

*На правах рукописи*

Молдавская Любовь Давидовна

**СТРУКТУРА, ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА  
И ИК ФОТОПРОВОДИМОСТЬ  
МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСИСТЕМ  
InGaAs/GaAs С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ**

05.27.01 — твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и наноэлектроника,  
приборы на квантовых эффектах

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2007

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
Шашкин Владимир Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Гавриленко Владимир Изяславович

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Карпович Игорь Алексеевич

Ведущая организация: Уральский государственный  
университет им. А.М. Горького

Защита состоится 13 декабря 2007 г. в 14 часов на заседании  
диссертационного совета Д 002.098.01 при Институте физики  
микроструктур РАН (603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института  
физики микроструктур РАН.

Автореферат разослан 12 ноября 2007 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

К. П. Гайкович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В настоящее время изучение механизмов формирования самоорганизующихся nanoостровков и квантовых точек, их структуры и электронных свойств, разработка приборов на их основе является одной из наиболее актуальных проблем физики и техники низкоразмерных систем. Используя метод самоорганизации в системе упругонапряженных слоев полупроводников, современные технологии эпитаксиального роста – молекулярно-пучковая и металлоорганическая газофазная эпитаксии (МОГФЭ) позволяют формировать в матрице широкозонного материала нульмерные объекты из узкозонного материала - практически идеальные кристаллы высокого структурного и оптического качества [1]. Активно исследуются гетероструктуры InGaAs/GaAs и Ge/Si с квантовыми точками (КТ) для фотоприёмников ИК диапазона. Длины волн, соответствующие внутризонным переходам в КТ в системе InGaAs/GaAs, перекрывают окна прозрачности атмосферы 3-5мкм и 8-12мкм, что определяет широкий круг практических применений. Нульмерный характер электронного спектра КТ изменяет правила отбора для внутризонного оптического поглощения и позволяет принимать излучение любой поляризации при нормальном падении, в отличие от структур с квантовыми ямами (КЯ). Благодаря снижению рассеяния на фононах кристаллической решетки в системах с КТ значительно возрастает время жизни фотовозбужденных электронов и уменьшается темновой ток [2]. Это может повысить квантовую эффективность приёмника и увеличить рабочие температуры. Важно отметить, что технология гетероструктур с КТ совместима с кремниевой системой считывания, разработанной для гетероструктур с КЯ, что позволяет создать матричный фотоприемник для систем изображения. Этим исследованиям посвящено большое число работ, однако, достигнутые результаты для гетероструктур (ГС) с КТ пока значительно ниже ожидаемых. Реализованная чувствительность ИК фотоприемников на ГС с КТ, как правило, уступает существующим фотоприемникам, а рабочая температура не превышает 100К. Основными причинами являются неоптимальная зонная структура ГС с КТ, малое поглощение из-за низкого коэффициента заполнения активных областей квантовыми точками и значительного неоднородного уширения линий поглощения [3]. В связи с этим, весьма актуальной задачей является исследование возможностей создания многослойных низкодефектных структур с массивами КТ необходимой формы, размеров, с высокой поверхностной плотностью и однородностью по размерам. В последнее время предложены новые методы зонной инженерии гетероструктур с КТ для ИК фотоприемников - «квантовые точки в квантовой яме», сверхрешетки из слоев КТ, структуры с

дополнительными барьерами AlGaAs и туннельно-связанными квантовыми ямами (КЯ). Перечисленные методы используют отработанные процессы формирования КТ и модифицируют области вокруг КТ.

В данной работе исследуется новый подход к формированию структур с КТ для ИК фотоприемников, основанный на модификации непосредственно массивов КТ. Изучаются факторы процесса МОГФЭ, способствующие достижению повышенной плотности КТ, однородности размеров, увеличению высоты при сохранении латеральных размеров. Исследуется возможность перестройки длины волны основного перехода в КТ путем вариации процедуры зарастивания. Важнейшими параметрами, определяющими энергетический спектр КТ, являются их состав и величина упругих напряжений. Определение этих параметров для КТ, закрытых слоем полупроводника - актуальная и непростая задача. Одна из глав диссертации посвящена определению состава и упругих напряжений nanoостровков методом рентгеновской дифрактометрии. В отличие от работ, где рентгенодифракционное исследование nanoостровков выполнено с помощью синхротронных источников излучения, представленная в данной работе методика позволяет использовать лабораторный дифрактометр. Также в диссертации обсуждаются механизмы ИК фоточувствительности и пути оптимизации структур для улучшения чувствительности и обнаружительной способности ИК фотоприёмников на ГС с КТ.

## **Цели работы**

- Анализ структурных, оптических и транспортных свойств упругонапряжённых гетеросистем InGaAs/GaAs с nanoостровками и квантовыми точками.
- Изучение ИК фотопроводимости многослойных селективно легированных гетероструктур InGaAs /GaAs с КТ.
- Оптимизация гетероструктур для улучшения параметров ИК фотодетекторов: вольт-ваттной чувствительности, обнаружительной способности, диапазона рабочих температур.

## **Научная новизна**

1. Предложена новая модель формирования КТ в структурах с повышенной эквивалентной толщиной слоя InAs, включающая стадии образования двумерного вторичного слоя InGaAs из крупных кластеров InAs и дальнейшей трехмерной трансформации слоя в поле упругих напряжений КТ.

2. В многослойных гетероструктурах InAs/GaAs с КТ, изготовленных методом МОГФЭ, наблюдалась фотолюминесценция с длиной волны до 1,6 мкм при комнатной температуре.
3. Предложен новый механизм продольной ИК фоточувствительности в структурах с КТ, основанный на уменьшении кулоновского рассеяния на заряженных квантовых точках при их нейтрализации в результате засветки.

### **Научная и практическая значимость работы**

Научная значимость заключается в выяснении закономерностей формирования вторичного слоя InGaAs из крупных кластеров InAs при промежуточном отжиге в структурах с повышенной эквивалентной толщиной слоя InAs. Обнаружена возможность проявления ИК фоточувствительности в структурах с КТ при продольном электронном транспорте в результате изменения подвижности носителей под действием ИК излучения.

