На правах рукописи

Котова Любовь Викторовна

ЭФФЕКТЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИСПЕРСИИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

Специальность:

01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

Научный руководитель:

Бугров Владислав Евгеньевич, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», профессор факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники, директор мегафакультета фотоники

Официальные оппоненты:

Гиппиус Николай Алексеевич, доктор физико-математических наук, Автономная некоммерческая образовательная организация высшего профессионального образования «Сколковский институт науки и технологий», профессор центра фотоники и квантовых материалов

Вербин Сергей Юрьевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», профессор кафедры физики твёрдого тела

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук»**

Защита состоится “13” июня 2019 г. в 10^{00} часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе и на сайте www.ioffe.ru

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

Автореферат разослан “__” ____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В современной физике полупроводников наиболее актуальной областью исследований является физика наноструктур [1], в которой всё больший интерес вызывают различные оптические явления. Это связано в первую очередь с тем, что современная электроника по большей части становится оптоэлектроникой. Новые приборы и устойства уже содержат существенную часть оптических компонент: разветвители, соединители, переключатели, оптические развязки и так далее [2] . Для создания таких устройств важно хорошо понимать оптические процессы, происходящие в полупроводниковых наноструктурах.

В связи с этим возникает необходимость более внимательного изучения классических оптических явлений в новых условиях. Одним из таких классических разделов оптики, важным для понимания свойств наноструктур, является кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии [3]. Несмотря на то, что обычно пространственная дисперсия в оптике кристаллов мала, она может приводить к качественно новым явлениям. Особенно ярко пространственная дисперсия может проявляться именно в неоднородных оптических средах, содержащих нанообъекты. Уже наличие простой плоской границы раздела сред приводит к существенным поправкам к формулам Френеля, связанным с пространственной дисперсией. Из законов отражения Френеля следует, что, когда падающий свет поляризован линейно в плоскости падения (p поляризация) или перпендикулярно плоскости падения (s поляризация), отражённый свет также должен иметь p или s поляризацию соответственно. Однако, было установлено, что это не так. Оказалось, что при отражении света даже от непоглощающей среды может происходить преобразование поляризаций из p в s, из s в p или из линейной в циркулярную. Причиной такого отклонения от закона Френеля является пространственная дисперсия.

Одним из замечательных проявлений пространственной дисперсии является естественная оптическая активность (гиротропия). В оптическом диапазоне частот наиболее известное применение гиротропии в медицине - это определение концентрации сахара в крови по углу поворота плоскости поляризации линейно поляризованного света при его распро-

странении в растворе крови. Представляется заманчивым научиться использовать данное явление в оптических компонентах современных приборов и устройств. Для этого необходимо детально исследовать проявление гиротропии в полупроводниковых наноструктурах и прежде всего в квантовых ямах. Микроскопическая природа гиротропии в полупроводниковых кристаллах связана со спин-орбитальным взаимодействием в структурах, не имеющих центра пространственной инверсии, и, следовательно, это оптическое явление тесно связано со спиновыми явлениями, интенсивно изучаемыми в последние годы. Отсутствие инверсионной симметрии может быть связано как с объёмными свойствами кристаллической решетки, так и с асимметрией структуры в целом. Благодаря этому, подбирая дизайн наноструктуры можно управлять её гиротропными свойствами.

В диссертационной работе выполнено детальное экспериментальное исследование эффектов пространственной дисперсии, проявляющих себя в конверсии поляризации при отражении света от полупроводниковых структур с квантовыми ямами. В отличие от метаматериалов, преобразующих поляризацию света благодаря специальной конструкции, приводящей как бы к искусственной гиротропии [4–6], полупроводниковые наноструктуры способны изменять поляризацию света, даже будучи однородными в плоскости. Исследованы как симметричные, так и асимметричные структуры с квантовой ямой на основе различных полупроводниковых соединений (ZnSe, CdTe, GaAs). В данной работе проведено изучение магнитоиндуцированной пространственной дисперсии в полупроводниковых наноструктурах, что также представляет собой важную тему для исследований [7–9].

Перечисленные выше доводы определяют актуальность темы диссертации, посвящённой исследованию эффектов пространственной дисперсии в полупроводниковых гетероструктурах, как во внешнем магнитном поле, так и без него.

Цель работы состоит в экспериментальном обнаружении эффектов пространственной дисперсии в полупроводниковых гетероструктурах и установлении микроскопических механизмов, ответственных за их возникновение. К задачам настоящего исследования относятся: наблюдение есте-

ственной оптической активности полупроводниковых квантовых ям; экспериментальное изучение магнитогиротропных эффектов, проявляющих себя в конверсии поляризации отражённого света; установление магнитоиндуцированных вкладов в отражение от асимметричных гетероструктур; выявление причин возникновения исследуемых эффектов.

