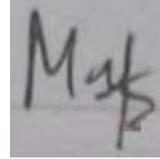


На правах рукописи

МАРКОСОВ МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ



**ШИРИНА ЛИНИИ ЭКСИТОНА И ЕГО ИНТЕГРАЛЬНОЕ  
ПОГЛОЩЕНИЕ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2009

**Диссертация выполнена в** Физико-Техническом Институте им. А. Ф. Иоффе

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
академик РАН

**Сейсян Рубен Павлович** (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор

**Разбирин Борис Сильвестрович** (ФТИ им. А.Ф.  
Иоффе РАН)

кандидат физико-математических наук,  
доцент

**Савельев Артем Владимирович** (СПбГПУ)

**Ведущая организация:** Балтийский государственный технический университет «ВоенМех»

**Защита состоится** 26 марта 2009г., в 12 часов, на заседании диссертационного совета  
Д 002.205.02 при Физико-Техническом институте им. А. Ф. Иоффе по адресу:

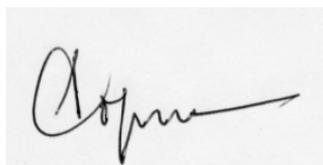
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26

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

**Автореферат разослан** 24 февраля 2009г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по  
вышеуказанному адресу ученому секретарю диссертационного совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.ф.-м.н., профессор



**Сорокин Л.М.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современное состояние полупроводниковой технологии уже позволяет создавать оптоэлектронные компоненты и приборы, реализующие экситонные или поляритонные эффекты. Энергия, необходимая для управления этими эффектами, сравнима с энергией связи экситона или величиной продольно-поперечного расщепления экситонного поляритона (ЭП), что на несколько порядков меньше характерной энергии, необходимой для создания электрон-дырочной пары в кристалле, используемой для управления традиционными полупроводниковыми приборами. Этот факт дает предпосылки для создания полупроводниковых приборов и элементов, характеризующихся меньшим потреблением энергии, уменьшенными значениями пороговых величин, более высоким КПД, а также способностью к высокой степени интеграции и к высоким скоростям работы. Опыты с экситонным транспортом или когерентным источником излучения на ЭП, обладающим почти нулевым порогом генерации, уже продемонстрировали первые многообещающие экспериментальные результаты.

Среди множества изученных полупроводниковых кристаллов системы  $Al_xGa_{1-x}As$  являются особо привлекательными. Это связано, в первую очередь, с развитой технологией получения высокосовершенных GaAs подложек в сочетании с фактом, что постоянные решетки GaAs и  $Al_xGa_{1-x}As$  различаются не более чем на 0.07% [1], что частично снимает вопрос о пагубном влиянии механических напряжений в гетероструктуре. Это большая, чем в обычно используемых материалах ширина запрещенной зоны, высокие значения подвижности носителей, возможность получения образцов с чрезвычайно низким содержанием примесей. Несомненно, привлекательна возможность подбора основных параметров полупроводника – ширины запрещенной зоны, масс носителей заряда и пр., путем изменения концентрации компоненты замещения  $x$ . Поэтому сверхбыстрые электронные и оптоэлектронные компоненты часто строят именно с использованием полупроводниковых твердых растворов (ПТР)  $Al_xGa_{1-x}As$ .

Перспективность использования экситонных и связанных с ними поляритонных эффектов в ПТР  $Al_xGa_{1-x}As$  очевидна. До настоящего времени, однако, не известны экспериментальные работы, в которых объемные экситонные поляритоны с их характерными особенностями надежно наблюдались бы в ПТР  $Al_xGa_{1-x}As$ .

Ширина линии (ШЛ) экситона во флуктуирующем потенциале ПТР является предметом изучения в течение более чем 30 лет [2-5]. В ШЛ экситона в ПТР преобладает неоднородная компонента (неоднородное уширение – НОУ), возникающая, в основном, вследствие взаимодействия экситона с флуктуациями потенциала. Механизм НОУ существенно

уширяет экситонную линию, и существование объемных ЭП в ПТР с большими концентрациями замещающего компонента  $x$  обычно представляется маловероятным.

Однако есть основания утверждать, что ни макрооднородность, ни упорядоченность не являются необходимыми условиями существования ЭП вообще. Взаимодействие экситона и ЭП со средой определяется взаимодействием этих квазичастиц с собственными колебаниями кристаллической решетки кристалла и рассеянием на заряженных примесях. Эти процессы приводят к однородному, или «истинному», уширению (ОУ) экситонной линии (ЭЛ). Указанные взаимодействия влияют на процессы интегрального поглощения (ИП) ЭП, приводя к характерному виду зависимости величины ИП ЭП от параметра затухания. Величина ИП растёт при увеличении температуры, достигая максимального значения, а затем остаётся постоянной с точностью до экспериментальной ошибки.

В полупроводниковых кристаллах ИП ЭП не является постоянной величиной вследствие наличия эффекта пространственной дисперсии. Теоретически, ИП ЭП в идеальном кристалле в отсутствие фононов равно нулю. Поглощение возникает только в процессе безизлучательной рекомбинации экситонов в результате рассеяния ЭП на фононах и примесях в реальных кристаллах.

**Цель диссертационной работы** заключалась в исследовании методами оптической спектроскопии закономерностей и формы существования экситона и ЭП в ПТР  $Al_xGa_{1-x}As$  и в теоретическом анализе результатов исследования с целью изучения экситон-фотонного взаимодействия в среде с флуктуирующим потенциалом.

