

На правах рукописи

БОКОВ Павел Юрьевич

**СПЕКТРОСКОПИЯ ФОТООТРАЖЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
СТРУКТУР НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ И ФОСФИДА ИНДИЯ**

Специальность 01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2005

Работа выполнена на кафедре общей физики физического факультета  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
доцент **Л.П. Авакянц**, физический  
факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор **А.Э. Юнович**, физический  
факультет МГУ им. М.В. Ломоносова;  
доктор физико-математических наук,  
профессор **В.С. Горелик**, Физический  
Институт им. П.Н. Лебедева РАН

Ведущая организация: Центр Естественно-Научных исследований  
Института общей физики им. А.М.  
Прохорова РАН

Защита состоится « 21 » декабря 2005 г. в «15.00» часов на заседании  
Диссертационного совета Д501.001.45 при Московском государственном  
университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, Ленинские  
горы, ГСП-2, НИИЯФ МГУ, 19 корпус, аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ

Автореферат разослан « 18 » ноября 2005 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д501.001.45

Доктор физико-математических наук

А.Н. Васильев

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Полупроводниковые структуры на основе арсенида галлия и фосфида индия являются интересными объектами для фундаментальных исследований и широко используются для создания фотодетекторов, оптических модуляторов, мощных и сверхбыстрых транзисторов и других приборов опто - и наноэлектроники. Актуальность исследования такого рода структур оптическими методами обусловлена тем, что основные тенденции современной электроники направлены на создание полупроводниковой приборной техники с размерами порядка нескольких нанометров. Диагностика таких приборов традиционными методами (например, эффект Холла) оказывается затруднительной.

В последнее время при исследовании полупроводниковых структур все большую популярность приобретают методы модуляционной спектроскопии, особенно, электро- и фотоотражение (ФО). Метод ФО позволяет бесконтактно определять величины встроенных электрических полей и особенности их пространственного распределения в полупроводниковых структурах, давать оценки концентрации носителей. Метод спектроскопии ФО особенно интересен для исследования квантово-размерных эффектов в полупроводниковых структурах, так как он позволяет определять энергии межзонных переходов даже при комнатной температуре.

Необходимые электрофизические параметры полупроводниковых приборов создаются посредством легирования. Ионизированная примесь и пространственная локализация носителей приводят к появлению дополнительных встроенных электрических полей, которые модифицируют профиль квантовых ям, что приводит не только к изменению энергетического спектра электронов и дырок, но и к изменению вероятностей межзонных переходов. Неконтролируемое изменение энергетического спектра электронов и дырок в такого рода структурах возможно также в ходе экспериментальных исследований. Последнее указывает на важность разработки бесконтактных маловозмущающих методов исследования полупроводниковых структур.

**Цель диссертационной работы:** исследовать особенности фотоотражения в легированных полупроводниковых структурах на основе GaAs и InP, а также в полупроводниковых квантовых ямах на основе GaAs/AlGaAs, для чего разработать методику регистрации спектров фотоотражения с минимальным воздействием зондирующего излучения на исследуемые структуры.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Особенности спектров ФО, обусловленные электрической активацией примеси в ионно-легированных InP и GaAs могут проявляться как в виде осцилляций Франца-Келдыша, так и в виде переходов с участием акцепторного уровня, в зависимости от энергии активации акцептора.
2. Обнаруженные в спектрах фотоотражения легированных кремнием пленок GaAs осцилляции Франца-Келдыша двух различных частот связаны с вкладом в спектр сигналов от приповерхностной области пространственного заряда и границы раздела «легированная пленка n-GaAs – полуизолирующая подложка GaAs».
3. Полученные из спектров ФО энергии межзонных переходов нелегированных гетероструктур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs соответствуют рассчитанным в рамках модели огибающей волновой функции для прямоугольного потенциала с учетом правил отбора по четности.
4. Основным механизмом уширения спектральных линий ФО, связанных с межзонными переходами в области квантовой ямы GaAs/AlGaAs является пространственная неоднородность гетерограниц.
5. Расщепление линий в спектрах ФО двойных квантовых ям связано с взаимодействием одиночных квантовых ям через туннельно-прозрачный барьер AlAs. Величина расщепления уменьшается с ростом толщины барьера AlAs и увеличивается с ростом энергии уровня в квантовой яме.

**Практическая ценность работы:**

1. Данные, полученные из спектров фотоотражения ионно-легированных InP и GaAs, могут быть использованы для выбора оптимальных режимов отжига при ионном легировании.

