

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Рожанского Игоря Владимировича «Резонансно-туннельные спиновые эффекты в полупроводниковых гетероструктурах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Диссертационная работа Рожанского И.В. посвящена теоретическому исследованию спин-зависящих эффектов при резонансном туннелировании в различных гетероструктурах.. Тема работа актуальна по целому ряду причин, имеющих как научное, так и прикладное значение. Исследование квантово-размерных эффектов при наличии спиновой поляризации в полупроводниковых гетероструктурах и гибридных наноструктурах является одним из самых современных направлений физики полупроводников и физики магнитных явлений. В первую очередь это определяется тем, что “металлическая“ спинтроника практически исчерпала бурный рост, и надежды на новые прорывные технологии, связанные с бездиссипационными спиновыми токами, оптическим или электрическим управлением магнитной записью, фотомагнетизмом, магнотронными логическими устройствами, как раз связываются с полупроводниковыми гетероструктурами. Резонансно-туннельные спиновые эффекты в гетероструктурах изучены были крайне недостаточно, а появившиеся экспериментальные данные не находили объяснение. Например, совершенно неожиданным и непонятным казалось возникновение достаточно высокой температуры Кюри в системе, когда монослой магнитной примеси, находился далеко от квантовой ямы. Новые задачи возникли и при поиске магнетизма графена. Из вышесказанного следует, что тема диссертации Рожанского И.В. актуальна, а появление работ, на которых основана его диссертация, было весьма важным и своевременным.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, включающего 183 наименований. Общий объем диссертационной работы составляет 218 страниц, в том числе 57 рисунков и 4 таблицы.

Первая глава носит методический характер, в которой описаны методы и подходы, используемые в диссертации. В ней рассматривается явление резонансного туннелирования, методы его описания, туннельный гамильтониан Бардина, модель Фано-Андерсона, и обсуждается применение задачи рассеяния для определения энергии взаимодействия. Вторая глава целиком посвящена туннелированию между двумерными слоями при наличии спин-орбитального взаимодействия Рашбы и Дрессельхауза. В третьей

главе на основе модели Фано-Андесона рассматривается влияние резонансно-туннельной гибридизации на оптические свойства гетероструктур с магнитными примесями. В четвертой главе рассматривается спин-зависимая туннельная рекомбинация в гетероструктурах. В пятой главе приводится детальный расчет и анализ предложенного автором нового типа обменного взаимодействия, а именно, косвенного обменного взаимодействия при резонансной туннельной гибридизации в гетероструктурах, когда проводящий канал отделен барьером от слоя магнитных примесей. В шестой главе, тот же тип обмена рассматривается применительно к графену и углеродным нанотрубкам с магнитными адатоми на поверхности.

Все поставленные задачи являются новыми, а полученные результаты оригинальны и вносят существенный вклад в понимание спин-зависимых резонансно-туннельных эффектов и их влияния на разнообразные свойства. Новизна работы определяется решением новых теоретических задач, направленных на объяснение конкретных экспериментов и изучением новых структур. Автор использует разнообразный современный математический аппарат теоретической физики, как аналитические, так и численные методы, причем искусно обходит трудности, когда прямые методы не позволяют довести решение до конца - все это характеризуют его высокую квалификацию. Несомненным, и довольно редким для фундаментальных теоретических работ, достоинством является то, что автор доводит результаты всех теоретических построений до конкретных чисел, до скрупулезного сравнения с экспериментом и практически все результаты имеют практическую значимость.

В отзыве невозможно перечислить все многочисленные новые результаты, полученные в диссертации, поэтому приведу только несколько из них, имеющих, по моему мнению, наибольший интерес и значение:

1. Впервые получено общее аналитическое выражение для туннельного тока электронов и тяжелых дырок между двумя квантовыми ямами при наличии как спин-орбитального взаимодействия (СОВ) Рашбы, так и Дрессельхауза (формула 2.18). Получено, что в вольт-амперной характеристике (ВАХ) появляются новые резонансы и при этом туннельный ток сильно зависит от соотношения параметров СОВ Рашбы и Дрессельхауза вплоть до возможности полного подавления тока или образования структуры «spin-helix». Для туннелирования дырок ситуация более благоприятная, чем для туннелирования электронов. И более того, рассчитанная в этом случае ВАХ при реальных параметрах хорошо описывает имеющиеся экспериментальные данные (см. Рис.2.10 диссертации). Это позволило автору предложить новый способ определения параметров СОВ и конкретные условия осуществления эксперимента в гетероструктурах на основе GaAs и SiGe p-типа.

2. Развита теория гибридизации волновой функции локализованного состояния электрона или дырки на примеси с континуумом делокализованных состояний в квантовой яме. Получено, что в результате такой гибридизации в спектре фотолюминесценции появляется провал в области энергии примесного состояния. Предложен механизм циркулярной поляризации фотолюминесценции из квантовой ямы при спиновом расщеплении примесного уровня, пространственно отделенном от квантовой ямы. Результаты расчета позволяют количественно объяснить имеющиеся экспериментальные данные. Согласно выполненным оценкам циркулярная поляризация может при таком механизме достигать 40-50%.

3. Для гетероструктуры, состоящей из квантовой ямы InGaAS и пространственно отстоящем от нее слоем магнитной примеси, туннельная спин-зависящая рекомбинация через донорные состояния приводит к сверхбыстрому гашению фотолюминесценции.