Практическая значимость заключается в разработке методики экспресс-анализа эпитаксиальных структур с самоорганизующимися наноструктурами с использованием лабораторного рентгеновского дифрактометра типа ДРОН. Методика позволяет в случае крупных самоорганизованных островков GeSi/Si(001) и InGaAs/GaAs(001) определять их усредненный состав и упругую деформацию по брегговским пикам двух отражений. Полученные в диссертации результаты по исследованию режимов роста массивов КТ повышенной плотности, с малым разбросом по высоте, с большим отношением высот к латеральным размерам, с возможностью перестройки основного перехода в КТ путем вариации толщины низкотемпературного покровного слоя могут быть использованы для создания чувствительных фотоприёмников среднего и ближнего ИК диапазонов.

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

1. Рентгеновская дифрактометрия с использованием лабораторного источника излучения позволяет определять усредненный состав и упругую деформацию крупных самоорганизованных островков GeSi/Si(001) и InGaAs/GaAs(001) по брегговским пикам двух отражений.
2. Свойства многослойных гетероструктур с повышенной эффективной толщиной слоя квантовых точек InAs могут быть модифицированы при промежуточном отжиге. Это приводит к образованию вторичного слоя InGaAs из крупных дефектных кластеров InAs и дальнейшей трехмерной трансформации этого слоя в поле упругих напряжений КТ. В таких структурах возможно увеличение длины волны межзонной фотолюминесценции до 1,6 мкм при 300К.
3. В многослойных селективно легированных гетероструктурах InGaAs/GaAs с квантовыми точками возможен новый механизм продольной ИК

фотопроводимости, связанный с изменением подвижности носителей, а не их концентрации. Фотопроводимость обусловлена уменьшением кулоновского рассеяния при нейтрализации заряда КТ, вызванной фотовозбуждением.

4. Многослойные селективно легированные гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантовыми точками перспективны для использования в качестве ИК фотоприёмников диапазона длин волн 3-6 мкм. Их обнаружительная способность сопоставима с обнаружительной способностью фотоприёмников на структурах с квантовыми ямами при температуре 80 К, а фоточувствительность сохраняется до 200 К.

### **Личный вклад автора в получение результатов**

Равнозначный вклад в проведение рентгенодифракционных измерений структур с наноструктурами InGaAs/GaAs и GeSi/Si, в обработку и интерпретацию их результатов (совместно с Ю.Н.Дроздовым) [A1-A9].

Определяющий вклад в проведение электрофизических измерений методом эффекта Холла [A10, A12], равнозначный в обработку и интерпретацию результатов низкотемпературных исследований электронного транспорта (совместно с В.И.Шашкиным, М.Н.Дроздовым, А.В.Германенко, Г.М.Миньковым) [A16, A21].

Основной вклад в подготовку и проведение измерений спектров фотопроводимости многослойных гетероструктур InAs/GaAs с КТ [A17, A18, A26-A29] (совместно с М.Н.Дроздовым). Равнозначный вклад в обработку и интерпретацию результатов измерений спектров фотопроводимости (совместно с В.И.Шашкиным, М.Н.Дроздовым) [A10-A15, A17, A18, A19, A22-A29].

Основной вклад в проведение измерений спектров фотолюминесценции многослойных гетероструктур InAs/GaAs с КТ в работах [A17, A18, A28, A29] (совместно с Д.М. Гапоновой, М.Н.Дроздовым). Равнозначный вклад в обработку и интерпретацию результатов измерений фотолюминесценции многослойных гетероструктур InAs/GaAs с КТ (совместно с В.И.Шашкиным, М.Н.Дроздовым) [A10-A18, A20, A21, A24, A26, A28, A29].

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты были доложены и обсуждены на всероссийских совещаниях "Рентгеновская оптика" (Нижний Новгород, 1999, 2002); Симпозиумах "Нанопотоника" (Нижний Новгород, 1999, 2000, 2002, 2003, 2004); "Нанопотоника и Нанопотоника" (Нижний Новгород, 2005, 2006, 2007); 5-й, 6-й и 7-й Российских конференциях по физике полупроводников (Нижний Новгород, 2001, Санкт-Петербург, 2003, Екатеринбург, 2007); Международной школе по материаловедению и электронной микроскопии (Халле, Германия, 1997); 26-м

международном симпозиуме по полупроводниковым приборам и интегральным схемам (XXVI Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits held in Europe, Черногловка, 2002); Международной конференции по сверхрешёткам, наноструктурам и наноприборам (International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevices. Тулуза, Франция, 2002); 32-й и 34-й международных школах по физике полупроводниковых соединений (XXXII и XXXIV International School on the Physics of Semiconducting Compounds “Jaszowiec 2003” и “Jaszowiec 2005”, (Яшовец, Польша, 2003 и 2005); 14-й и 15-й уральских международных зимних школах по физике полупроводников (Н.Тагил, 2002 и Кыштым, 2004); 12-й международной конференция по узкозонным полупроводникам (12th International Conference on Narrow Gap Semiconductors, Тулуза, Франция, 2005); XIX Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (2006, Москва).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 19 статей в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах, 17 работ в сборниках тезисов докладов и трудов конференций, симпозиумов и совещаний.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 136 страниц, включая 44 рисунка и 3 таблицы. Список цитируемой литературы включает 115 наименований, список публикаций автора по теме диссертации - 36 наименований.

