

## **Отзыв официального оппонента на диссертационную работу**

**Смирнова Дмитрия Сергеевича**

**«Теория спиновых флуктуаций носителей заряда**

**в полупроводниковых наноструктурах»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 — «физика полупроводников»

Спиновые явления в полупроводниках и наносистемах представляют собой уникальную область физики твердого тела, сочетающую в себе особенности как квантовых, так и релятивистских эффектов. В настоящее время значительное внимание уделяется теоретическим и экспериментальным исследованиям спиновых флуктуаций в полупроводниковых наноструктурах. Эти исследования позволяют определять времена спиновой релаксации, частоты спиновой прецессии, величины сверхтонкого взаимодействия с ядрами решетки как в равновесных, так и в неравновесных условиях.

Диссертационная работа Д. С. Смирнова посвящена разработке методов теоретического описания спиновых флуктуаций носителей заряда и их комплексов в полупроводниковых наноструктурах. Диссертационная работа является актуальной как с фундаментальной точки зрения, так и с точки зрения объяснения существующих экспериментов и потенциальной возможности практических применений.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 121 странице, содержит 28 рисунков и список литературы из 104 наименований.

Во введении сформулированы цель и основные задачи работы, обоснованы актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлено краткое содержание диссертационной работы.

В первой главе разработан теоретический подход для описания термодинамически равновесных спиновых флуктуаций локализованных электронов при наличии сверхтонкого взаимодействия с ядрами кристаллической решетки. Продемонстрировано, что спектр спиновых флуктуаций электронов, локализованных в квантовых точках, полученный с учетом наличия в исследуемой системе сверхтонкого взаимодействия с ядрами кристаллической решетки, содержит два пика: один из пиков связан со спиновой прецессией электронов во флуктуационном поле Оверхаузера, а второй пик обусловлен релаксацией компоненты спина, сонаправленной с полем ядер. Рассчитанные спектры спинового шума были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными для образцов с n- и p-типом проводимости, что позволило определить константы сверхтонкого взаимодействия и величины g-факторов для электронов и дырок в квантовых точках, а также вычислить характерные времена спиновой релаксации носителей заряда. В первой главе также предложена аналитическая модель

кластеров для описания спиновых флуктуаций электронов, локализованных на донорах в объемном полупроводнике, с учетом конкуренции между сверхтонким взаимодействием и обменным взаимодействием.

Во второй главе проведено теоретическое исследование влияния динамической поляризации ядер на спиновые флуктуации резидентных носителей заряда. Использовано приближение, в рамках которого эффективная ядерная спиновая температура изменяется значительно медленнее, чем характерные времена электронной спиновой динамики. Продемонстрировано, что положение прецессионного пика в спектре спинового шума обусловлено как действием внешнего магнитного поля, так и поля Оверхаузера. Показано, что ширина пика значительно уменьшается с ростом величины ядерной спиновой поляризации. На основе полученных теоретических результатов предложена экспериментальная методика спектроскопии спинового шума с временным разрешением для анализа динамики ядерных спинов. Применение предложенной методики совместно с разработанным теоретическим подходом позволило определить величину скорости ядерной спиновой релаксации в объемном GaAs. Также во второй главе развита микроскопическая теория динамического эффекта Зеемана для объемных полупроводников, на основе которой показано возникновение спинового расщепления для электронов и продемонстрировано, что величина и направление расщепления зависят от направления распространения света, знака циркулярной поляризации и интенсивности электромагнитного поля, распространяющегося в области прозрачности полупроводника.

В третьей главе проведено исследование спиновых флуктуаций носителей заряда в стационарных, но неравновесных условиях. Обнаружено, что поглощение зондирующего луча вызывает анизотропию процессов спиновой релаксации электронов и приводит к качественной модификации спектров спиновых флуктуаций носителей заряда. Возрастание мощности возбуждающего излучения приводит к подавлению «магнитной» компоненты в спектре спиновых флуктуаций локализованных носителей заряда в неравновесных условиях. Продемонстрировано хорошее совпадение результатов расчетов с экспериментальными данными. Предложена теория спинового шума электрона, локализованного в квантовой точке, расположенной в микрорезонаторе в режиме сильной связи трионного резонанса квантовой точки с фотонной модой. Показано, что спин-индуцированные флуктуации коэффициента прохождения света через такую структуру дают возможность определить и параметры спиновой динамики системы, и статистику фотонов.

В четвертой главе исследованы спиновая динамика и флуктуации в двумерном электронном газе в режиме стриминга с учетом эффектов спин-орбитального взаимодействия.

