

ВРИО директора Федерального государственного
Бюджетного учреждения науки Федеральный
исследовательский центр «Казанский научный
центр Российской академии наук»

_____ академик РАН Синяпин О.Г.

«14» 09 2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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.

Исследование свойств материалов, обусловленных с одновременным проявлением движения заряда и динамикой спина (магнитного момента) электронов, приобрело в настоящее время большое значение в связи разработкой спиновых технологий, в частности, спинтроники. Эти исследования актуальны вообще, и особенно они актуальны для магнитных полупроводников, легированных магнитными примесями, так как есть хорошо развитая технология и производство полупроводниковой микроэлектроники.

Диссертация Крайнова И.В. посвящена изучению механизмов формирования ферромагнитного порядка в разбавленных магнитных полупроводниковых наноструктурах с делокализованными носителями благодаря косвенному обменно-взаимодействию и разработке методов контроля, управления состоянием электронных спинов в наноразмерных системах. Решение этих проблем имеет большое значение для развития спиновой физики и спиновых технологий.

Диссертант выполнил свою работу в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН, который является одним из признанных мировых центров и в области полупроводниковой науки, и в спинтронике. Поэтому естественно, что в данной диссертации были поставлены и решены действительно актуальные вопросы. Диссертант оказался на высоте обстоятельств, в которых он выполнял свою работу, и он внес достойный личный вклад в получение результатов, изложенных в диссертации. Им получены совершенно новые результаты.

В первой главе диссертации обсуждается скорость парамагнитной релаксации в квантовых ямах в присутствии парамагнитных примесей марганца. Рассматривается нулевое внешнее магнитное поле. Считается, что спиновая релаксация происходит благодаря флуктуациям магнитного поля в месте нахождения электрона. Новым в этой работе является учет флуктуаций этого поля, вызванных косвенным обменным

взаимодействием между марганцами. В рамках временной теории возмущений во втором приближении по взаимодействию электронного спина с “обменным” магнитным полем оценено уменьшение времени корреляции флуктуирующего магнитного поля за счет взаимодействия между марганцами. С помощью полученных теоретических формул удалось объяснить экспериментальные данные по релаксации электронных спинов в квантовых ямах.

Обычно в магнитно-разбавленных твердых телах диполь-дипольное спин-спиновое взаимодействие вносит вклад в спиновую релаксацию. Надо бы диссертанту прокомментировать, почему он не рассматривает вклад этого механизма релаксации.

Диссертант в первой главе при обсуждении корреляции в движении магнитных моментов марганца, обусловленной косвенным обменным взаимодействием между марганцами, в спин-гамильтониане (1.15) пренебрегает секулярной частью спин-гамильтониана, оставляет только несекулярную часть, которая вызывает взаимные перевороты спинов марганца. Но ведь секулярная часть гамильтониана сдвигает уровни энергии и в итоге влияет на эффективность взаимных переворотов спинов, вызванных несекулярной частью. Следовало бы более подробно прокомментировать приближение, принятое в диссертации.

Диссертант исследовал спиновую релаксацию центров марганца за счет их обменного взаимодействия с быстро релаксирующими дырками, а также рассчитал сдвиг g -эффективного фактора $3d^5$ ионов марганца, вызванный магнитным полем дырок. В этой части работы диссертант рассматривает две магнитные подсистемы: одна состоит из электронов внутренней оболочки марганца, а другая подсистема-это дырки. Взаимное влияние двух подсистем рассматривается в приближении среднего поля.

В связи с этим возникает вопрос, почему магнитная подсистема дырок не учитывалась выше в теории спиновой релаксации подвижных электронов в квантовой яме.

Во второй главе диссертации обсуждается косвенное обменное взаимодействие между парамагнитными ионами через взаимодействие каждого из ионов с делокализованными носителями тока в квантовой яме. Новое в этой работе состоит в том, что предполагается наличие у примеси локализованного состояния, энергия которого лежит внутри континуума энергии делокализованных носителей тока в квантовой яме. В этой ситуации стандартная теория приводит к расходимостям. Но диссертанту удалось найти способ оценить величину косвенного обменного взаимодействия. Это очень хорошо.

Некоторый дискомфорт вызывает только то, что на протяжении главы 1 диссертант наделяет фактически одну и ту же систему разными свойствами. Выше это уже отмечалось в связи с намагниченностью дырок в квантовой яме. В предыдущих задачах были внутренние электроны марганца и подвижные носители тока. Сейчас на примеси появились еще локализованные состояния.