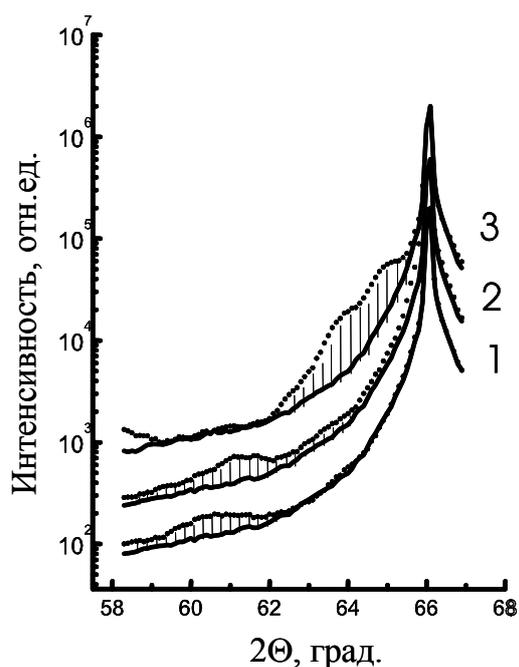
## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, показана ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цели работы, а также представлены сведения о структуре и содержании работы, приводятся положения, выносимые на защиту.

**Глава 1** содержит обзор литературы, посвящённой свойствам, методам получения и применению структур InAs/GaAs и Ge/Si с наноструктурами и квантовыми точками. Основное внимание уделено работам, связанным с использованием структур InAs/GaAs с квантовыми точками для создания фотоприёмников ИК диапазона. Приведены методы анализа гетероструктур с наноструктурами и квантовыми точками, используемые в работе, подробно рассмотрен вопрос исследования наноструктур методом рентгеновской дифрактометрии.

**Глава 2** посвящена экспериментальному исследованию наноструктур InGaAs/GaAs и GeSi/Si методом рентгеновской дифрактометрии. В первом параграфе приведено описание экспериментальной установки - дифрактометра ДРОН-4 с некоторыми доработками по сравнению с заводским вариантом. Во втором параграфе главы описаны приёмы оптимизации эксперимента для структур с наноструктурами [A1]. Обсуждаются основные сложности рентгенодифракционного (РД) анализа самосформированных наноструктур с помощью лабораторного источника излучения: интенсивность когерентного рассеяния на островках очень низкая, а дифракционные пики очень широкие. Приведены примеры полученных РД спектров структур с островками. Регистрируемые пики от островков отвечают их усредненным параметрам. В третьем параграфе представлены результаты исследования состава и упругих напряжений островков методом построения двумерного сечения обратного пространства [4] в окрестности двух отражений, которое представляет собой совокупность нескольких десятков одномерных спектров. Показано, что даже при нанесении чистого вещества (Ge или InAs) для формирования островков на самом деле островки представляют собой твердый раствор с веществом подложки (GeSi или InGaAs) [A1, A2, A3, A4, A5]. Описана разработанная методика экспресс-анализа эпитаксиальных структур с самоорганизованными наноструктурами, позволяющая определять усредненный состав наноструктур и упругую деформацию по брегговским пикам двух отражений, и приведены примеры её использования [A7]. Методика позволяет в десятки раз сократить объём экспериментальных исследований. В четвертом параграфе главы изучается влияние условий формирования островков InGaAs/GaAs и GeSi/Si на их состав и

Рис.1. Рентгенодифракционные спектры образцов с наноструктурами InGaAs в окрестности отражения (400) GaAs: 1 - КТ InAs без покровного слоя; 2 - КТ InAs с низкотемпературным покровным слоем; 3- КТ InAs с высокотемпературным покровным слоем. Спектры КТ показаны точками, линией показан спектр чистой подложки.



упругие напряжения. Показано, что с уменьшением температуры роста островков GeSi происходит увеличение доли Ge в островках [A6, A9]. Это увеличение вызвано подавлением диффузии кремния в островки при уменьшении температуры роста. Исследовано влияние температуры роста покровного слоя (GaAs в системе InGaAs/GaAs и Si в системе GeSi/Si) [A1, A2, A5, A8, A9]. Показано, что при низкотемпературном зарощивании происходили незначительные изменения состава и размера островков, тогда как высокотемпературное зарощивание приводило к образованию твёрдого раствора со значительным увеличением объёма островков, что иллюстрирует рис.1, то есть островки растворялись в покрывающем слое.

В **Главе 3** изучаются особенности продольного электронного транспорта и ИК фотопроводимости в многослойных селективно легированных гетероструктурах InGaAs/GaAs с квантовыми точками, изготовленных методом МОГФЭ. В первом параграфе описана схема базовой структуры (рис.2) и режим роста. Рост каждого из слоев квантовых точек проводился при пониженной температуре 480°C. Затем следовала продувка реактора водородом в присутствии арсина и зарощивание КТ тонким слоем GaAs при той же температуре. Как было показано в главе 2, при такой температуре зарощивания не происходит растворение квантовых точек и существенное изменение их размеров и плотности. Затем в режиме прерывания роста температура поднималась до 600-620°C и проводился рост барьерных слоев GaAs. Во втором параграфе

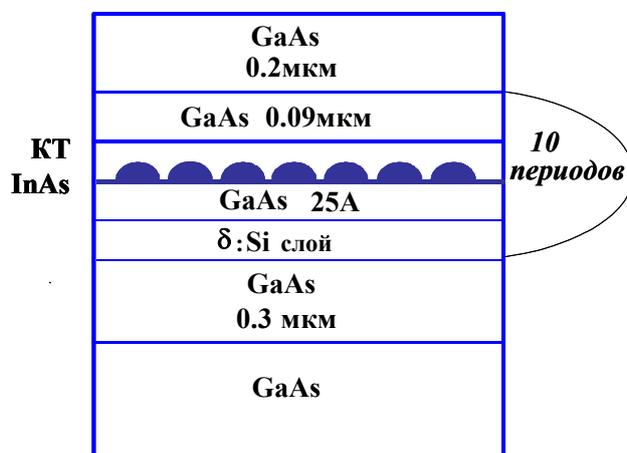


Рис.2. Схема базовой 10-слойной гетероструктуры с КТ.

