

*На правах рукописи*



Кожемякина Елена Владимировна

**Процесс формирования экситонов в GaAs и AlGaAs  
при нерезонансном оптическом возбуждении**

01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Журавлев Константин Сергеевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Альперович Виталий Львович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник.

Черненко Александр Васильевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук, старший научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Защита состоится 11 июня 2013 года в 15 часов на заседании диссертационного Совета Д 003.037.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан 7 мая 2013 года.

Ученый секретарь диссертационного Совета,  
доктор физико-математических наук



Погосов Артур Григорьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению процесса образования экситонов из свободных носителей заряда при нерезонансном оптическом возбуждении в эпитаксиальных слоях GaAs и AlGaAs с помощью разработанного метода, основанного на измерении кинетики величины спинового расщепления экситонной линии.

### Актуальность проблемы

Экситонные эффекты наблюдаются в полупроводниках в довольно широком диапазоне условий – низких и средних плотностях оптического возбуждения, от гелиевых до комнатных температур. В настоящее время повышенный интерес к экситонам связан с их влиянием на оптические свойства полупроводниковых структур. Экситонные эффекты в полупроводниках перспективны для создания электрооптических модуляторов излучения в ближнем инфракрасном и терагерцовом диапазонах [1] и быстродействующих переключателей [2]. Одно из популярных направлений сегодня – изучение взаимодействия слабого электромагнитного поля, рождающего экситонные поляритоны, со структурами, представляющими собой фотонные кристаллы или микрорезонаторы [3].

Кроме того, экситоны являются во многих случаях удобным объектом для проверки действенности основных приближений квантовой кинетики квазичастиц. Одна из нерешенных проблем в этой области – описание процесса образования экситонов. Известно, что в кристаллах  $A_3B_5$ , таких как GaAs, при поглощении фотона с энергией выше экситонного перехода образуются свободные носители заряда, которые после остывания связываются в экситоны. Несмотря на то, что этот процесс наблюдался в экспериментах множество раз, он до сих пор остается не изученным до конца. До настоящего времени не установлено характерное время формирования экситонов, не выявлены определяющие его механизмы. В трехмерных системах этот вопрос практически не изучался, в двумерных структурах было осуществлено большое количество исследований, однако разброс опубликованных в литературе результатов составляет несколько порядков: от менее чем 10 пс до 1 нс [4]. Это объясняется как различием условий эксперимента, так и недостатками применяемых методов исследования. Влияние условий эксперимента заключается в том, что темп генерации экситонов пропорционален произведению плотностей электронов и дырок, а также зависит от вероятности взаимодействия электрон-дырочной пары с фононом, которая определяется кинетической энергией пары и температурой системы. Теоретически, при изменении плотности возбуждения даже на один порядок, среднее характерное время, описывающее формирование популяции экситонов, может измениться более чем на два порядка, что, возможно, является причиной разброса экспериментальных данных. Большую проблему представляет также поиск метода измерения плотности экситонов. Будучи электрически нейтральными, экситоны наиболее хорошо детектируются оптическими методами. Однако это создает ряд трудностей в полупроводниках с малой электрон-фононной связью, в которых наблюдается лишь прямая рекомбинация эксито-

нов без участия фононов. Закон сохранения импульса требует, чтобы волновой вектор экситона был равен волновому вектору излучаемого фотона, поэтому лишь очень маленькая доля от общего числа экситонов участвует в фотолюминесценции (ФЛ). Так как неизвестно, каковы функции распределения неравновесных экситонов, невозможно напрямую определить, какова полная плотность экситонов (в том числе, с большими волновыми векторами). Можно лишь опираться на догадки о том, как формирование экситонов изменяет спектр и оптические свойства среды. Для этого анализируются ширина и форма линии ФЛ, высокоэнергетическое крыло ФЛ, кинетика спектра поглощения. На основе этих данных определяются некоторые характерные времена: исчезновения рассеяния экситонов электрон-дырочной плазмой, остывания газа носителей заряда и экситонов и т.п., после чего делается вывод, что данные времена отражают формирование популяции экситонов (краткий исторический обзор работ по этому направлению см. в [5]).

В настоящее время вопрос о том, какова кинетика формирования экситонов, до сих пор остается открытым и вызывает интерес. Недавно был предложен новый способ оценки полной плотности экситонов с помощью измерения поглощения терагерцового излучения экситонами [6]. Однако нет уверенности, что на терагерцовое поглощение не влияют другие процессы, например, поглощение электронами, кроме того, этот способ трудоемок, требует наличия терагерцового источника излучения и опирается на ряд предположений, например, о наличии термодинамического равновесия между электрон-дырочной и экситонной подсистемами. Результаты, полученные с помощью этого метода, также являются довольно спорными. Например, этот метод показал, что при нерезонансном фотовозбуждении до 40% экситонов образуется сразу после поглощения лазерного импульса (за время меньше 1 пс) [7], чему пока нет подходящего теоретического объяснения [8].