4. Впервые предложен и теоретически исследован новый тип косвенного обменного взаимодействия в гетероструктурах, в которых проводящий слой отделен от слоя магнитных примесей. В принципе в такой структуре возможен обмен коллективизированных электронов в проводящем канале, прямой или двойной обмен между магнитными примесями и наконец косвенный обмен РККИ за счет провисания волновой функции примесей в квантовую яму. Первые два типа обмена маловероятны или, по крайней мере, не могут дать разумные значения температуры Кюри. Третий тип обмена мал в силу отдаленности примесного уровня. Автор показал, что в условиях резонансного туннелирования возможно значительное усиление этого типа обмена. Им построена строгая теория такого обмена и при сравнении с экспериментом были выявлены закономерности, свидетельствующие в пользу развиваемой концепции. Существует всего несколько типов обмена и предложенный новый вид имеет фундаментальное значение для физики магнитных явлений и физики полупроводников. Надо также сказать, что автор в данной части работы проявил высокое мастерство, так как прямые методы теории возмущений здесь не работают, но автор нашел оригинальный путь решения задачи, который в точности воспроизводит известные результаты теории РККИ, но выходит за рамки теории возмущений.

5. Поиск магнитных полупроводников с высокой температурой Кюри, высокой степенью спиновой поляризации и хорошей подвижностью носителей является на протяжении последних 20 лет предметом интенсивных исследований и дискуссий. С появлением углеродных соединений, углеродных нанотрубок, графена множество авторов пыталось выявить в них высокотемпературный ферромагнетизм. Но пока без значительных успехов. Автор работы предлагает использовать предложенный им тип усиленного

косвенного обмена при резонансном туннелировании для продвижения в этом направлении. Он впервые рассчитал обмен между магнитными атомами на поверхности графена и показал, что усиление обмена возможно и им даже можно управлять электрическим полем.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений и подтверждается использованием современных методик, большим представленным в работе фактическим материалом, тщательным анализом полученных данных и их сопоставлением с результатами независимых исследований. В целом, диссертация хорошо написана, хорошо оформлена, содержит весьма незначительное число орфографических ошибок.

По сути сделанных в работе выводов замечаний у оппонента нет. Однако, работа не свободна от недостатков:

1. В диссертации отсутствует обзор. Частично этот недостаток устранен тем, что в начале каждой главы автор дает необходимую информацию (особенно это хорошо сделано в главе 5), но иногда следовало бы более подробно рассмотреть отличия от других работ. Например, в последние годы появилось несколько работ по Аномальному и спиновому эффекту Холла при туннелировании (Ведяев и др., A. Matos-Abiague and J. Fabian), в которых также решается задача о туннелировании при учете СОВ.
2. В формуле 5.67 в оценке усиления обмена вероятность туннелирования стоит в кубической степени, причем в знаменателе. То есть чем меньше вероятность туннелирования, тем сильнее обмен, что вызывает сомнения или требует дополнительного объяснения.
3. На Рис. 5.3 появляется надпись $\lambda = 0.1k_F$, но не объяснено, что это за параметр.
4. Вызывает вопрос формула 5.79 на стр. 165, так как температура Кюри неаддитивна.

Указанные недостатки не носят принципиального характера и не затрагивают основного содержания диссертационной работы.

Полученные в работе результаты имеют большое практическое значение как для физики полупроводников и физики магнитных явлений, так и для таких развивающихся областей физики и техники как спинтроника, магнитофотоника. Автор в работе много внимания уделяет конкретным возможным практическим применениям полученных результатов. Поэтому результаты работы можно рекомендовать для ознакомления и использования в организациях занимающихся как разработкой новых магнитных материалов, так и ведущих исследования в области физики полупроводников и физики магнитных явлений, как например, МГУ им. М.В.Ломоносова (г. Москва), Санкт-Петербургский, Уральский, Новосибирский и Тверской университеты, Воронежский технический университет, МИРЭА, Российский научный центр «Курчатовский институт» (г.

Москва), Институт физики твердого тела РАН РФ (п. Черноголовка Московская обл.), ФТИ им. А.Ф. Иоффе (г. С-Петербург), РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров, Нижегородская обл), Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН (г.Красноярск), Институт Теоретической и Прикладной Электродинамики РАН (Москва) и др.

Результаты диссертации многократно докладывались на российских и международных конференциях и хорошо известны специалистам.

Автореферат и публикации автора в престижных научных изданиях точно и полностью отражают полученные в диссертационной работе результаты.

Резюмируя сказанное можно констатировать, что диссертация Рожанского И.В. посвящена актуальной теме, содержит ряд новых, важных в научном и практическом плане результатов, которые вносят значительный вклад в понимание механизмов спин-зависящих резонансно-туннельных явлений в полупроводниковых гетероструктурах. Диссертационная работа Рожанского И.В.. является завершенным научным исследованием, которое может быть квалифицировано как новое крупное достижение в области физики полупроводников.

В целом диссертационная работа «Резонансно-туннельные спиновые эффекты в полупроводниковых гетероструктурах» отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторской диссертации, а ее автор, Рожанский Игорь Владимирович, несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Доктор физико-математических наук, профессор

Грановский А.Б.

Московский Государственный Университет
им. М.В. Ломоносова, Физический Факультет
Ленинские Горы, дом 1 , стр.2
119991 Москва
Тел. 8 495 939 47 87
Факс 8 495 939 47 87
E-mail: granov@magn.ru

Подпись профессора кафедры магнетизма физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова д.ф.-м.н., проф. Грановского А.Б. удостоверяю
Ученый секретарь физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

профессор

Караваев В.А.