

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф. ИОФФЕ

На правах рукописи

ГЛАЗОВ МИХАИЛ МИХАЙЛОВИЧ

СПИНОВАЯ ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОНОВ И ЭКСИТОНОВ В  
КВАНТОВЫХ ЯМАХ И КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2008

Работа выполнена в Физико-техническом институте  
им. А.Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Ивченко Е.Л.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Козуб В.И.

доктор физико-математических наук, профессор Мамаев Ю.А.

Ведущая организация: Институт физики твердого тела РАН

Защита состоится “27” марта 2008 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании  
диссертационного совета Д 002.205.01 при Физико-техническом институте  
им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу:

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического  
института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан “27” февраля 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

Петров А.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Теоретические и экспериментальные исследования полупроводниковых наноструктур составляют наиболее активно развивающуюся область современной физики конденсированного состояния [1]. Движение носителей заряда в таких структурах ограничено в одном или нескольких направлениях, что приводит за счет эффектов размерного квантования к качественной перестройке энергетического спектра носителей заряда и других квазичастиц. Это существенно сказывается на оптических и кинетических свойствах низкоразмерных систем, приводит к ряду новых физических явлений.

С другой стороны, в физике твердого тела возрастающий интерес привлекают спиновые явления. Понижение симметрии наноструктур по отношению к объемным полупроводникам, с одной стороны, и локализация носителей на меньших масштабах, с другой, увеличивают роль спин-орбитального взаимодействия в таких системах. В последние годы значительные усилия направлены на изучение специфики спин-орбитального взаимодействия в низкоразмерных структурах, на исследование спиновой динамики носителей заряда и их комплексов. Достижения в области оптической ориентации спинов электронов и дырок, инъекции спин-поляризованных носителей в гетероструктуры, управлении спиновой динамикой носителей внешними полями открывают возможности для создания устройств, в основе которых заложено использование дополнительной степени свободы частиц – их спина [2]. Особое внимание привлекает изучение спиновой динамики в квантовых точках, где электроны и дырки демонстрируют очень большие времена спиновой релаксации, в то время как их комплексы (экситоны) теряют свой спин на значительно меньших временных масштабах. Перспективной выглядит возможность создания структур, сочетающих полупроводниковые и магнитные материалы, в частности, квантовых точек, содержащих единичные магнитные ионы [3].

Исследование спиновой динамики носителей заряда в полупроводниковых наноструктурах позволяет извлекать информацию как о кинетических пара-

метрах электронов и дырок (таких как времена релаксации носителей по спину и по импульсу, частоты межчастичных столкновений), так и о тонкой структуре энергетического спектра носителей заряда и их комплексов.

Целью настоящего исследования является изучение кинетических и оптических эффектов в полупроводниковых гетероструктурах: квантовых ямах и квантовых точках – обусловленных процессами спиновой динамики носителей заряда и тонкой структурой их энергетического спектра.

Научная новизна работы состоит в решении конкретных задач:

1. Построить теорию спиновой релаксации электронов проводимости в полупроводниковых квантовых ямах с учетом межчастичного взаимодействия.
2. Изучить влияние внешнего магнитного поля на спиновую динамику электронного газа в квантовых ямах, а также спиновые биения, обусловленные спин-орбитальным расщеплением дисперсионной кривой носителей.
3. Построить теорию оптической ориентации двумерного электронного газа низкой плотности при резонансном возбуждении экситонов и трионов и разработать модель спиновых биений, возникающих в такой системе во внешнем магнитном поле.
4. Исследовать тонкую структуру и спектры фотолюминесценции возбужденных состояний экситона в квантовых точках, в частности, в точках, содержащих единичные магнитные ионы.

Практическая значимость работы заключается в том, что в ней впервые исследовано влияние электрон-электронного взаимодействия на спиновую релаксацию носителей; впервые подробно изучен вопрос о замедлении магнитным полем спиновой релаксации электронов в квантовых ямах; впервые построена теория тонкой структуры возбужденных состояний экситонов в изотропных и анизотропных квантовых точках, в том числе точках, содержащих магнитный ион. Сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными позволяет изучать тонкую структуру энергетического спектра носителей

заряда и их комплексов, а также определять ряд кинетических параметров электронов и дырок.

Основные положения выносимые на защиту:

1. Электрон-электронные столкновения, сохраняющие полный импульс ансамбля носителей, замедляют спиновую релаксацию электронного газа в механизме Дьяконова-Переля так же, как и процессы приводящие к потере полного импульса системы.
2. С увеличением степени поляризации электронного газа обменное взаимодействие между электронами приводит к стабилизации спина ансамбля носителей.
3. В подавлении спиновой релаксации двумерного электронного газа внешним магнитным полем циклотронный и ларморовский эффекты могут интерферировать.
4. Резонансное возбуждение синглетного состояния триона циркулярно поляризованным светом приводит к спиновой ориентации резидентных электронов в квантовых ямах  $n$ -типа.
5. Тонкая структура энергетического спектра экситонов в квантовых точках с единичным ионом марганца определяется конкуренцией между электрон-дырочным дальнедействующим обменным взаимодействием и взаимодействием носителей с  $d$ -электронами магнитного иона.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на семинарах ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, на рабочих семинарах университетов Клермон-Феррана (Франция) и Саутгемптона (Великобритания), международных симпозиумах “Nanostructures: Physics and Technology” (С.-Петербург 2005, 2007) и VI Российской конференции по физике полупроводников (С.-Петербург 2003), международной школе “2nd International School on Nanophotonics” (Маратая, Италия 2007, приглашенный доклад).

