

Васев Андрей Васильевич



**Реконструкции поверхности GaAs(001)
и их влияние на морфологию слоёв
при МЛЭ и вакуумном отжиге**

Специальность 01.04.10
(Физика полупроводников)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2009

Работа выполнена в: Учреждении Российской Академии наук Институте физики полупроводников
им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Преображенский Валерий Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
ведущий научный сотрудник
Орлов Лев Константинович;
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Торолов Александр Иванович.

Ведущая организация: Учреждение Российской Академии наук Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН

Защита состоится "22" декабря 2009 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.037.01 при Учреждении Российской Академии наук Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН по адресу: 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

Учреждения Российской Академии наук Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН.

Автореферат разослан "16" ноября 2009 г.

Учсный секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



А.Г. Погосов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Полупроводниковые устройства являются основными элементами приборной базы почти всех видов связи (космической, радиорелейной, сотовой, радиотелефонной) и навигации (управление потоками воздушных, морских и речных судов). Они определяют ключевые параметры большинства систем специального назначения – бортового навигационного оборудования, систем радиоэлектронного противодействия, радиометрических средств обнаружения, охранных комплексов. Значительная часть из вышеперечисленного, работая в ВЧ- и СВЧ-диапазонах, в своих приемных и передающих устройствах использует транзисторы, диоды, усилители, а также другие элементы, созданные на базе GaAs [1,2].

Получение полупроводниковых структур для СВЧ-приборов является сложной технологической задачей. Это связано с тем, что соответствующие структуры должны иметь высокую степень кристаллического совершенства и обладать хорошими электрофизическими свойствами. Как правило, приборные структуры состоят из множества слоев, толщина которых варьируется в диапазоне от нескольких нанометров до нескольких микрон. При этом состав и уровень легирования слоев должны быть точно выдержаны, а границы раздела сформированы максимально резкими и планарными. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) обладает уникальными возможностями для решения подобного рода задач [3,4].

Качество гетерограниц напрямую зависит от морфологии ростовой поверхности. Более того, в сложных многослойных гетеросистемах морфология способна наследоваться и аккумулироваться от слоя к слою. Эти процессы могут наблюдаться, уже начиная с исходной предэпитаксиальной поверхности. Как следствие, возникает целый ряд задач, связанных с “выглаживанием” исходной поверхности подложки и последующим улучшением ее морфологии в процессе эпитаксиального роста. Решая подобные задачи, необходимо учитывать не только температуру подложки и давление паров компонентов, но и кинетику происходящих на поверхности процессов. То есть, в рассмотрении должны быть включены адсорбция, десорбция и диффузия атомов, а также их взаимодействие друг с другом и с особенностями рельефа. Характеристики перечисленных процессов, наряду с термодинамическими параметрами, определяются реконструкционным состоянием поверхности. Систематических исследований влияния реконструкционных состояний на морфологию поверхности, как во время роста, так и при вакуумном отжиге до сих пор не проводилось.

Подобные исследования могут быть осуществлены лишь при использовании *in situ* методов. Объединение возможностей одноволновой автоматической эллипсометрии (ОАЭ) и дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) в едином аналитическом комплексе позволяет решать такие задачи с максимальной эффективностью. Обладая высокой оперативностью и информативностью, эти неразрушающие методы несут информацию о стехиометрии, реконструкционном состоянии и морфологии поверхности в условиях МЛЭ роста и вакуумного отжига.

Цель диссертационной работы состояла в выявлении роли реконструкций поверхности GaAs(001) в формировании морфологии эпитаксиальных слоев при молекулярно-лучевой эпитаксии и вакуумном отжиге.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Постановка методик, позволяющих прецизионно определять и контролировать температуру подложки и плотности молекулярных потоков при МЛЭ и вакуумном отжиге.
2. Выявление методами ОАЭ и ДБЭО корреляции между изменениями оптических и структурных свойств поверхностей GaAs(001) при монотонном повышении температуры в условиях вакуумного отжига. Установление на базе комплекса ОАЭ и ДБЭО данных областей существования переходных реконструкций поверхности GaAs(001).
3. Построение моделей, описывающей влияние реконструкции и морфологии ростовой поверхности на характер осцилляций интенсивности зеркального рефлекса картины ДБЭО в процессе МЛЭ.