представлено описание методик исследования структур, приведены характерные параметры КТ. Структуры исследовались методами атомно-силовой и просвечивающей электронной микроскопии, эффекта Холла, фотолюминесценции и фотопроводимости. В третьем параграфе приведены результаты исследования продольной ИК фотопроводимости (ФП)

гетероструктур [A10-A14]. При нормальном падении ИК излучения на поверхность образцов в спектрах продольной ФП обнаружены две линии внутризонной фотопроводимости КТ: вблизи 90 и 230мэВ и линия ФП вблизи 930мэВ, связанная с межзонными переходами в КТ. Проведено исследование температурной зависимости ИК фотопроводимости в данных структурах в диапазоне температур 8-150К. Установлено, что линии 230 и 930мэВ носят термоактивационный характер, что свидетельствует о бимодальном характере распределения размеров КТ и наличии потенциального барьера 2-3мэВ вокруг более крупных КТ. При температуре выше 30К свободные электроны преодолевают этот барьер и заселяют глубокие состояния в крупных точках, что и обеспечивает ФП в области 230мэВ. Длинноволновый отклик 90мэВ, связанный с мелкими точками, наблюдается до температур 30-40К, его гашение вызвано термическим опустошением мелких уровней КТ с ростом температуры. Термоактивационный механизм заселения КТ большего размера приводит к конкуренции заселенности мелких и глубоких уровней и ускоренному гашению длинноволновой линии ФП 90мэВ при температуре 30-40 К.

Возможны два механизма фотопроводимости в таких структурах: либо за счёт изменения концентрации свободных носителей, либо в результате изменения их подвижности. В основном обсуждается только концентрационный механизм ФП. Новый механизм ФП в таких структурах, связанный с изменением подвижности электронов в двумерном канале, роль которого выполняет смачивающий слой [A16], обсуждается в четвёртом параграфе. Исследована температурная зависимость эффекта Холла в гетероструктурах InGaAs/GaAs с КТ, в которых в диапазоне температур от 8 до 30-40 К наблюдалась внутризонная ФП в области 14мкм. Высокий уровень легирования структур обеспечивал отсутствие вымораживания носителей на КТ даже при низких температурах. Обнаружен резкий рост проводимости и холловской подвижности в интервале температур от 8 до 30-40К, с зависимостью от температуры, близкой к экспоненциальной:  $R=R_0 \exp T_0/T$ , где  $T_0=29К$ , при практически постоянном коэффициенте Холла и концентрации электронов (рис.3). Приведены результаты исследования магнетосопротивления гетероструктуры в магнитных полях, направленных перпендикулярно и вдоль поверхности образца, свидетельствующие о двумерном характере электронного транспорта. Двумерные электроны в смачивающем слое испытывают сильное кулоновское рассеяние на заряженных КТ [5]. Резкий рост подвижности  $\mu_H(T)$  двумерных электронов смачивающего слоя с ростом температуры связан с уменьшением числа эффективно рассеивающих заряженных квантовых точек из-за их нейтрализации при тепловом выбросе электронов. Для времени жизни фотовозбужденных электронов, превосходящего время релаксации импульса (что характерно для систем с КТ), такую же зависимость от температуры будет иметь

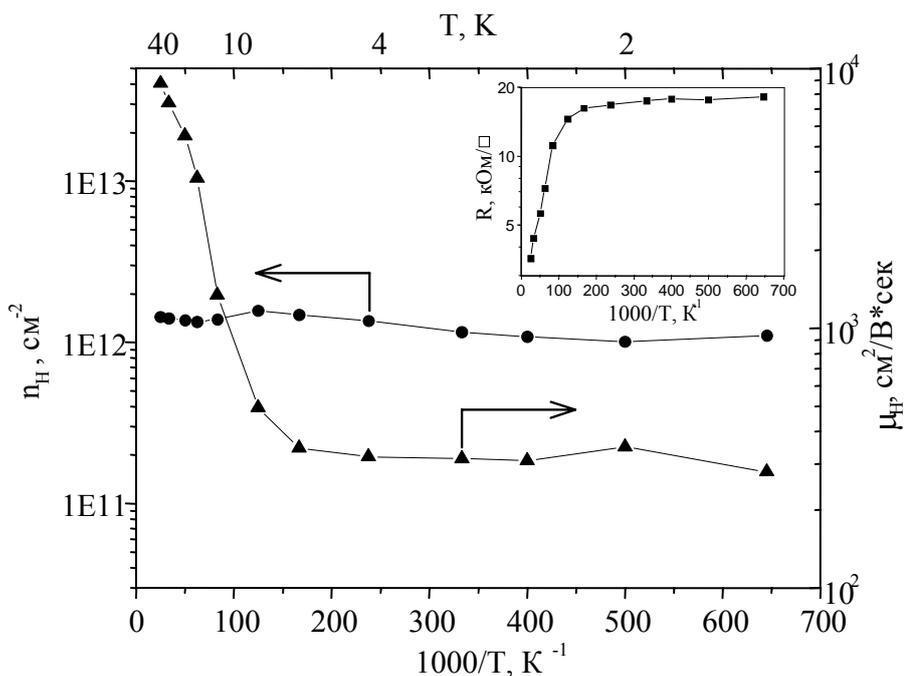


Рис.3. Температурная зависимость поверхностной концентрации электронов  $n_H$  и холловской подвижности  $\mu_H$ . На вставке: температурная зависимость сопротивления образца  $R$ .

и эффективная подвижность фотовозбужденных электронов. В результате фотовозбуждения носителей из КТ под действием ИК излучения в структуре будет наблюдаться заметный фототок даже при небольшом изменении полной концентрации свободных электронов вследствие изменения их эффективной подвижности. Диапазон температур, в котором наблюдается максимальное изменение подвижности в исследуемой структуре, составляет 8-30К. В этом диапазоне температур для данной структуры наблюдалась и максимальная величина ИК фоточувствительности.