**Предметом исследования** служила форма линии экситонного поглощения и закономерности изменения ее ширины и величины ИП при изменении температуры образцов  $Al_xGa_{1-x}As$ , или интенсивности магнитного поля, в котором они находились.

**Объектом исследования** были свободные высокосовершенные образцы твердых растворов  $Al_xGa_{1-x}As$  с  $x=0.15, 0.209, 0.27$ , освобожденные от подложки и упакованные свободно, без применения какой-либо фиксации.

#### **Задачи диссертационной работы**

1. Оценить влияние деформационного расщепления валентных зон на ШЛ экситона и определить методику корректного получения параметров экситонной линии в случае малых, или скрытых расщеплений.
2. Ввиду наличия вкладов НОУ и ОУ в ЭЛ найти теоретическую форму кривой, которая наилучшим образом описывает ЭЛ, и определить методику контурного анализа, учитывающую вклады континуума и возбужденных состояний экситона.

3. Определить качественный характер и параметры светопоглощения в образцах ПТР  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  в зависимости от температуры или напряженности магнитного поля.
4. В случае обнаружения поляритонного характера светопоглощения, выделить компоненту ОУ из наблюдаемого уширения и определить константы взаимодействия экситона с фононами и примесями.
5. Определить вклад НОУ, показать некорректность определения параметров взаимодействия экситона со средой только через наблюдаемое уширение.
6. Исследовать зависимость ШЛ экситона от интенсивности магнитного поля.
7. Изучить зависимость величины ИП ЭП от интенсивности магнитного поля.
8. Оценить эффективные массы носителей заряда, используя данные магнитооптических измерений.

**Методом исследования**, позволяющим решить поставленные задачи, была выбрана классическая магнитооптическая спектроскопия с одновременным снятием спектров пропускания и отражения образцов ПТР  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  высокого кристаллографического совершенства, упакованных свободно, без напряжений. Изменения температуры образца и интенсивности окружающего его магнитного поля рассматривались как факторы, влияющие на ШЛ и ИП экситона. Параметры ЭЛ определялись методами контурного анализа после отделения части спектра края поглощения от вкладов континуума и квазиконтинуума.

#### **Научная новизна полученных результатов**

1. Детально исследованы температурные зависимости ШЛ и ИП экситона в  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ .
2. Установлено, что в ПТР  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  в диапазоне температур 0-155К светопоглощение в районе экситонного резонанса определяется экситон-поляритонными эффектами.
3. Из экспериментально измеряемой ШЛ выделены данные по ОУ ЭЛ в ПТР  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  и показано, что ОУ ЭЛ, определяемое параметрами диссипативного затухания, которое напрямую связано с материальными параметрами среды, на порядок меньше наблюдаемого уширения.
4. Показана необходимость учета деформационного расщепления ЭЛ в образцах со скрытым расщепленным состоянием экситона.
5. Для описания формы ЭЛ в ПТР использовались контуры Войта, одновременно учитывающие однородное и неоднородное уширение.
6. Впервые был показан немонотонный ход зависимости ИП экситонной линии в ПТР  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  при изменении интенсивности магнитного поля.

### **Практическая ценность работы**

1. Разработана процедура определения параметров взаимодействия экситона со средой посредством изучения ОУ ЭЛ, извлекаемого из опытных данных, с учетом деформационного расщепления и перекрытия ЭЛ с квазиконтинуумом и континуумом состояний.
2. Предложенное использование контуров Войта для контурного анализа ЭЛ в ПТР  $Al_xGa_{1-x}As$  повышает точность измерения ее параметров.
3. Продемонстрирована возможность повышения точности определения параметров экситонной линии путем учета ее деформационного расщепления.
4. Показано, что применение магнитного поля изменяет условия существования ЭП в кристаллах ПТР  $Al_xGa_{1-x}As$ , как в сторону уменьшения ИП, так и его увеличения в сильных магнитных полях.
5. Полученные данные могут быть использованы при построении приборов на основе  $Al_xGa_{1-x}As$  с использованием экситон-поляритонных эффектов.

### **Основные научные положения, выносимые на защиту**

1. Деформационное расщепление экситонной линии полупроводниковых твердых растворов  $Al_xGa_{1-x}As$  может остаться незамеченным при небольших концентрациях замещающей компоненты  $x$ , и восприниматься, в таком случае, как скрытое уширение, растущее пропорционально  $x$ . Учет деформационного расщепления необходим для корректного определения ширины экситонной линии и других параметров экситонного поглощения.

2. Уширение экситонной линии вследствие структурного беспорядка в твердом растворе  $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$  более чем на порядок превосходит уширение вследствие взаимодействия экситона с фононами, дефектами и заряженными примесями (однородное уширение), т.е. является, в основном, неоднородным. Наблюдаемая ширина линии не может использоваться для определения параметров взаимодействия экситона и среды.

3. Форма экситонной линии в ПТР  $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$  определяется и однородным, и неоднородным уширением. Контурный анализ экситонных линий, проводимый с использованием функций Войта, одновременно учитывающих Гауссово (неоднородное) и Лоренцево (однородное) уширение, а также с учетом вкладов континуума и квазиконтинуума, позволяет наиболее точно зафиксировать параметры экситонной линии и сделать оценки соотношения однородной и неоднородной компонент уширения.

