

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор автономной некоммерческой образовательной
организации высшего образования

«Сколковский институт науки и технологий»

доктор технических наук, профессор, академик РАН

А.П. Кулешов

11 декабря 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации 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

Диссертационная работа Смирнова посвящена теоретическому исследованию спиновых флуктуаций резидентных и фотовозбуждённых носителей заряда в полупроводниках и полупроводниковых наносистемах. Экспериментальные исследования в данном направлении ведутся широким фронтом во многих лабораториях мира, что обуславливается как фундаментальным интересом к данной области, так и перспективой создания приборов для квантовой обработки информации, использующих спиновую степень свободы. Вследствие этого теоретические результаты, полученные в диссертации Д. С. Смирнова, безусловно являются весьма актуальным и востребованными в современной физике полупроводников.

Диссертация состоит из Введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Во Введении формулируется основная цель диссертационной работы: теоретическое описание спиновых флуктуаций носителей заряда и их комплексов в полупроводниковых наноструктурах. Обосновывается научная новизна и практическая значимость работы,

сформулированы основные положения, выносимые на защиту, кратко описана структура диссертации.

Первая глава посвящена описанию спиновых флуктуаций электронов и дырок, локализованных в квантовых точках или на примесных центрах, в условиях термодинамического равновесия с учётом сверхтонкого взаимодействия с ядрами кристаллической решётки. Проанализировано влияние внешнего магнитного поля на электронные спиновые шумы. Сопоставлены два метода расчёта спектра спиновых флуктуаций: квазиклассический, пренебрегающий спиновой динамикой ядер, и квантовомеханический, основанный на численном разложении оператора эволюции по полиномам Чебышёва. Теоретические расчёты также сопоставлены с экспериментальными данными, в результате чего определены g -факторы носителей заряда, константы сверхтонкого взаимодействия и скорости спиновой релаксации, не связанной с электронно-ядерным взаимодействием. Также в первой главе построена теория спинового шума электронов в нулевом магнитном поле, учитывающая обменное взаимодействие между носителями заряда, локализованными на соседних центрах, которое, как показано, приводит к эффективному увеличению времени спиновой когерентности в системе.

Вторая глава посвящена теоретическому описанию электронных спиновых флуктуаций в условиях динамической поляризации ядер. Такая система является неравновесной, поэтому к ней, вообще говоря, не может быть применена флуктуационно-диссипационная теорема. При этом, как показано Д. С. Смирновым, спектры спинового шума содержат информацию о спиновой динамике ядер, которую нельзя извлечь из спиновой восприимчивости системы. Показано, что степень поляризации ядер, превышающая 50%, приводит к подавлению ядерных спиновых флуктуаций и драматическому сужению пика спиновой прецессии в спектре спинового шума электронов. Предложен протокол спектроскопии спинового шума с временным разрешением, позволяющий исследовать ядерную спиновую динамику измеряя спектры спиновых флуктуаций резидентных носителей заряда. В главе 2 также продемонстрировано, что распространение циркулярно поляризованного света в области прозрачности полупроводника приводит к возникновению эффективного магнитного поля, направленного вдоль направления распространения луча – динамическому эффекту Зеемана. Данный эффект позволил Д. С. Смирнову объяснить на первый взгляд загадочные экспериментальные результаты, полученные в Санкт-Петербургском государственном университете.

В третьей главе рассматриваются спиновые шум в другой неравновесной ситуации, когда поглощение зондирующего луча приводит к генерации дополнительных электрон-

дырочных пар в системе. Показано, что это приводит как к сокращению среднего времени спиновой релаксации и модификации формы спектров спинового шума, так и к уменьшению интегральной мощности флуктуаций. В этой главе помимо ансамблей квантовых точек рассмотрена система состоящая из одиночной квантовой точки с резидентным электроном, помещённой в микрорезонатор. В такой системе может реализоваться режим сильной связи между трионным резонансом квантовой точки и фотонным резонансом микрорезонатора. Теоретическое описание такой системы требует учёта квантования электромагнитного поля. Показано, что спектры флуктуаций коэффициента пропускания света через такую структуру содержат информацию как о спиновой динамике системы, так и о статистике фотонов и структуре поляритонных состояний.

В четвёртой главе рассматривается спиновая динамика и спиновые флуктуации двумерных электронов в предельно неравновесной ситуации, когда реализуется режим стриминга в квантовой яме, с учётом спин-орбитального взаимодействия. В этой системе идентифицированы собственные спиновые моды и показано, что спектр спинового шума состоит из набора пиков, положения и ширины которых определяются частотами собственных мод и временами их жизни.

По диссертации имеются следующие замечания:

1. В диссертации в разделе 2.3 обсуждается механизм возникновения «оптического поля», связанный с перенормировками спектра электронов в поле электромагнитной волны. Неясно, может ли возникновение оптического поля обуславливаться обменным взаимодействием носителей заряда с виртуальными электрон-дырочными парами, возникающими при распространении света в области прозрачности?

2. Неясно, согласуется ли расчёт фактора усиления электромагнитного поля в резонаторе по формулам (2.29) и (2.30) с простой оценкой $f^2=Q$?

3. При обсуждении спиновых флуктуаций электронов в условиях динамической поляризации ядер отсутствует анализ влияния сверхтонкого взаимодействия с электронным спином на динамику спинов ядер.

Указанные замечания носят технический характер и не снижают общего очень хорошего впечатления о работе и не влияют на её положительную оценку. Диссертационная работа Д. С. Смирнова написана ясным языком и хорошо оформлена.

В целом, диссертационная работа Д. С. Смирнова выполнена на очень высоком и современном научном уровне и является весомым вкладом в теорию спиновых флуктуаций в полупроводниках. Основные результаты этой работы опубликованы в ведущих реферируемых научных журналах (Phys. Rev. B, Phys. Status Solidi B, Scientific

Reports, ФТТ), доложены на многих международных и Российских конференциях, они хорошо известны и признаны специалистами. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при исследовании спиновых свойств полупроводников в Физическом институте им. П.Н. Лебедева, ИФТТ РАН, ИОФ РАН, Сколтехе, а также в других научных учреждениях.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертации. Представленная диссертация соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Ее автор Дмитрий Сергеевич Смирнов несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - Физика полупроводников.

Доклад Д. С. Смирнова по материалам диссертации был представлен на научном семинаре Центра фотоники и квантовых материалов 21 ноября 2017 года. Отзыв составлен по итогам обсуждения этого доклада и изучения текстов диссертации и автореферата.

Отзыв составил Гиппиус Николай Алексеевич
д.ф.-м.н., профессор Центра фотоники и квантовых материалов
Автономной некоммерческой образовательной организации
высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»
143026, Москва, территория инновационного центра
«Сколково», ул. Нобеля, 3,
тел. +7 (495) 280-1481 доб. 3461 (рабочий)