Публикации. По результатам исследований, проведенных в диссертации, опубликовано 10 печатных работ, список которых приведен в Заключении.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения и списка литературы. Она содержит 113 страниц текста, включая 21 рисунок и одну таблицу. Список цитируемой литературы содержит 124 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и научная новизна работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава “Влияние межчастичного взаимодействия на спиновую релаксацию электронов” посвящена теоретическому исследованию влияния электрон-электронного взаимодействия на спиновую релаксацию носителей в механизме Дьяконова-Переля.

§1.1 представляет собой обзор теоретических и экспериментальных исследований, посвященных спиновой релаксации в полупроводниках. Приводится качественное описание прецессионного механизма спиновой релаксации (механизма Дьяконова-Переля). Спин-зависимые слагаемые в эффективном гамильтониане носителей играют роль эффективного магнитного поля, зависящего от волнового вектора электрона  $\mathbf{k}$ . Рассеяние носителей сопровождается случайными изменениями этого поля, поэтому при  $\Omega_{\mathbf{k}}\tau \ll 1$  неравновесная спиновая поляризация релаксирует со скоростью  $\tau_s^{-1} \sim \Omega_{\mathbf{k}}^2\tau$ , где  $\Omega_{\mathbf{k}}$  – частота спиновой прецессии в эффективном магнитном поле и  $\tau$  – микроскопическое время рассеяния электрона [4]. В первом параграфе ставится вопрос о вкладе электрон-электронных столкновений в постоянную времени  $\tau$ .

Во втором параграфе построена кинетическая теория спиновой релаксации носителей с учетом межчастичного взаимодействия. В начале параграфа эффекты электрон-электронного взаимодействия обсуждаются на качественном уровне. Электрон-электронные столкновения приводят, во-первых, к случай-

ным изменениям волнового вектора данного носителя и, поэтому, вносят аддитивный вклад в  $\tau^{-1}$  так же, как и упругие процессы релаксации импульса. Во-вторых, обменное взаимодействие между спин-поляризованными носителями приводит к дополнительной стабилизации полного спина. В §1.2.1 получено кинетическое уравнение для спиновой матрицы плотности электронов. В §1.2.2 конкретизируется вид эффективной частоты спиновой прецессии  $\Omega_{\mathbf{k}}$  в различных полупроводниковых структурах.

§1.2.3 посвящен решению кинетического уравнения при произвольной степени вырождения электронного газа и произвольной степени поляризации носителей. В нем получено уравнение баланса для полного спина ансамбля электронов и выведены выражения для компонент тензора обратных времен спиновой релаксации. В последующих двух подпараграфах §1.2.4 и §1.2.5 анализируются случаи невырожденного электронного газа, электронного газа с произвольной степенью вырождения и роль высокой степени поляризации носителей. При малой степени поляризации компоненты тензора обратных времен спиновой релаксации для электронов в квантовой яме, выращенной из материалов с решеткой цинковой обманки вдоль оси  $z \parallel [001]$ , можно представить в виде

$$\frac{1}{\tau_{x'x'}} = \left( \frac{\beta_+ k_0}{\hbar} \right)^2 \tau, \quad \frac{1}{\tau_{y'y'}} = \left( \frac{\beta_- k_0}{\hbar} \right)^2 \tau, \quad \frac{1}{\tau_{zz}} = \frac{1}{\tau_{x'x'}} + \frac{1}{\tau_{y'y'}}, \quad (1)$$

где константы  $\beta_{\pm}$  описывают линейные по  $\mathbf{k}$  вклады в спиновое расщепление дисперсионной кривой носителей, а именно  $\Omega_{\mathbf{k},x'} = \beta_- k_{y'}/\hbar$ ,  $\Omega_{\mathbf{k},y'} = -\beta_+ k_{x'}/\hbar$ ,  $\Omega_{\mathbf{k},z} = 0$ , оси  $x' \parallel [1\bar{1}0]$ ,  $y' \parallel [110]$ . Величина  $k_0$  имеет размерность волнового вектора, ее удобно выбрать для невырожденных электронов равной  $(2mk_B T/\hbar^2)^{1/2}$ , где  $m$  – эффективная масса электрона,  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура, и равной фермиевскому волновому вектору  $k_F$  при анализе ситуации с произвольной степенью вырождения носителей. Выполнены численные расчеты параметра  $\tau$  для электронного газа произвольной степени вырождения в зависимости от температуры, концентрации носителей и параметров квантовой ямы.

Температурная зависимость времени спиновой релаксации, определяемая электрон-электронными столкновениями, имеет немонотонный характер. В вырожденном электронном газе частота столкновений с увеличением температуры сначала не зависит от температуры, пока  $\tau \propto T^{-2}$  не станет меньше  $\tau_p$ , времени релаксации импульса двумерного газа. Затем частота столкновений возрастает как функция температуры, при этом  $\tau_s \propto T^2$ , достигает максимума при смене статистики носителей на невырожденную ( $T \sim T_F = \hbar^2 k_F^2 / 2mk_B$ ), после чего  $\tau_s \propto T^{-2}$ .