4. Температурная зависимость интегрального поглощения экситонной линии высокосовершенного твердого раствора  $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$  вплоть до критической температуры  $T_c=155K$  определяется экситон-поляритонными эффектами с учетом пространственной дисперсии и насыщается до  $K_{max} = 90.2$  эВ/см, что соответствует силе осциллятора экситона

$f = 1.16 \times 10^{-4}$  в пересчете на элементарную ячейку и параметру продольно-поперечного расщепления  $\hbar\omega_{LT} = 0.101$  мэВ.

5. Зависимость величины интегрального поглощения экситонной линии в высокосовершенном твердом растворе  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  от интенсивности приложенного магнитного поля при  $T=1.7\text{K}$  определяется конкуренцией двух механизмов изменения формы экситонной линии. Первый механизм уширяет экситонную линию во флуктуирующем потенциале твердого раствора вследствие сжатия и утяжеления экситона в магнитном поле и увеличивает ее интегральное поглощение вследствие роста силы осциллятора экситона. Второй механизм выражается в уменьшении интегрального поглощения экситонной линии из-за угнетения процесса рассеяния экситона на заряженных примесях – основном механизме, который обуславливает экситон-поляритонное поглощение и однородное уширение экситонной линии при низких температурах.

6. Экситон в твердом растворе  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  продолжает существовать в относительно сильных магнитных полях, таких что  $\beta \geq 1$ , где  $\beta = \hbar\Omega / 2Ry$  ( $\Omega$  – сумма циклотронных частот электрона и дырки,  $Ry$  – экситонный Ридберг), что позволяет наблюдать спектры диамагнитного экситона до  $H=7\text{Tл}$  и определить основные зонные параметры и эффективные массы носителей заряда в этом полупроводнике.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на: «4th International conference on Physics of light-matter coupling in nanostructures (Ioffe Institute, St.-Petersburg, Russia, June 29 - July 3, 2004); «Международном семинаре по опто- и наноэлектронике» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 27 октября 2008); на IX и X «Всероссийских молодежных конференциях по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой и нано-электронике» (Санкт-Петербург, 3-7 декабря 2007, 1-4 декабря 2008 (в 2008г работа удостоилась диплома)).

**Публикации.** Основные результаты исследований, выполненных в рамках данной диссертационной работы, опубликованы в 6 печатных работах, из них 2 входят в список изданий, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, состоящего из 97 источников. Работа содержит 183 страницы машинописного текста и 48 рисунков.

**Личный вклад.** Постановка и проведение экспериментов, математическая обработка данных, предварительный и теоретический анализ результатов.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** к диссертации обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, показаны ее научная новизна, практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации приведены основные предпосылки к уширению ЭЛ в ПТР. Даны положения теории интегрального поглощения ЭП в средах с пространственной дисперсией. Приведены элементы теории поведения экситона в структурно упорядоченных полупроводниках (СУП) и ПТР в магнитном поле. Даются основные параметры изучаемого ПТР  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с  $x=0.15$ , и объявляется постановка исследования.

Доминирующим фактором уширения ЭЛ в ПТР является взаимодействие экситона с флуктуирующим потенциалом кристалла, в общей кристаллической решетке которого произвольным образом распределены бинарные компоненты, в рассматриваемой системе - GaAs и AlAs. Существует несколько подходов, описывающих механизм взаимодействия флуктуирующего потенциала решетки с экситоном.

1. В работе [3], для расчета ШЛ экситона используется статистический квантово-механический подход для неупорядоченной структуры ПТР. Энергия связи экситона, подверженная флуктуациям величины запрещенной зоны ПТР, среднее значение которой дается как  $E_g(x) = E_A + C_A x + C_{AB} x^2$  [1], вычисляется с помощью теории возмущений первого порядка при использовании стандартных статистико-механических приемов. Форма линий экситонных переходов оказывается Гауссовой. При представлении экситона сплошной сферой, ширина линии на половине высоты рассчитывается через  $x$ ,  $V_{ex}$  и  $\Delta V$  - объемы экситона и элементарной ячейки, и величину  $dE_g(x)/dx$ :

$$\sigma(x) = 2(C_A + 2C_{AB}x) \sqrt{2 \ln 2x(1-x) \Delta V / V_{ex}} \quad (1)$$

2. Подход, развитый в работе [4], связывает уширение ЭЛ в ПТР с локализацией экситонов в потенциальных ямах флуктуирующего потенциала. Указывается, что ШЛ меняется по-разному, в зависимости от соотношений эффективных масс дырки ( $m_h$ ) и электрона ( $m_e$ ), а также радиуса экситона ( $a_{exc}$ ) и характерного масштаба флуктуации. В случае свободных экситонов, когда  $a_{exc}$  мало по сравнению с масштабом флуктуации:

$$\sigma(x) = 0.08 \frac{a_{exc}^4 x^2 (1-x)^2 M^3}{\hbar^6 N^2} \quad (2)$$

где  $M$  и  $N$  - трансляционная масса экситона и концентрация атомов замещения. В изучаемых образцах  $m_h \gg m_e$ , и движение электрона вокруг дырки захватывает гораздо большую

область пространства, чем движение самой дырки – ситуация начинает напоминать донорный атом. В таком случае ЭЛ имеет форму гауссиана с характерным уширением:

$$\sigma = 0.5 \frac{dE_g(x)}{dx} \left( \frac{x(1-x)}{N \cdot a_{exc}^3} \right)^{1/2} \quad (3)$$

3. Напряжения в образце также влияют на наблюдаемое уширение ЭЛ. Обычно изучаемые образцы весьма тонки (несколько мкм.) и, как правило [6], являются напряженными, что приводит к деформационному расщеплению валентных зон легкой и тяжелой дырки, и соответственно, расщеплению экситонного пика на величину  $2\Delta$ , где

$$\Delta_e^{001} = 2|e||D_u|(1 + \lambda_{001})/3 \quad (4)$$

Здесь  $e$  – тензор деформации, параметр  $\lambda$  определяется через компоненты тензора упругой жесткости,  $D_u$  – деформационный потенциал валентной зоны.

