

На правах рукописи



**ПОШАКИНСКИЙ АЛЕКСАНДР ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**ЭЛЕКТРОННАЯ СПИНОВАЯ ДИНАМИКА  
И КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ  
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСИСТЕМАХ**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном  
учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук

Научный руководитель:

**Тарасенко Сергей Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты:

**Юдсон Владимир Исаакович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), главный научный сотрудник Теоретического отдела

**Югова Ирина Анатольевна**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», доцент кафедры Физики твердого тела

Ведущая организация:

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики твердого тела Российской академии наук**

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе и на сайте [www.ioffe.ru](http://www.ioffe.ru).

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

Сорокин Л. М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время значительные усилия сосредоточены на экспериментальном и теоретическом изучении спиновой динамики электронов в полупроводниковых наноструктурах. Это связано как с фундаментальным интересом к механизмам создания и процессам релаксации неравновесного спина, так и с возможным практическим применением разработанных методов в области спинтроники — нового раздела квантовой электроники, занимающегося изучением спин-зависимых явлений в твердом теле и возможностями их использования для хранения и обработки информации [1]. Основными задачами в данной области являются изучение спиновых свойств полупроводников и полупроводниковых гетероструктур, особенностей спин-орбитального и обменного взаимодействий, динамики неравновесного спина, а также поиск эффективных оптических и электрических способов управления спинами носителей.

Традиционным способом исследования спиновых свойств полупроводниковых наноструктур является техника «накачка–зондирование», позволяющая создавать неравновесную спиновую поляризацию и детектировать ее динамику при помощи оптических импульсов. В последние годы активно развиваются слабозмущающие методы изучения спиновых свойств, которые не требуют внешнего возбуждения системы. Данные методы заключаются в детектировании флуктуации спина в состоянии, близком к термодинамическому равновесию [2]. Благодаря фундаментальной связи между флуктуациями и диссипационными процессами, исследование корреляционных функций спинового шума позволяет получать информацию о процессах спиновой динамики и релаксации.

Помимо оптических способов спиновая поляризация носителей заряда может создаваться и детектироваться электрическими методами. Так за счет спин-гальванического эффекта неравновесная спиновая поляризация в структурах со спин-орбитальным взаимодействием может преобразовываться в электрический ток [3]. И наоборот, протекание тока может приводить к ориентации спинов носителей заряда.

Особый интерес привлекают оптические и спиновые свойства оди-

ночных квантовых объектов, таких как квантовые точки, NV дефекты в алмазе и вакансии в карбиде кремния. Спином в таких объектах можно управлять при помощи импульсов света, а времена релаксации спина могут достигать нескольких секунд, что делает их перспективными кандидатами на роль кубитов [4]. Важной задачей является изучение тонкой структуры электронных уровней и ее влияния на оптические свойства одиночных квантовых объектов.

Цель настоящего исследования заключается в теоретическом изучении спиновой динамики, спин-гальванических и поляризационно-зависимых оптических эффектов в полупроводниковых структурах с квантовыми ямами, квантовыми точками и спиновыми центрами.