### **Цель и задачи работы**

Цель работы состояла в разработке нового метода определения плотности экситонов, основанного на измерении спинового расщепления между уровнями энергии экситонов со спинами  $+1$  и  $-1$ , возникающего при циркулярно поляризованном фотовозбуждении, и исследовании с его помощью процесса формирования экситонов в слоях GaAs и AlGaAs.

Достижение цели работы потребовало решения следующих задач:

1. Установление особенностей энергетического спектра AlGaAs. Оценка величины расщепления в валентной зоне уровней с проекциями момента  $m = \pm 3/2$  и  $\pm 1/2$ , вызванного одноосным напряжением из-за рассогласования постоянных решетки GaAs подложки и AlGaAs слоя.
2. Разработка методики регистрации спинового расщепления экситонных уровней в слоях GaAs и AlGaAs.
3. Детальное исследование кинетики спинового расщепления в слоях GaAs и AlGaAs при различных энергиях и плотностях фотовозбуждения.
4. Применение результатов, полученных в ходе решения предыдущей задачи, для нахождения кинетики плотности экситонов в слоях GaAs и AlGaAs.

5. Построение модели, описывающей полученные результаты, анализ факторов, влияющих на изменение кинетики плотности экситонов при нерезонансном оптическом возбуждении.

#### **Научная новизна работы**

Все основные результаты и выводы работы получены впервые. Впервые наблюдалась отрицательная циркулярная поляризация ФЛ экситонов в AlGaAs, возникающая вследствие одноосного напряжения из-за рассогласования постоянных решетки GaAs подложки и AlGaAs слоя. Впервые наблюдалось спиновое расщепление экситонов в объемном материале. Впервые наблюдалась немонотонная кинетика величины расщепления. Показано, что такая зависимость отражает нарастание плотности экситонов и их деполяризацию, и сделан вывод, что с ее помощью возможно исследование процесса формирования экситонов. Впервые с помощью метода наблюдения спинового расщепления были определены характерные времена формирования экситонов. Впервые было продемонстрировано, что с увеличением интенсивности фотовозбуждения увеличивается время, за которое плотность экситонов достигает максимума, и предложена модель, учитывающая зависимость константы бимолекулярной реакции формирования экситонов и времени их излучательной рекомбинации от температуры электрон-дырочного газа, объясняющая этот результат.

#### **Практическая значимость работы**

Практическую ценность составляет наблюдение и оценка величины расщепления в валентной зоне ветвей легких и тяжелых дырок из-за разницы постоянных кристаллической решетки GaAs подложки и AlGaAs пленки. Вторым важным вкладом является разработка методики измерения кинетики плотности экситонов, обеспечивающей простой и эффективный метод исследования времени формирования экситонов. Методика основывается на наблюдении эволюции энергетического положения линий ФЛ экситонов с противоположными направлениями проекции спина, регистрируемых при циркулярно поляризованном нестационарном фотовозбуждении. Третьим результатом является установление характерных времен нарастания плотности экситонов, которые важны при конструировании приборов на основе экситонных переходов.

#### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Расщепление уровней дырок с проекциями момента  $m = \pm 3/2$  и  $\pm 1/2$ , вызванное напряжением из-за рассогласования постоянных решетки GaAs подложки и AlGaAs слоя, составляет 2–4 мэВ и приводит к отрицательной циркулярной поляризации ФЛ экситонов в слоях AlGaAs.

2. В объемных образцах GaAs и AlGaAs наблюдается спиновое расщепление экситонов, величина которого достигает 1,5 мэВ.

3. В слоях GaAs и AlGaAs наблюдается немонотонная кинетика величины спинового расщепления. Нарастание величины расщепления отражает процесс формирования

экситонов. Полная плотность экситонов может быть определена из измерения величины спинового расщепления экситонов и степени их циркулярной поляризации.

4. При увеличении интенсивности фотовозбуждения с  $10^{15}$  до  $3 \times 10^{16}$   $\text{см}^{-3}$  в слоях GaAs и AlGaAs наблюдается увеличение характерного времени нарастания плотности экситонов. Этот эффект связан с ростом средней температуры газа носителей заряда и экситонов, что приводит к увеличению времени излучательной рекомбинации экситонов и снижению константы бимолекулярной реакции формирования экситонов.

### **Апробация работы**

Результаты, полученные в данной работе, докладывались на XI и XIII Международной школе-семинаре по люминесценции и лазерной физике (Иркутск, 2008, 2012), X Всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2008), XLVII Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2009), V International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (Cracow, Poland 2009), IX и X Российской конференции по физике полупроводников (Новосибирск-Томск, 2009 и Нижний Новгород, 2011), I International School on Spin-Optronics (Les Houches, France, 2010), 11th и 12th International Conference on Optics of Excitons in Confined Systems (Madrid, Spain, 2009 и Paris, France, 2011), 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (Zurich, Switzerland, 2012), а также докладывались и обсуждались на семинарах Института физики полупроводников СО РАН.