Процедуры роста и подготовки образцов могут подразумевать, как в данном и некоторых других случаях [6], наличие подложки, или ее остатков на образце. Тогда, из-за расогласования постоянных решеток, а также из-за разницы КТР, приводящей к расогласованию слоев при понижении температуры от ростовой до температуры снятия спектров, в образцах возникают напряжения. В некоторых условиях, когда величина расщепления меньше, либо порядка ШЛ экситона, комплекс из двух серий ЭЛ может восприниматься как единая экситонная линия.

4. Взаимодействие экситона с примесями и фононами приводит к однородному уширению ЭЛ [7]. ОУ описывается через константу взаимодействия и число рассеивателей – примесей или фононов, которое для акустических фононов пропорционально температуре, а концентрация оптических фононов описывается Бозе-функцией. Рассеяние ЭП на заряженных и компенсированных примесях можно считать температурно-независимым. В целом, температурная зависимость ОУ ЭЛ имеет вид:

$$\Gamma_H(T) = N\sigma + \beta T + y[\exp(\hbar\omega_{LO}/k_B T) - 1]^{-1}, \quad (5)$$

где  $\hbar\omega_{LO}$  – энергия оптического фонона,  $N$  – концентрация заряженных и компенсированных примесей. Форма, соответствующая ОУ – лоренциан. Специфика ОУ в ПТР заключается в том, что экситонные состояния, по мере увеличения энергии, должны быть представлены плоскими волнами [8], что уменьшает значения  $y$  для GaAs примерно в 2 раза [7]. Поправки, учитывающие тот факт, что с примесями и фононами взаимодействует не экситон, а ЭП также приводят к уменьшению  $\beta$  и  $y$  (приблизительно на 20% для GaAs [7]).

5. Теория интегрального поглощения рассматривает связь величины ИП ЭП с константой затухания  $\gamma$  в СУП. Однако есть основания утверждать, что ни макрооднородность, ни

упорядоченность не являются необходимыми условиями существования ЭП. К температурно-зависимому ИП в ПТР могут приводить каждый из двух возможных механизмов ЭП переноса. Первый проявляется в средах с пространственной дисперсией ( $M \neq \infty$ ) как результат конкуренции экситонного и электромагнитного энергопереноса - в зависимости от  $\gamma$ . Второй связан с переизлучением локализованных экситонов вдоль конечных цепочек резонансных квантовых ям в отсутствие механического переноса. Предполагается, что параметр нерадикационного затухания экситона  $\gamma$  не зависит от  $\omega$ . ИП исследуется как функция  $\gamma$  или температуры  $T$ . Для волн ЭП, распространяющихся в квазиоднородной среде с пространственной дисперсией, ИП имеет вид [9]:

$$K(\gamma) = K_{\max} \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left\{ \arctan \frac{\gamma/\gamma_c}{\sqrt{1-(\gamma/\gamma_c)^2}} + \frac{\gamma}{\gamma_c} \sqrt{1-\left(\frac{\gamma}{\gamma_c}\right)^2} \right\} & \text{при } \gamma < \gamma_c, \\ 1 & \text{при } \gamma > \gamma_c. \end{cases} \quad (6)$$

Максимальное значение ИП и критическое значение параметра затухания составляет:

$$K_{\max} = \frac{\pi \sqrt{\varepsilon_0} \omega_{LT}^2}{2c} \quad \gamma_c = 2 \omega_0 \sqrt{\frac{2 \varepsilon_0 \hbar \omega_{LT}}{Mc^2}}$$

6. Влияние магнитного поля на поведение экситона в ПТР выражается в сжатии его волновой функции, что приводит к снижению эффективности усреднения флуктуаций потенциала по объему экситона, и в росте его массы в плоскости, перпендикулярной магнитному полю [5], что ведет к увеличению вероятности локализации экситона в потенциальных ямах, образованных флуктуирующим потенциалом. Локализация потенциально может приводить к полному разрушению спектра диамагнитного экситона. Авторы [5] выделяют несколько механизмов изменения ШЛ, характерных для различных вариантов существования экситона в ПТР. Для  $Al_xGa_{1-x}As$  ( $0 < x < 0.4$ ) различными подходами подтверждается донороподобное поведение экситона. В таком случае, ШЛ в слабых полях мало зависит от  $H$ , а в дальнейшем предсказывается линейный рост с  $H$ . Конкурирующим механизмом является магнитное вымораживание носителей [10], которое обуславливает уменьшение ОУ и ИП при низких температурах, когда доминирует рассеяние ЭП на примесях.