В Главе 4 представлены результаты исследований по оптимизации условий формирования многослойных селективно легированных гетероструктур InGaAs/GaAs с КТ для ИК фотоприемников. В первом параграфе детально изучены структурные и оптические свойства серии образцов, изготовленных на основе базовой схемы (рис.2), отличающихся условиями формирования КТ и их зарощивания низкотемпературным покровным слоем GaAs. Обнаружена фотопроводимость в диапазоне 3-5мкм при температуре 77К, которая связывается с внутризонными переходами с локализованных состояний в КТ в состояния непрерывного спектра. Обнаружено значительное (более, чем в 30 раз) усиление данной линии внутризонной фотопроводимости при двукратном увеличении эквивалентной толщины слоя InAs ( $d_{eff}$ ) для формирования КТ. Одновременно наблюдалось снижение ФЛ от КТ. Такое поведение при увеличении  $d_{eff}$  обусловлено увеличением плотности КТ при сохранении их

размеров и формы. Одновременно происходит рост числа дефектов в окружающих слоях, что определяет гашение фотолюминесценции КТ, но оказывается не столь критичным для сигнала фотопроводимости. При дальнейшем увеличении  $d_{eff}$  наблюдалась двухцветная фотопроводимость на длинах волн 4,5 и 3 мкм, что свидетельствовало о формировании бимодального распределения размеров КТ: наряду с уже существовавшими КТ начинали формироваться более крупные КТ. Приводятся ростовые параметры серии структур, изготовленных для изучения механизма формирования крупных КТ. Представлены результаты исследования структур методами АСМ, рентгеновской дифракции и фотолюминесценции. Методом АСМ показано, что на этапе подъёма температуры для роста барьерных слоёв GaAs происходит растворение (и возможно, частичное испарение) крупных дефектных кластеров, не полностью покрытых консервирующим низкотемпературным слоем GaAs. Ранее эта процедура, получившая название «отжиг дефектов», применялась для улучшения оптического качества лазерных структур [6]. Данные АСМ также свидетельствуют о том, что процесс зарастивания КТ происходит благодаря поверхностной миграции адатомов вдоль атомных ступеней на поверхности GaAs. Методами рентгеновской дифракции и фотолюминесценции в структурах с повышенной толщиной  $d_{eff}$  показано возникновение вторичного смачивающего слоя InGaAs поверх слоя КТ из материала растворенных крупных релаксированных кластеров InAs при дальнейшем росте структуры. Таким образом, КТ оказываются заключёнными между двумя слоями с повышенным содержанием In: смачивающим слоем и вторичным слоем InGaAs.

Исследована ФЛ структур с различной толщиной консервирующего слоя GaAs. Показано, что высота КТ находится в прямой зависимости от толщины этого слоя. При использованных режимах роста могут растворяться не только крупные дефектные кластеры - возможно также растворение вершин высоких когерентных КТ, благодаря чему происходит выравнивание массива КТ по высоте. Это дает возможность дополнительного управления длиной волны ФЛ.

При комнатной температуре в спектрах ФЛ структур с увеличенной толщиной  $d_{eff}$  наблюдался пик в области 1,55 мкм, связанный с крупными КТ. Предложен новый механизм формирования крупных КТ с большим значением отношения высоты к латеральному размеру, основанный на последующей 2D-3D трансформации вторичного слоя InGaAs в поле упругих напряжений ранее сформированных КТ.

Во втором параграфе главы 4 представлены результаты исследования продольной ИК фотопроводимости в нелегированных структурах с КТ. Обнаружена продольная внутризонная фотопроводимость в нелегированных структурах с КТ при межзонной генерации носителей тока.

В третьем параграфе приведены измеренные характеристики

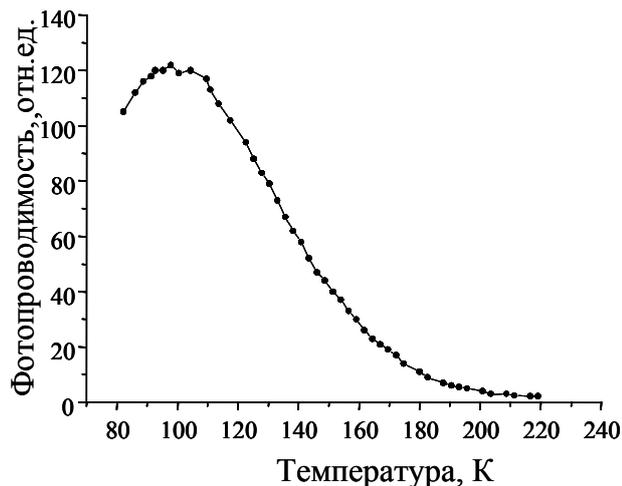
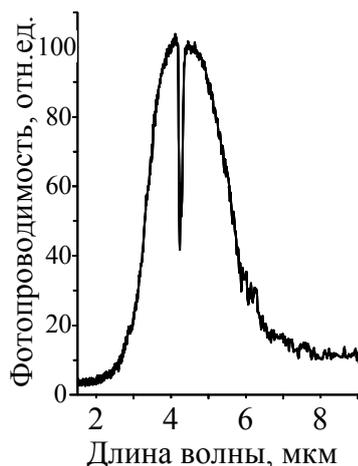


Рис.4. Спектр ФП структуры с КТ.      Рис.5. Зависимость ФП от температуры.

фотоприёмников диапазона 3-5мкм с вертикальным электронным транспортом. Описана схема эксперимента. Описана конструкция фотоприёмника. Приведены спектральная (рис.4) и температурная (рис.5) зависимости сигналов ФП. Длина волны в максимуме фотоотклика составляет 4,3мкм, ширина на полувысоте от максимума составляет  $\Delta\lambda=2,37\text{мкм}$ ,  $\Delta\lambda/\lambda=0,55$ . Фоточувствительность в диапазоне 3-6мкм наблюдалась до температуры 200К. Описана методика определения абсолютной чувствительности и обнаружительной способности. Приведена схема измерительной установки. При температуре 90К в полосе длин волн 3-6мкм вольт-ваттная чувствительность составила  $2 \cdot 10^4 \text{В/Вт}$  (ампер-ваттная – 0,5А/Вт), удельная обнаружительная способность -  $3 \cdot 10^9 \text{смГц}^{1/2}\text{Вт}^{-1}$ .

