

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу
Крайнова Игоря Вадимовича
«Особенности обменного взаимодействия и релаксации спина в разбавленных
магнитных системах»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.10 — «физика полупроводников»

В настоящее время значительное внимание уделяется теоретическим и экспериментальным исследованиям особенностей спиновой релаксации в магнитных полупроводниковых материалах, являющихся перспективными кандидатами для контролируемого формирования спиновых состояний и управления ими в системах малых размеров.

Диссертационная работа И.В. Крайнова посвящена разработке методов теоретического анализа спиновой релаксации носителей заряда в магнитных полупроводниковых наноструктурах со спиновыми корреляциями между магнитными примесями и косвенным обменным взаимодействием. 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 аналитическим и численным анализом особенностей спиновой релаксации в исследуемых гетероструктурах малых размеров, подробным сопоставлением результатов расчетов с 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. Разработана теория спиновой релаксации электронов в квантовых ямах с магнитными примесями, учитывающая наличие спин-спиновых корреляций на примесных состояниях.

2. Разработана теория косвенного обменного взаимодействия для магнитных адатомов, расположенных на поверхности графена. Показано, что в отличие от модели РККИ тип взаимодействия не зависит от типа связи адатомов с подешетками графена. Полученные результаты позволяют говорить о наличии возможности управления магнитными свойствами исследуемой системы за счет изменения уровня Ферми.

3. Предложен теоретический подход, позволивший объяснить связь спин - зависимого резонансного рассеяния проводящих электронов на связанном состоянии внутри одиночной магнитной молекулы, взаимодействующей с углеродной нанотрубкой, и кулоновской блокады внутри углеродной нанотрубки. Показано, что знак и сила спин-спинового взаимодействия молекул могут быть изменены напряжением на затворе.

4. Выполнено уточнение теоретической модели, описывающей акцептор марганца в арсениде галлия, позволившее исследовать тонкую структуру уровней акцептора марганца в присутствии внешнего магнитного поля и одноосной деформации.

К достоинствам работы также следует отнести аккуратное и подробное сравнение результатов теоретического анализа, полученных автором на основе предложенных теоретических методов и подходов для описания спиновой релаксации носителей заряда в магнитных полупроводниковых системах, с данными экспериментальных исследований, выполненных как российскими, так и международными научными группами. Кроме того, результаты численного анализа сопоставлены с данными аналитических расчетов, проведенных для ряда предельных случаев.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 143 страницы, включая 37 рисунков и список литературы из 137 наименований.

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

В первой главе исследован вопрос спиновой релаксации в магнитных полупроводниках, предложен и разработан новый механизм спиновой релаксации электронов в магнитных квантовых ямах. Отличие предложенного механизма от использованных ранее подходов заключается в учете спиновых корреляций в магнитной подсистеме. В результате, скорость релаксации спина электрона начинает зависеть от его волнового вектора. Обнаружено, что учет косвенного обменного взаимодействия типа РККИ между спинами магнитных примесей приводит к появлению зависимости времени электронной спиновой релаксации от температуры и от концентрации примесных состояний, обуславливающих возникновение косвенного обмена. Показано, что основным источником спиновой релаксации 3d5 электронов марганца в ферромагнитном (Ga,Mn)As являются дырки. Обнаружены два основных механизма спиновой релаксации марганца, обусловленных наличием дырок. Показано, что сильное спин-орбитальное взаимодействие дырок обуславливает короткие времена спиновой релаксации, а обменное взаимодействие дырок с 3d5 электронами марганца приводит к его быстрой спиновой релаксации. Выполнено сравнение времен спиновой релаксации, полученных в рамках разработанной теоретической модели, с экспериментально измеренными временами спиновой релаксации. Продемонстрировано качественное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными.

Во второй главе разработана теория резонансного косвенного обменного взаимодействия магнитных центров в полупроводниковых гетероструктурах сверхмалых размеров. Обнаружено, что в случае существования локализованного состояния у магнитной примеси происходит существенное изменение косвенного обмена по сравнению с хорошо известной моделью РККИ. Выявлен резонансный режим, когда происходит значительное усиление взаимодействия магнитных примесей. Для гибридных структур полупроводниковая квантовая яма – магнитный дельта слой продемонстрировано, что на температуру Кюри влияют два фактора: наличие магнетизма внутри дельта слоя и наличие косвенного обменного взаимодействия через дырки в полупроводниковой квантовой яме. Показано, что вклад, связанный с косвенным обменным взаимодействием, имеет немонотонную зависимость от глубины квантовой ямы. Во второй главе также предложена теория косвенного обменного взаимодействия для магнитных адатомов, локализованных на поверхности графена. Продemonстрировано, что в отличие от модели РККИ тип взаимодействия является одним и тем же независимо от типа связи адатомов с подрешетками графена.