Научная новизна и практическая значимость работы состоят в том, что в ней впервые описан аномальный эффект Ханле в двумерном электронном газе с сильным спин-орбитальным взаимодействием, разработана теория спиновой динамики электронов в структурах с анизотропным рассеянием, описаны пространственно-временные флуктуации спиновой плотности двумерного электронного газа в квантовых ямах. Предсказан и обнаружен спин-гальванический ток, обусловленный дрожащим движением электронов. Установлена тонкая структура дефектов со спином  $3/2$  в карбиде кремния. Впервые рассчитана матрица рассеяния пары фотонов микрорезонатором с ансамблем квантовых точек и продемонстрирована возможность реализации биэкситонной фотонной блокады. Сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными позволило определить константы спин-орбитального взаимодействия в квантовых ямах и параметры спинового гамильтониана дефектов в карбиде кремния. Описанные особенности тонкой структуры дефектов в карбиде кремния могут быть использованы для сверхточной магнитометрии.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В квантовых ямах с сильным спин-орбитальным взаимодействием деполяризация электронного спина в магнитном поле описывается немонотонной кривой Ханле.
2. Пространственные и временные флуктуации спиновой плотности в двумерном электронном газе взаимосвязаны как в баллистическом, так и в диффузионном режиме транспорта электронов.
3. В полупроводниках с линейным по волновому вектору спин-орбитальным расщеплением спектра во внешнем магнитном поле возникает дрожащее движение электронов, аналогичное эффекту *Zitterbewegung* для релятивистских частиц.
4. Тригональная симметрия дефекта со спином  $3/2$  приводит к модификации правил отбора для магнито-дипольных переходов и возникновению в спектре магнитного резонанса линий, соответствующих переходам с изменением проекции спина на  $\pm 2$ .
5. В микрорезонаторе с большим числом квантовых точек биэкситонный резонанс приводит к эффекту фотонной блокады: корреляционная функция интенсивности прошедшего света становится меньше единицы.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на рабочих семинарах ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ИОФ им. А.М. Прохорова, университетов Вюрцбурга, Дортмунда и Аахена в Германии, Университета Пьера и Марии Кюри в Париже, Лаборатории фотоники и наноструктур (Маркуси, Франция), научного центра IBM Research в Цюрихе, на Международной конференции по физике полупроводников (ICPS-2016, Пекин, Китай), Российских конференциях по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 2013; Звенигород, 2015), международных симпозиумах «Nanostructures: Physics and Technology» (Санкт-Петербург, 2014, 2016, 2017), международной конференции «Spin physics, spin chemistry and spin technology» (Санкт-Петербург, 2015), международных школах «Symmetry and Structural Properties of Condensed Matter» (Жешув, Польша, 2014), «Single dopants» (Санкт-Петербург, 2014), «International School on Spin-Optronics» (Санкт-Петербург, 2012),

«International Workshop on Relativistic Phenomena in Solids» (Ле Мон-Дор, Франция, 2012).

Публикации. По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 9 печатных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и списка литературы. Она содержит 130 страниц текста, включая 35 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 133 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цель и научная новизна работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертации посвящена теоретическому описанию динамики неравновесной спиновой поляризации двумерного электронного газа. В §1.1 представлен обзор различных механизмов релаксации спина в полупроводниковых структурах. В двумерных системах без центра инверсии доминирующим является механизм Дьяконова–Переля [5]. Этот механизм заключается в прецессии электронных спинов в эффективном магнитном поле, обусловленном спин-орбитальным взаимодействием. Направление поля зависит от волнового вектора электрона  $\mathbf{k}$  и меняется при рассеянии электрона по импульсу. Микроскопическое описание механизма Дьяконова–Переля на основе кинетического уравнения для функции распределения спина (обзор) дано в §1.2.

В §1.3 изучено влияние внешнего магнитного поля, лежащего в плоскости структуры, на спиновую релаксацию электронов в квантовых ямах (001) с линейными по волновому вектору  $\mathbf{k}$  спин-орбитальными расщеплениями Рашбы и Дрессельхауза. На рис. 1 показаны рассчитанные кривые Ханле, описывающие зависимость нормальной компоненты спиновой поляризации от магнитного поля в условиях непрерывной генерации спина вдоль нормали структуры. Расчет представлен для квантовых ям с изотропным спин-орбитальным расщеплением

Рашбы  $\hbar\Omega_R$  на уровне Ферми вырожденного электронного газа. Характер кривых Ханле существенно зависит от силы спин-орбитального взаимодействия и определяется параметром  $\Omega_R\tau$ , где  $\tau$  — время релаксации носителей по импульсу. При  $\Omega_R\tau \ll 1$  кривые описываются функцией Лоренца — спиновая поляризация монотонно уменьшается с ростом поля. В структурах с большим значением параметра  $\Omega_R\tau$  зависимость спиновой поляризации от магнитного поля становится немонотонной. Наличие пика в кривых Ханле обусловлено замедлением спиновой релаксации, когда частота прецессии спина во внешнем магнитном поле  $\Omega_L$  совпадает с частотой прецессии в эффективном спин-орбитальном поле  $\Omega_R$  [A1].