Третий параграф первой главы посвящен сопоставлению развитой теории и экспериментальных данных, полученных на структурах с квантовыми ямами GaAs/ Ga<sub>0.67</sub>Al<sub>0.33</sub>As. Время спиновой релаксации измерялось в экспериментах “накачка – зондирование”. Наблюдаемые на этих образцах при низких температурах ( $T \lesssim 5$  К) спиновые биения [5] позволяют определить частоту спиновой прецессии на уровне Ферми и время столкновений *одного* электрона  $\tau^*$ , соответствующее наблюдаемому затуханию биений. Экспериментальные значения времени релаксации  $z$  компоненты спина  $\tau_{zz}$  представлены на рис. 1 квадратами. Кривые на рис. 1 – результат теоретического расчета. Все параметры (спиновое расщепление, концентрация носителей и температурная зависимость времени релаксации электронного газа по импульсу,  $\tau_p$ ) были известны из эксперимента. Сплошная и пунктирная кривые показывают времена спино-

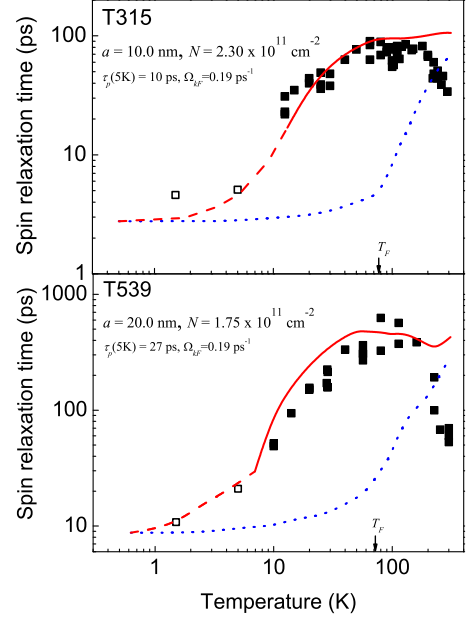


Рис. 1: Температурная зависимость времени спиновой релаксации. Точки – экспериментальные данные: сплошные квадраты соответствуют времени релаксации при наблюдаемом экспоненциальном спаде спиновой поляризации, открытые квадраты – значения  $(\Omega_{k_F}^2 \tau^*)^{-1}$ , полученные из анализа спиновых биений. Линии представляют результаты расчета, выполненного с использованием экспериментальных значений  $\Omega_{k_F}$ , температурной зависимости  $\tau_p$  с учетом (сплошная и пунктирная) и в пренебрежении (точечная) электрон-электронными столкновениями.



вой релаксации в механизме Дьяконова-Переля и величины  $(\Omega_{k_F}^2 \tau)^{-1}$ , соответственно, рассчитанные с учетом как электрон-электронных столкновений, так и упругого рассеяния по импульсу, а кривая, показанная точками – только с учетом  $\tau_p$ . Эффектами высокой спиновой поляризации пренебрегалось.

Из рис. 1 видно, что количественное и качественное описание температурной зависимости времени спиновой релаксации электронов возможно только с учетом межчастичного взаимодействия. Заметные различия между теорией и экспериментом, наблюдаемые при температурах, превышающих 200 К, связаны, по-видимому, с увеличением роли вклада Рашбы в спиновое расщепление, с заселением второй подзоны размерного квантования носителей, а также с уменьшением концентрации электронов в квантовой яме. В четвертом параграфе обобщены основные результаты главы.

**Вторая глава** “Спиновая динамика двумерных электронов в условиях электронного парамагнитного резонанса” посвящена теоретическому изучению влияния внешнего магнитного поля на спиновую релаксацию носителей в механизме Дьяконова-Переля. Параграф §2.1 содержит обзор теоретических и экспериментальных исследований по эффектам магнитного поля на спиновую релаксацию. Во втором параграфе выведено кинетическое уравнение для функции распределения электронов по спину и получены выражения для компонент тензора обратных времен спиновой релаксации  $\Gamma$  в классических магнитных полях. В условиях электронного парамагнитного резонанса независимо измеряются времена *продольной*  $T_1$  и *поперечной*  $T_2$  релаксации спина [6]. В §2.2.1 и §2.2.2 показано, что  $T_1 = \Gamma_{z'z'}^{-1}$ , где ось  $z'$  направлена по магнитному полю, а  $T_2 = 2/(\Gamma_{x'x'} + \Gamma_{y'y'})$  (оси  $x'$ ,  $y'$  лежат в плоскости, перпендикулярной магнитному полю).

