

## ОТЗЫВ

официального оппонента Рожанского Игоря Владимировича 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»

Диссертационная работа И.В. Калитухо лежит в области физики спиновых явлений в твердом теле и посвящена взаимодействию спиновых систем ферромагнетика и полупроводниковой квантовой ямы, разделенных тонким немагнитным барьером в двух типах гибридных структур – с кобальтом и с железом в качестве ферромагнетика. Целью работы являлось экспериментальное исследование спиновых взаимодействий, причем применялся целый комплекс взаимодополняющих магнитооптических методов. Результаты диссертации соответствуют целям и задачам: демонстрируется несколько типов взаимодействия спиновых систем ферромагнетика и квантовой ямы, определены их характеристики, предложена модель взаимодействия, а также способ управлять его величиной.

Исследование спиновых явлений в полупроводниковых гетероструктурах пониженной размерности в настоящее время является одним из основных направлений развития современной физики конденсированного состояния. В этой области проводится значительное количество теоретических и экспериментальных исследований, направленных на решение фундаментальных задач физики спин-зависимых явлений, а в прикладном аспекте – на практическое использование спиновой степени свободы электронов в приборах наноэлектроники. Результаты, представленные в диссертации И.В. Калитухо относятся именно к этой области исследований, тем самым актуальность темы диссертационной работы, не вызывает сомнений. Выполненные в диссертации исследования являются важными как для фундаментальной науки, так и для возможных приборных применений.

Одной из ключевых задач в рамках физики спиновых явлений в полупроводниках является создание устройств записи, хранения и обработки информации, использующих не заряд, а спиновую степень свободы электрона в качестве носителя информации. В диссертационной работе И.В. Калитухо развивается один из подходов к решению такой задачи: сочетание ферромагнитного материала и полупроводника в одной гибридной гетероструктуре. При этом получены новые результаты, которые вносят вклад в понимание физических явлений в подобных системах, и, кроме того, экспериментально демонстрируют возможности управления электрическими, оптическими и магнитными свойствами таких гибридных наноструктур.

В работе И.В. Калитухо получены следующие новые и оригинальные научные результаты:

1. В структурах Co – квантовая яма CdTe экспериментально обнаружен дальнедействующий ферромагнитный эффект близости. Установлена природа такого взаимодействия – спиновая поляризация дырок, локализованных на акцепторах в квантовой яме. Измерена величина этого эффекта.
2. В структуре Co – квантовая яма CdTe продемонстрировано электрическое управление величиной взаимодействия между спиновыми системами ферромагнетика и квантовой ямы.
3. Разработана модель механизма дальнедействующего ферромагнитного эффекта близости за счет эллиптически поляризованных фононов, распространяющихся из ферромагнетика в полупроводник и взаимодействующих с дырками, локализованными в квантовой яме.
4. В структурах Fe – квантовая яма CdTe экспериментально обнаружены короткодействующий и дальнедействующий ферромагнитные эффекты близости. Установлен тип носителей заряда и ферромагнетик, участвующие в этих эффектах близости.

Достоверность результатов исследования обусловлена использованием комплекса зарекомендовавших себя экспериментальных методов исследования спиновой физики. Эксперименты проведены на современном высокоточном оборудовании. Несомненным и важным достоинством работы является последовательное согласование и взаимосвязь результатов

экспериментов, полученных с применением различных методик. Выводы диссертационной работы сопоставлены ранее известным теоретическим и экспериментальным фактам. Достоверность результатов подтверждается публикациями в рецензируемых научных журналах, апробацией работы на большом количестве всероссийских и международных конференций, многократное обсуждение на научных семинарах. Это подтверждает высокий научный уровень данной диссертации и новизну полученных результатов.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в их использовании для разработки устройств хранения и обработки информации, развитые научные подходы и полученные результаты представляют несомненную ценность для дальнейших исследований гетероструктур ферромагнетик – полупроводник.

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

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель, а также основные задачи работы, представлены экспериментальные методы исследования, обсуждается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертационной работы.

Первая глава содержит подробное описание экспериментальных методик, применяемых для исследования структуры ферромагнетик – полупроводниковая квантовая яма. Показаны схемы экспериментальных установок и объяснены принципы постановки эксперимента, а также обработки его результатов. Во второй части главы приведена информация об исследуемых образцах ферромагнетик – полупроводниковая квантовая яма: общая структура, параметры конкретных образцов и методы их изготовления.

Главы со второй по пятую являются оригинальными.

Во второй главе приведены исследования гибридной структуры кобальт – квантовая яма. Результаты измерения равновесной поляризации в продольном магнитном поле демонстрируют, что спиновые системы ферромагнетика и квантовой ямы взаимодействуют друг с другом. Показано, что это

взаимодействие, так называемый ферромагнитный эффект близости, осуществляется вплоть до толщины барьера между квантовой ямой и ферромагнетиком равной 30 нм. Такое расстояние существенно превышает масштаб перекрытия волновых функций носителей в квантовой яме с ферромагнетиком, измеренный по туннелированию носителей заряда из квантовой ямы в ферромагнетик. Методом поляризационной спектроскопии фотолюминесценции с временным разрешением обнаружено, что со слоем ферромагнетика взаимодействуют дырки, локализованные на мелких акцепторах в квантовой яме. В главе проанализированы различные механизмы ферромагнитного эффекта близости. На основе экспериментальных фактов сделано предположение о взаимодействии между d-электронами ферромагнетика и дырками, локализованными на акцепторах в квантовой яме. Также во второй главе обсуждается природа ферромагнетика, участвующего в эффекте близости, а именно наличие в структуре интерфейсного ферромагнетика на границе Co/CdMgTe.