В §1.4 построена теория спиновой релаксации электронов в квантовых ямах с анизотропным рассеянием. Получено общее соотношение между тензором скоростей спиновой релаксации  $\mathbf{\Gamma}$  и тензором проводимости  $\boldsymbol{\sigma}$ :

$$\mathbf{\Gamma} = \frac{4\pi m^*}{e^2 \hbar^2} [\mathbf{I}_3 \text{Tr}(\boldsymbol{\beta} \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\beta}^T) - \boldsymbol{\beta} \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\beta}^T], \quad (1)$$

где  $e$  и  $m^*$  — заряд и эффективная масса электрона,  $\mathbf{I}_3$  — единичная матрица  $3 \times 3$ ,  $\boldsymbol{\beta}$  — тензор спин-орбитальных констант  $3 \times 2$ , описывающий линейную связь между частотой прецессии в эффективном магнитном поле и волновым вектором электрона,  $\boldsymbol{\Omega}_k = (2/\hbar) \boldsymbol{\beta} \mathbf{k}$ . Анализ собственных значений тензора (1) показывает, что в квантовых ямах кристаллографической ориентации (001) с анизотропной проводимостью наименьшая скорость релаксации нормальной компоненты спина достигается при отличной от нуля спин-орбитальной константе Рашбы, описывающей структурную асимметрию ямы. В работе [A2] установлено также, что в структурах с сильным спин-орбитальным взаимодействием ( $\Omega_k \tau \gtrsim 1$ ) при наличии нецентросимметричных рассеивателей

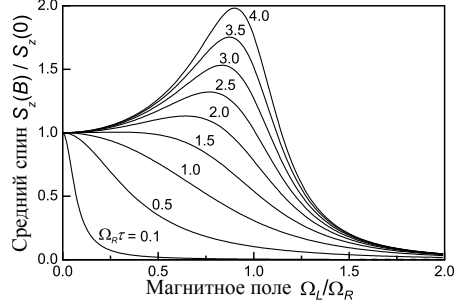


Рис. 1: Зависимости среднего спина электронов в условиях непрерывной оптической ориентации от величины поперечного магнитного поля при различной силе спин-орбитального взаимодействия.

компоненты спина в плоскости квантовой ямы и вдоль оси роста оказываются динамически связанными.

§1.5 посвящен описанию спиновой динамики электронов в квантовых ямах с кристаллографической ориентацией (110). Такие системы интересны тем, что в них эффективное магнитное поле Дрессельхауза направлено по оси роста и, соответственно, не вызывает релаксацию нормальной компоненты электронного спина [5]. Это приводит к рекордно длинным (для квантовых ям) временам жизни спина, достигающим сотен наносекунд [6]. Конечное время релаксации нормальной компоненты спина в квантовых ямах (110) связывают с наличием поля Рашбы, вызванного макроскопической асимметрией структуры или всегда имеющейся микроскопической асимметрией, обусловленной, например, флуктуациями распределения примесей.

В асимметричных квантовых ямах компоненты спина в плоскости структуры и перпендикулярно к ней оказываются связанными; при этом время жизни спина немонотонно зависит от подвижности электронов [A3]. При наличии внешнего магнитного поля, направленного по оси роста структуры, конкуренция циклотронного движения и ларморовской прецессии приводит к немонотонной зависимости времени жизни спина от величины магнитного поля. Обработка экспериментальных данных по спиновой динамике в квантовых ямах GaAs/AlGaAs, полученных в Университете Тулузы, подтвердила справедливость разработанной теории и позволила определить константы спиновых расщеплений [A4].

**Вторая глава** диссертации посвящена теории термических флуктуаций спиновой плотности в двумерном электронном газе со спин-орбитальным взаимодействием. Обзор современного состояния метода спектроскопии спиновых шумов в наносистемах приведен в §2.1. Исследование спинового шума в полупроводниках ограничивалось ранее рассмотрением эволюции спиновых флуктуаций во времени. Однако, уже в первых экспериментах по спектроскопии спиновых шумов в электронном газе было установлено, что существенное влияние на динамику спиновых флуктуаций оказывает диффузия электронов [7]. Анализ



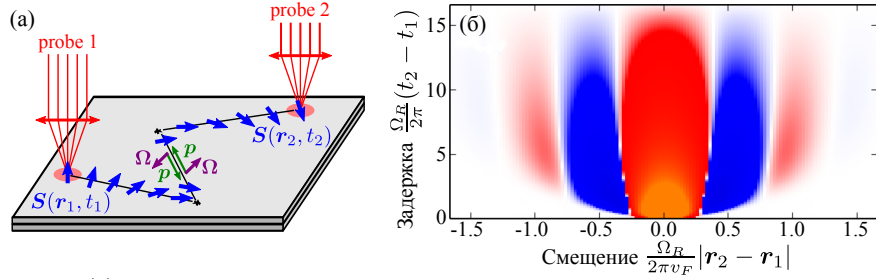


Рис. 2: (а) Схема возможного эксперимента по измерению пространственных корреляций флуктуаций спиновой плотности в квантовой яме. (б) Корреляционная функция нормальной компоненты спина, рассчитанная для случая спин-орбитального взаимодействия Рашбы и диффузионного режима транспорта электронов между точками детектирования ( $\Omega_R \tau = 0.2$ ).