В частном случае, когда внешнее поле ориентировано по нормали к яме

$$\frac{1}{T_1} = \frac{4\tau_p k_F^2}{\hbar^2} \left[ \frac{\beta_1^2}{1 + (\omega_L + \omega_C)^2 \tau_1^2} + \frac{\beta_2^2}{1 + (\omega_L - \omega_C)^2 \tau_1^2} \right], \quad (2)$$

где константы  $\beta_{1,2} = (\beta_+ \mp \beta_-)/4$  описывают вклады Дрессельхауза и Рашбы, соответственно,  $\omega_C$  и  $\omega_L$  – циклотронная и ларморовская частоты. Из (2) видно, что внешнее магнитное поле замедляет спиновую релаксацию электронов

как за счет циклотронного, так и за счет ларморовского эффектов. Первый механизм обусловлен тем, что циклотронное движение носителей приводит к изменению волнового вектора данного электрона и действует как дополнительное рассеяние носителей, что замедляет спиновую релаксацию. Ларморовский эффект внешнего магнитного поля модифицирует прецессию спина, уменьшая углы его отклонения от первоначального направления. Циклотронный и ларморовский эффекты интерферируют в замедлении спиновой релаксации, и в зависимости от знака  $g$ -фактора носителей и типа спинового расщепления, могут как совместно подавлять спиновую релаксацию, так и частично компенсировать друг-друга.

Параграф три посвящен сопоставлению развитой теории с экспериментальными данными, полученными методом электронного парамагнитного резонанса на образцах с квантовыми ямами Si/SiGe. На рис. 2 квадратами показана

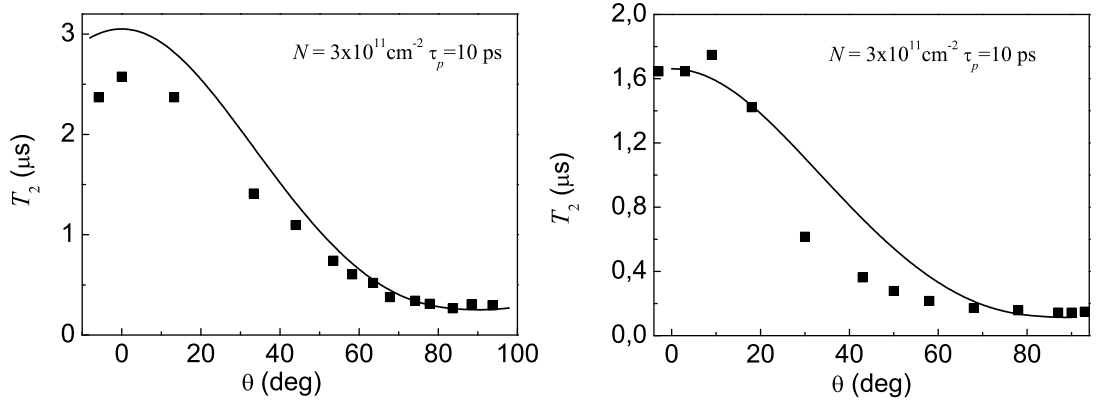


Рис. 2: Поперечное время спиновой релаксации в зависимости от угла между магнитным полем и нормалью к структуре. Квадраты – экспериментальные данные, полученные на двух образцах Si/Si<sub>0.75</sub>Ge<sub>0.25</sub>. Сплошные кривые – теоретический расчет.

ны экспериментальные значения времени поперечной релаксации спина  $T_2$ , а сплошными кривыми – их подгонка, единственным варьируемым параметром была частота спиновой прецессии на уровне Ферми  $\Omega_{k_F}$ . Наилучшее согласие эксперимента и теории было достигнуто при  $\Omega_{k_F} = 4 \times 10^8 \text{ c}^{-1}$ , а для образца на правой панели –  $\Omega_{k_F} = 1.1 \times 10^9 \text{ c}^{-1}$ . Порядок величин согласуется с теоретическими оценками эффекта Рашбы в таких структурах [7].

Четвертый параграф посвящен спиновой динамике и эффектам магнитного поля в структурах со спиновым расщеплением, сопоставимым со столкновительной шириной уровня. В таком случае наблюдаются квантовые спиновые биения [8]. В §2.4.1 теоретически исследуются спиновые биения в отсутствие внешнего магнитного поля. Изучается затухание биений, обусловленное рассеянием носителей, а также их дефазировка за счет анизотропии спинового расщепления и теплового уширения функции распределения электронов. В §2.4.2 исследуется влияние внешнего магнитного поля, направленного по оси роста  $z$  квантовой ямы, на биения продольной компоненты спина. Показано, что магнитное поле увеличивает частоту биений и приводит к уменьшению их затухания. В пятом параграфе обобщены основные результаты главы.

Третья глава “Спиновые биения электронного газа во внешнем магнитном поле” посвящена исследованию оптической ориентации и динамики поперечных к магнитному полю компонент спина в электронном газе низкой плотности, где  $Na_B^2 \lesssim 1$  ( $N$  – концентрация носителей,  $a_B$  – боровский радиус). Во введении (§3.1) приводится краткий обзор литературы по данной тематике и качественно описывается модель ориентации спинов резидентных электронов при резонансном фотовозбуждении синглетного состояния  $X^-$  триона.

Во втором параграфе главы анализируются механизмы формирования оптических сигналов Керра и Фарадея в экспериментах “накачка – зондирование”. Показано, что коэффициент отражения линейно поляризованного зондирующего импульса от квантовой ямы на частоте экситонного или трионного резонанса модулируется пропорционально полному спину резидентных электронов и фоторожденных экситонов, наведенному циркулярно поляризованной накачкой. Обсуждаются физические механизмы такой модуляции.