Научная новизна и практическая значимость настоящего исследования заключаются в том, что в нём впервые экспериментально установлено явление естественной оптической активности полупроводниковых квантовых ям. Выявлено, что оптическая активность вызвана спин-орбитальным взаимодействием. Сопоставление полученных экспериментальных данных с теорией позволило определить величину спиновых расщеплений Дрессельхауза в квантовых ямах на основе ZnSe. Описаны особенности проявления гиротропии при изменении ориентации линейной поляризации падающего света, приводящие к увеличению степени конверсии поляризации. Предложен метод прямого измерения констант спин-орбитального взаимодействия, применимый для широкого класса полупроводниковых наноструктур. Предсказан и обнаружен экспериментально эффект магнитоиндуцированной пространственной дисперсии в асимметричных полупроводниковых гетероструктурах. По проявлению магнитоиндуцированной пространственной дисперсии в конверсии поляризации установлена степень структурной асимметрии исследуемых квантовых ям на основе соединений $A^{III}B^{V}$ и $A^{II}B^{VI}$. Подобные исследования можно использовать в качестве нового инструмента для изучения симметрии нанообъектов. По магнитогиротропному вкладу в отражение определены вызванные объёмно-инверсионной асимметрией спин-орбитальные расщепления электронов и тяжёлых дырок в квантовых ямах на основе GaAs и CdTe.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Полупроводниковые квантовые ямы обладают естественной оптической активностью. При отражении от структур с квантовыми ямами света, линейно поляризованного в плоскости падения (*p* поляризация) или нормально к ней (*s* поляризация), происходит конверсия поляризации света, резонансно усиливающаяся вблизи энергии лёгкого экситона.

2. Предложен метод определения величин спиновых расщеплений Дрессельхауза лёгких дырок, вызывающих естественную оптическую активность квантовых ям, основанный на измерении поляризации отражённого света.

3. Конверсия поляризации отражённого света существенно зависит от ориентации линейной поляризации падающего света. Для p поляризации существует узкий диапазон углов падения, в котором происходит многократное увеличении степени конверсии.

4. В магнитном поле конверсия поляризации, обусловленная линейной пространственной дисперсией, резонансно усиливается вблизи энергии возбуждения тяжёлого экситона. Магнитоиндуцированная пространственная дисперсия вызвана асимметрией квантовых ям, что позволяет установить степень структурной асимметрии.

5. Помимо конверсии поляризации асимметрия квантовых ям приводит к проявлению магнитоиндуцированной пространственной дисперсии в диагональных коэффициентах отражения. Величина такого вклада, линейного по магнитному полю, в области резонанса тяжёлого экситона определяется расщеплениями Дрессельхауза электронов и тяжёлых дырок.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на Международной зимней школе по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 2015), Российской конференции по физике полупроводников (Звенигород, 2015 и Екатеринбург, 2017), Международной конференции “Наноструктуры: Физика и Технология” (Санкт-Петербург, 2017), XXI и XXII симпозиумах “Нанофизика и наноэлектроника” (Нижний Новгород, 2017 и 2018), на конференции “50 лет оптической ориентации в полупроводниках” (Париж, Франция, 2018), Международной конференции по физике полупроводников ICPS (Монпелье, Франция, 2018), юбилейной конференции “Передовые рубежи физики 21 века и ФТИ им. А.Ф. Иоффе” (Санкт-Петербург, 2018), были представлены приглашенными докладами на Международной школе-семинаре “Экситоны в кристаллах и наноструктурах. К 120-летию со Дня

Рождения Е.Ф. Гросса” (Санкт-Петербург, 2017), Международной конференции по исследованиям фотоники “INTER PHOTONICS 2018” (Турция, 2018).

Результаты исследований обсуждались также на рабочих семинарах ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Технического университета Дрездена (Германия, 2017), объединенном семинаре “LUT – ITMO” по физике твёрдого тела (Финляндия, 2017), СПбГУ, ИТМО, СПбАУ РАН, Сколковского института науки и технологий.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 7 научных статьях. Список работ приведён в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, четырёх глав, Заключения, списка основных обозначений и списка литературы. Она содержит 118 страниц текста, включая 35 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Оптические и магнитооптические свойства объёмных полупроводников хорошо исследованы. В низкоразмерных системах, таких как квантовые ямы или иные гетероструктуры, тонкие поляризационные эффекты мало изучены. Совершенствование технологии роста полупроводниковых гетероструктур и экспериментальных методик, огромная база фундаментальных знаний о структуре объёмных полупроводников и различных тонких эффектах, изученных в них, - всё это способствовало расширению области исследований и поиску новых явлений в наногетероструктурах, выращенных на основе полупроводниковых соединений. Многие тонкие эффекты, изученные в объёмных полупроводниках, до сих пор не обнаружены в двумерных системах, хотя с точки зрения симметрии они разрешены. На закрытие одного из таких пробелов и направлена диссертация. В диссертационной работе исследованы эффекты пространственной дисперсии первого порядка, главной отличительной чертой которых является

линейный по волновому вектору фотона вклад в оптический отклик.

В **первой главе** диссертации приведён краткий обзор обнаруженных и изученных оптических и магнитооптических эффектов в объёмных полупроводниках и структурах различного дизайна. В обзоре литературы обоснована актуальность, а также новизна в части исследования эффектов пространственной дисперсии гетероструктур с квантовыми ямами.