Третья глава посвящена прямому измерению константы взаимодействия между ферромагнетиком и дырками, локализованными на акцепторах в квантовой яме. Для этого используется метод неупругого рассеяния света с переворотом спина. Дано описание механизма переворота спина. Показаны результаты эксперимента для различных температур и различных толщин барьера между ферромагнетиком и квантовой ямой. Приведены значения g-факторов дырки, локализованной на акцепторе, и электрона, константы обменного взаимодействия и эффективного магнитного поля, действующего на дырки со стороны ферромагнетика. Во второй части данной главы предлагается модель 'эффективного обменного взаимодействия' через эллиптически поляризованные фононы – фононный эффект Штарка.

В четвертой главе экспериментально продемонстрировано электрическое управление величиной эффекта близости и спиновой поляризацией дырок, локализованных в квантовой яме. Влияние электрического поля показано в различных экспериментах: для поляризационной спектроскопии фотолюминесценции в стационарном режиме и с временным разрешением и для неупругого рассеяния света с переворотом спина. Показано, что соответствующую константу взаимодействия в данной структуре можно изменять в диапазоне от 140 мкэВ до 11 мкэВ, используя электрическое поле

напряженность около  $10^4$  В/см. Также в главе дополнен механизм фононного эффекта Штарка. Так, показано, что приложенное к структуре электрическое поле меняет расщепление тяжелой и легкой дырок, что выводит их из резонанса с эллиптически поляризованными фононами, уменьшая константу взаимодействия.

Пятая глава посвящена исследованию гибридной структуры железо – квантовая яма. Продемонстрировано присутствие в данной структуре двух эффектов: дальнедействующего ферромагнитного эффекта близости аналогичного структуре с кобальтом из предыдущих глав и короткодействующего эффекта близости для электронов в квантовой яме вследствие s-d обменного взаимодействия, который детектируется по эффекту Ханле. Показано, что эти эффекты происходят от различных ферромагнетиков. Дальнедействующий – от интерфейсного ферромагнетика на границе Fe/CdMgTe, а короткодействующий – от железа.

В заключении приводятся основные результаты работы и список публикаций И.В. Калитухо.

В качестве замечаний по диссертационной работе И.В. Калитухо можно отметить:

1. В диссертации используется термин ‘эффективное p-d обменное взаимодействие’ для описания механизма дальнедействующего механизма эффекта близости. Обменное взаимодействие, как правило, предполагает различие в энергии состояний тождественных частиц. Рассматриваемый в диссертации дальнедействующий механизм предполагает взаимодействие различных частиц - электронов и фононов, это отражено в слове ‘эффективное’. Однако, в некоторых местах, в частности в названии глав 3 и 4 это слово отсутствует

2. На стр 70 в п.3.4 состояния легких дырок не принимаются во внимание, указано что они отщеплены по энергии вследствие размерного квантования, при этом величина расщепления и применимость этого приближения не обсуждаются. Непонятно, о каких дырках идет речь – свободных или локализованных на акцепторе. На стр. 80 указано что расщепление легкой и тяжелой дырки на акцепторе составляет 1 мэВ, а свободной дырки в

рассматриваемой квантовой яме 10 мэВ, то есть эти величины существенно различны.

3. При исследовании неупругого рассеяния света с переворотом спина (п.3.6., стр 81) установлено, что основной вклад в эффект близости вносит интерфейсный ферромагнетик, а кобальт не вносит вклада даже в случае, когда его намагниченность выведена из плоскости большим внешним магнитным полем. Возможные физические причины этого подробно не обсуждаются и остаются неясными.

4. В п.2.4 стр 43 указана характерная напряженность рассеянных полей ферромагнетика 15 мТл, непонятно получена ли эта величина экспериментально или является теоретической оценкой, а также о каком ферромагнетике речь – кобальте или интерфейсном. Известно, что величина рассеянных полей существенно зависит от ориентации намагниченности.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не ставят под сомнение значимость полученных в диссертации результатов.

В целом, диссертационная работа И.В. Калитухо выполнена на высоком научном уровне, является оригинальной и имеет важное научное и прикладное значение для спиновой физики. Полученные в работе результаты являются актуальными, новыми и достоверными. Диссертационная работа и автореферат оформлены аккуратно, материал изложен в логической последовательности. Предложены дальнейшие направления исследований. Результаты, составившие основу диссертации, многократно докладывались на российских и международных конференциях и опубликованы в авторитетных реферируемых научных журналах: Nature Physics, Physical Review B, Nature Communications и др.

Автореферат и опубликованные статьи правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа "Ферромагнитный эффект близости в гибридной структуре ферромагнетик – полупроводниковая квантовая яма" отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям 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 Калитухо Инна Викторовна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук (специальность 01.04.10 – физика полупроводников), старший научный сотрудник сектора «Теории оптических и электрических явлений в полупроводниках» Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН

\_\_\_\_\_ Рожанский Игорь Владимирович

Почтовый адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 26

Телефон: +7 812 292-73-69

Электронная почта: rozhansky@gmail.com