В §3.3.1 построена теория спиновых биений во внешнем магнитном поле при возбуждении трионного резонанса. Показано, что при поглощении циркулярно поляризованного  $\sigma^+$  ( $\sigma^-$ ) света для формирования синглетного состояния триона из электронного газа изымаются электроны с проекцией спина  $+1/2$  ( $-1/2$ ) на ось роста. Это приводит к ориентации резидентных электронов по

спину. Продemonстрировано, что эта ориентация проявляется в экспериментах “накачка – зондирование” в случае, когда времена спиновой релаксации дырки в трионе  $\tau_s^T$  и спиновой релаксации резидентных электронов  $\tau_s$  различаются, или при приложении внешнего магнитного поля в плоскости квантовой ямы. Получены аналитические выражения, описывающие динамику спина ансамбля электронов при произвольном соотношении времен спиновой релаксации в зависимости от величины внешнего магнитного поля. Исследовано насыщение спиновой поляризации резидентных носителей с ростом интенсивности накачки.

Подпараграф §3.3.2 посвящен ориентации спинов резидентных электронов в случае, когда энергия фотонов накачки близка к экситонному резонансу. Исследованы механизмы насыщения спиновой поляризации электронов, обусловленные спиновой релаксацией электронов, связанных в экситон.

В четвертом параграфе разработанная теория сопоставляется с экспериментальными данными по спиновой динамике в магнитном поле в квантовой яме

CdTe/Cd<sub>0.78</sub>Mn<sub>0.22</sub>Te с концентрацией носителей  $N = 1.1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ .

На рис. 3 квадратами показаны экспериментальные значения начальной фазы спиновых биений двумерного электронного газа при резонансном возбуждении триона в зависимости от магнитного поля. Теоретические расчеты представлены сплошной и штриховой линиями. Глубина и положение минимума определяются значениями времени спиновой релаксации дырки в трионе  $\tau_s^T$ . Наблюдается качественное согласие экспериментальных результатов и

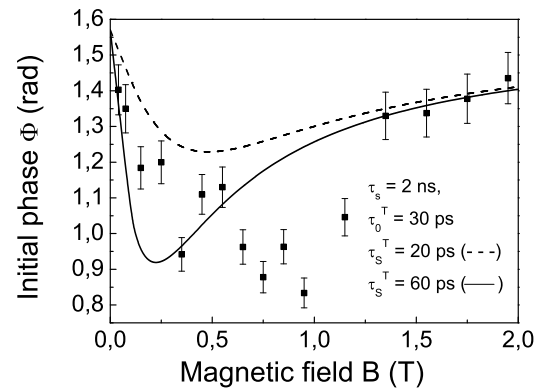


Рис. 3: Начальная фаза спиновых биений двумерного электронного газа в зависимости от магнитного поля, приложенного в плоскости ямы. Квадраты – экспериментальные данные. Сплошные кривые – результаты теоретического расчета. Плотность мощности импульса накачки  $0.64 \text{ Вт/см}^2$ , импульса зондирования  $0.5 \text{ Вт/см}^2$ .

теоретических расчетов. В заключение параграфа построенная нами классическая теория сопоставляется с квантовомеханическим описанием процессов оптической ориентации при резонансном возбуждении трионов, разработанным в [9]. В пятом параграфе обобщены основные результаты главы.

В главе четыре “Тонкая структура и спиновая динамика экситонов в квантовых точках” изучается тонкая структура энергетического спектра состояний экситона в квантовых точках, в том числе в точках, содержащих единичные магнитные ионы  $Mn^{2+}$ . Она определяется, в первую очередь, дальнедействующим обменным взаимодействием между электроном и дыркой [10], а в квантовых точках с магнитными ионами – обменным взаимодействием между электроном, дыркой и электронами внешней оболочки магнитного иона [3].

Параграф §4.1 содержит обзор литературы, посвященной спиновой динамике носителей заряда и их комплексов в квантовых точках, а также тонкой структуре экситонных состояний.

Во втором параграфе главы построена общая теория определяемой дальнедействующим обменным взаимодействием тонкой структуры экситонных состояний в квантовых точках. Во введении к §4.2 формулируется модель квантового диска, в рамках которой считается, что длина локализации носителей  $L_z$  вдоль оси роста структуры  $z \parallel [001]$  много меньше радиусов  $a_e, a_h$  локализации электронов (дырок) в плоскости  $xy \parallel (001)$ . Потенциал, описывающий латеральную локализацию электрона и дырки считается параболическим, причем размерное квантование в плоскости структуры предполагается более сильным, чем кулоновское взаимодействие между носителями. Экситонные состояния нумеруются орбитальными индексами, например, состояние  $S_e - P_h$  образовано электроном в  $S$  состоянии и дыркой в  $P$  состоянии, и проекцией спина (углового момента) экситона на ось  $z$ :  $m_z = s_z + j_z$ , где  $s_z = \pm 1/2$ ,  $j_z = \pm 3/2$  – проекции спинов электрона и “тяжелой” дырки. Рассматриваются только оптически активные состояния с  $m_z = \pm 1$ .