2. Результаты исследования модулировано легированных структур с квантовыми ямами на основе гетеропары GaAs/AlGaAs методом ФО, и их интерпретация на основе самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона позволяют получать информацию об изменении заселенности подзон размерного квантования, что может быть использовано при разработке прототипов НЕМТ транзисторов.
3. Методики, предложенные в диссертации, могут быть использованы для бесконтактного неразрушающего контроля оптических (ширина запрещенной зоны, энергии межзонных переходов в квантово-размерных структурах) и электрофизических (величины и пространственное распределение встроенных электрических полей, величина поверхностного потенциала, концентрация носителей) параметров.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на: международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов 99», г. Москва, 1999; Всероссийской научно-технической конференции «Микро – и нано – электроника 2001», г. Звенигород, 2001; 1-ой Российской конференции молодых ученых по физическому материаловедению, г. Калуга, 2001; 2-ой международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика 2001», г. Санкт-Петербург, 2001; 19<sup>th</sup> Condensed Matter Division conference, Brighton, 2002; международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов 2002», г. Москва, 2002; конференции «Оптика, оптоэлектроника и технология», г. Ульяновск, 2002; Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2002 (LAT-2002), г. Москва, 2002; 8-ой международной конференции «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V», г. Томск, 2002; 4-ой Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников, полупроводниковой опто- и наноэлектронике., г. Санкт-Петербург, 2002; Всероссийской научно-технической конференции «Микро – и нано – электроника 2003», г. Звенигород, 2003; международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика 2003», г. Санкт-Петербург, 2003;

международной конференции студентов и аспирантов «Ломоносов 2004», г. Москва, 2004; International Workshop on Modulation Spectroscopy of Semiconductor Structures, Wroclaw, 2004; на 20<sup>th</sup> General Conference Condensed Matter Division EPS, Prague, 2004; 6-ой молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, г. Санкт-Петербург, 2004; 13<sup>th</sup> European Molecular Beam Epitaxy Workshop, Grindewald, 2005; международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью 2005», г. Звенигород, 2005

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 26 научных работ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, включающего 102 наименования. Работа содержит 132 страницы, в том числе, 50 рисунков и 7 таблиц.

### **Содержание диссертации**

Во **введении** сформулированы актуальность, цель и практическая значимость работы. Приводятся основные положения, выносимые на защиту. Реферативно изложено содержание работы.

**Первая** глава является обзорной. В § 1.1 описывается эффект Франца-Келдыша, который является основой метода спектроскопии ФО. В § 1.2 рассматриваются два типа спектров ФО: низкополевой и среднеполевой. В § 1.3 описываются основные методы анализа многокомпонентных спектров ФО: анализ модуля изменения коэффициента отражения, фазочувствительный анализ, анализ среднеполевых спектров с применением преобразования Фурье. В § 1.4 изложены основные трудности спектроскопии фотоотражения.

**Вторая** глава посвящена методике эксперимента. В § 2.1 содержится описание основных оптических схем, используемых для регистрации спектров ФО.

В § 2.2 предлагается методика регистрации спектров ФО с применением двойного монохроматора, позволяющая минимизировать воздействие на образец зондирующего излучения, и засветку фотоприемника рассеянным модулирующим излучением. Регистрация спектров осуществлялась с помощью

монохроматора МДР-6, в который была вмонтирована дополнительная входная щель. Модуляция отражения осуществлялась либо He-Ne лазером на длине волны 632.8 нм (мощность 1 мВт) либо узконаправленными светодиодами типа СДК с длинами волн 470 нм, 530 нм, 590 нм и 650 нм. Мощность излучения светодиодов не превышала 1 мВт. Модуляция осуществлялась механическим прерывателем. Частота модуляции составляла 370 Гц. Спектры регистрировались при комнатной температуре.

Так как изменения коэффициента отражения  $\Delta R/R$  при фотомодуляции составляют  $10^{-5}$  -  $10^{-4}$ , то для регистрации спектров ФО нами был разработан малошумящий фотоусилитель. Фотоусилитель представляет собой преобразователь «ток - напряжение» с нулевым смещением на фотодиоде и дополнительной коррекцией амплитудно-частотной характеристики.

В качестве обоснования предлагаемой оптической схемы приводятся спектры ФО образцов, зарегистрированные в разных конфигурациях экспериментальной системы. Показано, что в спектрах ФО, зарегистрированных в оптической схеме с применением двойного монохроматора улучшается соотношение «сигнал/шум» и уменьшается ширина спектральных линий. Это связано с уменьшением воздействия на образец зондирующего излучения.

Параграф 2.3 описывает особенности программного обеспечения, разработанного для анализа спектров ФО.