Все оптические и магнитооптические явления удобно классифицировать с помощью линейного оптического отклика, разлагая его в ряд Тэйлора по магнитному полю $\mathbf{B}$ и волновому вектору света $\mathbf{q}$. Для восприимчивости $\hat{\chi}$, связывающей диэлектрическую поляризацию $\mathbf{P}$ и электрическое поле $\mathbf{E}$ как $\mathbf{P} = \hat{\chi}\mathbf{E}$, имеем в первом порядке по $\mathbf{B}$ и $\mathbf{q}$

$$\chi_{ij}(\mathbf{B}, \mathbf{q}) = \chi_{ij}^{0} + S_{ijk}B_k + i\gamma_{ijk}q_k + C_{ijkl}B_k q_l. \tag{1}$$

Здесь первый член описывает двулучепреломление, а следующий вклад, который дается тензором $\hat{\mathbf{S}}$, описывает хорошо известные эффекты Фарадея и магнитооптические эффекты Керра (МОКЕ). Слагаемое с тензором $\hat{\gamma}$ описывает гиротропные явления [3]. Ненулевые компоненты $\hat{\gamma}$ допускаются симметрией только в системах без центра пространственной инверсии. Более того, некоторые компоненты вектора и псевдовектора должны принадлежать одному и тому же представлению группы пространственной симметрии исследуемой системы. В структурах с квантовой ямой гиротропия может быть вызвана как объёмно-инверсионной, так и структурно-инверсионной асимметрией [10]. Эффекты, вызванные линейными по волновому вектору выражениями в уравнении (1), являются особыми, поскольку они приводят к разности скоростей циркулярно-поляризованных волн, распространяющихся в противоположных направлениях. В частности, тензор $\hat{\gamma}$ описывает оптическую активность квантовых ям, продемонстрированную в работе [A1]. Следует отметить, что в плоскости квантовой ямы присутствует трансляционная симметрия, поэтому можно применять уравнение (1), где под $\mathbf{q}$ подразумевается проекция волнового вектора света на плоскость ямы.

Член с тензором $\hat{\mathbf{C}}$, билинейный как по волновому вектору света $\mathbf{q}$, так и по магнитному полю $\mathbf{B}$, описывает эффект магнитоиндуцированной

пространственной дисперсии. Магнитоиндуцированная пространственная дисперсия, исследование которой представлено в работе [A5], присутствует только в гиротропных средах. В отличие от магнитооптических эффектов Фарадея и Керра, данное явление характеризуется зависимостью от волнового вектора, и её симметрия отличается от чисто линейной по $\mathbf{B}$ части. Таким образом обсуждаемые вклады приводят к различным эффектам и могут быть разделены правильным выбором экспериментальной геометрии. После общего введения, где рассматриваются эффекты пространственной дисперсии, главной отличительной чертой которых является линейный вклад по волновому вектору фотона в оптический отклик, в параграфе 1.1.1 представлена конверсия поляризации света, выступающая в качестве наиболее известного проявления исследуемых эффектов. Конверсия поляризации подразумевает под собой вращение плоскости поляризации линейно поляризованной световой волны при её распространении в оптически активной среде.

В работе [A2] обнаружено явление, состоящее в том, что оптические спектры для $\sigma^{\pm}$ поляризаций отличаются друг от друга в отсутствии магнитного поля. А именно были исследованы спектры отражения и возбуждения фотолюминесценции циркулярной поляризации при наклонном падении света в широких квантовых ямах, ширина которых много больше боровского радиуса экситона. Установлено, что при наклонном падении и при $\mathbf{B} = 0$ отношение интенсивностей чётных и нечётных пиков поглощения меняется на противоположное при смене знака циркулярной поляризации падающего света. Предложена модель [A2], учитывающая эффект двулучепреломления, вызванного пространственной дисперсией экситона. И для проходящего, и для отражённого света эффект двулучепреломления проявлял себя в конверсии линейной поляризации в циркулярную и из циркулярной поляризации в линейную. При этом знак конверсии поляризации зависел от чётности уровня квантования.

Одним из эффектов, ответственных за конверсию поляризации света, как было указано выше, является оптическая активность. Описание этого явления дано в параграфе 1.1.2. Оптическая активность, также именуемая гиротропией, может иметь как внутреннюю, так и внешнюю природу. В

отличие от вынужденной оптической активности, которая индуцируется в результате внешнего воздействия, например, индуцированная током гиротропия [11], естественная оптическая активность присуща кристаллам, симметрия которых допускает линейные по **q** члены в разложении (1). Естественную оптическую активность в видимом спектральном диапазоне принято исследовать в полупроводниках, где она значительно усиливается в области экситонных резонансов [3].

Параграф 1.1.3 посвящён рассмотрению проявления гиротропных эффектов под воздействием магнитного поля. Кроме рассмотренных явлений, линейных по **B**, представлен широкий класс эффектов, линейно зависящих как от магнитного поля **B**, так и от волнового вектора **q**. Магнитоиндуцированная пространственная дисперсия была продемонстрирована в полупроводниковых квантовых ямах в экспериментах по отражению в работах [A5; A7].

Микроскопические механизмы исследуемых эффектов пространственной дисперсии в полупроводниковых гетероструктурах связаны со спин-орбитальным взаимодействием, краткое описание которого предложено в разделе 1.2. Источниками гиротропных и магнитогиротропных эффектов являются объёмно- и структурно-инверсионная асимметрии, присутствующие в большинстве квантовых ям, выращенных из полупроводниковых соединений $A^{III}B^{V}$ и $A^{II}B^{VI}$. Для наблюдения эффектов пространственной дисперсии представлен обзор экспериментальных поляризационно-чувствительных методов исследования в разделе 1.3. Результаты исследований с использованием описанных в данном разделе методик приведены в основных главах диссертации.

