

"УТВЕРЖДАЮ"
Директор Института физики
твёрдого тела РАН
д.ф.-м.н. А.А. Левченко
_____ 2017 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твёрдого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН) на диссертацию Пошакинского Александра Валерьевича «Электронная спиновая динамика и корреляционные эффекты в полупроводниковых наносистемах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Диссертационная работа посвящена решению ряда теоретических задач, связанных со спин-зависимыми эффектами в квазидвумерных электронных системах, созданных на основе полупроводниковых гетероструктур. Исследования в этой области, называемой в настоящее время спинтроникой, представляют значительный интерес для фундаментальной науки и, кроме того, весьма востребованы с точки зрения возможных приложений, определяемых главным образом перспективой создания новых систем для хранения, обработки и передачи информации.

Уже “в первом приближении” ознакомление с представленной работой позволяет отметить два ее несомненных достоинства: это, с одной стороны, **высокий методический уровень** проводимых теоретических расчетов и, с другой стороны, **высокая степень актуальности** полученных результатов. Последняя отражается в том, что большая их часть либо сопоставляется с уже имеющимися современными экспериментальными данными, либо обосновывается их дальнейшее использование в возможных экспериментальных исследованиях. Автор, таким образом, проявляет себя не только как высококвалифицированный физик-теоретик, но и как исследователь с общим широким кругозором, хорошо информированный о месте, которое его результаты занимают или могут занимать в соответствующей области квантовой электроники. Результаты диссертации могут быть использованы в Институте физики твёрдого тела РАН, Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Институте физики микроструктур РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, МГУ, СПбГУ и других организациях, занимающихся исследованиями в области физики полупроводников и наноструктур.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключение и списка цитируемой литературы.

Введение содержит общую характеристику работы. Дана оценка современного состояния исследований по выбранной теме и обоснована ее актуальность. Приведены весомые аргументы в пользу научной новизны и практической значимости результатов, изложенных в диссертации. Перечислены основные положения, выносимые на защиту. Дан общий план подачи материала с разбивкой по главам.

Главными ключевыми словами первых трех глав, безусловно, являются «спин-орбитальное взаимодействие Рашбы и Дрессельхауза».

В материале **первой главы**, названной «Спиновая динамика электронов в квантовых ямах», следует отметить два результата: (i) предсказание новой, чисто “спин-орбитальной”, аномалии в эффекте Ханле, проявляющейся в немонотонности кривой Ханле (зависимости величины спиновой поляризации от внешнего поперечного магнитного поля), а именно в наличии пика, обусловленного замедлением спиновой релаксации электронов при частоте прецессии спина во внешнем магнитном поле, совпадающей с частотой прецессии в эффективном спин-орбитальном поле; (ii) построение теории спиновой релаксации в квантовых ямах с анизотропным рассеянием, которая приводит к некоторому соотношению общего вида между тензором скоростей спиновой релаксации и тензором проводимости.

Во **второй главе** «Пространственные корреляции спиновой плотности в двумерном электронном газе» развита теория спиновых флуктуаций в двумерном газе со спин-орбитальным взаимодействием. Рассчитаны пространственно-временные корреляционные функции флуктуаций спиновой плотности в диффузионном и баллистическом режимах. В частности, показано, что при близких по величине полях Рашбы и Дрессельхауза пространственные корреляции флуктуаций спиновой плотности могут резко возрасти. Тем самым предсказан и обоснован режим “устойчивой спиновой спирали” в флуктуациях спиновой плотности.

Третья глава «Оптическая ориентация спинов и генерация токов» посвящена эффекту “дрожащего движения” электронов в системе со спин-орбитальным взаимодействием во внешнем магнитном поле. Этот эффект, формально схожий с предсказанным еще Э. Шрёдингером явлением релятивистского “дрожания” электрона, описываемого уравнением Дирака («Zitterbewegung», 1930 г.), приводит в полупроводниковой системе к появлению переменного “спин-гальванического” тока. Рассчитана амплитуда этого тока, вызванного когерентным “дрожанием” спин-поляризованных электронов, которая оказывается намного большей, чем усредненная по времени величина, определяющая постоянный ток, связанный с поперечным (по отношению к направлению спиновой поляризации) дрейфом.