В четвёртом параграфе представлены результаты исследований фотопроводимости структур с повышенной толщиной  $d_{eff}$  при температуре 300К с латеральным и вертикальным токопереносом. Наблюдалась фотопроводимость в диапазоне длин волн 1,2-2,6мкм. Вольт-ваттная чувствительность в диапазоне 1.2-1.7мкм с дополнительным фильтром на основе пластины кремния составила  $3 \cdot 10^3 \text{В/Вт}$ , удельная обнаружительная способность -  $9 \cdot 10^8 \text{смГц}^{1/2}\text{Вт}^{-1}$ .

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

### Основные результаты работы

1. Разработана методика экспресс-анализа эпитаксиальных структур с квантовыми точками с использованием лабораторного рентгеновского дифрактометра. Схема измерений оптимизирована по чувствительности за счет уменьшения углового разрешения дифрактометра. Методика позволяет в случае крупных самоорганизованных островков GeSi/Si(001) и InGaAs/GaAs(001) определять их усредненный состав и упругую деформацию по брегговским пикам двух отражений.

2. Предложена новая модель формирования КТ в структурах с повышенной толщиной слоя InAs, включающая стадии образования двумерного вторичного слоя InGaAs из крупных кластеров InAs и дальнейшей трехмерной трансформации слоя в поле упругих напряжений КТ. Впервые в многослойных гетероструктурах InAs/GaAs с КТ, изготовленных методом МОГФЭ, наблюдалась фотолуминесценция с длиной волны до 1,6 мкм при комнатной температуре. В таких структурах при комнатной температуре обнаружена фотопроводимость в диапазоне длин волн 1,2-2,6 мкм. Вольт-ваттная чувствительность в диапазоне 1,2-1,7 мкм с дополнительным фильтром на основе пластины кремния составила  $3 \cdot 10^3$  В/Вт, удельная обнаружительная способность -  $9 \cdot 10^8$  смГц<sup>1/2</sup>Вт<sup>-1</sup>.

3. Установлено, что в многослойных селективно легированных гетероструктурах InGaAs/GaAs с квантовыми точками и двумерным электронным каналом при повышении температуры от 8 до 40 К подвижность электронов экспоненциально возрастает при незначительном росте концентрации. Это связано с уменьшением кулоновского рассеяния на заряженных квантовых точках при нейтрализации их заряда. На основе этого эффекта предложен новый механизм продольной ИК фоточувствительности в структурах с КТ.

4. В многослойных селективно легированных гетероструктурах InGaAs/GaAs с квантовыми точками при температурах ниже 200 К обнаружены линии внутризонной ИК фотопроводимости в диапазоне 3-6 мкм, связанные с переходами электронов из локализованных состояний в область непрерывного спектра. При 90 К вольт-ваттная чувствительность составила  $2 \cdot 10^4$  В/Вт (ампер-ваттная 0,5 А/Вт), удельная обнаружительная способность  $3 \cdot 10^9$  смГц<sup>1/2</sup>Вт<sup>-1</sup>.

### Список цитированной литературы

- [1] Шик А.Я. Физика низкоразмерных систем/ А.Я. Шик, Л.Г.Бакуева, С.Ф.Мусихин, С.А.Рыков. – СПб.: Наука, 2001.
- [2] Finkman E. Polarized front-illumination response in intraband quantum dot infrared photodetectors at 77 K / E.Finkman, S.Maimon, V.Immer, G.Bahir, S.E.Schacham, F.Fossard, F.H.Julien, J.Brault, M.Gedry // Phys.Rev. B. – 2001. -V.63. - P.045323.
- [3] J.Phillips. Evaluation of fundamental properties of quantum dot infrared detectors // J. Appl. Phys. – 2002. - V.91. - P.4590.
- [4] Боуэн Д.К. Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография / Д.К. Боуэн, Б.К. Таннер. - СПб.: Наука, 2002. - 274 с.
- [5] Kardynal B.E. Detection of single photons using a field effect transistor with a layer of quantum dots / B. E.Kardynal, A.JShields, M.P.O'Sullivan, N.S.Beattie, I.Farrer, D.A. Ritchie and K Cooper // Meas. Sci. Technol. – 2002. - V.13. - P.1721
- [6] Nuntawong N. Defect dissolution in strain-compensated stacked InGaAs/GaAs

quantum dots grown by metalorganic chemical vapor deposition / N.Nuntawong, S.Huang, Y.B.Jiang, C.P.Hains, D.L.Huffaker // Appl. Phys. Lett. – 2005. – V.87(11) – P.113105.