Вторая глава посвящена исследованию естественной оптической активности квантовых ям, которая является частным случаем пространственной дисперсии. Явление изучено в отражении света от структур с квантовыми ямами в области экситонного резонанса. Раздел 2.1 посвящен описанию исследования, в котором в отражении естественная оптическая активность проявляется в конверсии поляризации света, когда линейно поляризованный в плоскости падения или нормально к ней свет отражается эллиптически поляризованным. Исследованы квантовые ямы $A^{II}B^{VI}$, выращенные

из полупроводников с решеткой цинковой обманки, с симметричными интерфейсами. Структура исследуемых образцов приведена в параграфе 2.1.1. Представлены экспериментальные результаты по обнаружению данного явления в симметричных гетероструктурах с одиночной квантовой ямой [A1], подробные экспериментальные результаты рассмотрены в параграфе 2.1.2.

Поляризационное состояние отражённого света определялось с помощью параметров Стокса:

$$P_{circ} = \frac{I_{\sigma_+} - I_{\sigma_-}}{I_{\sigma_+} + I_{\sigma_-}}, \quad \tilde{P}_{lin} = \frac{\tilde{I}_1 - \tilde{I}_2}{\tilde{I}_1 + \tilde{I}_2}. \tag{2}$$

Здесь $I_{\sigma_\pm}$ - интенсивность света, отражённого в циркулярных компонентах, $\tilde{I}_{1,2}$ - интенсивность линейно поляризованных компонент в осях, повёрнутых на $\pm 45^\circ$ относительно плоскости падения. С помощью таких измерений можно получить степени циркулярной и линейной поляризации в отражённой волне с высокой точностью.

В разделе 2.2 показано, что оптическая активность вызвана спин-орбитальным взаимодействием в экситоне, а именно вкладом Дрессельхауза. Спин-орбитальное расщепление, вызванное объёмно-инверсионной асимметрией, проявляется в виде эффективного магнитного поля, которое приводит к изменению поляризации света аналогично реальному полю в магнитооптическом эффекте Керра. Экспериментально получены и изучены зависимости поляризации отражённого света от ориентации плоскости падения относительно кристаллографических осей. Измерения показывают, что стоксовы параметры отражённого света зависят от ориентации плоскости падения, см. Рис. 1. Абсолютное значение сигнала является мак-

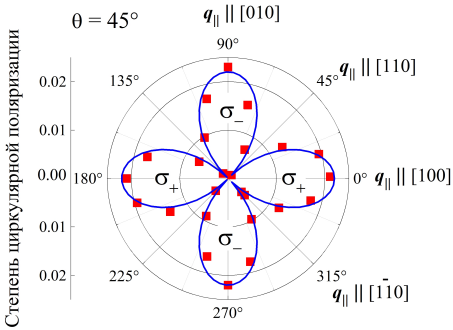

Рис. 1: Зависимость степени циркулярной поляризации отражённого света от ориентации плоскости падения относительно кристаллографических осей. Сплошная линия соответствует $P_{circ}(\varphi) = A\cos 2\varphi$.

симальным, когда плоскость падения соответствует кубическим осям [100], [010]. P_{circ} меняет свой знак при вращении на 90° и уменьшается до нуля при $\mathbf{q}_{\parallel}$, ориентированном вдоль ⟨110⟩ направлений. Такое поведение отражает симметрию системы и соответствует анизотропии эффективного магнитного поля.

Эффект имеет резонансную спектральную зависимость вблизи частоты лёгкого экситона и отсутствует для тяжёлого. Последнее связано с тем, что для конверсии поляризации необходимо наличие компоненты оптически активного дипольного момента вдоль оси роста структуры. Конверсия поляризации света описывается коэффициентом, который предложен в теоретической модели [A1] и описан в параграфе 2.2.1. Естественную оптическую активность можно пронаблюдать, анализируя поляризацию отражённого света при наклонном падении. Для описания экспериментальных

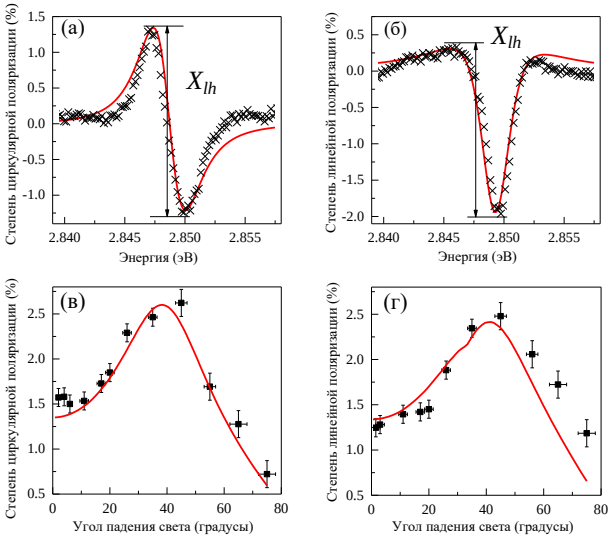

Рис. 2: Спектры степеней поляризации отражённого света P_{circ} (а) и $\tilde{P}_{lin}$ (б) в области экситонного резонанса X_{lh}. Падающий под углом $\theta = 35°$ свет s-поляризован. Зависимости от угла падения амплитуд P_{circ} (в) и $\tilde{P}_{lin}$ (г), определённых стрелками на панелях (а) и (б). Сплошными линиями отображены теоретически рассчитанные зависимости.

данных необходимо учесть отражение от всей структуры, для чего введены коэффициенты отражения и пропускания в параграфе 2.2.2.