В § 2.4 приведено описание экспериментальной установки для регистрации спектров комбинационного рассеяния света. Спектры регистрировались в геометрии обратного рассеяния на автоматизированной установке на базе двойного монохроматора ДФС-12. Спектральное разрешение составляло  $2 \text{ см}^{-1}$ . Возбуждение рассеяния осуществлялось  $\text{Ar}^+$  лазером на длинах волн 488.0 и 514.5 нм. Во избежание сильного разогрева образцов, мощность возбуждающего излучения не превышала 100 мВт. Спектры регистрировались при комнатной температуре.

В третьей главе рассматриваются особенности ФО легированных InP и GaAs.

В § 3.1 представлены результаты исследования ионно-легированного InP. Нами исследовались образцы InP с ориентацией поверхности (100). После механической полировки и химического травления полупроводниковые пластины имплантировались ионами бериллия с энергией 100 кэВ и дозой  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Далее образцы подвергались термическому отжигу в течение 10 секунд при температурах от 300 °С до 800 °С.

В спектре ФО неотожженного образца (рис. 1) спектральные линии в области фундаментального края поглощения InP отсутствуют. При температурах отжига от 300 °С до 700 °С в спектрах наблюдаются линии, связанные с фундаментальным переходом InP  $E_g=1.34 \text{ эВ}$  и переходом между зоной проводимости и отщепленной подзоной валентной зоны  $E_g+\Delta_{so}=1.44 \text{ эВ}$  в

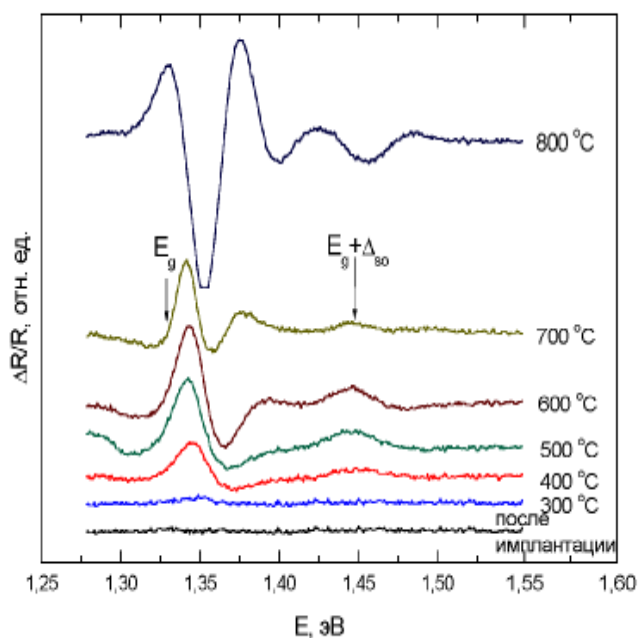


Рис. 1. Спектры фотоотражения InP имплантированного ионами  $\text{Be}^+$  с дозой  $10^{13} \text{ см}^{-2}$  и подвергнутому 10 секундному термическому отжигу при температурах от 300 до 800 °С

силу спин-орбитального взаимодействия. По мере увеличения температуры отжига растет интенсивность этих линий и уменьшается их ширина. Это может быть связано с восстановлением разрушенной в ходе имплантации ионов кристаллической структуры InP. Рассматриваемые спектры ФО имеют вид,



характерный для низкополевого случая, и могут быть описаны формулой Аспнеса:

$$\frac{\Delta R}{R}(E) = \mathbf{Re} \left[ A \cdot e^{i\varphi} \cdot (\hbar\omega - E_i + i\Gamma)^{-m} \right] \quad (1)$$

где  $A$ ,  $\varphi$  - амплитудный и фазовый параметры,  $\hbar\omega$  - энергия зондирующего излучения,  $E_i$  - положение спектральной особенности,  $\Gamma$  - параметр уширения,  $m$  - параметр, определяемый видом критической точки.

Для образца, подвергнутого отжигу при температуре 800 °С спектр ФО в области фундаментального перехода представляет собой осцилляции Франца-Келдыша, при этом происходит скачкообразный сдвиг фундаментального края поглощения на 27 мэВ в сторону меньших энергий. Появление осцилляций и сдвиг линии ФО можно связать с процессом электрической активации примеси. Величина наблюдаемого сдвига совпадает с энергией активации бериллия в InP. Данные спектроскопии ФО коррелируют с данными спектроскопии комбинационного рассеяния света.

В § 3.2 представлены результаты исследования ионно-легированного GaAs. Нами исследовались образцы GaAs типа АГП с ориентацией (100), облученные ионами  $^{55}\text{Mn}^+$  с энергией 200 кэВ и дозой  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Плотность ионного тока не превышала  $0.5 \text{ мкА/см}^2$ . После облучения ионами образцы отжигались в установке быстрого термического отжига. Отжиг происходил в потоке аргона. Для предотвращения испарения мышьяка образцы укладывались облученной поверхностью на кремниевую подложку. Диапазон температур отжига составлял от 400 до 900 °С, длительность процесса - 10 с.