В третьей главе предложена теоретическая модель, позволившая объяснить наличие эффектов гигантского магнитосопротивления и кулоновской блокады в системах углеродных нанотрубок с присоединенными магнитными молекулами. На основе предложенной теоретической модели гигантского магнитосопротивления предсказана дальнодействующая природа взаимодействия между магнитными молекулами, обусловленная кулоновским взаимодействием электронов в нанотрубках и резонансным спин-спиновым рассеянием на магнитных молекулах. Показано, что спин-спиновое взаимодействие магнитных молекул, находящихся на поверхности углеродной нанотрубки, зависит от взаимного расположения молекул и от величины напряжения, приложенного к затвору. В третьей главе также продемонстрирована возможность формирования управляемого спинового клапана в системе углеродная нанотрубка – магнитная молекула для случая антиферромагнитного упорядочения спинов магнитных молекул.

В четвертой главе исследован вопрос о тонкой структуре уровней одиночного акцептора марганца в объемном полупроводнике GaAs в присутствии внешнего магнитного поля и одноосной деформации. Проведено сравнение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными, которое дало возможность определить величину случайных локальных полей, действующих на акцептор марганца. Также была обнаружена зависимость константы обменного взаимодействия дырки и электронов 3d оболочки марганца от величины внешней деформации.

В заключении диссертационной работы приведены основные результаты и выводы.

В качестве замечаний по диссертационной работе И.В. Крайнова можно отметить следующее:

1. Во второй главе при исследовании вопроса о косвенном обменном взаимодействии двух магнитных примесей в системе квантовая яма – магнитный слой рассмотрен случай, когда магнитные примеси находятся на одинаковом расстоянии от квантовой ямы, что означает одинаковые константы туннельной связи. Представляется важным обсудить как изменятся результаты в случае несимметричного расположения магнитных примесей, то есть различных констант туннельной связи каждой из примесей с квантовой ямой. Кроме того, в рассматриваемой модели не учтено наличие кулоновских корреляций на каждой из магнитных примесей. Каким образом наличие кулоновских корреляций на каждой из магнитных примесей повлияет на полученные в работе результаты?

3. Во второй главе, в части посвященной резонансному косвенному обменному взаимодействию магнитных атомов на поверхности графена, приведены различные результаты для знака косвенного обменного взаимодействия в зависимости от положения уровня локализованного состояния относительно точки Дирака. Например, на рис. 2.7 на левой панели показана энергия взаимодействия, рассчитанная при энергии локализованного состояния -100 мэВ, а уровень Ферми равен нулю и взаимодействие антиферромагнитное, тогда как на правой панели энергия локализованного состояния 100 мэВ, а уровень Ферми равен 110 мэВ и взаимодействие ферромагнитное. Как изменятся результаты в случае энергии локализованного состояния равной 100 мэВ, а энергии Ферми -110 мэВ?

5. В третьей главе, посвященной исследованию вопроса об электронном транспорте в системе углеродной нанотрубки с магнитными молекулами, автором предполагается сильный сбой фазы носителей в канале, обоснованный экспериментальными данными. Насколько изменятся результаты в случае когерентного (баллистического) транспорта?

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, личный вклад автора и достоверность полученных в работе результатов не вызывают сомнения. Основные результаты диссертационной работы неоднократно обсуждались на научных семинарах, докладывались на российских и международных конференциях, опубликованы в статьях в научных изданиях, входящих в список, рекомендованный ВАК РФ. Материал,

изложенный в диссертационной работе, представлен понятно и логически последовательно. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа И.В. Крайнова «Особенности обменного взаимодействия и релаксации спина в разбавленных магнитных системах» соответствует всем требованиям, предъявляемым Положением ВАК РФ к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников».

Официальный оппонент

Ведущий научный сотрудник физического факультета
ФГБОУ ВО МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук

Владимир Николаевич Манцевич

Подпись В.Н. Манцевича удостоверяю

Декан физического факультета МГУ имени
профессор,
доктор физико-математических наук

Н.Н. Сысоев

Адрес официального оппонента:

119991 Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1, корп. 2

Тел.: 8 (495) 939-50-72

эл. почта: vmantsev@gmail.com