Используя теоретический подход, изложенный в [A1], промоделированы спектры параметров Стокса и проведено их сравнение с измеренными данными, см. Рис. 2. Для всех поляризаций падающего и отражённого света удалось добиться хорошего согласия с экспериментом, используя один набор экситонных параметров, что позволило оценить величину параметра Дрессельхауза, ответственного за спиновое расщепление состояния лёгкого экситона в исследуемых гетероструктурах. Наилучшее соответствие данных при наклонном падении, показанных на Рис. 2, достигается при спин-орбитальной константе экситона $\beta = 0.07$ eVÅ. Установлено, что постоянная экситона в основном определяется постоянной $lh1$: $\beta \approx \beta_h m_h/(m_e + m_h)$. Определена величина постоянной объёмно-инверсионной асимметрии для подзоны состояний с лёгкой дыркой в 10 нм ZnSe/ZnMgSSe квантовой яме, $\beta_h \approx 0.14$ eVÅ. Это значение согласуется с теоретическими оценками в работе [12].

Экспериментальные результаты демонстрируют присутствие конверсии поляризации и при нормальном падении. Это не связано с эффективным магнитным полем, но указывает на двулучепреломление, вызванное низкой симметрией реальной исследуемой квантовой ямы. Одной из причин для проявления конверсии поляризации при нормальном падении света могут быть деформации в плоскости квантовой ямы. Разделение вкладов от естественной оптической активности и двулучепреломления представлено в разделе 2.3.

В разделе 2.4 установлена качественная зависимость эффекта конверсии поляризации отражённого света от ориентации линейной поляризации падающего. Было установлено, что для света в s поляризации величина конверсии не превышает 2.5 % при всех углах падения. А в p поляризации обнаружено сильное увеличение степени конверсии поляризации в узком угловом диапазоне, где она достигала 7 %. Последнее связано с эффектом интерференционного подавления фонового отражения. Поскольку наблюдаемый сигнал отражения содержит в себе вклад не только от квантовой ямы, но и от поверхности образца, а также от границы структура/подложка,

измеряемый фоновый сигнал является результатом интерференции амплитуд отражённого света от поверхности и от подложки с учётом фазы, набираемой светом при прохождении структуры. Подбор параметров исследуемого образца позволил реализовать условия для наблюдения на лёгком экситоне интерференционного подавления фона, который в свою очередь влияет на измеряемую величину поляризации отражения. Данное свойство исследуемой структуры подробно описано в параграфе 2.4.1. Параметры исследуемого образца позволяют достигнуть в данной поляризации полной компенсации отражения от покрывающего слоя и подложки, что приводит к возрастанию экситонного вклада в отражение и к интерференционному усилению конверсии поляризации [A3]. Тем самым, выбор p поляризованного света в совокупности с параметрами структуры привели к усилению наблюдаемого эффекта конверсии поляризации отражённого света, параграф 2.4.2. Моделирование с учётом реальных параметров исследованной структуры и интерференционного усиления демонстрирует, что в случае идеально параллельного пучка возможно достижение десятков процентов в величине степени конверсии поляризации.

В **третьей главе** “Магнитоиндуцированная пространственная дисперсия полупроводниковых квантовых ям” исследовано влияние магнитного поля на конверсию поляризации отражённого света от ассиметричных гетероструктур на основе соединений $A^{III}B^{V}$ и $A^{II}B^{VI}$. Проведено исследование эффектов магнитоиндуцированной пространственной дисперсии в полупроводниковых квантовых ямах, результаты которого описаны в разделе 3.1. Измерена степень поляризации отражённого сигнала, билинейная по магнитному поля **B** и волновому вектору в плоскости ямы **q** [A4]. Магнитоиндуцированная пространственная дисперсия обусловлена структурной асимметрией квантовой ямы. Теория, учитывающая смешивание состояний тяжёлых и лёгких дырок при конечном волновом векторе в плоскости ямы, по порядку величины описывает экспериментальные данные [A5].

Для наблюдения эффекта магнитоиндуцированной пространственной дисперсии исследуемый образец должен иметь значительную степень структурной асимметрии. В структурах с квантовыми ямами структурно-инверсионная асимметрия может быть вызвана двумя причинами: i) ге-

теропотенциал может иметь треугольную форму или ii) левый и правый барьеры прямоугольной квантовой ямы имеют разную высоту. В работе реализованы обе возможности [A5; A6]. Структура исследованных образцов представлена в параграфе 3.1.1. По появлению как круговой, так и ортогональной линейной компоненты поляризации наблюдалась эллиптичность световой волны, отражённой от изучаемых структур, при падении линейно поляризованного света.

Исследовалась область экситонного резонанса в геометрии, когда магнитное поле приложено в плоскости квантовой ямы параллельно плоскости падения. Эффект резонансно усиливается вблизи экситона с тяжёлой дыркой. Сигнал конверсии поляризации возрастает линейно по магнитному полю, Рис. 3. Непосредственный анализ спектров поляризации затруднен из-за эффектов, не связанных с магнитоиндуцированной пространственной дисперсии, например из-за двулучепреломления. Влияние этих эффектов сильнее, чем вызванная магнитным полем конверсия поляризации. Для идентификации изучаемого эффекта был использован тот факт, что он нечётен по **B**, тогда как другие вклады либо чётны, либо не зависят от магнитного поля. Это позволило использовать для анализа дифференциальный сигнал, аналогичный использованному в работе [13], измеренный для фиксированной экспериментальной геометрии в двух противоположных направлениях магнитного поля. Детали эксперимента и полученные результаты приведены в параграфе 3.1.2.