показывает, что временные и пространственные корреляции спиновых флуктуаций, возникающих в электронном газе, взаимосвязаны вследствие броуновского движения электронов и спин-орбитального взаимодействия. Последовательное описание спинового шума в электронном газе с пространственно-временным разрешением проведено в §2.2.

На рис. 2(а) проиллюстрировано распространение спиновых флуктуаций в плоскости квантовой ямы между двумя областями детектирования. Эффективное магнитное поле, обусловленное спин-орбитальным взаимодействием, приводит к повороту электронного спина на угол, зависящий от траектории электрона в реальном пространстве. Корреляционная функция нормальной компоненты спина, рассчитанная в §2.3, показана на рис. 2(б). Корреляции могут быть положительными (красные области) или отрицательными (синие области) в зависимости от среднего угла, на который поворачивается спин электрона при распространении из точки  $\mathbf{r}_1$  в  $\mathbf{r}_2$ .

Наличие пространственных осцилляций коррелятора спиновой плотности свидетельствует о том, что среди всех спиновых волн в двумерном электронном газе наибольшим временем жизни обладают моды с отличным от нуля волновым вектором. В асимметричных квантовых ямах с равными по величине спин-орбитальными константами Рашбы и Дрессельхауза время жизни долгоживущей спиновой моды существенно возрастает. Это связано с реализацией в таких структурах режима

устойчивой спиновой спирали (persistent spin helix [8]). В этом режиме угол поворота электронного спина однозначно связан со смещением электрона в реальном пространстве и не зависит от траектории, что приводит к резкому усилению флуктуаций спиновой плотности [А6].

Важной задачей спиновой физики является управление квантовыми состояниями в наноструктурах при помощи импульсов света. Возбуждая систему последовательностью оптических импульсов с определенными разницей фаз и поляризацией, можно контролируемо заселять квантовые состояния и ориентировать по спину носители заряда и комплексы [9]. В третьей главе диссертации развита микроскопическая теория оптической ориентации спинов и генерации фототоков в электронном газе.

В §3.1 проведен краткий обзор работ в области оптического контроля спиновых состояний. В §3.2 описана генерация импульсами света переменного электрического тока, обусловленного явлением дрожащего движения в системе с линейным по волновому вектору спин-орбитальным расщеплением спектра. В 1930 г. Э. Шредингером было показано, что оператор скорости свободного релятивистского электрона, описываемого уравнением Дирака, не коммутирует с гамильтонианом [10], поэтому скорость не постоянна, а осциллирует во времени. Данный феномен получил название дрожащего движения (нем. Zitterbewegung), его физической причиной является интерференция решений уравнения Дирака с положительными и отрицательными энергиями. Непосредственное детектирование дрожащего движения релятивистского электрона неосуществимо в силу соотношения неопределенности.

Эффект, аналогичный дрожащему движению релятивистских частиц, может возникать для электронов в полупроводниковых структурах, описываемых гамильтонианом, имеющим формальное сходство с дираковским [11]. Так как величины энергетических расщеплений в полупроводниках гораздо меньше, дрожащее движение ожидается на частотах, доступных для экспериментального исследования. Тем не менее, в виду сложности детектирования движения отдельных электронов, данный эффект ранее экспериментально обнаружен не был.

В §3.2.1 рассмотрено движение электрона в системе со спин-орбитальным взаимодействием во внешнем магнитном поле  $\mathbf{B} \parallel x$ , которое описывается гамильтонианом

$$\hat{H} = \frac{\hbar^2 \hat{\mathbf{k}}^2}{2m^*} + \beta_{xy} \sigma_x \hat{k}_y + \beta_{yx} \sigma_y \hat{k}_x + \frac{\hbar}{2} \Omega_L \sigma_x, \quad (2)$$