В спектре ФО неотожженного образца спектральные линии в области фундаментального края поглощения GaAs отсутствуют. С увеличением температуры отжига от 400 до 600 °С увеличивается интенсивность и ширина спектральной линии, связанной с фундаментальным переходом  $E_g$  GaAs. В спектре ФО образца, отожженного при температуре 700 °С происходит скачкообразное уменьшение ширины линии. Дальнейшее увеличение

температуры отжига приводит к ее сдвигу от энергии 1.42 эВ до энергии 1.38 эВ и уширению. Кроме того, в спектре появляется отсутствовавшая ранее широкая полоса фотолюминесценции в области 1.42 эВ. Все рассматриваемые спектры ФО имеют вид, характерный для низкополевого случая, и могут быть описаны формулой Аспнеса (1).

Рост интенсивности линии при температурах отжига 400 – 600 °С свидетельствует о восстановлении кристаллической структуры, разрушенной в ходе имплантации ионами  $Mn^{+}$ . Увеличение ширины спектральной линии ФО связано с тем, что Mn плохо растворяется в GaAs и формирует в объеме кластеры. При отжиге в диапазоне температур 400 - 600 °С большая часть имплантированных ионов остается в междоузлиях решетки (примесь не активирована). Это приводит к увеличению вероятности рассеяния носителей на такого рода дефектах и, следовательно, росту ширины спектральной линии ФО. Скачкообразное уменьшение ширины спектральной линии у образца, отожженного при температуре 700 °С, можно связать с уменьшением рассеяния носителей в GaAs, которое обусловлено образованием кластеров Mn.

Изменения в спектрах ФО при температурах отжига 800 и 900 °С можно связать с активацией примеси. В отличие от InP, легированного ионами бериллия, активация примеси в GaAs, легированном ионами марганца не сопровождается появлением в спектрах ФО осцилляций Франца-Келдыша. По-видимому, это может быть связано с несколькими причинами. Во-первых, энергия активации марганца  $E_a > kT$  (при  $T = 300$  К  $kT = 26$  мэВ). Во-вторых, в область осцилляций Франца-Келдыша попадает сигнал фотолюминесценции.

Данные спектроскопии ФО коррелируют с данными спектроскопии комбинационного рассеяния света.

В § 3.3 представлены результаты исследования легированных кремнием пленок n-GaAs. Образцы выращивались на подложках GaAs типа АГП методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Концентрация носителей в образцах была в диапазоне от  $3.7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  до  $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

В спектрах ФО пленок n-GaAs наблюдаются осцилляции Франца-Келдыша разной частоты и пик в области энергии 1.42 эВ. При  $n \geq 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  «частота» осцилляций увеличивается с ростом концентрации носителей, при  $n \leq 7.6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  – их «частота» уменьшается с ростом концентрации носителей, а при  $6 \cdot 10^{17} \leq n \leq 3.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  наблюдается два типа осцилляций: «низкочастотные» и «высокочастотные». Частоты этих осцилляций уменьшаются с ростом концентрации носителей.

С целью определения источника осцилляций Франца-Келдыша в каждом образце были зарегистрированы спектры ФО при модуляции излучением с разными длинами волн. Было установлено, что низкочастотные осцилляции в спектрах ФО образцов с концентрацией носителей от  $3.7 \cdot 10^{16}$  до  $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  связаны с приповерхностной областью пространственного заряда, а высокочастотные – с границей раздела «легированный слой n-GaAs – полуизолирующая подложка GaAs». В спектрах ФО образцов с концентрацией носителей  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и более источником осцилляций Франца-Келдыша является граница раздела «легированный слой n-GaAs – полуизолирующая подложка GaAs».

Установлено, что с уменьшением длины волны модулирующего излучения исчезает резкая линия в области 1.42 эВ. Это подтверждает наше предположение о том, что ее источником является подложка GaAs.

**Четвертая** глава посвящена исследованию энергетического спектра межзонных переходов в одиночных и двойных полупроводниковых квантовых ямах на основе гетеропары GaAs/AlGaAs.

В § 4.1 приведены результаты исследования гетероструктур с квантовыми ямами на основе GaAs/AlGaAs. Образцы выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии и представляли собой квантовые ямы GaAs шириной 6.5, 10, 20, 26, 30 и 35 нм, помещенные между барьерами  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ . Толщины барьеров в разных образцах составляли 30 – 33 нм.