Разработка на базе построенной модели методики *in situ* контроля характера морфологических изменений ростовой поверхности GaAs(001).

4. Проведение на базе разработанных методик исследования влияния температуры подложки и плотности потока мышьяка на характер морфологических изменений, происходящих на поверхности GaAs(001) при МЛЭ и вакуумном отжиге. Выявление роли переходных реконструкций в формировании морфологии поверхности. Определение условий получения структурно-совершенной поверхности GaAs(001).

На защиту выносятся следующие основные научные положения:

1. Изменение поляризационных свойств поверхности GaAs(001), наблюдаемое методом одноволновой эллипсометрии в процессе сверхструктурных переходов, обусловлено эволюцией диэлектрических свойств реконструированного слоя в направлении перпендикулярном поверхности.
2. При молекулярно-лучевой эпитаксии слоев GaAs(001) в температурном диапазоне 550+650°C реконструкция ростовой поверхности задает характер развития морфологии эпитаксиального слоя. Рост в условиях существования реконструкции (2×4) характеризуется формированием трехмерного рельефа, а в условиях (3×1) – образованием упорядоченной системы монослойных ступеней.
3. Реконструкция поверхности GaAs(001) определяет скорость морфологических изменений, происходящих на ней в процессе вакуумного отжига. Эффективность процедуры выглаживания в процессе отжига скачкообразно повышается при переходе границы между реконструкциями (2×4) и (3×1).

Научная новизна работы:

1. Показано, что в процессе сверхструктурных переходов эволюция ортогональной компоненты ϵ_{xx} тензора диэлектрической функции реконструированного слоя сопровождается оптическим откликом ΔA , превышающим аналогичный отклик для латеральных компонент ϵ_{yy} и ϵ_{zz} более чем на порядок.
2. Обнаружено, что наиболее интенсивным оптическим откликом характеризуется появление на поверхности переходных As-обедненных реконструкционных состояний.
3. Построена статическая фазовая диаграмма переходных сверхструктурных состояний (3×1), (1×6), (1×1) и (4×6) для поверхности GaAs(001). Определены активационные энергии переходов (2×4) ⇌ (3×1) ⇌ (1×6) ⇌ (1×1) ⇌ (4×6) при $VEP(As_4) > 2.3 \times 10^{-8}$ Торр: 3.3, 3.3, 4.0 и 4.1 эВ, соответственно.
4. Установлена связь сверхструктурного состояния ростовой поверхности GaAs(001) с характером морфологических изменений при МЛЭ в диапазоне температур 550+650°C.
 - Показано, что рост в условиях существования реконструкции (2×4) приводит к формированию 3D рельефа, образованного неупорядоченно расположенными террасами и отдельными островками. Определена активационная энергия 1.1 ± 0.3 эВ процесса, отвечающего за развитие рельефа при МЛЭ GaAs(001)-(2×4).
 - Переход к эпитаксии в условиях существования реконструкции (3×1) ведет к исчезновению островков и появлению упорядоченной системы монослойных ступеней.
5. При температуре роста ниже 550°C поверхность GaAs(001) характеризуется ярко выраженной анизотропией рельефа. Показано, что переход от реконструкции (2×4) к (3×1) на ростовой поверхности сопровождается изменением ориентации выделенного направления рельефа на 90°. При эпитаксии на границе этого перехода рельеф поверхности изотропен.
6. При температуре выше 650°C влияние реконструкции на формирование морфологических свойств ростовой поверхности слабо выражено.
7. Установлено влияние сверхструктурного состояния поверхности GaAs(001) на характер морфологических изменений, происходящих на ней в процессе вакуумного отжига. Показано, что эффективность процедуры отжига с целью выглаживания поверхности скачкообразно повышается при переходе границы между реконструкциями (2×4) и (3×1).

Практическая значимость работы

1. Показано, что метод ОАЭ позволяет регистрировать начало сверхструктурных переходов на поверхности GaAs(001) с прецизионной точностью. Продемонстрирована более высокая чувствительность этого метода в сравнении с ДБЭО, особенно при регистрации переходов между переходными реконструкциями.
2. На базе метода ДБЭО разработана и апробирована методика *in situ* контроля направления и интенсивности морфологических изменений, происходящих на поверхности эпитаксиальных слоев GaAs(001) в процессе МЛЭ.
3. Определена область условий роста GaAs(001), эпитаксия при которых позволяет получать слои, характеризующиеся высокой степенью структурного совершенства поверхности.
4. Полученные в работе результаты могут быть использованы для усовершенствования технологии роста полупроводниковых гетероструктур с целью повышения структурного совершенства гетерограниц и активных поверхностей.