Достижением диссертанта является проведенный им расчет косвенного обменного взаимодействия между магнитными атомами в графене при посредничестве делокализованных носителей тока в графене. Расчет проводится на основе того, что есть обменное взаимодействие между электронами внутренней оболочки адатома и локализованного на адатоме электрона, с одной стороны, и что есть туннелирование между состояниями локализованных электронов адатомов и состояниями непрерывного спектра графена. Учитывая большой интерес к свойствам графенов, оценка величины косвенного обменного взаимодействия между примесными центрами (адатомами) на графене является актуальным делом. В результате, диссертант получил весьма интересные результаты о типе взаимодействия (ферромагнитный или антиферромагнитный) в зависимости от того, как соотносится уровень локализованного электрона с уровнями энергии зоны проводимости или валентной зоны в графене.

В третьей главе диссертант обсуждает важную проблему влияния магнитных молекул на электропроводность в углеродных нанотрубках, в частности, эффект гигантского магнитосопротивления и кулоновской блокады. Один из выводов диссертационной работы состоит в том, что спин-спиновое взаимодействие (синглет-триплетное расщепление) магнитных молекул, присоединенных к углеродной нанотрубке, зависит от приложенного на затворе напряжения. На первый взгляд это может показаться странным, так как приложенное электрическое поле меняет энергию заряда и, казалось бы, причем здесь спин-спиновое взаимодействие. Но этот результат диссертанта вполне коррелирует с результатами квантовой теории молекул, для которых также синглет-триплетное расщепление зависит не только от двух электронных интегралов, но и от одноэлектронных интегралов (энергии одноэлектронных орбиталей).

В четвертой главе обсуждается в объемном образце GaAs влияние деформации и внешнего магнитного поля на тонкую структуру уровней энергии одиночного марганца. Влияние деформации приписывается изменению обменного взаимодействия между дыркой и электронами иона марганца.

Таким образом, в этой диссертационной работе решен ряд актуальных задач, которые позволяют описать спиновую динамику электронов в квантовых ямах с учетом их взаимодействия с магнитными примесями и способствуют пониманию природы магнитного упорядочения разбавленных магнитных полупроводников. Полученные теоретические результаты, теоретические оценки создают основы для развития спинтроники.

Диссертант освоил теоретические методы, необходимые для решения поставленных задач, с успехом применил их в своей работе. Теоретические оценки и полученные зависимости наблюдаемых параметров диссертант сравнивает с имеющимися экспериментальными данными, полученные им теоретические результаты оказываются весьма полезными для интерпретации экспериментальных данных.

Диссертант выступал в нашем институте и оставил очень хорошее впечатление.

В ходе чтения диссертации возникли некоторые вопросы, которые уже были приведены выше в тексте. В дополнение приходится высказать упрек автору диссертации за состояние текста диссертации. Такое впечатление, что никто ни разу не вычитывал текст. В ряде случаев формулы надо разгадывать как кроссворд. Для примера, можно отметить ур. (4.3, 4.4).

Оценивая диссертацию Крайнова И.В. как квалификационную работу, следует признать, что диссертант получил хорошие научные результаты, они будут способствовать развитию физики магнитных полупроводников, спинтроники, проявил себя весьма эрудированным исследователем.

Полученные результаты могут быть использованы в научных и прикладных исследованиях, проводимых в Казанском физико-техническом институте РАН, Нижегородском Государственном университете, Институте физики полупроводников СО РАН, Физическом Институте им. Лебедева РАН, Институте физических проблем РАН, Институте физики металлов УроРАН, Казанском федеральном университете.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, защищаемые положения и выводы.

Диссертация Крайнова И.В. соответствует всем критериям (п.9-п.14) Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, и требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Крайнов Игорь Вадимович, несомненно, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10— физика полупроводников.

Диссертация была заслушана и обсуждена 29 июня 2018 года на научном семинаре отдела химической физики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского - обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (КФТИ им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН) (Протокол № 12). Отзыв обсуждался и утвержден на открытом заседании Ученого совета КФТИ им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН 05 сентября 2018 года (протокол № 22). На заседании присутствовало 32 специалиста, среди них 15 докторов наук, 17 кандидатов наук, аспиранты, студенты.

Текст отзыва составил:

Научный руководитель ФИЦ КазНЦ РАН по направлению «Физика»

Д.-ф.м.н., профессор

Салихов Кев Минуллинович

Тел.: +7 (843) 2319102,

E-mail: salikhov@kfti.knc.ru