**Во второй главе** описывается процедура подготовки образцов ПТР  $Al_xGa_{1-x}As$  к исследованию. Образцы были выращены в Новосибирском Институте физики полупроводников СОАН А.И. Тороповым и др., с применением специальных мер по достижению предельно низкой концентрации примесей [11], оказывающейся на уровне  $1-5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Образцы любезно предоставлены Т.С. Шамирзаевым. Приводятся результаты прецизионного хи-

мического травления образцов, выполненного Н.Д. Ильинской в ФТИ им. Иоффе. Описывается схема эксперимента, приводятся соображения по элиминированию результатов интерференции в тонких (2.5 мкм) образцах. Приводятся данные двух образцов  $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$  (№1 и №2), исследовавшихся в большинстве экспериментов. Температурные зависимости зарегистрированы с применением криостата «УТРЕКС».

**В третьей главе** приводятся основные экспериментальные результаты.

1. Для корректного определения параметров ЭЛ проведено ее выделение из спектра поглощения путем вычитания вкладов континуума и квазиконтинуума. Учтено деформационное расщепление, величина которого получена для образца с  $x=0.15$  путем экстраполяции величины расщепления ЭЛ в образце с  $x=0.209$ , где оно наблюдается в виде расщепления спектральной линии. Скрытое расщепление составило 2.4 и 3.2 мэВ для образцов №1 и №2 соответственно. Учтен и сдвиг  $E_g$ , составивший 2.3 и 2.7 мэВ. Контурный анализ проводился контурами Войта, что увеличило точность определения ШЛ и величины ИП. Приведены данные по температурно- и магнито-зависимому поглощению, с описанием особенностей и результатов контурного анализа в каждом случае.

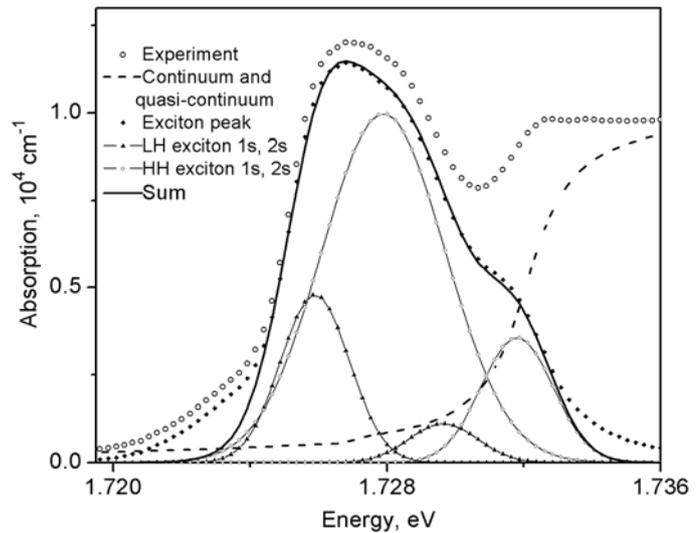


Рис.1 Контурный анализ расщепленной ЭЛ, после выделения ее из экспериментально полученного, свободного от интерференции спектра поглощения  $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$  №1. Экситонные состояния аппроксимируются контурами Войта.

Строятся зависимости положений экситонного пика от температуры или магнитного поля; для температурной зависимости производится сравнение с кривой Варшни, для магнитной - определяются зоны действия расщепления Зеемана, диамагнитного сдвига (составившего для образцов №1 и №2, соответственно:  $\Delta_{lh}^{1s} = 7.5 \times 10^{-5}$  эВ/Тл<sup>2</sup> и  $\Delta_{hh}^{1s} = 4.3 \times 10^{-5}$  эВ/Тл<sup>2</sup>, и  $\Delta_{lh}^{1s} = 7 \times 10^{-5}$  эВ/Тл<sup>2</sup> и  $\Delta_{hh}^{1s} = 4.2 \times 10^{-5}$  эВ/Тл<sup>2</sup>) и сдвига Ландау. Определена величина  $H_c$ , при которой достигается критерий Элиота-Лудона сильного поля. Для образца №1 она составила:  $H_c = 4.5$  Тл, для №2 -  $H_c^+ = 5$  Тл и  $H_c^- = 4.2$  Тл для экситонов на легкой(+) и тяжелой(-) дырках. Анализ ОМП (рис. 2) образца №1 позволил определить величину запрещенной зоны  $E_g = 1.7320 \pm 0.002$  эВ, что совпало с ранее определенным, учитывающим дефор-

ционный сдвиг, значением:  $E_g = 1.7321$  эВ. Из анализа спектров, снятых в лево- и право-

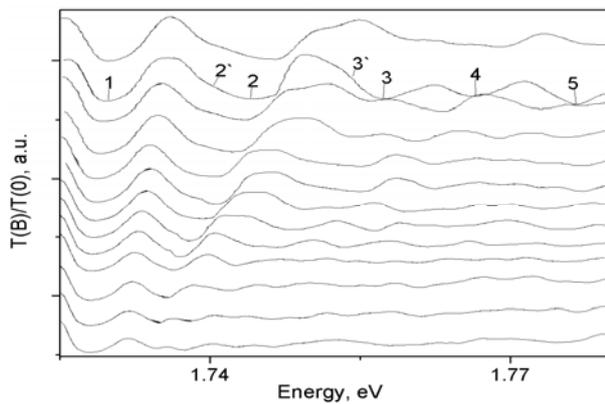


Рис 2. Спектры ОМП в  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  №1 при  $H$  от 1Тл (нижний спектр) до 7Тл (верхний спектр) с шагом 0.5Тл. Цифрами отмечены пики поглощения снятые в ПЦП при  $H=6.5$ Тл, соответствующие переходам: 1- $ab^-(1)ab^c(0)$ , 2'- $a^+(1)a^c(0)$ , 2- $ab^-(2)ab^c(1)$ , 3'- $b^+(1)b^c(0)$ , 3- $ab^-(3)ab^c(2)$ , 4- $ab^-(4)ab^c(3)$ , 5- $ab^-(5)ab^c(4)$ , положение которых использовалось для определения зонных параметров.