### **Публикации**

По результатам, полученным в данной работе, опубликовано 28 печатных работ, среди которых 9 статей в рецензируемых журналах.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы из 148 наименований, содержит 135 страниц текста, включая 30 рисунков и 1 таблицу.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Во введении* обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, указана их научная новизна и практическая значимость, дана краткая аннотация полученных результатов.

*Первая глава* является обзорной. В ней рассмотрены механизмы формирования экситонов при резонансном и нерезонансном оптическом возбуждении. Дан подробный обзор экспериментальных и теоретических исследований процесса формирования экситонов из свободных электрон-дырочных пар. Рассмотрены основные подходы к исследованию кинетики формирования экситонов. Обсуждаются недостатки применяемых методов. Рас-

смотрены причины возникновения спинового расщепления экситонов. Обсуждается, как этот эффект может быть использован для измерения плотности экситонов.

Во второй главе описываются методические вопросы исследования. В первом параграфе главы приведены условия получения исследованных в работе слоев GaAs и AlGaAs с мольной долей алюминия  $x_{Al} = 0,0015, 0,03, 0,054, 0,09$  и  $0,15$ , выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией (100). Дана характеристика образцов: все образцы имели  $p$ -тип проводимости, концентрация дырок по данным эффекта Холла уменьшалась с  $8 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$  в GaAs до  $(1-5) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$  в AlGaAs. Наименьшая концентрация дырок  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  наблюдалась в  $Al_{0,15}Ga_{0,85}As$ . Низкая концентрация фоновых примесей в образцах подтверждалась следующим. Во-первых, ширина экситонных линий в исследованных образцах не превышала теоретически предсказанных минимальных значений для тройного твердого раствора AlGaAs. Во-вторых, в спектрах ФЛ отношение интенсивностей линий свободных и связанных экситонов было очень высоким. В-третьих, наблюдалась линейная зависимость интегральной интенсивности ФЛ от плотности фотовозбуждения, при ее изменении в широком диапазоне.

Во втором параграфе главы описаны применявшиеся методы исследования – стационарной и нестационарной ФЛ и оптической ориентации.

В третьем параграфе описаны условия экспериментов и схемы измерительных установок. Основными элементами установок являлись возбуждающий лазер, набор поляризационных приспособлений, спектрометр, криостат, система регистрации ФЛ и система управления установкой на основе ЭВМ. Линейно поляризованное излучение лазера проходило через четвертьволновую пластину, преобразуясь в циркулярно поляризованное, и направлялось на образец, помещенный в криостат. ФЛ регистрировалась в геометрии обратного рассеяния. Собранное линзой рекомбинационное излучение пропусклось через вторую четвертьволновую пластину, переводящую циркулярно поляризованное излучение в линейное, и линейный поляризатор. Затем излучение фокусировалось на входную щель спектрометра. Данная схема позволяла получить отдельно данные о поляризованной и деполаризованной компонентах ФЛ.

В четвертом параграфе описана методика обработки спектров нестационарной ФЛ для получения из них информации о величине спинового расщепления и плотности экситонов. Для определения величины энергетического расщепления между уровнями энергии экситонов со спинами  $+1$  и  $-1$ , определялось положение линий свободных экситонов в поляризованных и деполаризованных спектрах (ФЛ с тем же направлением циркулярной поляризации, что и возбуждающий свет,  $I_{\sigma^+}$ , и с противоположным –  $I_{\sigma^-}$ ). Для этого линии свободных экситонов в обоих спектрах описывались кривыми Гаусса с помощью метода наименьших квадратов. Положение максимума кривой бралось за значение энергии свободных экситонов. Величина погрешности была определена как энергетическое положение пика, при котором среднее квадратическое отклонение увеличивалось на 20%

(разница между экспериментальными данными и подгоночной кривой определялась визуально), и была равна  $\pm 0,01$  мэВ. Величина расщепления определялась как разность между энергетическим положением линии в поляризованном и деполаризованном спектре с точностью до  $\pm 0,02$  мэВ.

В третьей главе представлены данные о наблюдении отрицательной циркулярной поляризации ФЛ на энергиях свободных и связанных экситонов в объемных образцах AlGaAs.

В первом параграфе главы сообщается о наблюдении отрицательной циркулярной поляризации ФЛ в узком диапазоне энергий, лежащем на несколько мэВ выше энергии переходов, относящихся к максимуму ФЛ свободных экситонов. При нерезонансном оптическом возбуждении с энергией фотонов 1,748 эВ, которая отвечает переходам с энергией примерно на 20 мэВ выше ширины запрещенной зоны  $E_g$ , наблюдалась, как и ожидается в AlGaAs, положительная степень циркулярной поляризации, равная нескольким процентам. На рисунке 1 показаны спектры ФЛ экситонов  $-I_\Sigma = (I_{\sigma^+} + I_{\sigma^-})$  и разности между поляризованной и деполаризованной составляющими ФЛ  $I_\Delta = (I_{\sigma^+} - I_{\sigma^-})$ , где  $I_{\sigma^+}$  и  $I_{\sigma^-}$  – интенсивность право- и левополяризованной ФЛ для образца  $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ . Однако в узком диапазоне энергий 2–4 мэВ выше энергии свободного экситона  $E_{\text{FX}}$  (равна в  $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$  1,729 эВ), степень циркулярной поляризации ФЛ была отрицательной. При резонансном возбуждении в этот диапазон энергий, наблюдалось изменение знака  $I_\Delta$  (штрих-пунктирная линия на рисунке 1, отмеченная как  $\hbar\omega_{\text{neg}}$ ), т.е. весь спектр ФЛ имел отрицательную степень циркулярной поляризации.

