

“УТВЕРЖДАЮ”

Проректор ННГУ им. Н.И. Лобачевского
по научной работе, д.ф.-м.н.

КАЗАНЦЕВ Виктор Борисович

« » июля 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» на диссертационную работу
РОЖАНСКОГО Игоря Владимировича
«Резонансно-туннельные спиновые явления в полупроводниковых гетероструктурах»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа И.В. Рожанского ставит задачей теоретическое исследование резонансно-туннельных спиновых явлений в полупроводниковых наносистемах таких как квантовые ямы и проволоки, а также в графене.

Этот круг явлений относится к одному из наиболее активно развивающихся направлений физики полупроводников – полупроводниковой спинтронике, нацеленной на фундаментальные и прикладные исследования спин-зависимых явлений, в частности, взаимодействия поляризованного излучения с носителями заряда, формирования циркулярно-поляризованного излучения в спиновых системах, спиновой инжекции, спиновой динамики электронов, эффектов магнетизма. В конечном итоге ожидается, что спиновая степень свободы электрона или фотона может служить квантовым битом информации (кубит), что в перспективе позволит создавать устройства обработки информации на основе квантовомеханических принципов. Диссертация И.В. Рожанского посвящена подробному исследованию проблематики спиновых и кинетических явлений в полупроводниковых наносистемах, и ее **актуальность** с фундаментальной и прикладной точек зрения не вызывает сомнений.

Новизна исследований и полученных результатов

Научная новизна и практическая значимость диссертации состоит в разработке теории фундаментальных физических явлений, основанных на резонансном туннелировании в полупроводниковых гетероструктурах с учётом спина. В диссертации предложена теория резонансно-туннельного транспорта между двумерными системами со спин-орбитальным взаимодействием, описан механизм создания спиновой и оптической поляризации в двумерной системе с непрерывным энергетическим спектром за счет спинового расщепления пространственно отделённых локализованных состояний. Впервые описано косвенное обменное взаимодействие, основанное на резонансно-туннельной связи магнитных ионов с проводящим каналом, предложена теория спин-зависимой резонансно-туннельной рекомбинации и предложен новый принцип модуляции магнитных свойств с помощью резонансной обменной связи.

Отметим наиболее важные и интересные, на наш взгляд, результаты:

В первой главе диссертации подробно рассмотрены методы туннельного гамильтониана и резонансно-туннельной гибридизации и приведен пример использования метода туннельного гамильтониана для расчета инжекции дырок в среду с прыжковой проводимостью. Результаты расчетов позволили впервые объяснить экспериментально наблюдаемые особенности вольтамперных характеристик для контактов металла с органическими молекулярными твердыми телами с дырочной проводимостью.

Во второй главе построена теория туннелирования электронов и дырок между двумерными проводящими слоями со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы и Дрессельхауза. Установлены критерии проявления спин-орбитального взаимодействия в резонансном туннелировании между двумерными слоями. Предсказано, что эффект будет значителен при туннелировании дырок в гетероструктурах на основе GaAs и SiGe. Показано, что спин-орбитальные особенности туннельного транспорта чрезвычайно чувствительны к величинам параметров Рашбы и Дрессельхауза и их отношению. Это позволяет создать новый метод экспериментального определения этих параметров. В частности, такой метод позволит экспериментально определить параметр Дрессельхауза для двумерных дырок, величина которого до настоящего времени надежно не установлена.

В третьей главе рассмотрено явление возникновения спиновой и оптической поляризации при резонансно-туннельной гибридизации свободных носителей в двумерном проводящем канале с локализованным состоянием на магнитной примеси. Описан механизм возникновения циркулярной поляризации фотолюминесценции из квантовой ямы вследствие гибридизации локализованного состояния, расщепленного по спину, с континуумом двумерных состояний в квантовой яме. Показано, что вследствие гибридизации

делокализованных состояний носителей в квантовой яме с примесным уровнем в барьере матричный элемент, соответствующий прямым оптическим переходам в квантовой яме, имеет минимум вблизи энергии локализованного состояния, что является следствием фазовых соотношений гибридизированной волновой функции вблизи резонансной энергии.

Расщепление примесного состояния по спину приводит к циркулярной поляризации фотолюминесценции из квантовой ямы, поскольку особенности, отвечающие разным спиновым подуровням в спектре фотолюминесценции, оказываются смещены. Развитая теория может быть использована для описания результатов экспериментов по измерению оптических свойств гетероструктур, содержащих квантовую яму на основе InGaAs и широкозонные барьеры GaAs с отделенным от квантовой ямы на 3-10 нм слоем магнитной примеси (Mn). Полученная в расчётах степень поляризации согласуется с наблюдаемой в экспериментах. Наиболее вероятно, предложенный механизм имеет место для случая глубоких квантовых ям (максимум спектра фотолюминесценции при $\hbar\omega_{max} < 1.4$ эВ) и малых мощностей накачки.