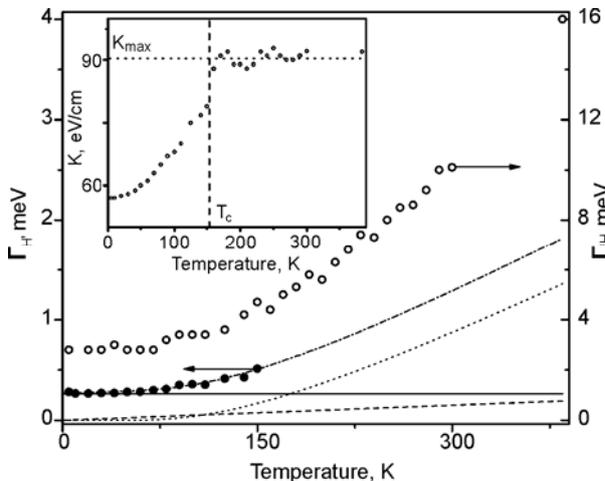


Рис 3. Наблюдаемое уширение (окружности), ОУ (кружки) и анализ ОУ суммой фоновых (пунктир и штриховая линии) и примесных (сплошная) составляющих. Штрихпунктир – экстраполяция ОУ в высокотемпературную область. На врезке – полученное ИП с параметрами  $\Gamma_c=0,32$  мэВ,  $\hbar\omega_{LT}=0.101$ мэВ,  $K_{\max}=90.2$  эВ/см.

нить константы взаимодействия экситона с фононами и примесями, раскладывая ОУ со-

циркулярных поляризациях, были получены эффективные массы носителей заряда:  $m_e = 0.085m_0$ ,  $m_{lh} = 0.099m_0$ ,  $m_{hh} = 0.705m_0$ , соответствующие литературным данным [1] в пределах точности измерения концентрации Al в образцах.

#### В четвертой главе приводятся результаты

анализа полученных данных

1. Температурная зависимость ИП ЭЛ образца  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  №1 (врезка на рис.3) показывает поляритонный характер светопоглощения вплоть до  $T=155\text{K}$ , причем его характер определяется первым механизмом светопереноса (квазисвободные экситоны). Теория интегрального поглощения в средах с пространственной дисперсией позволяет, из зависимостей величины ИП от температуры (эксперимент) и ИП от константы затухания (теория) найти зависимость константы затухания от температуры, а через нее – величину однородного уширения (рис. 3). Вычитание ОУ из наблюдаемого уширения позволяет условно оценить НОУ. При  $T=1.7\text{K}$  величины НОУ и ОУ различаются примерно на порядок –  $2.8\text{мэВ}$  и  $0.26\text{мэВ}$  для экситонов на тяжелой дырке. Так как взаимодействие экситона с веществом определяет именно ОУ, а НОУ является следствием взаимодействия экситона с неоднородностями образца, в частности, флуктуациями состава, то становится возможным оце-

гласно (5). Для  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  они равны:  $\sigma = 5.3 \times 10^{-19} \text{ эВ} \times \text{см}^3$ ,  $\beta = 573 \text{ мэВ/К}$ ,  $\gamma = 2.9 \text{ мэВ}$ . Соответствующее  $\sigma$  температурно-независимое примесное уширение для образца №1 составляет  $0.265 \text{ мэВ}$ . Данные по взаимодействию ЭП с фононами для  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  близки к таковым для GaAs [7] если учитывать, что высокоэнергетичные состояния экситона должны рассматриваться как плоские волны [8]. Анализ показывает, что до  $T \sim 100 \text{ К}$  уширение в основном определяется рассеянием ЭП на заряженных примесях.

2. При наличии магнитного поля происходит уширение ЭЛ [3, 5] в силу описанных выше причин. Для  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  характерна отсутствующая, либо слабая зависимость ШЛ от  $H$  в слабых магнитных полях с близким к линейному росту в сильных. Однако, в области 0-2Тл. наблюдается даже некоторое уменьшение ШЛ, что может быть отнесено за счет уменьшения компоненты ОУ в общем уширении, преимущественно состоящем из НОУ. При низких  $T$ , ОУ определяется рассеянием на заряженных примесях. С увеличением магнитного поля, заряженные примеси начинают «вымораживаться», переходя в нейтральное состояние [10] вследствие увеличения энергии активации. Последнее является результатом уменьшения экранирования кулоновского взаимодействия заряженной примеси и носителя заряда. Поэтому компонента ОУ уменьшается, что в условиях доминирования НОУ и его постоянства при слабых магнитных полях проявляется в относительно слабом уменьшении ШЛ (рис. 4).

