

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации Крайнова Игоря Вадимовича “Особенности обменного взаимодействия и релаксации спина в разбавленных магнитных системах”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников.

Актуальность

Диссертационная работа И.В. Крайнова посвящена теоретическому исследованию эффектов обменного взаимодействия в широком наборе разнообразных полупроводниковых наноструктур с магнитными примесями. Она включает в себя процессы спиновой релаксации в квантовых ямах на основе разбавленных магнитных полупроводников, магнитные свойства графена с адсорбированными магнитными примесями, транспортные свойства углеродных нанотрубок с магнитными молекулами, электронную структуру магнитных примесей. Указанные структуры представляют значительный интерес в связи с тем, что в последние годы экспериментально в них обнаружено множество новых необычных эффектов, с которыми связываются определенные перспективы использования в системах спинтроники, но их природа пока не выяснена. Фундаментальная научная значимость изучаемых эффектов определяется важной ролью, которую в их возникновении играет обменное взаимодействие.

Диссертация направлена на изучение специфических особенностей обменного взаимодействия в таких наноструктурах и их проявлений в процессах спиновой релаксации, механизмах формирования магнитных фаз и электронном транспорте. Наиболее яркая особенность обменного взаимодействия, обнаруженная диссертантом и проявляющаяся во многих ситуациях, возникает благодаря наличию локализованного на магнитной примеси электронного состояния, связанного с континуумом состояний свободных электронов. Актуальность проведенных исследований связана с тем, что обменное взаимодействие является ключевым фактором, определяющим механизмы образования спиновых структур и управления ими. Решение затронутых в диссертации проблем открывает новые возможности в этом направлении.

Научная новизна и достоверность

В диссертационной работе решен широкий круг задач, касающихся неравновесных спиновых процессов в квантовых ямах на основе полупроводников с магнитными примесями, косвенного обменного взаимодействия магнитных примесей в полупроводниковых квантовых ямах и в графене, электронного транспорта в углеродных нанотрубках с одиночными магнитными молекулами и тонкой структуры марганца в GaAs. Все решенные в диссертации задачи самым тесным образом связаны с конкретными экспериментами и в большинстве случаев дают убедительное объяснение недавно обнаруженным необычным экспериментальным фактам, а также предсказывают новые эффекты.

Диссертация И.В. Крайнова состоит из введения, в котором дается краткое описание диссертации, четырех глав, каждая из которых содержит обзор литературы по соответствующей тематике и обоснование ее актуальности, детальное (иногда даже, пожалуй, слишком детальное) описание экспериментальных исследований, которые мотивировали диссертанта, и представление полученных им оригинальных результатов. В заключении приведены основные результаты. Приведенная библиография свидетельствует о хорошем знании диссертантом литературы по тематике его исследований.

Первая глава диссертации посвящена процессам спиновой релаксации в разбавленных магнитных полупроводниках. Здесь решены две задачи. Первая направлена на объяснение необычных зависимостей темпа спиновой релаксации от температуры и от

плотности носителей заряда, обнаруженных недавно экспериментально и, на первый взгляд, даже противоречащих имеющимся представлениям. В диссертации предложен новый механизм спиновой релаксации, связанный с корреляциями спинов магнитных примесей и флуктуациями спиновой плотности, который качественно объясняет эксперименты. Это интересный результат, значение которого не ограничивается рамками рассмотренной системы. Вторая задача посвящена релаксации спина марганца в GaAs и объяснению зависимости его g -фактора от температуры. В диссертации показано, что имеются два механизма спиновой релаксации, связанные с наличием свободных дырок, которые по-разному проявляются в парамагнитной и ферромагнитной фазах. Выяснение этих механизмов позволило диссертанту объяснить имеющиеся эксперименты.

Вторая глава посвящена резонансному косвенному обменному взаимодействию магнитных примесей. Ключевым моментом в модели, развитой диссертантом, в обоих случаях является наличие электронного состояния, локализованного на магнитной примеси и связанного с континуумом делокализованных состояний. Благодаря такому состоянию, как показано, происходит значительное усиление косвенного обменного взаимодействия. Физическая природа этого эффекта совершенно ясна и можно только удивляться, что он не был изучен ранее. В диссертации эффект резонансного косвенного обменного взаимодействия исследован детально для наноструктур двух типов: для полупроводниковой квантовой ямы с расположенным вблизи нее δ -слоем магнитных примесей и для графена с магнитными адатомами. В первом случае разработана теория обменного взаимодействия двух примесей, на основе которой сделана оценка температуры Кюри в гетероструктурах GaAs с δ -слоем Mn, расположенном вблизи квантовой ямы InGaAs. В результате дано объяснение зависимости температуры Кюри от глубины квантовой ямы, наблюдаемой экспериментально. Очень интересные результаты получены в случае косвенного обменного взаимодействия магнитных адатомов на поверхности графена. Показано, что наличие резонансных состояний приводит к специфической зависимости знака косвенного обменного взаимодействия от положения уровней локализованных состояний относительно точки Дирака и расстояния между примесями.