Апробация работы. Основные результаты исследований, приведенные в данной диссертации, опубликованы в статьях [A1], [A6], [A7], [A14], [A15], [A16], [A17], [A18], [A19], [A20] и апробированы на конференциях [A2], [A3], [A4], [A5], [A8], [A9], [A10], [A11], [A12], [A13].

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, заключения и списка литературы.

Объем работы составляет 148 страниц текста, 75 рисунков, 2 таблицы, 2 приложения на 11 страницах и список литературы из 401 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, указана новизна и практическая ценность работы, дана краткая аннотация диссертации.

В первой главе дается обзор основных научных публикаций, представленных в литературе, позволяющих охарактеризовать современное состояние вопросов, обсуждаемых в диссертации. В обзоре рассмотрены методики получения атомарно-чистой и гладкой поверхности GaAs, методы *in situ* контроля оптических и структурных свойств поверхности в условиях сверхвысокого вакуума. Отражены существующие представления о природе и свойствах реконструкционных состояний.

Анализ литературных данных показал, что:

1. Грань (001) кристалла GaAs характеризуется большим числом сверхструктурных состояний, способных реализоваться на ней в зависимости от условий проведения эксперимента. Особым многообразием структурных свойств отличаются так называемые переходные реконструкции, область существования которых на фазовых диаграммах (ФД) лежит между As-обогащенной (2×4) и Ga-обогащенной (4×2).
2. На ФД поверхности GaAs(001), представленных в литературе, информация об областях существования переходных сверхструктурных состояний отсутствует.
3. Для переходных сверхструктурных состояний характерна ситуация, когда наблюдаемые на поверхности реконструкции являются результатом суперпозиции двух или более сосуществующих сверхструктурных фаз. Возможности метода ДБЭО не позволяют установить в режиме *real time* факт реализации суперпозиции.
4. Некоторые переходные сверхструктурные состояния не обладают дальним порядком симметрии, вследствие чего плохо регистрируются методом ДБЭО.

5. Оптические методы (в частности метод ОАЭ) обладающей высокой чувствительностью к изменениям ориентации и типа химических связей в решетке реконструированного слоя кристалла, позволяют в режиме *real time* осуществлять исследование природы большинства процессов, протекающих на поверхности. Объединение методик ДБЭО и ОАЭ в единый комплекс позволит еще более расширить возможности подобных исследований.

6. Значительность влияния, которое оказывают сверхструктурные состояния грани GaAs(001) на процессы поверхностной диффузии, адсорбции, десорбции, встраивания адатомов в кристалл, позволяет предполагать, что эти состояния также играют важную роль и в формировании характера морфологических изменений, происходящих в процессе МЛЭ и вакуумного отжига. Систематических исследований в этом направлении до сих пор не проводилось.

На основе сделанных заключений формулируются основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе приводится описание сверхвысоковакуумных (СВВ) установок, на которых осуществлялась экспериментальная часть диссертационной работы. Представлены конструкции дополнительных узлов, необходимых для успешного выполнения поставленных задач. Приводится описание процедур, специально разработанных для осуществления прецизионных измерений параметров эксперимента. Описаны процедуры предварительной обработки подложек GaAs перед загрузкой в аналитическую камеру. Дана краткая характеристика возможностей методов ОАЭ и ДБЭО при изучении оптических, структурных и морфологических свойств поверхности GaAs, описаны основные методики исследований, используемые модели. Описаны методики, использованные при осуществлении *ex situ* исследований свойств образцов GaAs.

Большая часть экспериментальных исследований была выполнена на модернизированных установках МЛЭ "Адам" и "Штат" отечественного производства.