### Список публикаций автора по теме диссертации

- [A1] Дроздов Ю.Н. Рентгенооптическая схема для дифракционного исследования полупроводниковых квантовых слоев и точек / Ю.Н. Дроздов, Л.Д. Молдавская, В.М. Данильцев, О.И. Хрыкин, А.В. Новиков, В.В. Постников //Поверхность. РСНИ. – 2000. - №1. – С. 136-139.
- [A2] Востоков Н.В. Однородные nanoостровки Ge на Si (100) /Н.В.Востоков, И.В.Долгов, Ю.Н.Дроздов, З.Ф.Красильник, Д.Н.Лобанов, Л.Д.Молдавская, А.В.Новиков, В.В.Постников, Д.О.Филатов //Известия Академии наук: Серия физическая . – 2000. - Т. 63 (2) - С.302-305.
- [A3] Красильник З.Ф. Упругие напряжения и состав самоорганизующихся nanoостроек GeSi на Si(100) /Н.В. Востоков, С.А. Гусев,И.В. Долгов, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.И. Лобанов, Л.Д. Молдавская, А.В. Новиков, В.В. Постников, В.В. Филатов //ФТП. – 2000. - Т.34. - Вып.1. – С.8-12.
- [A4] Vostokov N.V. Transition from "doom" to "pyramid" shape of self-assembled GeSi islands / N.V. Vostokov, I.V. Dolgov, Yu. N. Drozdov, Z.F. Krasil'nik, D.N. Lobanov, L.D. Moldavskaya, A.V. Novikov, V.V. Postnikov, D.O.Filatov //J. of Cryst. Growth. - 2000. - V.209. – P.302-305.
- [A5] Krasil'nik Z.F. The elastic strain and composition of self- assembled GeSi islands on Si(001) /Z.F. Krasil'nik, I.V. Dolgov, Yu. N. Drozdov, D.O. Filatov, S.A. Gusev, D.N. Lobanov, L.D. Moldavskaya, A.V. Novikov, V.V. Postnikov, N.V.Vostokov //Thin Solid Films. - 2000. V.367. – P.171-175.
- [A6] Vostokov N.V. The relation between composition and sizes of GeSi/Si(001) islands grown at different temperatures / N.V. Vostokov, S.A. Gusev, Yu. N. Drozdov, D.N. Lobanov, L.D. Moldavskaya, A.V. Novikov, V.V. Postnikov, Z.F. Krasil'nik //Phys. Low-Dim. Struct.- 2001. - No.3/4. - P.295-302.
- [A7] Дроздов Ю.Н. Сокращенный способ рентгеновского дифракционного сканирования обратного пространства частично релаксированных слоев и островков / Ю.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, З.Ф. Красильник, Л.Д. Молдавская, А.В. Новиков, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин //Поверхность. РСНИ. – 2003. - №5. - С.22-26.
- [A8] Novikov A.V. Strain-driven alloying sizes, shape and photoluminescence of GeSi/Si (100) self-assembled islands / A.V. Novikov, B.A.Andreev, N.V. Vostokov, Yu.N. Drozdov, Z.F. Krasil'nik, D.N. Lobanov, L.D. Moldavskaya A.N. Yablonsky, M. Miura, N. Usami, Y. Shiraki, M.Ya.Valakh, N.V. Mesters, J. Pascual //Materials Science and Engineering B. - 2002. –V. 89. – P.62-65.

- [A9] Валах М.Я. Влияние диффузии кремния на рост, параметры и фотолуминесценцию самоорганизующихся островков GeSi/Si(001) / М.Я.Валах, Н.В.Востоков, С.А.Гусев, Ю.Н.Дроздов, З.Ф.Красильник, Д.Н.Лобанов, Л.Д.Молдавская, А.В.Новиков, В.В.Постников и др //Известия Академии Наук. Сер. Физическая -2002 - Т. 66. - №2. - С. 160-163.
- [A10] Шашкин В.И. Продольная ИК фотопроводимость в структурах с InGaAs квантовыми точками /В.И.Шашкин, А.В.Антонов, Д.М.Гапонова, М.Н.Дроздов, В.М.Данильцев, А.Ю.Лукьянов, Л.Д.Молдавская, А.В.Мурель, О.И.Хрыкин, А.Н.Яблонский, В.С.Туловчиков. В.И. //Прикладная физика -2003.– Т.2.- С.76-79.
- [A11] Moldavskaya L.D. Infrared lateral photoconductivity of InGaAs quantum dots: The temperature dependence/ L.D.Moldavskaya, V.I.Shashkin, M.N.Drozdov, V.M.Daniltsev, A.V.Antonov, A.N.Yablonsky //Acta Physica Polonica A. – 2003. - V.103. - No.6. - P.579-584.
- [A12] Шашкин В.И. Исследование ИК-фотопроводимости в селективно легированных гетероструктурах с квантовыми точками InGaAs/GaAs /В.И.Шашкин, Б.А.Андреев, Д.М.Гапонова, С.А.Гусев, В.М.Данильцев, М.Н.Дроздов, Ю.Н.Дроздов, А.Ю.Лукьянов, Л.Д.Молдавская, А.В.Мурель, Е.Н.Садова, О.И.Хрыкин, А.Н.Яблонский //Изв. РАН, Серия физическая. – 2003. - Т.67. - №2. - С.208-210.
- [A13] Shashkin V.I. Infrared lateral photoconductivity of InGaAs quantum dot heterostructures grown by MOCVD / L.D.Moldavskaya., V.I.Shashkin, M.N.Drozdov, Yu.N.Drozdov, V.M.Daniltsev, A.V.Murel, B.A.Andreev, A.N.Yablonsky, S.A.Gusev, D.M.Gaponova, O.I.Khrykin, A.Yu.Luk'yanov, E.N.Sadova //Physica E. – 2003. – V.17. – P. 634–635.
- [A14] Moldavskaya L.D. The temperature dependence of photoluminescence and IR photoconductivity in InGaAs/GaAs quantum dot heterostructures / L.D.Moldavskaya, V.M.Daniltsev, M.N.Drozdov, V.R.Zakamov, V.I.Shashkin. "Narrow Gap Semiconductors 2005, eds Kono & Léotin, Institute of Physics Conference Series Number 187, published by Taylor & Franics". - P.360-364.
- [A15] Антонов А.В. Гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантовыми точками для ИК фотоприемников диапазона 3-5мкм / А.В.Антонов, Д.М.Гапонова, В.М.Данильцев, М.Н.Дроздов, Л.Д.Молдавская, А.В.Мурель, В.С.Туловчиков, В.И.Шашкин // ФТП. – 2005. - Т.39. - Вып.1. - С.96-99.
- [A16] Данильцев В.М. Роль эффектов электронного транспорта в ИК фотопроводимости структур InGaAs/GaAs с квантовыми точками / В.М.Данильцев, М.Н.Дроздов, Л.Д.Молдавская, В.И.Шашкин, А.В.Германенко, Г.М.Миньков, Шерстобитов А.А. //Письма в ЖТФ. – 2004. - Т.30. - Вып.18. - С.87-94.
- [A17] Шашкин В.И. ИК-фотопроводимость в многослойных гетероструктурах InGaAs/GaAs с квантовыми точками / В.И. Шашкин, В.М. Данильцев, М.Н.