3. Сила осциллятора экситона в магнитном поле растет квадратично с полем. Однако, ИП ЭП в области низких  $T$  зависит только от рассеяния экситона на заряженной примеси, и в идеальном случае устремляется к нулю. Когда энергия активации примеси увеличивается (рис 5, врезка), и концентрация заряженных примесей падает, ИП ЭП уменьшается. Таким

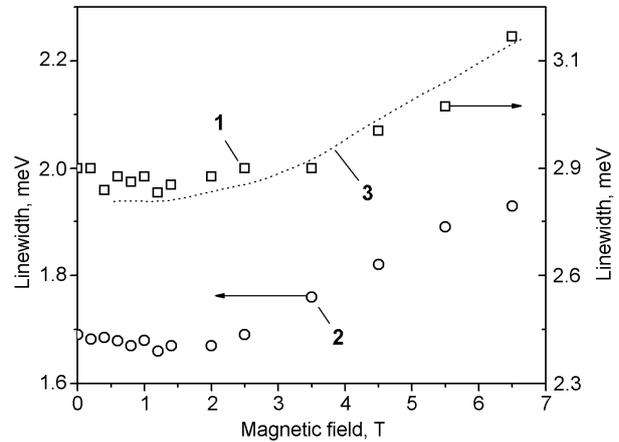


Рис 4. ШЛ экситона в образце  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  №2 на легкой (2) и тяжелой (1) дырке в зависимости от магнитного поля. 3 – теоретическая зависимость, полученная по (1) учетом изменения  $V_{exc}$  с полем.

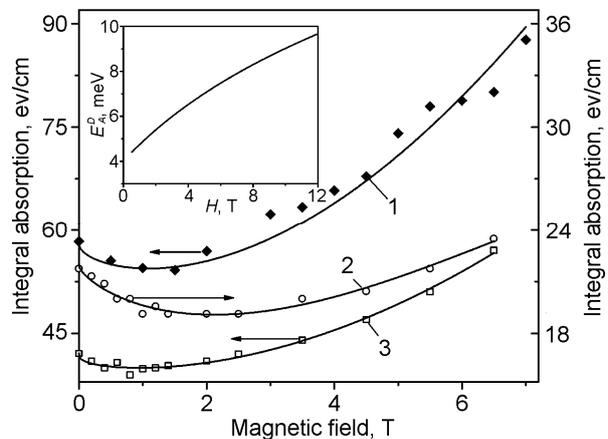


Рис 5. ИП экситона в  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  образцах (1) - №1, 2,3 – №2 (легкие и тяжелые экситоны) с построенными по (7) кривыми. Врезка – энергия активации примеси в GaAs ( $n \sim 10^{14}$ )

образом, имеет место конкуренция двух процессов, приводящая к наличию минимума ИП в области около 1.5-2 Тл, после чего преобладает квадратичный рост ИП. Результат действия этих процессов может быть записан, как:

$$K(H) = K_{T=1.7K}^{B=0} [1 + d_1 H^2] \cdot [1 - p H^{1/2}], \quad (7)$$

где  $d_1 = a_{exc}^3 \varepsilon / \mu c^2$ , - дипольный момент основного состояния экситона [6], а коэффициент  $p$  выражает зависимость ИП ЭП от рассеяния экситона на заряженных примесях в магнитном поле.

Параметры в выражении (7) для обоих образцов  $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ , а также для тонкого (3мкм) образца GaAs, исследовавшегося в лаборатории ФФМ ФТИ, сведены в таблицу:

Параметр	GaAs (данные получены в лаборатории ФФМ)	$Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ №1 Кривая 1	$Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ №2 Кривая 3 ( $hh$ )	$Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ №2 Кривая 2 ( $lh$ )
$K_0$ , эВ/см	8.8	57.89	41.8	22.1
$d_1$ , Тл <sup>-2</sup>	0.011	0.012	0.012	0.0136
$p$ , Тл <sup>-1/2</sup>	-	0.09	0.12	0.054

Таким образом, как и ожидалось, дипольный момент основного состояния пропорционален  $a_{exc}^3$  ( $a_{exc}$  - радиус экситона), и увеличивается с уменьшением приведенной массы экситона, тогда как коэффициент, выражающий зависимость ИП ЭП от рассеяния экситона на заряженных примесях, с увеличением  $a_{exc}$  убывает.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

**В заключении** приводятся основные результаты по данной диссертационной работе, которые сформулированы следующим образом.

1. Были получены температурные зависимости экситонных ШЛ и ИП в ПТР  $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ . Использовалась техника, позволяющая детально учесть вклады континуума и квазиконтинуума в наблюдаемую ширину линий в целях получения достоверных данных
2. Была показана необходимость учета «скрытого» деформационного расщепления ЭЛ, как влияющего на определение ее ширины, и установлена процедура учета этого механизма уширения для точного определения искомых параметров.
3. Был показан экситон-поляритонный характер температурной зависимости ИП ЭЛ для твердого раствора  $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ , имеющий место в интервале температур 0 – 155К с параметрами ЭП  $\hbar\omega_{LT} = 0.101$  мэВ,  $\Gamma_c = 0,32$  мэВ,  $K_{max} = 90.2$  эВ/см, или силе осциллятора экситона  $f = 1.16 \times 10^{-4}$  в пересчете на элементарную ячейку.

