



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

В диссертационный совет
Д002.205.02
при ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Отзыв

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого **Фирсова Дмитрия Анатольевича** 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

Актуальность. Изучение спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах лежит в основе развития спинтроники – области науки, исследующей процессы генерации, переноса и детектирования спина электрона. В связи с этим разработка новых методов изучения спиновой динамики носителей заряда представляет несомненный интерес. В последние годы интенсивно развивается новый метод исследования спиновых явлений – спектроскопия спиновых шумов или спиновых флуктуаций. Методика анализа спектра спиновых флуктуаций по спектру шумов фарадеевского вращения является относительно несложной, при этом она позволяет определять целый ряд параметров спиновой системы, что определяет преимущества этой методики перед более развитыми традиционными методами исследования спиновой динамики (методики *spin-probe*, ядерного магнитного резонанса, малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов и т. д.). Развитие методики спектроскопии спиновых флуктуаций сопровождается публикацией значительного числа экспериментальных работ, однако теория спиновых флуктуаций в наноструктурах, учитывающая различные факторы, например, локализацию носителей заряда, влияние обменного взаимодействия, неравновесные внешние условия, остается до конца не разработанной. Диссертационная работа посвящена теоретическому описанию спиновых флуктуаций

носителей заряда в наноструктурах в равновесных и неравновесных условиях. Значительное внимание уделяется локализованным носителям заряда, учитывается динамическая поляризация ядер, изучается режим стриминга. Таким образом, тема диссертационной работы, несомненно, является актуальной, а сама работа представляется необходимой и своевременной.

Новизна и достоверность результатов. В работе получен ряд новых научных результатов. Приведу лишь некоторые из них, представляющиеся мне наиболее важными и интересными.

Первая глава диссертации посвящена развитию теории спиновых флуктуаций локализованных носителей заряда. Для случая локализации электронов и дырок в квантовых точках впервые получены результаты с учетом сверхтонкого взаимодействия, позволившие определить величины g -факторов носителей заряда, константы сверхтонкого взаимодействия и времена спиновой релаксации. Учет обменного взаимодействия резидентных электронов проводился для электронов, локализованных на донорах. В этом случае для описания спиновых флуктуаций была предложена модель кластеров, позволившая описать конкуренцию обменного и сверхтонкого взаимодействий.

Описанные выше результаты были получены для равновесных систем. Несомненным достоинством работы является развитие теории спиновых шумов для неравновесных систем. Были получены спектры спинового шума в условиях динамической поляризации ядер, позволившие определить скорость ядерной спиновой релаксации. Разработана теория динамического эффекта Зеемана, заключающегося в расщеплении спиновых электронных состояний в сильном электромагнитном поле.

В условиях, когда в неравновесном состоянии находится электронная подсистема при оптической генерации экситонов и трионов также был рассчитан спектр спиновых флуктуаций носителей заряда, локализованных на примеси.

Особо хотелось бы выделить результаты по спиновому шуму в условиях стриминга двумерных электронов. Периодическое движение носителя заряда в импульсном пространстве в условиях стриминга уже было использовано для генерации излучения в объемных полупроводниках в терагерцовом диапазоне частот. Сильная анизотропия функции распределения электронов при стриминге в условиях спин-орбитального взаимодействия приводит к возникновению интересных спин-зависимых явлений. В работе показано, что спектр спиновых шумов при стриминге, в отличие от равновесной ситуации, состоит из набора пиков, положения которых определяются временем пролета пассивной области.

Достоверность основных результатов работы не вызывает сомнений. Следует особо отметить внимание автора к экспериментальному подтверждению полученных теоретических результатов. Подавляющее

большинство полученных результатов хорошо согласуется с результатами эксперимента, что подтверждает правильность основных выводов работы.

Научная и практическая значимость работы высока и несомненна. Она отражена в предыдущих разделах отзыва. Добавим, что развитая в работе теория спектроскопии спиновых шумов в наноструктурах в совокупности с экспериментальными результатами позволяет определять ряд важных параметров спиновой динамики электронов и дырок, а также ядер кристаллической решетки, таких как времена продольной и поперечной релаксации, константы сверхтонкого взаимодействия и величины g-факторов.

Замечания и вопросы.

1. В работе показано, что циркулярно-поляризованный свет в отсутствие поглощения вызывает т. н. динамический эффект Зеемана, проявляющийся в спиновом расщеплении электронных состояний. В диссертации отмечается, что в ряде публикаций других авторов подобное явление называется динамическим эффектом Штарка. Было бы желательно провести сравнение этих двух эффектов.

2. При расчетах спиновых флуктуаций в условиях стриминга автор пренебрегает проникновением электрона в активную область, считая, что испускание оптического фона происходит мгновенно. Однако это условие заведомо не выполняется в сильных электрических полях, в том числе, в таких полях, для которых получен ряд результатов работы.

3. В условиях стриминга в сильном электрическом поле происходит интенсивное испускание оптических фононов. Это может привести к накоплению неравновесных оптических фононов в образце. Может ли это явление повлиять на полученные результаты?

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-зависимых явлений в полупроводниках и наноструктурах. К достоинствам работы следует отнести четкую структуру диссертации, формулировку основных и промежуточных результатов, хороший язык изложения.

Автореферат и статьи, опубликованные в ведущих научных журналах, правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации.

Таким образом, диссертация Смирнова Дмитрия Сергеевича полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (п. 9 Положения о

присуждении ученой степени, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013, ред. от 30.07.2014), а он сам, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 «Физика полупроводников».

Заведующий кафедрой физики полупроводников
и наноэлектроники, профессор, доктор физ.-мат. наук
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Адрес: 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
E-mail: dmfir@rphf.spbstu.ru
Тел.: +7-921-798-8231

Дмитрий Анатольевич Фирсов

25.12.2017