где  $\hbar \hat{\mathbf{k}}$  — оператор импульса,  $\sigma_\alpha$  — матрицы Паули. Последнее слагаемое в гамильтониане (2) аналогично массовому слагаемому в гамильтониане Дирака. Оно описывает вызванное внешним магнитным полем зеемановское расщепление состояний при  $\mathbf{k} = 0$  на величину  $\hbar \Omega_L = g \mu_B B_x$ , где  $g$  — эффективный фактор Ланде электрона,  $\mu_B$  — магнетон Бора. Спин-орбитальное взаимодействие вызывает линейные по  $\mathbf{k}$  слагаемые, смешивающие спиновые состояния. Компонента  $x$  оператора скорости  $\hat{v}_x = \hbar \hat{k}_x / m^* + \beta_{yx} \sigma_y / \hbar$  не коммутирует с гамильтонианом. Решение уравнения движения для гейзенберговского оператора скорости в первом порядке по спин-орбитальным константам дает

$$\hat{v}_x(t) = \hat{v}_x(0) + \frac{\beta_{yx}}{\hbar} [\sigma_y (\cos \Omega_L t - 1) - \sigma_z \sin \Omega_L t]. \quad (3)$$

Осциллирующая добавка к скорости электрона описывает явление дрожащего движения в отсутствие внешних переменных сил. Осцилляции происходят на частоте  $\Omega_L$ , соответствующей зеемановскому расщеплению, и вызваны интерференцией спиновых состояний. Электрон дрожит синхронно с вращением его спина, как показано на рис. 3.

В состоянии термического равновесия каждый электрон испытывает дрожащее движение со своей случайной фазой, так что макроскопический ток отсутствует. Однако, методом оптической ориентации можно создать электроны в определенном спиновом состоянии. Дрожание поляризованных электронов происхо-

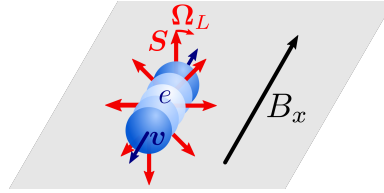


Рис. 3: Иллюстрация дрожащего движения электрона во внешнем магнитном поле  $B_x$ . Прецессия спина происходит синхронно со смещением электрона в реальном пространстве.

дит когерентно и приводит к появлению в системе электрического тока с плотностью [A9]

$$j_x = -\frac{2en\tau}{\hbar}\beta_{yx}\Omega_L s_z, \quad (4)$$

где  $\tau$  — время релаксации импульса,  $n$  — концентрация электронов,  $s_z$  — их средний спин. Последовательный расчет тока поляризованных по спину электронов в рамках формализма спиновой матрицы плотности выполнен в §3.2.2. В §3.2.3 теоретические предсказания сопоставлены с результатами измерений, проведенных в Университете Аахена. Экспериментально обнаруженные синфазные осцилляции тока и спиновой поляризации после возбуждения системы циркулярно поляризованным импульсом качественно и количественно подтверждают справедливость развитой теории когерентного дрожащего движения электронов.

В §3.3 построена теория оптической ориентации электронов и генерации нестационарных фототоков в квантовых ямах последовательностью двух не перекрывающихся во времени когерентных линейно поляризованных импульсов света. Показано, что энергетическое распределение спина фотоэлектронов содержит осцилляции с периодом, обратно пропорциональным времени задержки между импульсами [A5]. Изучено влияние на спиновую поляризацию и фототок внешнего магнитного поля и спин-орбитального расщепления.

Интересными спиновыми свойствами обладают одиночные квантовые объекты, такие как квантовые точки или дефекты в объемных полупроводниках. Одной из перспективных систем с точки зрения возможных применений в оптоэлектронике являются дефекты в карбиде кремния (SiC). **Четвертая глава** диссертации посвящена теоретическому изучению тонкой структуры кремниевых вакансий в SiC. Ключевые свойства этих дефектов описаны в §4.1. Особенно важна возможность селективно заселять их спиновые состояния оптической накачкой. При этом такое оптическое выстраивание дефектов по спину имеет место даже при комнатной температуре [4].