В §4.2.1 исследуется тонкая структура  $S - P$  состояния экситона. Показано, что в квантовом диске с изотропным латеральным потенциалом это состо-

яние расщеплено за счет дальнедействующего обменного взаимодействия на три подуровня: верхний и нижний соответствуют проекции углового момента экситона на ось роста, равной 0, а средний уровень двукратно вырожден и соответствует проекции углового момента на ось  $z$ , равной  $\pm 2$ . Анизотропия квантовой точки приводит к полному снятию вырождения. Выполнен расчет расщеплений между подуровнями в зависимости от степени анизотропии латерального потенциала.

В §4.2.2 изучается структура энергетического спектра уровня  $P - P$ . Продемонстрировано, что в изотропных квантовых точках четырехкратное орбитальное вырождение этого состояния частично снимается кулоновским взаимодействием, причем только один из подуровней обладает орбитальным моментом, равным 0, т.е. является оптически активным. В точках с потенциалом, анизотропным в осях  $x, y$ , орбитальное вырождение полностью снимается. Кроме того, дальнедействующее обменное взаимодействие между электроном и дыркой расщепляет оптически активные состояния по микроскопическому дипольному моменту экситона (рис. 4).

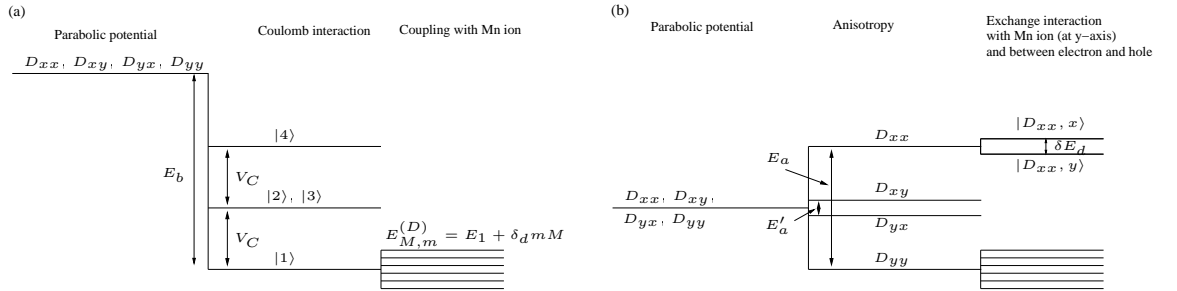


Рис. 4: Энергетическая диаграмма уровня  $P - P$  для аксиально симметричной [панель (a)] и анизотропной [панель (b)] квантовой точки, содержащей магнитный ион. Нижние индексы в обозначении орбиталей  $D_{ij}$  характеризуют симметрию  $P$  состояний электрона и дырки. Структура уровней, показанная на панели (b), соответствует случаю, когда магнитный ион расположен на оси  $y$ , при этом он не взаимодействует с орбиталью  $D_{xx}$ . Величины  $E_b$  и  $V_C$  характеризуют кулоновское взаимодействие между носителями,  $E_a$ ,  $E'_a$  – анизотропию латерального потенциала,  $\delta E_d$  – анизотропное обменное расщепление  $P - P$  уровня,  $\delta_d$  – обменное взаимодействие экситона с магнитным ионом.

В следующем §4.3 анализируется тонкая структура экситонных состояний

в квантовых точках, содержащих единичные магнитные ионы  $\text{Mn}^{2+}$ . Обменное взаимодействие между электроном, дыркой и полным спином внешней  $3d^5$  оболочки Mn имеет короткодействующий вид

$$\mathcal{H}_{\text{Mn}} = [A_e s \delta(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_e) + A_h j \delta(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_h)] M, \quad (3)$$

где  $\mathbf{r}_0$ ,  $\mathbf{r}_e$ ,  $\mathbf{r}_h$  – радиус-вектор иона марганца, электрона и дырки, соответственно,  $A_e$  и  $A_h$  – константы связи для электронов зоны проводимости и дырок в валентной зоне с магнитным ионом. Показано, что учет поперечных компонент спина электрона в (3) не приводит к существенным количественным изменениям дальнейших результатов.

В изотропной точке как основной  $S - S$ , так и единственный оптически активный возбужденный  $P - P$  уровень экситона расщеплены взаимодействием (3) на 6 двукратно вырожденных подуровней (рассматриваются только состояния с  $m_z = \pm 1$ ), см. рис. 4а. Константы, описывающие это расщепление, определяются перекрытием магнитного иона и соответствующих орбиталей.

Анизотропия латерального потенциала квантовой точки приводит к более сложной тонкой структуре основного и возбужденных состояний экситона. В случае, когда анизотропное расщепление основного состояния экситона мало по сравнению со взаимодействием с ионом Mn, качественная структура спектра состояния  $S - S$  не меняется. Структура  $P - P$  орбиталей зависит от положения магнитного иона в квантовой точке, при этом возможна ситуация, когда один из уровней (например,  $D_{xx}$ ) не взаимодействует с Mn, и его структура определяется электрон-дырочным обменным взаимодействием, а структура состояния  $D_{yy}$ , наоборот, определяется взаимодействием с магнитным ионом (рис. 4b).