В четвертой главе диссертации рассматривается кинетика неравновесного спина, связанная с резонансным туннелированием в полупроводниковых гетероструктурах. Рассматриваемое физическое явление заключается в возникновении спиновой поляризации электронов или дырок в квантовой яме из-за разных скоростей туннелирования носителей с противоположными проекциями спина на примесное состояние в барьере. Характерные времена ухода могут быть очень малыми, поэтому кинетика наблюдаемых оптических свойств, в частности, фотолюминесценции из квантовой ямы, будет сверхбыстрой, т.е. с характерным временем меньшим, чем время излучательной рекомбинации. В диссертации изложена теория, описывающая спин-зависимую туннельную рекомбинацию и проведено сравнение с экспериментом. Расчеты качественно и количественно объясняют экспериментально наблюдаемые особенности фотолюминесценции в гетероструктурах на основе InGaAs с квантовой ямой с пространственно отделенным слоем Mn, в частности, сверхбыстрое гашение фотолюминесценции и линейный рост поляризации с характерным временем на несколько порядков меньше времени излучательной рекомбинации. Автор полагает, что спиновая поляризация электронов в квантовой яме возникает из-за туннелирования на примесные состояния донорного типа в слое Mn, расщепленные по спину вследствие обменного взаимодействия. Такой механизм спиновой поляризации электронов в квантовой яме может быть доминирующим в гетероструктурах с мелкой квантовой ямой и при высоких плотностях накачки (максимум спектра фотолюминесценции при $\hbar\omega_{max} > 1.4$ эВ).

Пятая глава диссертационной работы содержит предложенную И.В. Рожанским теорию резонансного косвенного обменного взаимодействия в гетероструктурах. Теория описывает косвенное обменное взаимодействие магнитных ионов через проводящий канал, отделенный потенциальным барьером. Физический принцип взаимодействия аналогичен взаимодействию Рудермана-Киттеля-Касуя-Йосиды (РККИ), однако ключевое отличие предложенной теории заключается в учете резонансной гибридизации связанного состояния на примеси с проводящим каналом. В диссертации развит подход, не использующий теорию возмущений РККИ и позволяющий рассчитывать величину косвенного обменного взаимодействия, в том числе, и в резонансном случае. Подход основан на вычислении фаз резонансного рассеяния на потенциале двух магнитных ионов.

В диссертации решена стандартная задача о косвенном обменном взаимодействии магнитных ионов через газ свободных носителей предложенным методом фаз рассеяния в одномерном и двумерном случаях. Точный результат практически совпадает с результатами расчетов по теории РККИ. Далее, метод фаз рассеяния применен и для случая резонансного косвенного обмена через проводящий канал. Туннельная связь магнитных ионов с каналом является резонансной, если энергия связанного состояния носителя на магнитном ионе лежит в интервале энергий заполненных состояний в канале. Автором показано, что в резонансном случае косвенный обмен приводит к значительному усилению ферромагнитного взаимодействия по сравнению с нерезонансным случаем.

Развитая в диссертации теория резонансного косвенного обмена применена для анализа экспериментов по исследованию ферромагнитных свойств гетероструктуры, содержащей квантовую яму $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и пространственно отделенный от нее слой магнитной примеси (Mn). Возможно туннелирование дырок между квантовой ямой и примесным слоем Mn и, следовательно, косвенное обменное взаимодействие между ионами Mn через дырки квантовой ямы. Такие гетероструктуры проявляют ферромагнитные свойства, причем наблюдается немонотонная зависимость температуры Кюри от глубины квантовой ямы. Приведенный автором расчет воспроизводит экспериментальную зависимость температуры Кюри от глубины квантовой ямы.

В шестой главе предложенная теория резонансного косвенного обмена применена для углеродных нанотрубок и графена с нанесенными на поверхность магнитными адатомами. В диссертации показано, что косвенное обменное взаимодействие между магнитными адатомами в структурах на основе графена значительно усиливается при попадании энергетического уровня локализованного состояния на адатоме в спектр заполненных состояний графена. Однако наиболее важным и интересным результатом теории является то, что в случае резонансного косвенного обмена в графене характер магнитного

взаимодействия (антиферромагнитное или ферромагнитное) между адатомами на малых расстояниях зависит только от энергии локализованного состояния на адатоме, но не зависит от расположения адатомов на поверхности графена. Этот результат кардинально отличается от результатов расчетов по теории РККИ. И.В. Рожанским предложен новый принцип модуляции магнитных свойств графена с магнитными адатомами. Условие резонанса зависит от положения уровня Ферми относительно энергии локализованного состояния на адатоме, поэтому изменение уровня Ферми, например, электрическим полем затвора, должно приводить к значительной модуляции взаимодействия. Этот эффект открывает возможности для управления магнитными свойствами графена для практических применений.