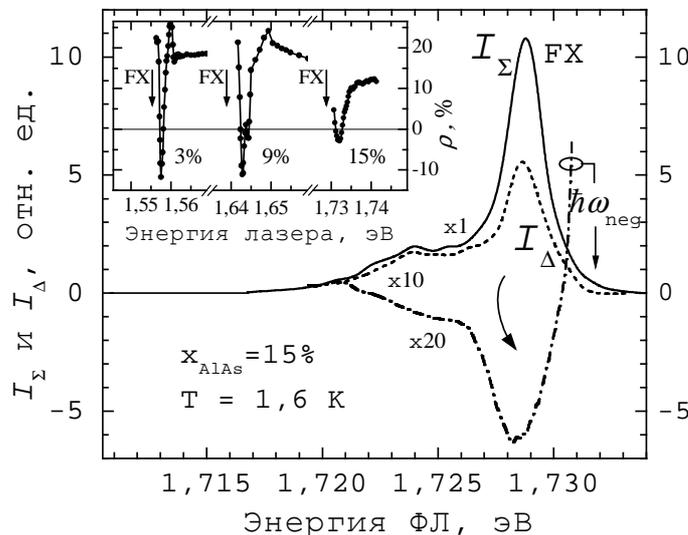


Рисунок 1 – Спектр суммарного  $I_\Sigma$  (сплошная линия) и разностного  $I_\Delta$  сигнала (пунктирная и штрих-пунктирная линии). Энергия возбуждения: сплошная и пунктирная линии – 1,748 эВ; штрих-пунктирная линия (обозначена  $\hbar\omega_{\text{neg}}$ ) – 1,7318 эВ. На вставке: зависимость степени поляризации ФЛ свободных экситонов от энергии фотонов для образцов AlGaAs с  $x_{\text{Al}} = 0,03; 0,09$  и  $0,15$  (стрелкой отмечено положение максимума линии свободных экситонов)

Во втором параграфе обсуждаются причины возникновения отрицательной циркулярной поляризации. Показано, что данный эффект вызван несоответствием постоянных ре-

шетки GaAs подложки и AlGaAs пленки, упругая деформация которой приводит к энергетическому расщеплению между подзонами дырок с проекцией углового момента  $m = \pm 1/2$  и  $\pm 3/2$ . Показано, что величина расщепления составляет несколько мэВ, и может наблюдаться в эксперименте, несмотря на то, что рассогласование постоянных решетки мало (для  $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$  – 0,022%). Таким образом, остаточное напряжение, которым, как правило, пренебрегают при анализе систем на основе AlGaAs/GaAs, может значительно влиять на энергетический спектр и оптические свойства слоев AlGaAs. Полученные результаты хорошо согласуются с расчетами, опубликованными Сейсяном Р. П. и соавторами [9], которые наблюдали расщепление линии поглощения экситонов в  $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$  на две компоненты, отстоящие друг от друга примерно на 2 мэВ, и дали сходную интерпретацию.

В четвертой главе приведены результаты исследования спинового расщепления в слоях GaAs и AlGaAs.

В первом параграфе главы представлены данные о кинетике поляризованной ФЛ. Во втором параграфе главы сообщается о наблюдении в объемных образцах расщепления уровней экситонов с проекцией спина на направление светового луча +1 и –1. Типичные спектры ФЛ,  $I_{\sigma^+}$  и  $I_{\sigma^-}$  показаны на рисунке 2 (а).