Параграф четыре посвящен сравнению разработанной теории и экспериментальных данных по возбуждению микрофотолюминесценции в одиночных точках CdTe/ZnTe, легированных  $\text{Mn}^{2+}$ . Экспериментальные и расчетные спектры возбуждения фотолюминесценции для состояния  $D_{yy}$  представлены на рис. 5. Наилучшее согласие достигнуто при следующих параметрах: анизотропное расщепление  $P - P$  уровня  $\delta E_d = 0.05$  мэВ и расщепление за счет

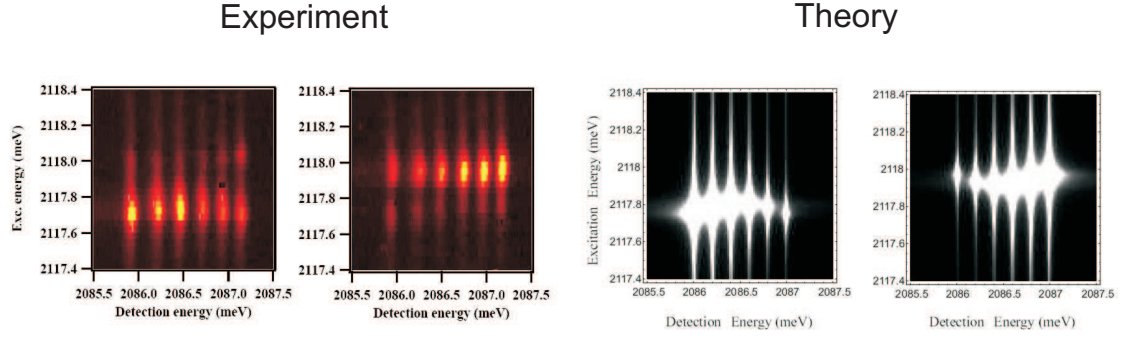


Рис. 5: Развертки по энергии возбуждения и детектирования экспериментальных спектров возбуждения фотолюминесценции (2 левые панели) и рассчитанные спектры (2 правые панели) при линейно поляризованной накачке в состоянии  $D_{yy}$  и неполяризованном детектировании.

взаимодействия с ионом марганца  $\delta_{yy} = 0.04$  мэВ. Порядок величины  $\delta E_d$  соответствует размерам точки  $a_e = 45 \text{ \AA}$  и  $a_h = 90 \text{ \AA}$ . Значение  $\delta_{yy}$  позволяет оценить координаты магнитного иона в точке, которые оказываются равными  $y_0 \approx 0.3a_h$ ,  $x_0 \ll y_0$ . В §4.5 обобщены основные результаты главы.

В **Заключении** обобщены основные результаты работы:

1. Построена кинетическая теория спиновой релаксации в механизме Дьяконова-Переля с учетом межчастичного взаимодействия. Выведен интеграл электрон-электронных столкновений при произвольной степени поляризации электронного газа.

2. Показано, что электрон-электронные столкновения замедляют спиновую релаксацию по механизму Дьяконова-Переля так же, как и процессы упругого рассеяния, приводящие к релаксации импульса в ансамбле электронов. Обменное взаимодействие между электронами приводит к дополнительному замедлению спиновой релаксации с ростом степени поляризации электронного газа.

3. Теоретически изучена спиновая релаксация двумерных электронов в классических магнитных полях по механизму Дьяконова-Переля при произвольной анизотропии спинового расщепления и ориентации внешнего магнитного поля. Показано, что циклотронный и ларморовский эффекты внешнего магнитного поля либо аддитивно замедляют спиновую релаксацию, либо ча-



стично компенсируют друг друга в зависимости от типа доминирующего вклада в спиновое расщепление и знака электронного  $g$ -фактора.

4. Получено выражение для ширины линии электронного парамагнитного резонанса при произвольной анизотропии спинового расщепления и ориентации магнитного поля по отношению к главным осям квантовой ямы.

5. Продемонстрировано, что спиновые биения в нулевом магнитном поле, наблюдаемые в структурах, где спиновое расщепление превышает столкновительное уширение уровней, затухают за счет анизотропии спинового расщепления, теплового размытия функции распределения носителей и процессов рассеяния электронов.

6. Показано, что резонансное возбуждение синглетного состояния  $X^-$  триона в квантовой яме с двумерным электронным газом низкой плотности приводит к ориентации резидентных электронов по спину.

7. Построена теория спиновых биений двумерного электронного газа во внешнем магнитном поле при резонансном возбуждении трионных и экситонных состояний. Получены зависимости начальной фазы спиновых биений от величины магнитного поля. Сопоставление построенной теории и экспериментальных данных позволило определить  $g$ -фактор носителей и время спиновой релаксации электронов.

8. Построена теория расщепления возбужденных состояний экситонов за счет электрон-дырочного дальнегодействующего обменного взаимодействия в аксиально симметричных квантовых точках и в точках с малой степенью анизотропии. Показано, что в аксиально симметричных квантовых точках  $S - P$  экситонный уровень расщепляется на подуровни за счет дальнегодействующего обменного взаимодействия, а  $P - P$  уровень – за счет прямого кулоновского взаимодействия между электроном и дыркой.