И.В. Рожанский является известным специалистом в области физики туннельных и спиновых явлений в полупроводниковых наносистемах. Им опубликован ряд работ в ведущих отечественных и зарубежных журналах, в том числе, в *Physical Review B*, *Applied Physics Letters*, *Journal of Applied Physics*, *Scientific Reports*, *Physica Status Solidi*, *Solid State Communications*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *Физика Низких Температур*, *Физика и Техника Полупроводников*. Работы И.В. Рожанского многократно представлялись на ведущих международных конференциях по физике низкоразмерных систем и полупроводников, в том числе и с приглашенными докладами. Это подтверждает **новизну** и **достоверность** полученных результатов.

Научная и практическая значимость полученных результатов

В диссертации И.В. Рожанского разработана теория физических явлений, основанных на резонансном туннелировании в полупроводниковых гетероструктурах и системах пониженной размерности с учётом спина. Полученные теоретические результаты сопоставлены с известными экспериментальными данными, сформулированы предложения по экспериментальной реализации предсказаний теории, в частности для резонансно-туннельного транспорта дырок между двумерными системами со спин-орбитальным взаимодействием, а также управления ферромагнетизмом в графене с магнитными адатомами.

В диссертации описан ряд новых физических моделей и явлений, в частности, косвенное обменное взаимодействие, основанное на резонансно-туннельной связи магнитных ионов с проводящим каналом, теория спин-зависимой резонансно-туннельной рекомбинации и принцип модуляции магнитных свойств с помощью резонансной обменной связи.

Ясна и практическая значимость диссертации, обусловленная исследованием эффектов, необходимых для создания устройств спиновой электроники и фотоники. Кроме практических применений, эффекты, изучаемые в диссертации, важны для исследования энергетического спектра и фундаментальных параметров (в частности, констант спин-орбитальной связи и обменного взаимодействия) в полупроводниках. Полученные И.В. Рожанским результаты могут быть использованы для разработки приборов спинтроники. В целом, предложенные автором теоретические подходы весьма эффективны для изучения спиновых систем в полупроводниковых структурах. Все это определяет **научную и практическую значимость** представленной диссертационной работы.

Основные результаты, полученные в диссертации, могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих исследования в области физики полупроводников и ведущих разработку приборов и устройств микро- и оптоэлектроники (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Институт физики полупроводников СО РАН, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Институт физики твердого тела РАН, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Институт радиотехники и электроники РАН, Институт физики микроструктур РАН, РИЦ «Курчатовский Институт», МГУ, СПбГУ, СПбГПУ и др.).

В диссертации Игоря Владимировича Рожанского четко сформулированы цели исследования, рассмотрены физические явления, наблюдения которых можно было ожидать в исследованных структурах, достаточно полно описаны и проанализированы использованные теоретические методы и обсуждены полученные результаты. Диссертация написана ясным языком.

Выступление соискателя по материалам диссертационной работы было заслушано и обсуждалось на расширенном научном семинаре кафедры физики полупроводников и оптоэлектроники физического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Диссертационная работа И.В. Рожанского в целом произвела хорошее впечатление. Научные положения и результаты диссертации обоснованы. Основные результаты работы отражены в публикациях в авторитетных российских и международных журналах, докладывались на российских и международных конференциях. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

По содержанию и оформлению диссертационной работы сформулированы следующие замечания:

- 1) На стр.158 при рассмотрении резонансного косвенного обмена в гетероструктурах на основе InGaAs с дельта-слоем Mn автор пишет, что «Концентрация ионов марганца в рассматриваемой системе мала, так что прямого перекрытия волновых функций соседних ионов нет». Нам представляется, что это утверждение не совсем верно. Расчет среднего расстояния между атомами Mn в дельта-слое со значением плотности 0.12 монослоя дает значение около 1.1 нм. Такой же порядок величины и имеет размер волновой функции иона марганца. Тогда рассуждение о том, что имеет место значительное «туннелирование дырок между квантовой ямой и связанными состояниями на Mn», а обменное взаимодействие в системе - это «косвенное обменное взаимодействие между ионами Mn через дырки в квантовой яме» недостаточно обосновано.
- 2) По результатам расчётов, выполненных в разделе 3.3, предсказывается наличие провала на спектральной зависимости интенсивности излучательной рекомбинации в структурах с квантовой ямой и дельта-слоем легирующей примеси. Отметим, что известно довольно большое количество экспериментальных работ по исследованию таких систем (например, R.C. Myers, et al. // Phys.Rev. B. - 2004. - V.69. P.161305(R); M.V. Dorokhin, et.al. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2008. – V.41 – P.24). В рамках главы не проводится сопоставления с экспериментальными работами, в которых такого провала не зафиксировано.
- 3) В Главе 3 приводятся результаты исследования резонансной туннельной гибридизации структур с квантовой ямой и ферромагнитным дельта-слоем. В четвёртой главе исследуется спин-зависимая туннельная рекомбинация в подобных же структурах. Оба рассмотренных эффекта приводят к появлению ненулевой спиновой поляризации носителей в квантовой яме. В обеих главах приводится сопоставление с подобными экспериментальными структурами. Из рассмотрения не ясно, при каких условиях проявляется тот или иной эффект. Это не позволяет отнести полученные экспериментальные результаты по спиновой поляризации носителей в структурах «квантовая яма/дельта-слой Mn» к эффекту гибридизации или туннельной рекомбинации.
- 4) В главе 5 разработана теоретическая модель резонансного туннелирования носителей заряда между уровнями размерного квантования в квантовой яме и акцепторным уровнем марганца. При этом автор использует упрощенное представление об энергетическом положении уровня Mn в запрещенной зоне GaAs: в случае Mn_{Ga} – это

акцепторный уровень с энергией активации порядка 100 мэВ (стр.158). Экспериментальные исследования (ПЖТФ. – 2009. - Т.35, в.14. - С.8) показали, что в реальных GaAs структурах одиночный дельта слой Mn обеспечивает электропроводность вплоть до низких температур (< 10 К) и по транспортным свойствам подобен однородно-легированному слою GaMnAs. Следовательно, дельта-легирующий слой Mn, вероятно, образует примесную зону конечной ширины, имеющую разрешенные энергетические состояния. Так, для GaAs:Mn с концентрацией примеси выше 0.3 ат.% наблюдалась примесная зона шириной не менее 40-50 мэВ (Т. Slupinski et al. // Acta Phys. Pol. A. – 2007. – V.112. – P.325). В главе 4 рассматривается также донорное состояние Mn_I , но, поскольку концентрация атомов Mn в междоузлиях обычно достаточно велика, то уширение донорного уровня наверняка должно иметь место. Однако, в работе не рассматриваются особенности перехода носителей заряда между примесной зоной Mn дельта-слоя и квантовой ямой.

- 5) Имеются замечания по оформлению диссертации. Диссертация написана на русском языке; однако, 30 рисунков содержат надписи по осям и пояснительные надписи на английском языке. Два рисунка (рис.2.9 и рис.2.12) не имеют надписей на осях. В тексте встречаются единицы физических величин на английском языке (например, на стр.32, 64, 104). На рисунок 1.4 в тексте нет упоминания и объяснений. В диссертации нет списка сокращений и обозначений, а некоторые обозначения выбраны не совсем удачно: так, T – это и туннельный параметр, и временное упорядочение, хотя общепринято – абсолютная температура. Параграф 4.3 назван неудачно: «Спин-зависимая туннельная рекомбинация в гетероструктурах (Ga,Mn)As». Такое же выражение и в параграфе 5.1.3. Что означает гетероструктура (Ga,Mn)As? Не понятно. Неудачным представляется нам и выражение «оптическая поляризация фотолюминесценции» (название параграфа 3.4) – а какой может быть еще поляризация оптического излучения?

Тем не менее, сделанные замечания не снижают научной значимости проведенных исследований, не влияют на новизну и достоверность полученных результатов и общую положительную оценку диссертационной работы.

Таким образом актуальность исследований, новизна, достоверность и практическая значимость выводов, сделанных в диссертационной работе И.В. Рожанского, не вызывают сомнений. Полученные результаты вносят существенный вклад в новое направление – физику резонансно-туннельных спиновых явлений в полупроводниковых наносистемах.

Диссертация полностью отвечает требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям, представленным на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, в том числе критериям II раздела Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, № 842, а автор диссертационной работы Рожанский Игорь Владимирович заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Адрес организации:

Российская Федерация, 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

Тел.: (831) 462-30-03

Эл. почта: unn@unn.ru

Веб-сайт: www.unn.ru

Зав. кафедрой физики полупроводников и оптоэлектроники
физического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского
доктор физ.-мат. наук, профессор

ПАВЛОВ Дмитрий Алексеевич

« » июля 2016 года.