Линии ФО (рис. 2) в области 1.41 и осцилляции Франца-Келдыша в области 1.70 - 1.77 эВ, связаны с фундаментальными переходами GaAs, и

$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  соответственно. Линии в области энергий 1.41 - 1.70 эВ (метки а – г на рис. 3) соответствуют низкополевой модели Аспнеса (1). В связи с тем, что с ростом ширины квантовой ямы от 6.5 до 35 нм наблюдается увеличение числа спектральных линий в этой области энергий, они связаны с переходами между уровнями размерного квантования электронов зоны проводимости и дырок валентной зоны.

В случае прямоугольного потенциала энергии уровней в квантовых ямах зоны проводимости и валентной зоны  $E_i$  определяются из трансцендентного уравнения:

$$\sin\left(L_w \cdot \sqrt{\frac{m_1^* \cdot E_i}{2 \cdot \hbar^2}}\right) - \frac{1}{2} \left[ \sqrt{\frac{m_1^* \cdot (V - E_i) \cdot E_i}{m_2^*}} - \sqrt{\frac{m_2^* \cdot E_i}{m_1^* \cdot (V - E_i)}} \right] \cdot \cos\left(L_w \cdot \sqrt{\frac{m_1^* \cdot E_i}{2 \cdot \hbar^2}}\right) = 0 \quad (2)$$

здесь  $m_1^*$  - эффективная масса носителей в яме GaAs,  $m_2^*$  - эффективная масса носителей в барьере  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ . Энергии межзонных оптических переходов в квантовой яме определяются из выражения:

$$E = E_{01} + E_i^e + E_k^{jh} \quad (3)$$

где  $E_i^e$  - энергия  $i$  - го уровня в квантовой яме зоны проводимости,  $E_k^{jh}$  - энергия  $k$  - го уровня в валентной зоне,  $j=l, h$  для подзон легких и тяжелых дырок соответственно.

На основании рассмотренной модели произведен расчет энергий межзонных переходов для гетероструктур с

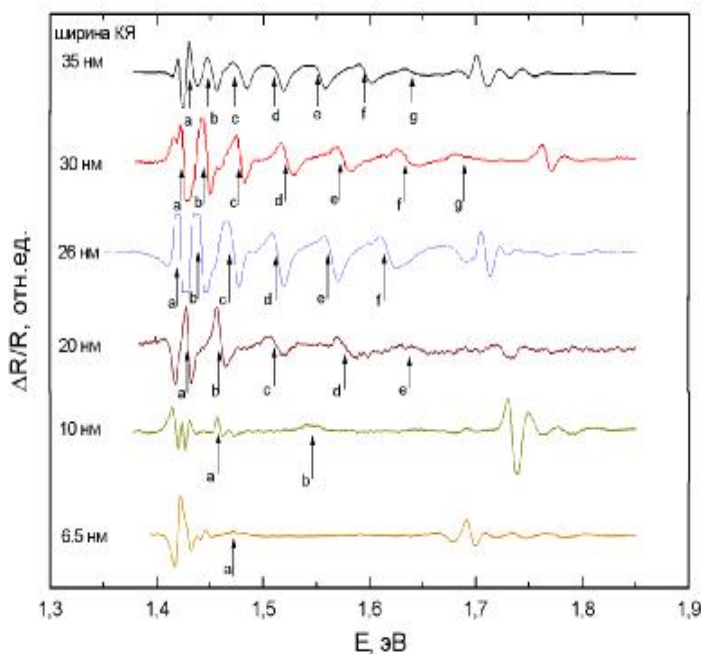


Рис.2. Спектры фотоотражения гетероструктур GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с одиночными квантовыми ямами. Символами а-г обозначены переходы в области квантовой ямы GaAs

одинокими квантовыми ямами. При вычислении энергий межзонных переходов мы считали, квантовую яму прямоугольной. В этом случае действуют правила отбора по чётности и наиболее вероятными являются переходы с

$$n_{l,h} - n_e = 0, 2, \dots \quad (4),$$

где  $n_{l,h}$  - номер энергетического уровня в валентной зоне для тяжелых  $h$  или легких  $l$  дырок,  $n_e$  - номер энергетического уровня в зоне проводимости. В результате проведенных расчетов установлено, что наблюдаемые в спектрах ФО линии соответствуют межзонным переходам в квантовых ямах.