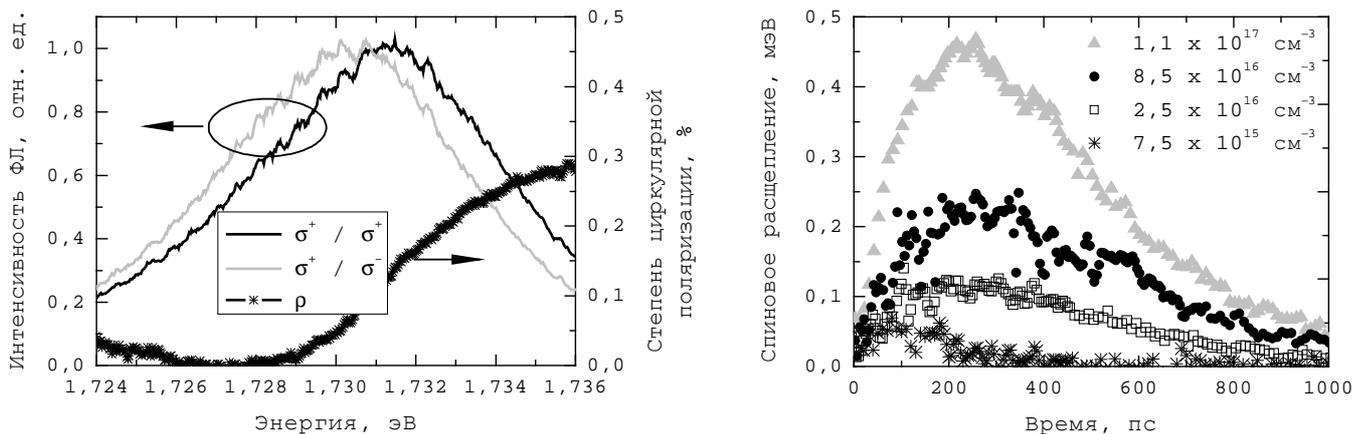


Рисунок 2 – (а) Спектры нестационарной ФЛ, нормированные на единицу, и степень циркулярной поляризации ФЛ через 300 пс после возбуждения с энергией 1,763 эВ в  $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ . Плотность возбуждения  $8 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . (б) Кинетика величины спинового расщепления в  $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ . Энергия возбуждения 1,781 эВ (50 мэВ выше энергии ФЛ свободного экситона)

Кросс-поляризованная компонента  $\sigma^-$  лежала ниже по энергии, чем компонента  $\sigma^+$ , поляризованная так же, как лазер. В объемном материале спиновое расщепление экситонов наблюдается впервые. Ранее данное явление наблюдалось только в двумерных системах, и предполагалось, что наблюдение этого явления в объемных слоях невозможно [10].

На рисунке 2 (б) представлена кинетика величины спинового расщепления, измеренная при нерезонансном фотовозбуждении (на 50 мэВ выше энергии свободного экситона) при различных плотностях возбуждения, для образца  $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ . Расщепление немонотонно изменяется со временем: оно нарастает в течение первых нескольких сотен пикосекунд, а затем экспоненциально спадает до нуля в течение примерно 1 нс. Данная зависимость радикально отличается от известного из литературы поведения, наблюдав-

шегося в квантовых ямах, где было зафиксировано монотонное снижение величины расщепления от максимального значения до нуля [11, 12]. Еще одно отличие данных результатов – малая величина расщепления в объемных образцах (максимум 1,5 мэВ) по сравнению с двумерными системами (до 10 мэВ). Аналогичная картина наблюдалась в  $\text{Al}_{0,054}\text{Ga}_{0,946}\text{As}$  и  $\text{GaAs}$ .

Немонотонная кинетика величины спинового расщепления в исследованных образцах может быть объяснена тем, что темпы образования, релаксации и рекомбинации экситонов в объемных слоях ниже, чем в квантово-размерных структурах. Действительно, в  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  квантовых ямах расщепление наблюдалось только в первые несколько сотен пикосекунд после фотовозбуждения, после чего поляризация ФЛ терялась [11]. Вполне вероятно, что в двумерных системах кинетика расщепления также немонотонна, но наблюдение этого эффекта ограничивалось разрешением установок.

В третьем параграфе главы измеренные зависимости применяются для определения кинетики плотности экситонов. Согласно теории, величина спинового расщепления пропорциональна плотности экситонов и степени ориентации их спинов [13]:

$$\Delta_S^{3D} = 3,4 |E_x| (X_+ - X_-) a_B^3 = 3,4 |E_x| \rho \times X \times a_B^3, \quad (1)$$

где  $X_+$  и  $X_-$  – плотности экситонов со спинами  $+1$  и  $-1$ ;  $E_x$  – энергия связи экситона;  $a_B$  – борковский радиус;  $\rho$  – степень циркулярной поляризации экситонов.

Из кинетики спинового расщепления с помощью формулы (1) рассчитывались зависимости плотности экситонов от времени  $X(t)$ . Для того чтобы определить время, характеризующее кинетику плотности экситонов, полученные зависимости  $X(t)$  описывались двухэкспоненциальной моделью (2):

$$X(t) = n_0 \times \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \times e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (2)$$

где  $n_0$  – начальная плотность электрон-дырочных пар,  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – характерные времена, описывающие нарастание и спад плотности экситонов.

На рисунке 3 представлены зависимости рассчитанной величины  $\tau_1$  для образцов  $\text{GaAs}$ ,  $\text{Al}_{0,054}\text{Ga}_{0,946}\text{As}$  (а) и  $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$  (б) от плотности оптического возбуждения. Ожидалось, что  $\tau_1$  будет уменьшаться с ростом плотности фотовозбуждения, т.к. характерное время связывания электрона и дырки в экситон равно  $1 / C \times n$ , т.е. обратно пропорционально плотности электрон-дырочных пар.