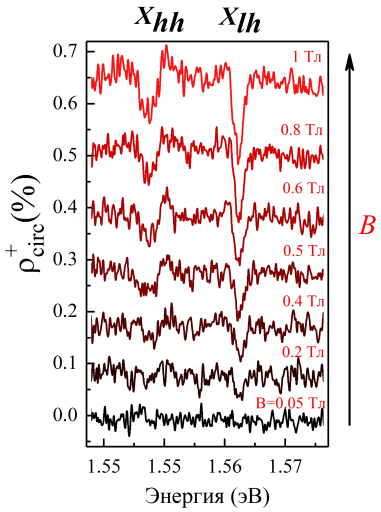

Рис. 3: Нечётная по **B** часть циркулярной поляризации отражённого света от асимметричной структуры GaAs/AlGaAs. Показаны экситонные резонансы с тяжёлой (X_{hh}) и лёгкой (X_{lh}) дыркой. Магнитное поле B растёт от 0.05 до 1 Тл (спектры вертикально смещены для ясности). Температура $T = 3$ K.

В разделе 3.2 обсуждается микроскопическая природа магнитоинду-

цированной пространственной дисперсии полупроводниковых квантовых ям. Представлены теоретическая модель на основе механизмов, позволяющих объяснить и описать данные, полученные экспериментально. Параграф 3.2.1 посвящен описанию орбитального механизма, в параграфе 3.2.2 предложен спиновый механизм, ответственный за изучаемый эффект. В результате показано, что конверсия поляризации отражённого света при воздействии магнитного поля вызвана смешиванием состояний тяжёлых и лёгких дырок в квантовой яме, обусловленным как орбитальным, так и спиновым эффектами. Хотя спиновые и орбитальные механизмы дают сопоставимый вклад в магнитоиндуцированную пространственную дисперсию, орбитальный механизм несколько сильнее для квантовых ям на основе GaAs и CdTe.

Можно оценить параметр структурно-инверсионной асимметрии как $\xi \sim (e/\hbar c)a^2 z_{lh1,hh1}$, где a - длина локализации дырок в структуре квантовой ямы. Для $a = 8$ нм получаем $\xi \sim (z_{lh1,hh1}/a)$ нмТл$^{-1}$. Эффект магнитоиндуцированной пространственной дисперсии в отражении описывается коэффициентом конверсии поляризации $\mathcal{R} \approx \xi q_{\parallel} B$. Это дает для $q_{\parallel} \sim 4 \times 10^4$ см$^{-1}$ оценку $\mathcal{R}/B \sim 0.005(z_{lh1,hh1}/a)$Тл$^{-1}$. Следует сравнить такую теоретическую оценку с экспериментом. Экспериментальные результаты, представленные в параграфе 3.1.2, показывают, что амплитуда сигнала магнитоиндуцированной пространственной дисперсии в квантовых ямах на основе GaAs и CdTe составляет $\sim 10^{-3} B$ Тл$^{-1}$. Это соответствует 20 % степени структурно-инверсионной асимметрии в обеих квантовых ямах: $z_{lh1,hh1}/a \sim 0.2$.

Такая оценка разумна для обеих структур. В исследуемой квантовой яме CdTe шириной 8 нм, структурно-инверсионная асимметрия вызвана различием в материалах левого и правого барьера. Данное различие приводит к смещению волновых функций дырок от точки к середине квантовой ямы и, следовательно, к ненулевому матричному элементу $z_{lh1,hh1}$. В квантовой яме GaAs высота правого барьера плавно увеличивается от нуля до значения высоты левого барьера при ширине 27 нм. В результате, как длина локализации a, так и степень структурно-инверсионной асимметрии больше, чем в квантовой яме CdTe. Это объясняет сопоставимые коэффи-

циенты конверсии поляризации в обеих квантовых ямах на основе GaAs и CdTe, что и показано в разделе 3.3.

В **четвёртой главе** диссертации описано явление магнитогиротропии полупроводниковых квантовых ям. В отличие от рассмотренного в предыдущей главе проявления магнитоиндуцированной пространственной дисперсии в конверсии поляризации отражённого света, данный механизм проявляет себя в поправках к диагональным коэффициентам отражения. В разделе 4.1 показано, что вклад в отражение обусловлен магнитогиротропией квантовых ям, то есть слагаемые в оптическом отклике являются линейными как по напряженности магнитного поля **B**, так и по волновому вектору света **q**. Экспериментально обнаружено по отражению в магнитном поле, ориентированном в плоскости исследуемых структур, проявление объёмно-инверсионной асимметрия полупроводниковых квантовых ям на основе соединений III-V и II-VI, результаты приведены в параграфе 4.1.1. Данное исследование проводилось на той же экспериментальной установке, которая использовалась для измерений методом спектроскопии экситонного отражения с поляризационным разрешением в работах [A4–A6]. Линейный по магнитному полю вклад в коэффициент отражения измеряется при наклонном падении s и p поляризованного света в области экситонных резонансов. Продемонстрировано, что преобразование поляризации обусловлено магнитоиндуцированной пространственной дисперсией в квантовых ямах, которая проявляется во вкладе в коэффициент отражения, билинейном по компонентам магнитного поля в плоскости **B** и волновому вектору света **q**.