Установлено, что значения параметра уширения линий ФО, обусловленных межзонными переходами в квантовых ямах, уменьшаются с увеличением ширины квантовых ям. Следовательно, основной механизм

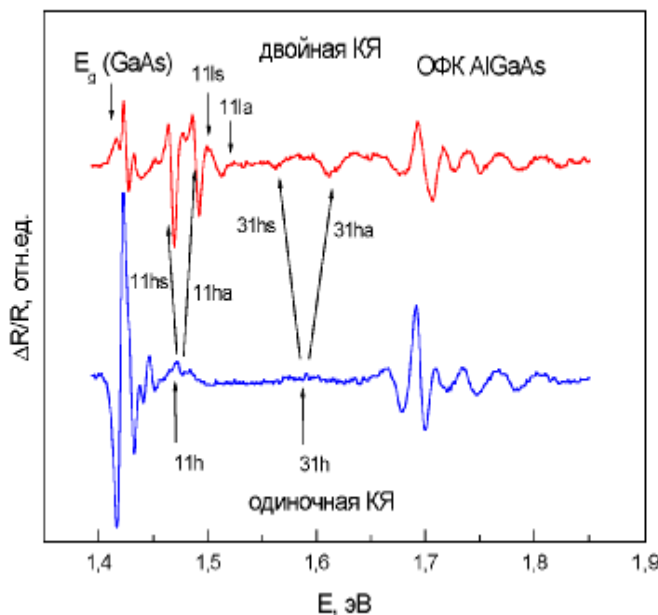


Рис. 3. Спектры фотоотражения структур GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As с одиночной и двойными квантовыми ямами. Ширины ям 6.5 нм и 2x6.5 нм.

уширения спектральных линий связан с пространственной неоднородностью гетерограниц. Проведенные оценки показали, что неоднородность каждой гетерограницы исследуемых образцов не превышает 3 – 4 монослоя. Это свидетельствует о

высоком качестве исследуемых квантовых ям.

В § 4.2 рассматриваются пары идентичных квантовых ям GaAs шириной 6.5, 13 и 17.5 нм, разделённых тонкой (толщина от 0.5 до 1.8 нм) широкозонной перегородкой AlAs. Вследствие туннельной прозрачности тонкого барьера в двойных связанных квантовых ямах из дважды вырожденного состояния соответствующих одиночных ям образуются два состояния, описываемые симметричной и антисимметричной волновой функцией. Из анализа спектров ФО (рис. 3) установлено, что величина расщепления спектральных линий уменьшается с ростом толщины барьера AlAs и увеличивается с ростом энергии уровня в квантовой яме.

В § 4.3 методом спектроскопии ФО исследуется влияние модулированного легирования барьеров на энергетический спектр электронов и дырок в квантовых ямах. Исследовались структуры с квантовыми ямами GaAs шириной 6.5, 13, 18, 26 и 35 нм и концентрацией легирующей примеси (кремний) в барьерах n-AlGaAs от  $10^{18}$  до  $2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Легированная часть барьера отделялась от области квантовой ямы i-AlGaAs спейсером. Толщины спейсера и легированного барьера составляли 16.5 нм.

В спектрах ФО присутствуют линии в области 1.41 и 1.65 - 1.90 эВ, связанные с фундаментальными переходами  $E_{01}$  GaAs, и  $E_{02}$  Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As соответственно. Линии, связанные с барьерами Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As представляют собой осцилляции Франца-Келдыша. Линии в области энергий 1.38 - 1.65 эВ, представляют собой структуры с двумя экстремумами разных знаков, соответствующие низкополевой модели Аспнеса (1). Эти линии связаны с межзонными переходами в квантовых ямах. С ростом концентрации примеси в барьерах происходит уменьшение интенсивности и увеличение ширины спектральных линий, обусловленных межзонными переходами в квантовой яме. В отличие от спектров ФО нелегированных структур с квантовыми ямами, где интенсивность спектральных линий монотонно уменьшалась с ростом энергии, в спектрах структур с модулированным легированием барьеров интенсивность линий с ростом энергии перехода сначала увеличивается, а потом уменьшается.

Профиль квантовой ямы в гетероструктуре с модулированным легированием барьеров существенно отличается от прямоугольного. Следовательно, для описания спектра межзонных переходов пользоваться системой (2 – 3) с правилами отбора (4) нельзя. Для объяснения экспериментальных данных самосогласованно решались уравнения Пуассона и Шредингера. В ходе решения определялись профиль квантовой ямы, волновые функции четырех электронных и четырех дырочных состояний в гетероструктуре, интегралы перекрытия волновых функций электронов и дырок. Сопоставление экспериментальных и теоретических результатов показало, что изменение типов межзонных переходов в квантовых ямах связано с изменением интегралов перекрытия волновых функций электронов и дырок. Это происходит при концентрации легирующей примеси в барьерах  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы работы.