Для того чтобы объяснить наблюдаемую немонотонную зависимость характерного времени  $\tau_1$  от интенсивности оптического возбуждения, была построена модель, описывающая основные процессы релаксации электронной системы после возбуждения ее лазерным импульсом. Модель учитывала зависимость константы бимолекулярной реакции образования экситонов  $C$  от температуры электрон-дырочного газа, ионизацию экситонов и рост времени излучательной рекомбинации экситонов при увеличении их средней кинетической энергии.

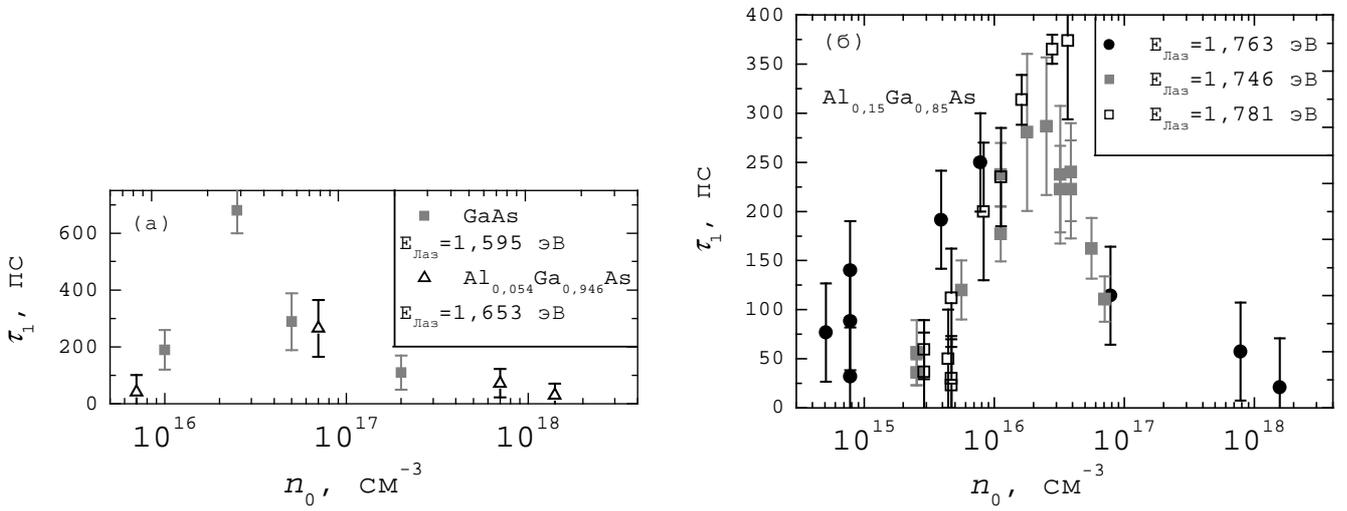


Рисунок 3 – Зависимость характерного времени  $\tau_1$ , описывающего кинетику нарастания плотности экситонов, определенного по формуле (22), от плотности фотовозбуждения

Модель предсказывает, что при возрастании плотности фотовозбуждения  $n_0$  увеличивается средняя температура газа носителей заряда и экситонов. При этом время  $\tau_1$ , отвечающее за нарастание плотности экситонов, будет расти при увеличении  $n_0$  с  $10^{15}$  до  $3 \times 10^{16}$  см $^{-3}$ . При дальнейшем увеличении плотности фотовозбуждения  $\tau_1$  начинало уменьшаться, повторяя поведение, наблюдавшееся экспериментально, и показанное на рисунке 3. Таким образом, построенная модель достаточно хорошо описывает экспериментальные данные и предсказывает немонотонную зависимость  $\tau_1$  от плотности оптического возбуждения.

Сравнение полученных данных с результатами других исследователей затруднено тем, что разброс экспериментальных значений измеренных времен формирования экситонов очень велик. Тем не менее, время  $\tau_1$ , лежащее в диапазоне 50–360 пс, измеренное в данной работе, хорошо согласуется по порядку величины с наиболее свежими исследованиями [4, 7].

Что касается зависимости  $\tau_1$  от интенсивности фотовозбуждения, то в литературе можно найти всего две экспериментальные работы на эту тему, обе посвященные двумерным структурам. В исследовании J. Szczytko et al. [1] сообщается об уменьшении с ростом интенсивности фотовозбуждения характерного времени связывания электрона и дырки в экситон  $1 / C \times n$ . С другой стороны, в работе R. Kumar et al. [14] наблюдается такая же зависимость величины  $\tau_1$ , определяемой из двухэкспоненциальной аппроксимации, как и в данном исследовании. Кроме того, теоретический расчет, проведенный M.H. Zhang et al. [15], показал, что время формирования экситонов должно быть пропорционально  $1 + k_B T_{eh} / E_x$ , т.е. должно возрастать с увеличением температуры электрон-дырочного газа. Это наблюдается в проведенных в данной работе экспериментах: при увеличении интенсивности возбуждения наблюдается рост температуры носителей заряда.

