



В специализированный совет  
Д 002.205.02

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Отзыв  
официального оппонента

о диссертационной работе Рожанского Игоря Владимировича "Резонансно-туннельные спиновые явления в полупроводниковых гетероструктурах", представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников

Актуальность. Процессы туннелирования в значительной степени определяют кинетические и оптические свойства полупроводниковых структур с пониженной размерностью. Туннелирование лежит в основе работы многих современных приборов, среди которых, например, квантово-каскадные лазеры, туннельные и резонансно-туннельные диоды, транзисторы на горячих электронах, сканирующий туннельный микроскоп. Особый интерес представляет резонансное туннелирование, наблюдаемое в определенных условиях. Туннельные эффекты в стандартных системах хорошо изучены, однако бурно развивающиеся исследования спин-зависимых явлений в полупроводниковых гетероструктурах определяют необходимость детального изучения новых явлений: влияния спина на туннелирование. Исследования такого рода известны, однако подробного изучения влияния спина на процессы резонансного туннелирования до сих пор не проводилось. Настоящая работа восполняет этот пробел, она посвящена исследованиям нового класса спиновых явлений в условиях резонансного туннелирования, и в связи с этим тема диссертационной работы, несомненно, является актуальной, а сама работа представляется необходимой и своевременной.

Новизна и достоверность результатов. В работе получен ряд новых научных результатов. Укажем лишь некоторые из них, по нашему мнению наиболее важные и интересные.

Прежде всего, в диссертации построена теория резонансно-туннельного транспорта между двумерными проводящими слоями с учетом спин-орбитального взаимодействия Рашбы и Дрессельхауза. Важной особенностью этой задачи является чрезвычайно высокая чувствительность туннелирования к отношению вкладов Рашбы и Дрессельхауза, позволяющая разработать

методику экспериментального определения параметров спин-орбитального взаимодействия.

Основное внимание в работе уделяется ситуации резонансного туннелирования с участием дискретных состояний, в качестве которых выступают примесные состояния, в том числе состояния магнитных примесей, либо состояния магнитных ионов, расположенных вблизи слоя с двумерным газом.

В рамках такого подхода в работе предложен новый механизм возникновения спиновой и оптической поляризации на основе резонансно-туннельной гибридизации локализованного состояния с континуумом двумерных состояний. В этих условиях возникает провал в спектре фотолюминесценции и в случае расщепления локализованного состояния по спину в магнитном или эффективном обменном поле возникает циркулярная поляризация фотолюминесценции из квантовой ямы (даже в отсутствие спинового расщепления двумерных носителей заряда в квантовой яме).

Автором описано новое физическое явление – усиление косвенного обменного взаимодействия при резонансной туннельной гибридизации, наблюдаемое при расположении магнитных ионов вблизи двумерного проводящего канала. В условиях резонансной туннельной связи теория косвенного обменного взаимодействия Рудермана-Киттеля-Касуя-Йосиды (РККИ) оказывается неприменимой. Для количественного описания этого явления автором развита теория косвенного обмена, основанная на вычислении фаз резонансного рассеяния на магнитных ионах и применимая в резонансном случае. Было показано, что резонансный косвенный обмен приводит к усилению ферромагнитного взаимодействия.

Разработанная автором теория резонансного косвенного обмена были применена для случая магнитных адатомов на поверхности графена. Важным результатом является усиление косвенного обменного взаимодействия при попадании уровня состояния, локализованного на адатоме, в спектр заполненных состояний графена. Интересным представляется отсутствие зависимости характера магнитного взаимодействия адатомов от их расположения на поверхности графена в случае резонансного косвенного обмена, что, несомненно, интересно с экспериментальной точки зрения.

Достоверность основных результатов работы не вызывает сомнений. В работе построены теории исследуемых явлений и на этой основе выполнены расчеты основных характеристик структур. Результаты расчетов, полученные в работе, хорошо согласуются с результатами экспериментов в тех случаях, когда такие экспериментальные результаты имеются. Примерами могут служить вольтамперные характеристики при резонансном туннелировании между двумерными проводящими слоями с учетом спин-орбитального взаимодействия Рашбы и Дрессельхауза, немонотонная зависимость температуры Кюри от глубины квантовой ямы с дельта-слоем марганца в барьере, совпадение результатов расчетов автора по косвенному обменному взаимодействию с теорией РККИ в тех случаях, когда эта теория применима.

Научная и практическая значимость работы высока и несомненна. Она частично отражена в предыдущих разделах отзыва. Следует отметить фундаментальный характер разработанных автором теоретических подходов. К важным практическим результатам следует отнести разработанный и обоснованный автором метод определения параметров Рашбы и Дрессельхауза с точностью, превосходящей точность других экспериментальных методик. В работе предложен новый принцип управления магнитными свойствами графена, основанный на значительном увеличении косвенного обменного взаимодействия в графене в условиях резонанса, которые могут быть созданы при изменении напряжения на затворе. Ряд эффектов, предсказанных в настоящей работе, еще не обнаружен на эксперименте, что направляет и стимулирует экспериментальные исследования в области спин-зависимого резонансного туннелирования.

#### Замечания и вопросы.

1. При рассмотрении теории двухэтапной рекомбинации через промежуточное спин-расщепленное состояние на доноре, расположенном на некотором расстоянии от квантовой ямы, учитываются только безызлучательные процессы. Почему можно пренебречь излучательной рекомбинацией с испусканием фотона?

2. В этом же разделе диссертации при сравнении с экспериментальными данными время жизни электрона на доноре принимается равным 0.5 пс. В качестве обоснования приводится ссылка на работу [122]. Однако столь малые времена жизни получены в этой работе для свободных электронов в низкотемпературном GaAs и применимость этого результата к времени жизни локализованного состояния требует пояснений.

3. Схема туннелирования между двумерными слоями, представленная в работе, является условной, но все же на ней следовало бы более корректно отобразить ход потенциала в соответствии с распределением заряда.

4. Имеется некоторая небрежность в оформлении: в разных разделах диссертации, например, в формулах (3.35) и (2.29) электрическое поле обозначается разными переменными.

Указанные замечания не являются принципиальными и не влияют на общую высокую оценку работы.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить высокий научно-методический уровень выполнения работы, большой объем проведенных исследований, новизну полученных результатов. Работа является цельным и законченным исследованием. Несомненно, эта работа открывает новые перспективы дальнейшего исследования спин-зависимого резонансного туннелирования в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах. Совокупность опубликованных работ автора представляет собой крупное достижение в области наноэлектроники и физики полупроводников, имеющее большое научное и прикладное значение. Одним из достоинств работы является то, что ряд результатов теоретических исследований, полученных в ней,

подтверждается экспериментальными работами других авторов. Диссертация имеет четкую структуру, основные результаты четко сформулированы.

Автореферат и опубликованные статьи правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации.

Таким образом, диссертация Рожанского Игоря Владимировича полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а он сам, несомненно, заслуживает присвоения искомой степени.

Заведующий кафедрой физики полупроводников  
и наноэлектроники, профессор, доктор физ.-мат. наук  
E-mail: dmfir@rphf.spbstu.ru  
Тел.: +7-921-798-8231

Дмитрий Анатольевич Фирсов

12.10.2016