

ОТЗЫВ

официального оппонента 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.

Полупроводниковые гетероструктуры уже давно заняли важное место в современной физике. В этих системах было открыто много новых явлений, которые были интересны вначале с «чисто научной» точки зрения, но очень быстро исследованные явления начинали применяться в новых устройствах. Изучение спин-зависимых явлений сейчас находится, пожалуй, еще в стадии научного поиска. Открытие здесь новых явлений и изучение их особенностей создает основу для будущего развития спинтроники, то есть для методов управления спином «полупроводниковыми методами»: током, напряжением затвора и т.д. Полупроводниковые гетероструктуры предоставляют большие возможности по такому управлению спинами. Контролируемое легирование магнитными примесями определенных слоев в полупроводниковых гетероструктурах позволяет изменять параметры магнитной подсистемы. Существующее в полупроводниках спин-орбитальное взаимодействие дает дополнительные возможности управления спином электронов. Диссертация И.В.Рожанского посвящена новой области спин-зависимых явлений. В ней изучаются особенности систем, в которых процессы туннелирования оказываются спин-зависимыми или ориентация спина влияет на туннельную связь. Такая связь туннельных и спиновых явлений, безусловно, интересна с точки зрения фундаментальной физики. При этом, некоторые результаты вполне могут оказаться полезными и для разработки физических принципов новых устройств, в которых можно создавать определенные спиновые конфигурации, управлять магнитными свойствами и т.д.

Поэтому тематика диссертации И.В.Рожанского, несомненно, является актуальной и практически значимой.

В работе впервые предсказан и описан целый ряд новых, ранее не изученных эффектов в полупроводниковых гетероструктурах. Среди полученных результатов я бы выделил следующие:

Показано, как из явления резонансного туннелирования между двумя квантовыми ямами можно определять параметры спин-орбитального взаимодействия. Интересно, что вид туннельных характеристик зависит от типа спин-орбитального взаимодействия.

Описана новая группа явлений, связанных с существованием резонансной туннельной связи двумерных носителей с магнитными примесями. Одно из явлений – это появление оптической поляризации люминесценции в условиях, когда в квантовой яме спины носителей не поляризованы. Физической причиной этого является наличие связанного состояния в диапазоне энергий заполненных зонных состояний, которое обуславливает провал в спектре фотолюминесценции из квантовой ямы в области энергии связанного состояния. За счет туннельной связи с магнитным атомом положения этих провалов различны для σ^+ и σ^- поляризаций, что и приводит при определенных условиях к поляризации излучения.

Надо отметить, что автор заботится об учете ряда деталей, важных при сравнении результатов теории с экспериментом. В диссертации показано, что экспоненциальная зависимость степени спиновой поляризации от толщины барьера оказывается ослабленной из-за электростатического эффекта, появляется предэкспоненциальный фактор, растущий с толщиной туннельного барьера.

Также в диссертации дано объяснение зависимости скорости гашения люминесценции от толщины ямы и, на мой взгляд, интересного и необычного явления – линейного нарастания со временем степени поляризации излучения в нестационарной ситуации. Это объяснение основано на идее о спин-зависимом резонансном туннелировании.

Описано косвенное обменное взаимодействие магнитных примесей через пространственно отделенный проводящий слой в случае туннельной связи примесных состояний с состояниями слоя. В отличие от обычного вывода взаимодействия РККИ, задача решалась не по теории возмущений, что позволяет получить ответ в случае резонансного туннелирования. Величина косвенного обменного взаимодействия для резонансного случая оказывается намного выше, чем для нерезонансного. Причем, по оценке автора, это усиление может достигать трех порядков.

Примененная к случаю магнитных адатомов на графене, теория резонансного косвенного обмена дала неожиданный результат, что характер магнитного взаимодействия – ферромагнитное или антиферромагнитное – зависит только от энергии примесного состояния на адатоме, и не зависит до некоторого масштаба от расстояния между адатомами. Такой эффект приводит к упорядочивающему магнитному взаимодействию между адатомами, даже при их случайном расположении.

Достоверность всех полученных в диссертации результатов обеспечивается применением адекватных теоретических методов и подтверждается сравнением с экспериментальными данными. Основные результаты диссертационной работы

И.В.Рожанского опубликованы в 19 статьях в ведущих российских и зарубежных журналах, рекомендованных ВАК России и индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. В опубликованных статьях полностью изложены положения диссертации, выносимые на защиту.

Существенных замечаний к тексту диссертации не так много. Первое замечание заключается в том, что при рассмотрении динамических эффектов возникновения поляризации при рекомбинации носителей в квантовой яме, в принципе, можно было объединить два случая – резонансный и нерезонансный, написав общую систему кинетических уравнений. При таком подходе, приведенные в диссертации формулы получались бы, как два предельных случая из общих уравнений.

Второе замечание связано с рассмотренным в главе 6 косвенным взаимодействием магнитных адатомов на графене. Следовало бы явно пояснить, какие особенности этого обмена (зависимость от расстояния, например) обусловлены спецификой графена - линейным спектром и соответствующим видом плотности состояний. Интересно было бы понять, как на приведенные результаты повлияет небольшая щель в спектре, если вместо монослоя графена взять бислой графена, графан, слой нитрида бора, другие узкощелевые слоистые соединения.

Есть также следующее мелкое замечание. В тексте изложение спин-орбитального взаимодействия начинается с формулы для спин-орбитального взаимодействия в атоме. Исходного, общего, выражения, в которое входит градиент потенциала, не приводится. Поэтому, на мой взгляд, в тексте теряется общность происхождения всех видов спин-орбитального взаимодействия, взаимодействие Бычкова-Рашбы и Дресселхауза получаются оторванными от атомной формулировки спин орбитального взаимодействия.

Высказанные замечания не ставят под сомнение значимость полученных в диссертации результатов. В целом, диссертация представляет собой законченную научную работу, выполненную на высоком уровне. Представленные в ней новые результаты были получены автором самостоятельно. В диссертации построено описание ряда новых туннельно-резонансных спиновых эффектов, имеющих большое значение для физики полупроводниковых гетероструктур и спинтроники.

Результаты, вошедшие в диссертацию были своевременно опубликованы в ведущих зарубежных и российских физических журналах, докладывались на большом количестве семинаров, российских и международных конференций. Выводы и заключения, сделанные автором, обоснованы. В автореферате правильно и полностью изложено содержание диссертационной работы.

Таким образом, диссертация Рожанского Игоря Владимировича «Резонансно-туннельные спиновые явления в полупроводниковых гетероструктурах», полностью удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

14 октября 2016 г.

Официальный оппонент

Арсеев Петр Иварович

Гнс Отделения теоретической физики им. И.Е. Тамма
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН
Почтовый адрес: 119991 Москва,
Ленинский проспект 53
Тел. 499-1326271
ars@lpi.ru

Подпись П.И.Арсеева заверяю

Заместитель директора ФИАН,
д.ф.-м.н.

С.Ю.Савинов