Измерены спектры отражения в магнитных полях от −1 Тл до +1 Тл. Для этого были использованы как s, так и p поляризации падающего света. Получены коэффициенты отражения $r_{s,p}$. Проанализирован нечётный вклад по **B** в отражение:

$$D = \frac{r(\mathbf{B}) - r(-\mathbf{B})}{r(\mathbf{B}) + r(-\mathbf{B})}. \tag{3}$$

Амплитуда A определённого таким образом вклада D в каждом спектре отражения используется для количественной оценки влияния магнитного поля. На Рис. 4 приведена зависимость $A(B)$. Экспериментально получено,

что линейный по **q** и **B** вклад в отражение имеет порядок 0,1 % в обеих исследуемых структурах с одиночной квантовой ямой.

В разделе 4.2 описана теория магнитогитротропных эффектов при отражении света, разработанная с учетом линейных по импульсам вкладов объёмно-инверсионной асимметрии в электронных и дырочных эффективных гамильтонианах. Объёмно-инверсионная асимметрия вызывает поправки в коэффициент отражения, полученные экспериментальные данные согласуются с теоретическими оценками. Предложенная в работе [A7] теория даёт следующую оценку для магнитогиротропных поправок: $\Delta r_{s,p} \sim (\beta q \Gamma_0/\Gamma^2)(a/l_B)^2$, где a - ширина квантовой ямы, а l_B - магнитная длина. Для $q = 2.5 \times 10^4$ см$^{-1}$, $\beta = 140$ мэВ Å [12], $\Gamma = 1$ мэВ, $\Gamma_0 = 0.1$ мэВ и $a = 100$ Å, получаем $\Delta r_{s,p} \sim 10^{-3} B$ Тл $^{-1}$. Это значение по порядку величины согласуется с экспериментальными данными для квантовых ям на основе GaAs и CdTe, Рис. 4. Таким образом, видно, что индуцированное объёмно-инверсионной асимметрией спин-орбитальное расщепление электронных и дырочных состояний в квантовой яме дает основной вклад в магнитогиротропные поправки к коэффициентам отражения.

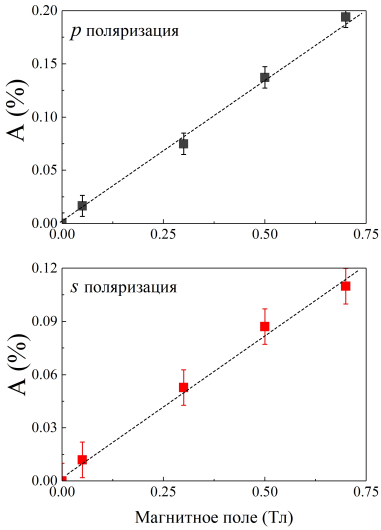

Рис. 4: Магнитополевые зависимости амплитуды сигнала D для s и p поляризованного падающего света на образец с квантовой ямой CdTe. (Линии вспомогательны для глаз.)

Величина такого вклада в области резонанса тяжёлого экситона определяется расщеплениями Дрессельхауза электронов и тяжёлых дырок [A7]. В разделе 4.3 исследуется отношение постоянных спин-орбитального взаимодействия. Установлено, что константа расщепления объёмно-инверсионной асимметрии тяжёлых дырок в квантовых ямах на основе GaAs и CdTe примерно в три раза больше, чем для электронов.

В **Заключении** обобщены основные результаты работы:

1. Экспериментально наблюдалась естественная оптическая активность квантовых ям, проявляющая себя в конверсии поляризации отражённого света в области экситонных резонансов.

2. Установлено, что естественная оптическая активность вызвана спин-орбитальным взаимодействием. Определена постоянная объёмно-инверсионной асимметрии для состояния экситона с лёгкой дыркой в 10 нм квантовой яме ZnSe/ZnMgSSe, равная 0.14 эВÅ.

3. Выявлено различие в проявлении эффекта при изменении ориентации линейной поляризации падающего света. Для света, поляризованного в плоскости падения, обнаружено резкое увеличение степени конверсии поляризации в узком диапазоне углов падения, связанное с влиянием интерференции отражённой волны на толщине структуры.

4. Экспериментально обнаружена магнитоиндуцированная пространственная дисперсия в квантовых ямах на основе соединений $A^{III}B^{V}$ и $A^{II}B^{VI}$.

5. Степень структурной асимметрии исследуемых квантовых ям GaAs/AlGaAs и CdZnTe/CdTe/CdMgTe, объясняемая смешиванием тяжёлых и лёгких дырочных состояний, индуцированным магнитным полем в плоскости структур, параллельным направлению распространения света, составляет 20%.

6. Магнитоиндуцированная пространственная дисперсия в квантовых ямах на основе соединений $A^{III}B^{V}$ и $A^{II}B^{VI}$, возникающая из-за асимметрии структуры квантовых ям, проявляет себя во вкладе в коэффициент отражения, билинейном по компонентам магнитного поля в плоскости и волновому вектору света, и обусловлена смешиванием состояний тяжёлых и лёгких дырок в квантовой яме из-за как орбитального, так и спинового эффектов в магнитном поле.

7. Магнитогиротропный вклад в отражение, обусловленный объёмно-инверсионной асимметрией, измерен в полупроводниковых квантовых ямах GaAs и CdTe. Установлено что, константа электронного расщепления объёмно-инверсионной асимметрии в исследуемых структурах с одиночной квантовой ямой в три раза меньше, чем для тяжёлых дырок.