В заключении диссертации указан вклад автора и сформулированы основные результаты и выводы работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Обнаружено явление отрицательной циркулярной поляризации в объемных образцах AlGaAs. Отрицательная поляризация наблюдалась при возбуждении с энергией на 2–4 мэВ больше энергии максимума интенсивности ФЛ свободного экситона (во всем спектре), а также в указанном диапазоне энергий при нерезонансном возбуждении с энергией, большей ширины запрещенной зоны  $E_g$ . Показано, что данный эффект возникает из-за снятия вырождения в валентной зоне, возникающего вследствие расщепления уровней дырок с проекциями момента  $m = \pm 3/2$  и  $\pm 1/2$ . Показано, что причиной этого является одноосное напряжение, вызванное рассогласованием постоянных решетки GaAs подложки и AlGaAs слоя. Таким образом, данное исследование доказывает, что остаточное напряжение, которым, как правило, пренебрегают при анализе структур на основе AlGaAs/GaAs, может значительно влиять на энергетический спектр и оптические свойства таких систем.

2. Обнаружено впервые в объемных образцах спиновое расщепление уровней энергии свободных экситонов, возникающее вследствие межэкситонного взаимодействия. Исследована зависимость величины расщепления от условий эксперимента. Показано, что в диапазоне интенсивностей возбуждения до  $10^{17}$  см<sup>-3</sup> расщепление линейно зависит от разницы плотностей экситонов с проекциями спина +1 и -1, хорошо согласуясь с теорией. При больших значениях плотности возбуждения экспериментально измеренная величина расщепления насыщается, в то время как теория не предсказывает насыщения, что объясняется уменьшением доли экситонов в общем объеме сгенерированных электрон-дырочных пар вблизи перехода Мотта.

3. Обнаружено, что в объемных образцах кинетика спинового расщепления имеет немонотонный характер, возрастая в первые несколько сотен пикосекунд после возбуждения, и затем экспоненциально спадая. Данное поведение отличается от наблюдавшегося до этого в двумерных системах монотонного экспоненциального падения величины расщепления. Показано, что первоначальное нарастание величины спинового расщепления отражает процесс формирования экситонов.

4. Разработан новый метод регистрации плотности экситонов на основе измерения величины спинового расщепления. С помощью данного метода была исследована зависимость кинетики плотности экситонов от интенсивности возбуждающего света в слоях GaAs и AlGaAs.

5. Обнаружено, что при увеличении плотности оптического возбуждения в диапазоне от  $10^{15}$  до  $3 \times 10^{16}$  см<sup>-3</sup> возрастало время, характеризующее нарастание плотности экситонов, что противоречило ожидавшимся результатам.

6. Построена модель, описывающая кинетику плотности экситонов и интенсивности нестационарной фотолуминесценции, включающая процесс формирования, ионизации и излучательной рекомбинации экситонов. Показано, что увеличение характерного времени, за которое плотность экситонов достигает максимума, при повышении интен-

сивности фотовозбуждения объясняется ростом времени излучательной рекомбинации экситонов и уменьшением константы бимолекулярной реакции формирования экситонов из-за разогрева носителей заряда при высоких плотностях оптического возбуждения.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТЫ

A1. Amo A., Ballarini D., Sanvitto D., Kozhemyakina E., Vina L., Lemaître A., Bajoni D., Bloch J. Optically-induced ultrafast quenching of the semiconductor quantum well luminescence // *Appl. Phys. Lett.* – 2008 – Vol. 92, N 6. – P. 061912–1–3.

A2. Amo A., Ballarini D., Sanvitto D., Kozhemyakina E., Viña L., Skolnick M. S., Roberts J. S. Exciton warming in III-V semiconductors and microcavities // *Superlattices and Microstructures* – 2008 – Vol. 43, N 5–6. – P. 449–453.

A3. Amo A., Ballarini D., Kozhemyakina E., Sanvitto D., Klotkowski L., Viña L., Bajoni D., Bloch J., Skolnick M. S., Roberts J. S. Ultrafast tailoring of the exciton distribution in quantum wells // *Phys. Stat. Solidi (b)* – 2008 – Vol. 245, N 6. – P. 1064–1066.

A4. Gilinsky A. M., Winter A., Mejía-García C., Pascher H., Zhuravlev K. S., Efanov A. V., Kozhemyakina E. V. Negative spin polarization in AlGaAs photoluminescence // *Phys. Stat Solidi (c)* – 2008 – Vol. 5, N 1. – P. 330–333.

A5. Kozhemyakina E. V., Zhuravlev K. S., Amo A., Ballarini D., Viña L. Observation of the zero-magnetic-field exciton spin splitting in high-quality bulk GaAs and AlGaAs // *Appl. Phys. Lett.* – 2009 – Vol. 95, N 6. – P. 182107–1–3.

