекрытия волновых функций. В результате анализа возможных механизмов эффекта близости сделано предположение об обменном взаимодействии между d-электронами ферромагнетика и дырками, локализованными на акцепторах в квантовой яме.

В третьей главе выполнено прямое измерение константы эффективного обменного взаимодействия в гибридной структуре Co/CdMgTe/CdTe методом неупругого рассеяния света с переворотом спина. Исследована зависимость обменной константы от температуры и толщины барьера между ферромагнетиком и квантовой ямой. Предложен механизм эффективного обменного взаимодействия, связанный с эллиптически поляризованными фононами, которые формируются в ферромагнетике, распространяются через барьер и вызывают расщепление пары уровней легких и тяжелых дырок, локализованных на акцепторах.

В четвертой главе продемонстрирована возможность электрического контроля обменного взаимодействия в гибридной структуре Co/CdMgTe/CdTe. Продемонстрировано изменение амплитуды ферромагнитного эффекта близости и константы обменного взаимодействия приложении к образцу поперечного напряжения. Показано уменьшение константы обменного взаимодействия от 140 мкэВ до 11 мкэВ с изменением напряжения смещения от 0 В до -3 В.

В пятой главе рассмотрена гибридная структура Fe/CdMgTe/CdTe. Показано существование двух типов ферромагнитного эффекта близости – дальнодействующего и короткодействующего. Короткодействующий эффект близости обусловлен обменным взаимодействием электронов в квантовой яме с d-электронами железа. Дальнодействующий эффект близости связан со взаимодействием дырок, локализованных на акцепторах в квантовой яме, с ферромагнетиком на границе Fe/CdMgTe. Исследована зависимость обоих эффектов от толщины барьера между ферромагнетиком и квантовой ямой.

В заключении диссертационной работы приведены основные результаты и выводы. В качестве замечаний по диссертационной работе И.В. Калитухо можно отметить следующее:

1. Представление обзора литературы в качестве введения к каждой отдельной главе является неудобным и мало информативным с точки зрения оценки масштабности и единства

результатов, полученных в диссертационной работе. Написание единого обзора литературы позволяет подвести к формулировке проблемы, решаемой в диссертационной работе, и явным образом демонстрирует логическое единство решаемых в работе задач.

2. Положение номер 4, выносимое на защиту, не следовало формулировать отдельно. Логично было бы его сократить и объединить с положением номер 3. В представленной формулировке положение номер 4 частично повторяет положения номер 2 и номер 3.

3. В третьей главе на рисунке 3.5а результаты приведены для толщины барьера 5 нм, а на рисунке 3.5.б – для толщины барьера 7.5 нм, при этом полученные результаты обсуждаются единым блоком. Следовало бы привести результаты измерений для одной и той же толщины барьера.

4. В третьей главе на рисунке 3.6 показана зависимость константы p - d обменного взаимодействия в зависимости от толщины барьера между квантовой ямой и ферромагнетиком. С увеличением толщины барьера константа значительно возрастает. Интуитивно можно ожидать уменьшение константы обменного взаимодействия или, по крайней мере, сохранения величины постоянной. В тексте работы не обсуждаются физические причины, приводящие к значительному росту константы обменного взаимодействия.

5. В четвертой главе обсуждается вопрос электрического контроля на ферромагнитный эффект близости. С точки зрения возможности применения исследуемых систем для записи информации представляется важным обсудить характерные времена отклика гибридных систем на изменение напряжения, приложенного к контактам.

6. В четвертой главе диссертации формула 4.1 приведена без вывода или ссылки на ранее опубликованную работу, в которой она была получена.

Представленные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы, являющуюся оригинальным и законченным научным исследованием. Полученные результаты являются актуальными, новыми и представляют значительный научный интерес. Актуальность, новизна, практическая значимость, достоверность полученных в работе результатов, а также личный вклад автора не вызывают сомнения. Основные результаты диссертационной работы неоднократно обсуждались на научных семинарах, докладывались на российских и международных конференциях, опубликованы в ведущих научных изданиях по тематике диссертационной работы, входящих в базы данных Scopus и Web of Science. Материал, изложенный в диссертационной работе, представлен понятно и логически последовательно. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Результаты диссертационной работы рекомендованы к использованию в фундаментальной и прикладной исследовательской работе научных и учебных учреждений, специализирующихся в областях оптики и магнитооптики конденсированного состояния, спиновых явлений в полупроводниках: на физическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ФИАН им. П.Н. Лебедева, ИТМО, СПбГУ, СПбПУ, ННГУ, а также в целом ряде исследовательских центров других странах. Результаты, представленные в четвертой главе, представляют интерес для разработки устройств записи и хранения информации, основанных на оптическом и электрическом считывании и переключении намагниченности.

Диссертационная работа была заслушана и подробно обсуждена на заседании кафедры физики полупроводников и криоэлектроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова 11 апреля 2022 года. На семинаре присутствовало 15 человек. Из них: д.ф.-м.н. – 5 человек, к.ф.-м.н. – 6 человек. На все вопросы, возникшие во время обсуждения, были получены ответы.

Диссертационная работа И.В. Калитухо «Ферромагнитный эффект близости в гибридной структуре ферромагнетик – полупроводниковая квантовая яма» соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния» согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ей искомой ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составили

Доцент кафедры физики полупроводников и криоэлектроники физического факультета ФГБОУ ВО МГУ имени М.В. Ломоносова,

доктор физико-математических наук

Владимир Николаевич Манцевич

Заведующий кафедрой физики полупроводников и криоэлектроники физического факультета ФГБОУ ВО МГУ имени М.В. Ломоносова, профессор

доктор физико-математических наук

Олег Васильевич Снигирев

Адрес: 119991, г. Москва, Ленинские горы д.1 корп. 2; тел. 8 (495) 939-50-72; e-mail:
oleg.snigirev@phys.msu.ru