9. В квантовых точках, содержащих единичный магнитный ион, тонкая структура экситонных состояний определяется конкуренцией анизотропного обменного взаимодействия и обменного взаимодействия электрон-дырочной пары с магнитным ионом, при этом спектр возбужденных состояний экситона

оказывается чувствительным к положению иона относительно главных осей квантовой точки.

10. Сопоставление экспериментальных спектров возбуждения фотолюминесценции одиночных квантовых точек, легированных  $Mn^{2+}$ , позволило определить константы обменного взаимодействия между носителями, связанными в нульмерный экситон, и  $3d$ -электронами магнитного иона.

Основные результаты диссертационной работы изложены в публикациях:

- [A1] М.М. Глазов, Е.Л. Ивченко, Прецессионный механизм спиновой релаксации при частых электрон-электронных столкновениях // Письма в ЖЭТФ **75**, 476–478 (2002).
- [A2] М.М. Глазов, Механизм спиновой релаксации Дьяконова-Переля при частых электрон-электронных столкновениях в квантовой яме конечной ширины // ФТТ **45**, 1108–1111 (2003).
- [A3] M.M. Glazov, E.L. Ivchenko, Dyakonov-Perel's spin relaxation under electron-electron collisions in QWs // В сб. "Optical Properties of 2D Systems with Interacting Electrons" под ред. W.J. Ossau и R. Suris, 181-192 (2003).
- [A4] М.М. Глазов, Е.Л. Ивченко, Влияние электрон-электронного взаимодействия на спиновую релаксацию носителей тока в полупроводниках // ЖЭТФ **126**, 1465–1478 (2004).
- [A5] W.J.H. Leyland, G.H. John, R.T. Harley, M.M. Glazov, E.L. Ivchenko, D.A. Ritchie, I. Farrer, A.J. Shields, and M. Henini, Enhanced spin-relaxation time due to electron-electron scattering in semiconductor quantum wells // Phys. Rev. B **75**, 165309 (2007).
- [A6] M.M. Glazov, Magnetic field effects on spin relaxation in heterostructures // Phys. Rev. B **70**, 195314 (2004).
- [A7] M.M. Glazov, Effect of structure anisotropy on low temperature spin dynamics in quantum wells // Solid State Commun. **142**, 531 (2007).

- [A8] E.A. Zhukov, D.R. Yakovlev, M. Bayer, M.M. Glazov, E.L. Ivchenko, G. Karczewski, T. Wojtowicz and J. Kossut, Spin coherence of a two-dimensional electron gas induced by resonant excitation of trions and excitons in CdTe/(Cd,Mg)Te quantum wells // *Phys. Rev. B* **76**, 205310 (2007).
- [A9] M.M. Glazov, E.L. Ivchenko, R. v. Baltz and E.G. Tsitsishvili, Fine structure of excited excitonic states in quantum disks // *Proc. Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology"*(St-Petersburg, Russia, 2005) pp. 348–349.
- [A10] M.M. Glazov, E.L. Ivchenko, L. Besombes, Y. Léger, L. Maingault, and H. Mariette // Fine structure of exciton excited levels in a quantum dot with a magnetic ion, *Phys. Rev. B* **75**, 205313 (2007).

#### Список литературы

- [1] *Ivchenko E. L. Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures.*— Alpha Science, Harrow UK, 2005.
- [2] *Zutic I., Fabian J., Sarma S. D. Spintronics: Fundamentals and applications // Rev. Mod. Phys.* — 2004. — Vol. 76, no. 2. — P. 323.
- [3] Probing the spin state of a single magnetic ion in an individual quantum dot / L. Besombes, Y. Leger, L. Maingault et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2004. — Vol. 93, no. 20. — P. 207403.
- [4] *Дьяконов М. И., Перель В. И. Спиновая релаксация электронов проводимости в полупроводниках без центра инверсии // ФТТ.* — 1972. — Т. 13. — С. 3581.
- [5] Precession and motional slowing of spin evolution in a high mobility two-dimensional electron gas / M. A. Brand, A. Malinowski, O. Z. Karimov et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2002. — Vol. 89, no. 23. — P. 236601.

- [6] *Wilamowski Z., Jantsch W.* Suppression of spin relaxation of conduction electrons by cyclotron motion // *Phys. Rev. B.* — 2004. — Vol. 69, no. 3. — P. 035328.
- [7] *Nestoklon M. O., Golub L. E., Ivchenko E. L.* Spin and valley-orbit splittings in SiGe/Si heterostructures // *Phys. Rev. B.* — 2006. — Vol. 73, no. 23. — P. 235334.
- [8] *Гриднев В. Н.* Теория биений фарадеевского вращения в квантовых ямах с большой величиной спинового расщепления // *Письма ЖЭТФ.* — 2001. — Т. 74. — С. 417.
- [9] Optical readout and initialization of an electron spin in a single quantum dot / *A. Shabaev, A. L. Efros, D. Gammon, I. A. Merkulov* // *Phys. Rev. B.* — 2003. — Vol. 68, no. 20. — P. 201305.
- [10] *Гупалов С. В., Ивченко Е. Л., Кавокин А. В.* Тонкая структура уровней локализованных экситонов в квантовых ямах // *ЖЭТФ.* — 1998. — Vol. 113. — P. 703.