В третьей главе представлены результаты, на мой взгляд, самого интересного исследования в диссертации. В ней разработана модель, объясняющая гигантское магнитосопротивление, наблюдаемое в экспериментах на углеродных нанотрубках с присоединенными к ним одиночными магнитными молекулами. Ключевую роль в этой модели помимо магнитного момента молекул играют электронные состояния, локализованные в лигандах этих молекул и связанные туннельным образом с делокализованными состояниями в углеродной нанотрубке. Показано, что из-за наличия присоединенных молекул трубка разбивается на одномерные квантовые точки, барьеры между которыми зависят от спина. Транспорт электронов в такой системе в значительной мере определяется кулоновской блокадой, также зависящей от спина. Возникает очень интересная ситуация, в которой реализуется эффект спинового клапана, управляемого не только магнитным полем, но и электростатическим потенциалом. При этом возникает эффективно дальнотянущее спин-спиновое взаимодействие магнитных молекул, зависящее от потенциала затвора и расположения молекул.

В четвертой главе развита модель тонкой структуры одиночного акцептора марганца в объемном GaAs при наличии одноосной деформации и внешнего магнитного поля, которая применена для анализа спектров комбинационного рассеяния света, связанных с электронными переходами между основным состоянием с моментом, равным 1, и первым возбужденным состоянием с моментом, равным 2. В результате сделана оценка величины случайных локальных полей деформации, величины константы обменного взаимодействия и установлена ее зависимость от деформации.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнения, так как в аналитических расчетах автор пользуется проверенными методами теоретической физики, проведенные

расчеты доводятся до числа и результаты с разумной точностью соответствуют экспериментам.

Научная и практическая значимость работы также несомненна.

Среди основных и наиболее значимых научных результатов, которые могут быть использованы научным сообществом при дальнейших исследованиях спиновых и спин-зависимых явлений в низкоразмерных структурах, в первую очередь необходимо отметить

- предложение нового механизма спиновой релаксации, связанного со спиновыми корреляциями магнитных примесей,
- выяснение роли дырок в процессах спиновой релаксации марганца в GaAs,
- установление механизма косвенного обменного взаимодействия магнитных атомов на графене,
- предложение оригинального механизма гигантского магнетосопротивления в углеродных нанотрубках с присоединенными к ним магнитными молекулами.

Полученные результаты могут быть использованы и для создания и совершенствования устройств спинтроники, а также систем хранения и обработки информации.

Замечания

При изучении диссертации у меня возник ряд вопросов и небольших замечаний.

1. Ни сколько не умаляя значимости результата, полученного в разделе 1.2, относительно влияния спин-спиновых корреляций магнитных центров на релаксацию спина электронов в полупроводниковых квантовых ямах, замечу, что как видно из рис. 1.3 (правая панель), результаты теоретических расчетов довольно сильно расходятся с экспериментом. Было бы уместно обсудить на качественном уровне причины такого расхождения и/или другие возможные причины такой необычной температурной зависимости времени релаксации.

2. Не вполне ясна процедура решения нелинейных уравнений (1.35)-(1.36), описывающих динамику спина в разделе 1.3., а именно, используется ли регулярная математическая процедура или делаются модельные допущения при разделении величин $M(t)$ и $\delta M(x,t)$. Этот материал воспринимался бы лучше, если бы было приведено более убедительное, а возможно просто более четкое, обоснование процедуры решения.

3. Во второй главе было бы уместно обсудить роль заряда электронов, локализованных на примеси и электрон-электронного взаимодействия, тем более что в четвертой главе при рассмотрении углеродных нанотрубок такое кулоновское взаимодействие оказывается существенным.

4. При изложении теории электронного транспорта в углеродных нанотрубках в главе 4 не вполне ясно, каким образом моделировались высокопроводящие электронные резервуары, которые служат контактами к нанотрубке.

5. Не могу не сделать замечания о многочисленных небрежностях в изложении и большом количестве грамматических ошибок. Неприятнее всего встречать неадекватные ссылки на формулы. Например, во второй главе на стр 61-62 диссертант неоднократно предлагает обратиться к гамильтониану (4.3), относящемуся к другой задаче из главы 4; имеются неоднократные ссылки на несуществующие формулы (2.3.1) и (2.3.3), и т.д.

Сделанные замечания не изменяют общей высокой оценки представленной диссертации, которая является законченной научной работой, выполненной на высоком профессиональном уровне, и содержит решение большого количества актуальных задач об эффектах, обусловленных обменным взаимодействием в низкоразмерных структурах с магнитными примесями.

Материалы диссертации опубликованы в ведущих высокорейтинговых зарубежных журналах (Phys. Rev. B, ACS Nano, Applied Phys. Lett.) и докладывались автором на российских и международных научных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа И.В. Крайнова является законченным исследованием и содержит принципиально новые важные результаты, имеющие как фундаментальное, так и прикладное значение. Диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. И.В. Крайнов безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 — физика полупроводников.

Сабликов Владимир Алексеевич,
доктор физико-математических наук,
специальность 01.04.10 — физика полупроводников,
главный научный сотрудник лаборатории теоретических проблем микроэлектроники,
Фрязинского филиала ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А.
Котельникова РАН,
площадь им. академика Б.А. Введенского, д. 1, Московская область, Фрязино, 141190,
e-mail: sablikov@gmail.com

23 августа 2018 г.

Подпись В.А. Сабликова удостоверяю
Ученый секретарь ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
д.ф.-м.н.

Г.В. Чучева