1. Разработана схема регистрации спектров ФО полупроводниковых структур, в которой уменьшено воздействие на образец зондирующего излучения. Это позволило избежать неконтролируемых разогрева образца и изгиба зон, связанного с фотогенерацией носителей. Установлено, что особенности спектров ФО, обусловленные электрической активацией примеси в InP, легированном ионами  $\text{Be}^+$ , и GaAs, легированном ионами  $\text{Mn}^+$ , могут проявляться как в виде осцилляций Франца-Келдыша, так и в виде переходов с участием акцепторного уровня, в зависимости от энергии активации акцептора. Показано, что обнаруженные в спектрах ФО легированных кремнием пленок n-GaAs осцилляции Франца-Келдыша двух различных частот связаны с вкладом в спектр сигналов от приповерхностной области пространственного заряда и области, связанной с границей раздела «легирующая пленка – полуизолирующая подложка».
4. Показано, что полученные из спектров ФО энергии межзонных переходов нелегированных гетероструктур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs, соответствуют рассчитанным в рамках модели огибающей волновой функции для прямоугольного потенциала с учетом правил отбора по

четности. В модулировано легированных квантовых ямах GaAs/AlGaAs при концентрации легирующей примеси в барьерах, порядка  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , происходит изменение типов межзонных переходов. Это подтверждается самосогласованным решением уравнений Пуассона и Шредингера.

5. Установлено, что основным механизмом уширения спектральных линий ФО, связанных с межзонными переходами в области квантовой ямы GaAs/AlGaAs является пространственная неоднородность гетерограниц.
6. Обнаруженное в спектрах фотоотражения двойных квантовых ям расщепление спектральных линий связано с взаимодействием одиночных квантовых ям через туннельно-прозрачный барьер AlAs. Величина расщепления спектральных линий уменьшается с ростом толщины барьера AlAs и увеличивается с ростом энергии уровня в квантовой яме.
7. Разработана программа для анализа спектров ФО с применением моделей Аспнеса и Штудны, фазового анализа, преобразования Фурье, соотношений Крамерса-Кронига. Разработана программа для расчета энергетических уровней электронов и дырок, а также, энергий межзонных переходов в полупроводниковых квантовых ямах в рамках модели огибающей волновой функции.

### **Список публикаций по теме диссертации**

1. Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Казаков И.П., Червяков А.В. Размерное квантование в гетероструктурах GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As по данным спектроскопии фотоотражения. Вестн. Моск. Ун-та. Физика. Астрономия. 32(4), с.48 (2002)
2. Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Галиев Г.Б., Каминский В.Э., Кульбачинский В.А., Мокеров В.Г., Червяков А.В. Исследование эффектов размерного квантования в связанных квантовых ямах Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As методом спектроскопии фотоотражения. Опт. и Спектр., 93(6), с.857 (2002)
3. Галиев Г.Б., Каминский В.Э., Мокеров В.Г., Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Червяков А.В., Кульбачинский В.А. Исследование электронных переходов в связанных квантовых ямах со встроенным электрическим полем методом спектроскопии фотоотражения. ФТП, 37(1), с.77 (2003)



4. Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Колмакова Т.П., Червяков А.В. Исследование встроенного электрического поля в напряженных сверхрешетках GaAs/GaAsP методом спектроскопии фотоотражения. Вестн. Моск. Ун-та. Физика. Астрономия, том 1, с.45 (2004)
5. Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Колмакова Т.П., Червяков А.В. Исследование разрыва зон на гетеропереходе напряженных короткопериодных сверхрешеток GaAs/GaAsP методом спектроскопии фотоотражения. ФТП, 38(12), с.1429 (2004)
6. Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Червяков А.В. Исследование активации примеси в InP, имплантированном ионами бериллия, методом фотоотражения. ФТП 39(2), с.189 (2005)
7. Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Червяков А.В. Автоматизированная установка для регистрации спектров фотоотражения с использованием двойного монохроматора. ЖТФ, 75(10), с.66 (2005)
8. Боков П.Ю., Желтяков П.А. Автоматизированная установка для регистрации спектров фотоотражения полупроводниковых структур. Тез. докл. междунар. конф. студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов 99», с.102, г. Москва, апрель 1999
9. Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Казаков И.П., Червяков А.В. Исследование гетероструктур GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As методом спектроскопии фотоотражения. Тез. докл. Всероссийской научно-технической конф. «Микро – и нано – электроника 2001», с. р2-29, Звенигород 1-5 октябрь 2001
10. Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Казаков И.П., Червяков А.В. Исследование гетероструктур GaAs/AlGaAs методами комбинационного рассеяния света и фотоотражения. Тез. докл. первой Российской конф. молодых ученых по физическому материаловедению, с. 42, Калуга, 2001
11. Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Казаков И.П., Червяков А.В. Исследование гетероструктур состава GaAs/AlGaAs методом комбинационного рассеяния света. Тез. докл. второй междунар. конф. молодых ученых и специалистов «Оптика 2001», с. 65, Санкт-Петербург, 2001