Четвертая и пятая главы диссертации посвящены нульмерным электронным объектам. В **четвертой главе** «Тонкая структура дефектов со спином $3/2$ в карбиде кремния» использован теоретико-групповой анализ для описания тонкой структуры исследуемых дефектов во внешнем магнитном поле. Построен эффективный спиновый гамильтониан, описывающий центр в соответствующем атомарном окружении гексагонального политипа SiC. Объяснены некоторые результаты, полученные в экспериментах по оптически детектируемому магнитному резонансу. В частности, обосновано появление “запрещенных” линий, отвечающих переходам между уровнями с отличающимися на 2 проекциями спина. Объяснен также эффект возникновения антипересечения этих уровней при определенных экспериментальных условиях.

В **пятой главе** изучается «Биекситонный механизм фотонной блокады». Объектом изучения является ансамбль квантовых точек, помещенных в оптический микрорезонатор. Каждая из точек представляет собой двухуровневую систему, в которой может оптически возбуждаться либо один экситон, либо биекситон, представляющий собой пару взаимодействующих экситонов с противоположными проекциями спинов на ось резонатора. Предложена микроскопическая модель, описывающая эту систему, на основе которой исследовано прохождение пар фотонов через микрорезонатор с учетом биекситонной нелинейности. Установлено, что поскольку корреляционная функция прошедшего линейно поляризованного света зависит от энергии связи биекситона немонотонным образом, то путем подстройки энергии биекситона можно реализовать режим “фотонной блокады”. Эффект в определенном смысле перекликается с явлением кулоновской блокады для квантовых точек, но в данном случае речь идет не об электронном транспорте, а о транспорте фотонов через микрорезонатор.

В **Заключении** автор подводит итоги, обобщает основные результаты работы и приводит список своих публикаций.

Следует отметить, что все результаты работы А.В. Пошакинского являются оригинальными и **новыми**. Они представляют собой тщательно выполненное и глубокое по содержанию исследование, выполненное на самом современном уровне, вносящее существенный вклад в наше понимание спин-зависимых процессов, происходящих в электронных системах. Надежность и достоверность материалов диссертации не вызывают сомнений. Основная их часть своевременно опубликована в международных реферируемых журналах, имеющих весьма высокий “impact factor”. Кроме того, автор докладывал свои результаты на многих российских и международных научных конференциях, а также на семинарах ведущих научных групп России и Европы. В частности, его доклад по материалам предлагаемой к защите диссертации был заслушан на заседании теоретического семинара ИФТТ РАН 13 ноября 2017 года.

Текст диссертационной работы хорошо написан стилистически. Попутно с изложением результатов дается обширный литературный обзор (всего приводятся ссылки на 133 статьи, относящиеся к теме работы). Наглядность представления обеспечивается значительным числом хорошо выполненных рисунков и графиков. Автореферат правильно и полно отражает содержание работы.

К диссертации имеются следующие замечания:

1. Отсутствие общего списка обозначений, используемых в тексте, что, учитывая обширность докладываемого материала (ранее изложенного в девяти публикациях автора), затрудняет чтение. (Особенно это существенно, когда разные величины обозначаются одной буквой (например, прописной `омега`), но при этом различаются лишь нижним индексом.)
2. На рисунке 3.2 кривые, соответствующие различным величинам магнитного поля, по-видимому, сдвинуты по вертикали для наглядности, но в тексте это не пояснено.
3. При описании спиновой динамики двумерного электронного газа автор пренебрегает многочастичными эффектами. Следовало бы обсудить применимость подобного приближения, а также описать возможное влияние межчастичного взаимодействия на описанные в диссертации эффекты.
4. Для описания процессов релаксации в диссертации используется модель точечных примесей, в то время как в современных квантовых ямах с высокой подвижностью основную роль может играть плавный случайный электростатический потенциал. Следовало бы обсудить, как вид потенциала влияет на результаты.

Сделанные замечания носят характер рекомендаций и не снижают общей, высокой, оценки диссертации.

Итак, по значимости и актуальности полученных результатов диссертационная работа А.В. Пошакинского удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор достоин присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Отзыв утвержден на Ученом Совете ИФТТ РАН, протокол №

Отзыв составили:

Старший научный сотрудник теоретического
отдела ИФТТ РАН,
кандидат физ.-мат. наук
Дикман Сергей Михайлович (dickmann@issp.ac.ru)

Главный научный сотрудник лаборатории неравновесных
электронных процессов ИФТТ РАН,
академик РАН, доктор физ.-мат. наук
Кукушкин Игорь Владимирович (kukush@issp.ac.ru)

Адрес организации:

ИФТТ РАН,
г. Черноголовка, Московская обл, ул. Академика Осипьяна 2, 142432 Россия
Факс: +7(496)5228160, 8(496)5221982.
Телефон: 8(496)5221982, +7(906)0954402.
E-mail: adm@issp.ac.ru