4. Были получены данные по однородному уширению экситонной линии в ПТР  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ . Показано, что истинное уширение ЭЛ, определяемое параметрами диссипативного затухания, которое напрямую связано с материальными параметрами среды, на порядок меньше наблюдаемого неоднородного уширения в температурном диапазоне 0-155К. Показано, что наблюдаемая ширина линий не может быть использована для определения характеристик экситон-фотонного взаимодействия в среде, а свидетельствует, в первую очередь, о структурном беспорядке кристалла.
5. Было показано, что экситон в «сильном» магнитном поле в ПТР  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  не разрушается вплоть до  $H=7\text{Тл}$ , что позволяет наблюдать спектры диамагнитного экситона и извлекать информацию о зонных параметрах, в частности, об эффективных массах носителей заряда в кристалле.
6. Впервые была получена и проанализирована зависимость величины ИП ПТР  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  от интенсивности магнитного поля при  $T=1.7\text{К}$  и показан ее немонотонный характер, обусловленный наличием конкурирующих механизмов изменения ширины и амплитуды экситонной линии.
7. Анализ зависимостей ширины линии от магнитного поля показал, что наблюдаемая ширина экситонной линии в образцах  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  незначительно зависит от поля до значений порядка 3.5Тл, а после характеризуется монотонным ростом, описываемым как результат увеличения трансляционной массы экситона и как результат усреднения флуктуаций потенциала по объему экситона в силу его уменьшения в магнитном поле. Наблюдаемый спад зависимости ширины экситонной линии от интенсивности магнитного поля в районе 1.5-2Тл может быть отнесен на счет уменьшения однородной компоненты уширения экситонной линии в магнитном поле.

#### **Основные публикации по теме диссертации**

1. Р. П. Сейсян, В.А. Кособукин, С.А. Ваганов, М.А. Маркосов, Т.С. Шамирзаев, К.С. Журавлев, А.К. Бакаров, А.И. Торопов. Экситонные поляритоны в полупроводниковых твердых растворах  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  // Материалы IV международной конференции по физике взаимодействия света с веществом в наноструктурах (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия, 29 июня – 3 июля, 2004)
2. R.P. Seisyan, V.A. Kosobukin, S.A. Vaganov, M.A. Markosov, T.A. Shamirzaev, K.S. Zhuravlev, A.K. Bakanov and A.I. Toropov. Exsitionic polaritonis in semiconductor solid solutions  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  // Phys. Stat. Sol. C. – 2005. - V. 2. - P. 900-905
3. Сейсян Р.П. Маркосов М.С. Зависимость интенсивности экситонного поглощения от магнитного поля в высокосовершенных твердых растворах  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  // Тезисы докла-

дов международного семинара по опто- и наноэлектронике. (СПб.: Из-во Политехн. ун-та, 2008.-С.51)

4. Р.П. Сейсян, В.А. Кособукин, М.С. Маркосов. Экситоны и поляритоны в полупроводниковых твердых растворах  $Al_xGa_{1-x}As$  // ФТП.-2006.-11.-С.1321
5. М.С. Маркосов, Р.П. Сейсян. Ширина линии экситонного поглощения в твердых растворах  $Al_xGa_{1-x}As$  // Тезисы докладов 9-ой всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. (СПб.: Из-во Политехн. ун-та, 2007.-С.126)
6. М.С. Маркосов, Р.П. Сейсян. Зависимость интенсивности экситонного поглощения от магнитного поля в твердых растворах  $Al_xGa_{1-x}As$  // Тезисы докладов 10-ой всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. (СПб.: Из-во Политехн. ун-та, 2008.-С.4)

#### Цитируемая литература

- [1] Sadao Adachi. GaAs, AlAs and  $Al_xGa_{1-x}As$ : Material parameters for use in research and device application// J. Appl. Phys. -1985.- V.58.- N.3.- P.R1-R29.
- [2] Алферов Ж.И., Портной Е.Л., Рогачев А.А. О ширине края поглощения полупроводниковых твердых растворов // ФТП.-1968.-2.-С.1194.
- [3] S.M. Lee, K.K. Bajaj. A quantum statistical theory of linewidth of radiative transition due to compositional disordering in semiconductor alloys // J. Appl. Phys. - 1993. – N.73. - P.1788-1796.
- [4] Н.Н. Аблязов, М. Э. Райх, Ал. Л. Эфрос. Ширина линии экситонного поглощения в твердых растворах // ФТТ.-1983.-25.-С.353.
- [5] М. Э. Райх, Ал. Л. Эфрос. Уширение линии диамагнитного экситона в твердых растворах // ФТТ.-1984.-Т.26.-1.-С.106.
- [6] Р.П. Сейсян. Спектроскопия диамагнитных экситонов. (М., Наука, 1984.-С.62).
- [7] S. Rudin, T.L. Reinecke, B. Segall. Temperature-dependent exciton linewidths in semiconductors // Phys. Rev. B.-1990.-V.42.-N.17.- P.11218.
- [8] S. Lai, M.V. Klein. Evidence for Exciton Localization by Alloy Fluctuations in Indirect-Gap  $GaAs_{1-x}P_x$  // Phys.Rev.Lett., -1980.-V.44.-N.16.- P.1087.
- [9] Н.Н. Ахмедиев. Роль пространственной дисперсии в поглощении света экситонами // ЖЭТФ.-1980.-Т.79.-С.1534.
- [10] I. Bisotto, B. Jouault, A. Raymond, W. Zawadzki, and G. Strasser. Donor ionization energy in bulk GaAs for different donor concentrations and magnetic fields // Phys. Stat. Sol. (a).-2005.- 202,- 4, P.614.

[11] 32. K. S. Zhuravlev, A. I. Toropov, T. S. Shamirzaev, and A. K. Bakarov. Photoluminescence of high-quality AlGaAs layers grown by molecular-beam epitaxy // Appl.Phys.Letter, - 2000.- V.76- N.9.-P.1131.