Кремниевые вакансии в гексагональном политипе  $4H$ -SiC имеют спин  $3/2$ , а их локальная симметрия описывается точечной группой

$C_{3v}$ . В §4.2 методом инвариантов построен эффективный спиновый гамильтониан, описывающий тонкую структуру такого центра во внешнем магнитном поле. Ввиду достаточно низкой симметрии и большого спина влияние магнитного поля в общем случае описывается шестью линейно независимыми  $g$ -факторами. Четыре из них присутствовали бы и в аксиальном приближении, а оставшиеся два возникают в меру тригональной пирамидальной асимметрии кристаллического окружения дефекта. Тригональная симметрия центра приводит к смешиванию состояний с проекциями спина  $+3/2$  и  $-3/2$  и делает разрешенными магнито-дипольные переходы с изменением проекции спина на гексагональную ось кристалла на  $\pm 2$ , в то время как в аксиальном приближении разрешены лишь переходы с изменением проекции спина на  $\pm 1$ . В §4.3 теоретически рассчитанные частоты спиновых переходов сопоставлены с экспериментальными спектрами оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) и определены параметры эффективного гамильтониана вакансии.

При определенных величинах внешнего магнитного поля, направленного вдоль гексагональной оси кристалла, спиновые подуровни пересекаются. Приложение небольшого магнитного поля, перпендикулярного к оси, приводит к смешиванию состояний и возникновению антипересечения. Величина расщепления спиновых подуровней в точке антипересечения линейно зависит от перпендикулярной компоненты магнитного поля. Если расщепление уровней, различающихся по проекции спина на 1, возможно и в приближении аксиальной симметрии дефекта, то линейное по полю расщепление уровней, различающихся по проекции спина на 2, происходит лишь в меру тригональной асимметрии, поэтому его величина значительно меньше. Смешивание спиновых подуровней приводит к модификации схемы оптической накачки и изменению интенсивности фотолюминесценции. Детектируя это изменение, можно с высокой точностью измерять малые отклонения магнитного поля от значения, соответствующего антипересечению [A7].

Оптический отклик нульмерных квантовых объектов может оказываться существенно нелинейным даже при небольшой интенсивности

света, в предельном случае — для пары фотонов. В **пятой главе** рассмотрено влияние биэкситонного резонанса на квантовый нелинейный транспорт фотонов через ансамбли квантовых точек в волноводах и микрорезонаторах. В §5.1 приведен обзор современных работ, посвященных эффекту фотонной блокады [12]. Простейшим случаем, когда он реализуется, является взаимодействие света с двухуровневой системой. Двухуровневая система не может излучить или поглотить два фотона одновременно, поэтому в излученном или рассеянном ею свете фотоны летят по одному, т.е. корреляционная функция интенсивности  $g^{(2)}(t) < 1$  на малых временах задержки  $t$ . Когда свет взаимодействует не с одной, а с несколькими двухуровневыми системами, два фотона могут излучаться двумя различными системами одновременно, поэтому явление фотонной блокады отсутствует [13].

В §5.2 описан подход к расчету оптических свойств квантовых объектов, основанный на замене операторов, соответствующих двухуровневой системе, на бозонные операторы с добавлением вспомогательного взаимодействия, исключающего нефизические состояния. С помощью этого метода в §5.3 рассчитана матрица рассеяния, описывающая прохождение двух фотонов через микрорезонатор с квантовыми точками в режиме сильной связи с учетом биэкситонного резонанса.

Благодаря наличию биэкситонного состояния квантовая точка может одновременно поглотить или испустить два фотона с противоположными циркулярными поляризациями. Несмотря на это, при определенных условиях наличие биэкситонного резонанса может приводить к усилению режима фотонной блока-

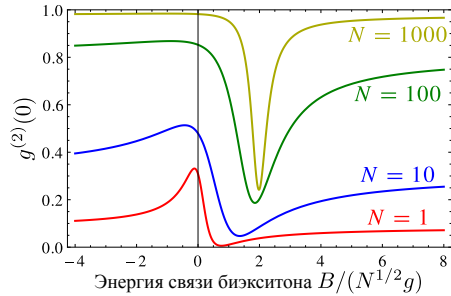


Рис. 4: Зависимость корреляционной функции линейно поляризованного света, прошедшего через микрорезонатор с  $N$  квантовыми точками, от энергии связи биэкситона  $B$  при линейно поляризованном резонансном возбуждении. Расчет выполнен для режима сильной связи,  $g/\Gamma = 10$ , где  $g$  — константа взаимодействия экситонов с модой резонатора,  $\Gamma$  — затухание оптической моды.