В этом режиме основным механизмом релаксации импульса носителей заряда является рассеяние на оптических фононах. Показано, что в рассматриваемом режиме спиновая релаксация сильно анизотропна. Скорость спиновой релаксации квазипериодически зависит от обратной величиной приложенного к системе электрического поля. Получены собственные спиновые моды и спектры спиновых флуктуаций. Особенности, возникающие в спектрах спиновых флуктуаций, обусловлены собственными частотами и временами затухания спиновых мод системы двумерного электронного газа.

В заключении диссертационной работы приведены основные результаты и выводы.

Достоверность результатов обеспечена комплексным подходом к аналитическому и численному анализу свойств спиновых флуктуаций в исследуемых структурах, тщательным сопоставлением с экспериментальными данными, а также широкой апробацией результатов работы на научных семинарах, всероссийских и международных конференциях. Автором получен ряд новых и оригинальных результатов. К ним можно отнести следующее:

1. Проведен последовательный анализ спиновых флуктуаций локализованных носителей заряда с учетом не только сверхтонкого взаимодействия, но и обменного взаимодействия.

2. Разработана теория спектроскопии электронных спиновых шумов при наличии динамической поляризации ядер. На основе теоретического анализа предложена схема экспериментального исследования спиновой динамики ядер по спектроскопическим измерениям спиновых флуктуаций резидентных электронов с временным разрешением.

3. Предложен теоретический подход, позволяющий определять методом спектроскопии спинового шума параметры спиновой и зарядовой динамики резидентных носителей заряда в квантовых точках в неравновесных условиях с учетом возбуждения многочастичных комплексов, выходя за пределы применимости флуктуационно-диссипационной теоремы.

4. Выполнены теоретические исследования спиновой динамики и спиновых флуктуаций в двумерном электронном газе с учетом спин-орбитального взаимодействия в режиме стриминга.

К достоинствам работы необходимо отнести тщательное сравнение результатов теоретического анализа, полученных автором на основе разработанных методов и подходов для описания спиновых флуктуаций носителей заряда и их комплексов в полупроводниковых наноструктурах, с данными экспериментальных исследований, выполненных как российскими, так и международными научными группами. Кроме того, результаты численного моделирования сопоставлены с данными аналитических расчетов, выполненных в ряде предельных случаев.

В качестве замечаний по диссертационной работе Д.С. Смирнова можно отметить следующее:

1. В первой главе при рассмотрении особенностей спиновой динамики носителей заряда в предложенной автором модели кластеров на каждом доноре локализован один электрон. Однако может реализоваться ситуация, когда часть доноров оказывается свободной. Представляется интересным исследовать роль туннельных процессов между соседними кластерами и проанализировать обусловленное ими изменение спектров спинового шума.

2. В третьей главе при исследовании спинового шума в квантовой точке с резидентным электроном в микрорезонаторе время релаксации введено в модельные уравнения феноменологически. В предыдущих главах диссертационной работы было показано, что при описании спиновой динамики нужно учитывать взаимодействие с ядрами. Представляется важным обсудить вопрос об учете взаимодействия с ядрами для рассматриваемой системы и проанализировать изменение спектра спинового шума.

3. В диссертационной работе при расчете спектров спинового шума учитывается разброс электронного  $g$ -фактора, который составляет 7%. Чем обусловлен выбор величины разброса?

Представленные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы, которая является оригинальным и законченным научным исследованием. Полученные результаты являются новыми и представляют существенный научный интерес. Актуальность, практическая значимость, новизна диссертационной работы, а также личный вклад автора и достоверность полученных результатов не вызывают сомнения. Основные результаты диссертационной работы неоднократно обсуждались на научных семинарах, докладывались на российских и международных конференциях, опубликованы в статьях в научных изданиях, входящих в список, рекомендованный ВАК РФ. Диссертационная работа аккуратно оформлена, материал представлен понятно и логически последовательно. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа Д.С. Смирнова «Теория спиновых флуктуаций носителей заряда в полупроводниковых наноструктурах» соответствует всем требованиям, предъявляемым Положением ВАК РФ к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников».

Официальный оппонент

Ведущий научный сотрудник физического факультета  
ФГБОУ ВО МГУ имени М.В. Ломоносова,  
доктор физико-математических наук

Владимир Николаевич Манцевич

Подпись В.Н. Манцевича удостоверяю

Декан физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,  
профессор,  
доктор физико-математических наук

Н.Н. Сысоев

Адрес официального оппонента:

119991 Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1, корп. 2

Тел.: 8 (495) 939-50-72

эл. почта: [vmantsev@gmail.com](mailto:vmantsev@gmail.com)