Дроздов, В.Р. Закамов, А.Ю. Лукьянов, Л.Д. Молдавская, А.В. Мурель // Прикладная физика. – 2007. - Т.2. - С.73.

[A18] Shashkin V.I. IR photoconductivity in InGaAs/GaAs multilayer heterostructures with quantum dots V.I. Shashkin, V.M. Daniltsev, M.N. Drozdov, V.R. Zakamov, A.Yu. Lukyanov, L.D. Moldavskaya, A.V. Murel / Proc. SPIE. – 2007. - V. 6636. - 66360L.

[A19] Moldavskaya L.D. Infrared photoconductivity of InGaAs quantum dots grown by MOCVD with lateral electron transport / L.D.Moldavskaya, V.I.Shashkin, M.N.Drozdov, A.V.Murel, V.M.Daniltsev, Yu.N.Drozdov, B.A.Andreev, A.N.Yablonsky // International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevices. Book of Abstracts. Toulouse, France, 2002.

[A20] Andreev B.A. Normal incidence infrared lateral photoconductivity of InGaAs quantum dot heterostructures / B.A.Andreev, S.A.Gusev, V.M.Daniltsev, M.N.Drozdov, Yu.N.Drozdov, D.M.Gaponova, A.V.Murel, L.D.Moldavskaya, O.I.Khrykin, E.N.Sadova, V.I.Shashkin, V.S.Tulovchikov, A.N.Yablonsky // XXVI Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits held in Europe. Chernogolovka, Russia, 21-22 May 2002. Материалы совещания. - С.35.

[A21] Шашкин В.И. Продольный электронный транспорт и ИК фотопроводимость в структурах InGaAs/GaAs с квантовыми точками / В.И.Шашкин, М.Н.Дроздов, Л.Д.Молдавская, А.В.Германенко, Г.М.Миньков, Шерстобитов А.А. // Тез. докл. VI всероссийской конференции по физике полупроводников, Санкт-Петербург, 27-31 октября 2003. - С. 403.

[A22] Moldavskaya L.D. Infrared lateral photoconductivity of InGaAs quantum dots: The temperature dependence / L.D.Moldavskaya, V.I.Shashkin, M.N.Drozdov, V.M.Daniltsev, A.V.Antonov, A.N.Yablonsky // Abstracts of XXXII International School on the Physics of Semiconducting Compounds Jaszowiec 2003, Jaszowiec, Poland, May 30 - June 6, 2003. - P.52.

[A23] Данильцев В.М. Гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантовыми точками для ИК фотоприемников диапазона 3-5мкм / В.М.Данильцев, М.Н.Дроздов, Л.Д.Молдавская, В.С.Туловчиков, В.И.Шашкин и др. // Нанофотоника. Материалы совещания. Нижний Новгород, 2-6 мая 2004г. - С.216-219.

[A24] Данильцев В.М. Температурная зависимость фотолюминесценции и ИК фотопроводимость гетероструктур InGaAs/GaAs с квантовыми точками / В.М.Данильцев, М.Н.Дроздов, В.Р.Закамов, Л.Д.Молдавская, Д.А.Пряхин, В.И.Шашкин, О.И.Хрыкин // Материалы всероссийского симпозиума Нанофизика и нанoeлектроника, (Н.Новгород, 25-29 марта 2005 г.) с.320-321.

[A25] Daniltsev V.M. Effect of aspect ratio on infrared photoconductivity in InGaAs/GaAs quantum dot heterostructures / V.M.Daniltsev, M.N.Drozdov, V.R.Zakamov, L.D.Moldavskaya, V.I.Shashkin // Abstracts of XXXIV International School on the Physics of Semiconducting Compounds "Jaszowiec 2005". - P.113.

[A26] Молдавская Л.Д. Влияние времени роста квантовых точек в гетероструктурах InGaAs/GaAs на интенсивность фотолюминесценции и ИК фотопроводимости / Л.Д.Молдавская, В.М.Данильцев, М.Н.Дроздов, Д.А.Пряхин, В.И.Шашкин, И.Ю.Шулешова // Материалы всероссийского симпозиума Нанопизика и наноэлектроника, Н.Новгород, 13-17 марта 2006г. - С.443-444.

[A27] Шашкин В.И. ИК-фотопроводимость в многослойных гетероструктурах InGaAs/GaAs с квантовыми точками / В.И. Шашкин, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, В.Р. Закамов, А.Ю. Лукьянов, Л.Д. Молдавская, А.В. Мурель // Тезисы докладов XIX Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 23-26 мая, 2006г., Москва, Россия. - С. 69.

[A28] Молдавская Л.Д. Сэндвич-структура с квантовыми точками InGaAs для фотоприемников ИК диапазона / Л.Д.Молдавская, Н.В.Востоков, Д.М.Гапонова, В.М.Данильцев, М.Н.Дроздов, Ю.Н.Дроздов, В.И.Шашкин // XI всероссийский симпозиум «Нанопизика и Наноэлектроника». Нижний Новгород, 10 – 14 марта 2007г. Материалы Симпозиума. - Т.2.- С.412.

[A29] Востоков Н.В. Гетероструктуры InGaAs/GaAs с повышенной эффективной толщиной слоя квантовых точек InAs для ИК фотоприёмников / Н.В.Востоков, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н.Дроздов, М.Н.Дроздов, Л.Д.Молдавская, В.И.Шашкин // Тез. докл. VIII всероссийской конференции по физике полупроводников, Екатеринбург, 30 сентября-5 октября 2007. - С. 406.

Молдавская Любовь Давидовна

**СТРУКТУРА, ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА  
И ИК ФОТОПРОВОДИМОСТЬ  
МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСИСТЕМ  
InGaAs/GaAs С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ**

Автореферат

Подписано к печати 11 октября 2007 г. Тираж 100 экз.  
Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН  
603950, Нижний Новгород, ГСП-105