ды. Влияние биэкситонного резонанса на фотонную блокаду иллюстрируется на рис. 4, где построена зависимость корреляционной функции второго порядка  $g^{(2)}(0)$  фотонов, прошедших через микрорезонатор с  $N$  квантовыми точками, от энергии связи биэкситона  $B$ . Эта зависимость немонотонная: наименьшее значение  $g^{(2)}(0)$  достигается при совпадении энергии биэкситонного состояния с энергией двухчастичного сверхизлучательного состояния. Возникающее при этом антипересечение уровней обеспечивает отстройку двухфотонных резонансов от удвоенной энергии однофотонных резонансов и реализацию режима фотонной блокады. Провал в зависимости корреляционной функции от  $B$  не исчезает даже с увеличением числа квантовых точек. Таким образом, режим фотонной блокады может быть обеспечен даже для большого числа одинаковых квантовых точек в микрорезонаторе [A8]. В §5.4 показано, что данный результат остается в силе и при наличии не слишком сильных дисперсий энергии экситонов и константы взаимодействия экситонов с оптической модой.

В **Заключении** обобщены основные результаты работы:

1. Показано, что в квантовых ямах с сильным спин-орбитальным взаимодействием деполяризация неравновесного спина в магнитном поле описывается немонотонной кривой Ханле. Максимум спиновой поляризации достигается во внешнем поле, совпадающем по величине с эффективным полем спин-орбитального взаимодействия.
2. Теоретически описана спиновая динамика электронов в двумерных системах с анизотропным рассеянием. Установлено, что тензор скоростей спиновой релаксации определяется тензором проводимости.
3. Развита микроскопическая теория спиновой релаксации электронов в асимметричных квантовых ямах кристаллографической ориентации (110) с однородным и с пространственно флуктуирующим полем Рашбы. Показано, что поле Дрессельхауза приводит к увеличению времени жизни спина.
4. Построена теория пространственно-временных флуктуаций спиновой плотности в двумерном электронном газе со спин-орбитальным взаимодействием в баллистическом и диффузионном режимах

транспорта электронов. Продемонстрировано усиление корреляций флуктуаций спина в условиях долгоживущей спиновой спирали.

5. Предсказан эффект дрожащего движения электронов в структурах с линейным по волновому вектору спин-орбитальным расщеплением спектра во внешнем магнитном поле. Рассчитан нестационарный спин-гальванический ток, обусловленный когерентным дрожащим движением ансамбля поляризованных по спину электронов.
6. Продемонстрирована возможность оптической ориентации электронов и генерации нестационарных фототоков в квантовых ямах последовательностью двух не перекрывающихся во времени когерентных линейно поляризованных импульсов света.
7. Построен эффективный спиновый гамильтониан, описывающий тонкую структуру уровней кремниевой вакансии со спином  $3/2$  в SiC с учетом тригональной симметрии кристаллического окружения. Объяснено появление в экспериментальных спектрах магнитного резонанса вакансий линий, соответствующих переходам с изменением проекции спина на  $\pm 2$ , и антипересечений уровней.
8. Рассчитана матрица рассеяния, описывающая прохождение пары фотонов через оптический микрорезонатор с квантовыми точками с учетом биэкситонной нелинейности. Корреляционная функция прошедшего линейно поляризованного света зависит от энергии связи биэкситона немонотонно. Путем подстройки энергии связи биэкситона можно реализовать режим фотонной блокады для сколь угодно большого числа одинаковых квантовых точек в микрорезонаторе.

Основные результаты работы изложены в публикациях:

- [A1] A.V. Poshakinskiy, S.A.Tarasenko. Spin-orbit Hanle effect in high-mobility quantum wells // Phys. Rev. B **84**, 073301 (2011).
- [A2] A.V. Poshakinskiy, S.A. Tarasenko. Electron spin dephasing in two-dimensional systems with anisotropic scattering // Phys. Rev. B **84**, 155326 (2011).
- [A3] A.V. Poshakinskiy, S.A.Tarasenko. Effect of Dresselhaus spin-orbit coupling on spin dephasing in asymmetric and macroscopically