12. Avakyants L.P., Bokov P.Yu., Chervyakov A.V., Kazakov I.P. Photoreflectance study of GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As quantum well structures. Тез. докл. 19<sup>th</sup> Condensed Matter Division conference, Brighton, United Kingdom 7-11 april 2002
13. Боков П.Ю. Исследование гетероструктур Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As методом спектроскопии фотоотражения. Тез. докл. межд. конф. студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов 2002», с. 196, Москва, Физический факультет МГУ, апрель 2002
14. Галиев Г.Б., Каминский В.Э., Мокеров В.Г., Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Червяков А.В. Исследования электронно-дырочных переходов в связанных квантовых ямах со встроенным электрическим полем методом фотоотражения. тез. докл. конф. «Оптика, оптоэлектроника и технология», с. 82, Ульяновск, 17-22 июнь 2002
15. Avakyants L.P., Bokov P.Yu., Chervyakov A.V., Kazakov I.P., Trofimov V.T. Study of carrier concentration in Si doped GaAs by Raman scattering and photoreflectance spectroscopy. Тез. докл. конф. Lasers, Applications, and Technologies -2002, p. 114, Москва, 22-27 июнь 2002
16. Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Казаков И.П., Червяков А.В. Особенности фотоотражения в тонких пленках n-GaAs. Материалы 8 междун. Конф. «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V», с. 214, Томск, 1 - 4 октябрь 2002
17. Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Казаков И.П., Червяков А.В. Исследование электронных состояний в тройных квантовых ямах на основе GaAs/AlGaAs методом спектроскопии фотоотражения. Материалы 8 междун. конф. «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V», с. 149, Томск, 1 - 4 октябрь 2002
18. Боков П.Ю., Авакянц Л.П. Исследование эффектов размерного квантования в гетероструктурах с квантовыми ямами методом фотоотражения. Тез. докл. IV Всероссийской молодежной конф. по физике полупроводников, полупроводниковой опто- и наноэлектронике., с. 84, Санкт-Петербург, 3 - 6 декабрь 2002

19. Avakyants L.P., Bokov P.Yu., Chervyakov A.V., Galiev G.B., Klimov E.A., Vasil'evskij I.S. Room temperature photoreflectance investigation of undoped and doped GaAs/AlGaAs quantum well structures. Proc. SPIE Vol. 5401, p. 605, 2003
20. Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Червяков А.В. Особенности спектров фотоотражения InP при имплантации ионами Be. Тез. докл. междунар. конф. молодых ученых и специалистов «Оптика 2003», с. 258, Санкт-Петербург, октябрь 2003
21. Боков П.Ю. Регистрация спектров фотоотражения полупроводниковых структур с использованием двойного монохроматора. Тез. докл. междунар. конф. студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов 2004», с. 192, Москва, апрель 2004
22. Avakyants L.P., Bokov P.Yu., Chervyakov A.V., Galiev G.B., Klimov E.A., Vasil'evskij I.S. Photoreflectance investigation of GaAs/AlGaAs quantum well with different level of doping. Тез. Workshop on Modulation Spectroscopy of Semiconductor Structures, p. 39, Wroclaw, Poland, 2004
23. Avakyants L.P., Bokov P.Yu., Chervyakov A.V. Characterization of structural and electrical properties of Be<sup>+</sup> implanted InP by Raman scattering. Abstracts of 20<sup>th</sup> General Conference Condensed Matter Division EPS p. 130, Prague, 19-23 July 2004
24. Боков П.Ю., Авакянц Л.П. Особенности фотоотражения в GaAs, ионно легированном Mn<sup>+</sup>. Тез. докл. VI Всероссийской молодежной конф. по физике полупроводников, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, с. 97, Санкт-Петербург, 6-10 декабрь 2004
25. Avakyants L.P., Bokov P.Yu., Chervyakov A.V., Kazakov I.P., Kukin V.N. Diagnostics of GaAs/AlGaAs superlattices by means of photoreflectance spectroscopy. Тез. докл. 13<sup>th</sup> European Molecular Beam Epitaxy Workshop, p. P-11, Grindenwald, Switzerland, 2005
26. Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Червяков А.В. Исследование GaAs:Mn методами комбинационного рассеяния света и

фотоотражения. Тез. докл. междун. конф. «Взаимодействие ионов с поверхностью 2005», с. 2-102, Звенигород, 2005

Подписано к печати 15.11.05

Тираж: 130 экз. Заказ 170

Отпечатано в отделе оперативной печати

Физического факультета МГУ