Список публикаций по теме диссертации

[A1] Optical activity of quantum wells / L. V. Kotova, A. V. Platonov, V. N. Kats, V. P. Kochereshko, S. V. Sorokin, S. V. Ivanov, L. E. Golub // Phys. Rev. B. — 2016. — Vol. 94. — P. 165309.

[A2] Проявление PT симметрии в экситонных спектрах квантовых ям / В. П. Кочерешко, Л. В. Котова, И. С. Хахалин, R. T. Cox, H. Mariette, R. Andre, H. Bukari, С. В. Иванов // ФТП. — 2017. — Т. 51, № 12. — С. 1605.

[A3] Интерференционное усиление конверсии поляризации света от структур с квантовой ямой / Л. В. Котова, А. В. Платонов, В. П. Кочерешко, С. В. Сорокин, С. В. Иванов, Л. Е. Голуб // ФТТ. — 2017. — Т. 59, № 11. — С. 2148.

[A4] Невзаимные оптические и магнитооптические эффекты в полупроводниковых квантовых ямах / Л. В. Котова, А. В. Платонов, В. Н. Кац, Т. С. Шамирзаев, R. Andre, В. П. Кочерешко // ФТТ. — 2018. — Т. 60, № 11. — С. 2229.

[A5] Magnetospatial dispersion of semiconductor quantum wells / L. V. Kotova, V. N. Kats, A. V. Platonov, V. P. Kochereshko, R. Andre, L. E. Golub // Phys. Rev. B. — 2018. — Vol. 97. — P. 125302.

[A6] Effects of Spatial Dispersion in Symmetric and Asymmetric Semiconductor Quantum Wells / L. V. Kotova, A. V. Platonov, V. N. Kats, S. V. Sorokin, S. V. Ivanov, R. Andre, V. E. Bugrov, V. P. Kochereshko // phys. stat. sol. (b). — 2019. — P. 1800665.

[A7] Magnetogyrotropic reflection from quantum wells induced by bulk inversion asymmetry / L. V. Kotova, V. N. Kats, A. V. Platonov, V. P. Kochereshko, R. Andre, L. E. Golub // Phys. Rev. B. — 2019. — Vol. 99. — P. 035302.

Список цитируемой литературы

[1] *Ivchenko E. L.* Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures. — Alpha Science Int., Harrow, UK, 2005. — ISBN 9781842651506.

[2] Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides / Y. A. Vlasov, M. O'Boyle, H. F. Hamann, S. J. McNab // Nature. — 2005. — Vol. 438. — P. 65–69.

[3] *Агранович В. М.*, *Гинзбург В. Л.* Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. — 2-е изд. — Москва : Наука, 1979.

[4] Giant nonlinear optical activity in a plasmonic metamaterial / M. Ren, E. Plum, J. Xu, N. I. Zheludev // Nature Commun. — 2012. — Vol. 3. — P. 833.

[5] Terahertz Metamaterials for Linear Polarization Conversion and Anomalous Refraction / N. K. Grady, J. E. Heyes, D. R. Chowdhury, Y. Zeng, M. T. Reiten, A. K. Azad, A. Taylor, D. A. R. Dalvit, H.-T. Chen // Science. — 2013. — Vol. 340. — P. 1304–1307.

[6] Controlling circular polarization of light emitted by quantum dots using chiral photonic crystal slabs / S. V. Lobanov, S. G. Tikhodeev, N. A. Gippius, A. A. Maksimov, E. V. Filatov, I. I. Tartakovskii, V. D. Kulakovskii, T. Weiss, et al. // Phys. Rev. B. — 2015. — Vol. 92. — P. 205309.

[7] *Zvezdin A. K.*, *Kotov V. A.* Modern Magnetooptics and Magnetooptical Materials. — 1rd. — Bristol, Philadelphia : Institute of Physics Publishing, 1997. — ISBN 9780750303620.

[8] *Tokura Y.*, *Nagaosa N.* Nonreciprocal responses from non-centrosymmetric quantum materials // Nat. Commun. — 2018. — Т. 9. — С. 3740.

[9] *Levy M.*, *Baryshev A. V.*, *Inoue M.* Magnetophotonics; From Theory to Applications. — Springer, Berlin, 2013. — ISBN 9783642355097.

[10] *Ganichev S. D.*, *Golub L. E.* Interplay of Rashba/Dresselhaus spin splittings probed by photogalvanic spectroscopy –A review // phys. stat. sol. (b). — 2014. — Vol. 251, no. 9. — P. 1801–1823.

[11] Спиновая ориентация дырок при протекании тока в теллуре / В. А. Шалыгин, А. Н. Софронов, Л. Е. Воробьев, И. И. Фарбштейн // ФТТ. — 2012. — Т. 54, вып. 12. — С. 2237—2247.

[12] *Durnev M. V.*, *Glazov M. M.*, *Ivchenko E. L.* Spin-orbit splitting of valence subbands in semiconductor nanostructures // Phys. Rev. B. — 2014. — Vol. 89. — P. 075430.

[13] Routing the emission of a near-surface light source by a magnetic field / F. Spitzer, A. N. Poddubny, I. A. Akimov, V. F. Sapega, L. Klompmaker, L. E. Kreilkamp, L. V. Litvin, R. Jede, et al. // Nat. Phys. — 2018. — Vol. 14. — P. 1043.