A6. Gilinsky A. M., Winter A., Mejía-García C., Pascher H., Zhuravlev K. S., Efanov A. V., Kozhemyakina E. V., Amo A., Viña L. Reversal of spin polarization direction in excitonic photoluminescence of AlGaAs // *Europhysics Letters* – 2009 – Vol. 88, N 1. – P. 17001–1–5.

A7. Кожемякина Е. В., Амо А., Вина Л., Журавлев К. С. Наблюдение спинового расщепления экситонов в объемных образцах AlGaAs // *Известия вузов. Физика* – 2009 – Т. 52, N 12/3. – С. 321–324.

A8. Kozhemyakina E., Zhuravlev K., Amo A., Viña L. Exciton-formation time obtained from the spin splitting dynamics // *J. Phys.: Conference Series* – 2010 – Vol. 210, N 1. – P. 012002–1–5.

A9. Кожемякина Е. В., Журавлев К. С. Исследование процессов формирования экситонов с помощью динамики спинового расщепления // *Известия вузов. Физика.* – 2011 – Т. 54, Вып. 2/2. – С. 185–190.

### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carter S. G., Birkedal V., Wang C. S., Coldren L. A., Maslov A. V., Citrin D. S., Sherwin M. S. Quantum coherence in an optical modulator // *Science* – 2005 – Vol. 310. – P. 651–653.

2. Grosso G., Graves J., Hammack A. T., High A. A., Butov L. V., Hanson M., Gossard A. C. Excitonic switches operating at around 100 K // *Nature Photonics* – 2009 – Vol. 3. – P. 577–580.

3. Gibbs H. M., Khitrova G., Koch S. W. Exciton-polariton light-semiconductor coupling effects // *Nature Photonics* – 2011 – Vol. 5. – P. 273–280.
4. Szczytko J., Kappei L., Berney J., Morier-Genoud F., Portella-Oberli M. T., Deveaud B. Determination of the exciton formation in quantum wells from time-resolved interband luminescence // *Phys. Rev. Lett.* – 2004 – Vol. 93, N 13. – P. 137401–1–4.
5. Shah J. *Ultrafast spectroscopy of semiconductors and semiconductor nanostructures.* – Berlin ; Heidelberg : Springer, 1999. – 518 P.
6. Ulbricht R., Hendry E., Shan J., Heinz T. F., Bonn M. Carrier dynamics in semiconductors studied with time-resolved terahertz spectroscopy // *Rev. Mod. Phys.* – 2011 – Vol. 83, N 2. – P. 543–586.
7. Kaindl R. A., Hägele D., Carnahan M. A., Chemla D. S. Transient terahertz spectroscopy of excitons and unbound carriers in quasi-two-dimensional electron-hole gases // *Phys. Rev. B* – 2009 – Vol. 79. – P. 045320–1–13.
8. Amand T., Dareys B., Baylac B., Marie X., Barrau J., Brousseau M., Dunstan D. J., Planel R. Exciton formation and hole-spin relaxation in intrinsic quantum wells // *Phys. Rev. B* – 1994 – Vol. 50, N 16. – P. 11624–11628.
9. Сейсян Р. П., Кособукин В. А., Маркосов М. С. Экситоны и поляритоны в полупроводниковых твердых растворах AlGaAs // *ФТП* – 2006 – Т. 40, Вып. 11. – С. 1321–1330.
10. Amand T., Marie X., Baylac B., Dareys B., Barrau J., Brousseau M., Planel R., Dunstan D. J. Enhanced exciton blue shift in spin polarized dense exciton system // *Phys. Lett. A* – 1994 – Vol. 193. – P. 105–110.
11. Viña L., Muñoz L., Perez E., Fernandez-Rossier J., Tejedor C., Ploog K. Spin splitting in a polarized quasi-two-dimensional exciton gas // *Phys. Rev. B* – 1996 – Vol. 54, N 12. – P. R8317–R8320.
12. Sun Zheng, Xu Z. Y., Ji Yang, Sun B. Q., Wang B. R., Huang S. S., Ni H. Q. Exciton spin splitting in ultrathin InAs layers // *Appl. Phys. Lett.* – 2007 – Vol. 90, N 7. – P. 071907–1–3.
13. Fernandez-Rossier J., Tejedor C., Munoz L., Vina L. Polarized interacting exciton gas in quantum wells and bulk semiconductors // *Phys. Rev. B* – 1996 – Vol. 54, N 16. – P. 11582–11591.
14. Kumar R., Vengurlekar A. S., Prabhu S. S., Shah J., Pfeiffer L. N. Picosecond time evolution of free electron-hole pairs into excitons in GaAs quantum wells // *Phys. Rev. B* – 1996 – Vol. 54, N 7. – P. 4891–4897.
15. Zhang M. H., Huang Q., Zhou J. M. Calculations of the time taken for excitons to form in GaAs quantum wells // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 1997 – Vol. 9. – P. 10185–10194.