- symmetric (110)-grown quantum wells // *Phys. Rev. B* **87**, 235301 (2013).
- [A4] G. Wang, A. Balocchi, A.V. Poshakinskiy, C.R. Zhu, S.A. Tarasenko, T. Amand, B.L. Liu, X. Marie. Magnetic field effect on electron spin dynamics in (110) GaAs quantum wells // *New J. Phys.* **16**, 045008 (2014).
- [A5] A.V. Poshakinskiy, S.A. Tarasenko. Excitation of spin density and current by coherent light pulses in QWs // *Письма в ЖЭТФ* **99**, 743 (2014).
- [A6] A.V. Poshakinskiy, S.A. Tarasenko. Spatiotemporal spin fluctuations caused by spin-orbit-coupled Brownian motion // *Phys. Rev. B* **92**, 045308 (2015).
- [A7] D. Simin, V.A. Soltamov, A.V. Poshakinskiy, A.N. Anisimov, R.A. Babunts, D.O. Tolmachev, E.N. Mokhov, M. Trupke, S.A. Tarasenko, A. Sperlich, P.G. Baranov, V. Dyakonov, G.V. Astakhov. All-optical dc nanotesla magnetometry using silicon vacancy fine structure in isotopically purified silicon carbide // *Phys. Rev. X* **6**, 031014 (2016).
- [A8] A.V. Poshakinskiy, A.N. Poddubny. Biexciton-mediated superradiant photon blockade // *Phys. Rev. A* **93**, 033856 (2016).
- [A9] A.V. Poshakinskiy, I. Stepanov, M. Ersfeld, M. Lepsa, E.L. Ivchenko, S.A. Tarasenko, B. Beschoten. Coherent Zitterbewegung of electrons in semiconductor structures triggered by optical pulses // 33rd International Conference on the Physics of Semiconductors (Beijing, China, 2016), Book of Abstracts, part I, p. 362.

#### Список литературы

- [1] *Žutić I., Fabian J., Das Sarma S.* Spintronics: Fundamentals and applications // *Rev. Mod. Phys.* — 2004. — Vol. 76. — P. 323.
- [2] *Zapasskii V. S.* Spin-noise spectroscopy: from proof of principle to applications // *Adv. Opt. Photon.* — 2013. — Vol. 5, no. 2. — P. 131.
- [3] Spin-galvanic effect / S. D. Ganichev, E. L. Ivchenko, V. V. Bel'kov et al. // *Nature*. — 2002. — Vol. 417, no. 6885. — P. 153.

- [4] Room temperature coherent control of defect spin qubits in silicon carbide / W. F. Koehl, B. B. Buckley, F. J. Heremans et al. // *Nature*. — 2011. — Vol. 479, no. 7371. — P. 84.
- [5] Дьяконов М. И., Качоровский В. Ю. Спиновая релаксация двумерных электронов в полупроводниках без центра инверсии // *ФТП*. — 1986. — Т. 20. — С. 178.
- [6] Spin polarization, dephasing, and photoinduced spin diffusion in (110)-grown two-dimensional electron systems / R. Völkl, M. Schwemmer, M. Griesbeck et al. // *Phys. Rev. B*. — 2014. — Vol. 89. — P. 075424.
- [7] Spin Noise Spectroscopy in GaAs (110) Quantum Wells: Access to Intrinsic Spin Lifetimes and Equilibrium Electron Dynamics / G. M. Müller, M. Römer, D. Schuh et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2008. — Vol. 101. — P. 206601.
- [8] Bernevig B. A., Orenstein J., Zhang S.-C. Exact SU(2) Symmetry and Persistent Spin Helix in a Spin-Orbit Coupled System // *Phys. Rev. Lett.* — 2006. — Vol. 97. — P. 236601.
- [9] Access to long-term optical memories using photon echoes retrieved from semiconductor spins / L. Langer, S. V. Poltavtsev, I. A. Yugova et al. // *Nature Photonics*. — 2014. — Vol. 8, no. 11. — P. 851.
- [10] Schrödinger E. Über die kräftefreie Bewegung in der relativistischen Quantenmechanik // *Sitz. Press. Akad. Wiss. Phys.-Math.* — 1930. — Vol. 24. — P. 418.
- [11] Zawadzki W., Rusin T. M. Zitterbewegung (trembling motion) of electrons in semiconductors: a review // *J. Phys.: Condens. Matter*. — 2011. — Vol. 23, no. 14. — P. 143201.
- [12] Strongly Interacting Photons in a Nonlinear Cavity / A. Imamoglu, H. Schmidt, G. Woods, M. Deutsch // *Phys. Rev. Lett.* — 1997. — Vol. 79. — P. 1467.
- [13] Рупасов В. И., Юдсон В. И. К точной теории сверхизлучения Дике: бетевские волновые функции в модели с дискретными атомами // *ЖЭТФ*. — 1984. — Т. 86. — С. 819.