Отличительной особенностью установки "Адам" является интегрированный в рабочую камеру аналитический комплекс из одюволинного автоматического эллипсометра и дифрактометра на быстрых электронах. Данный комплекс позволяет реализовывать параллельные *in situ* исследования оптических и структурных свойств поверхности в условиях сверхвысокого вакуума. Шлюзовая камера установки "Адам" оснащена герметичным перчаточным боксом с атмосферой сухого азота. Бокс предназначен для проведения процедур предварительной химической обработки образцов и последующей их фиксации на поверхности молибденовых держателей без экспозиции на комнатную атмосферу. Процедура фиксации пластин проводилась при помощи расплавленного индия, что обеспечивало надежный и равномерный тепловой контакт. Нагрев образцов осуществлялся радиационно, температура контролировалась хромель-алюмелевой термопарой, встроенной во внутрь держателя. Создание потока молекул As_4 , а также управление его интенсивностью реализовывались при помощи двухзонного твердотельного молекулярного источника. Контроль плотности потока над поверхностью образцов осуществлялся при помощи ионизационного манометрического преобразователя типа Bayard-Alpert. Измерения плотности потока проводились при перемещении лампы преобразователя в позицию подложки.

Установка "Штат" представляет собой модернизированный комплекс для МЛЭ, созданный на базе установки УЭ ПМА-12.5-001 [5]. Основной особенностью установки "Штат" является возможность прецизионной регистрации изменений характеристик картины ДБЭО. Установка оснащена системой регистрации на базе электрооптического преобразователя с фокусирующим устройством. Данная система позволяет фиксировать изменения интенсивности любой зоны картины ДБЭО размером от 0.1 до 1.5 мм². Другой характерной чертой установки "Штат" является возможность работы с потоками молекул As_2 и As_4 . Создание потока молекулярного мышьяка, а также управление его интенсивностью осуществлялось с помощью молекулярного источника вентильного типа с зоной кренинга.

При проведении эллипсометрических измерений важно знать точное значение угла падения поляризованного луча на исследуемую поверхность. Этот параметр является ключевым при анализе измеренных эллипсометрических данных и определении диэлектрических свойств отражаю-

щей системы. Для установления значений угла падения с прецизионной (эллипсометрической) точностью использовалась специальная разработанная процедура контрольных измерений. В рамках данной процедуры, осуществлялась регистрация оптических свойств калибровочной пластины с тщательно изученными свойствами. Расположение пластины совпадало с расположением исследуемого образца. Результаты измерений однозначно характеризовали пространственное положение образца относительно эллипсометра с точностью ± 0.5 угловой минуты.

Контроль процедур нагрева и охлаждения осуществлялся по показаниям управляющей терморпары, встроенной в нагреватель. Для сопоставления показаний этой терморпары (не имеющей прямого теплового контакта с подложкой) с реальными значениями температуры использовались несколько различных процедур калибровки. В случае, когда имелась возможность эпитаксиального обновления поверхности (при работе на установке "Штаг"), калибровка управляющей терморпары проводилась по температурам сверхструктурных переходов на поверхности GaAs(001) в условиях отсутствия подпора мышьяка. Детали такой процедуры представлены в работе [6]. При работе на установке "Адам", значения управляющей терморпары калибровались по показаниям терморпары тестовой, находящейся в прямом тепловом контакте с образцом [A7].

В третьей главе представлены результаты ОАЭ и ДБЭО исследований особенностей эволюции оптических и структурных свойств поверхностей GaAs(001) и (111)В в процессе вакуумного отжига.

Исследования проводились на образцах, представлявших собой нелегированные гомоэпитаксиальные слои GaAs толщиной ~ 70 нм, выращенные методом МЛЭ подложках полупроводящего GaAs с ориентацией (001) $\pm 0.5^\circ$. Ростовая поверхность образцов была защищена от загрязняющих примесей пассивирующей пленкой аморфного мышьяка толщиной ~ 100 нм.

ОАЭ и ДБЭО измерения осуществлялись в процессе монотонного (с постоянной скоростью $2^\circ\text{C}/\text{мин}$) повышения температуры в интервале от 20 до 650°C . В ходе процедуры давление паров мышьяка над исследуемой поверхностью поддерживалось постоянным. От нагрева к нагреву $BEF(As_4)$ изменялось в диапазоне от 1.6×10^{-10} Торр до 2.8×10^{-7} Торр.

На Рис. 1 представлена эволюция эллипсометрических параметров ψ и Δ в процессе СВВ прогрева GaAs(001) в парах As_4 с давлением $BEF(As_4) = 1.8 \times 10^{-9}$ Торр. После десорбции защитного слоя аморфного мышьяка, на поверхности образца наблюдается ряд из восьми

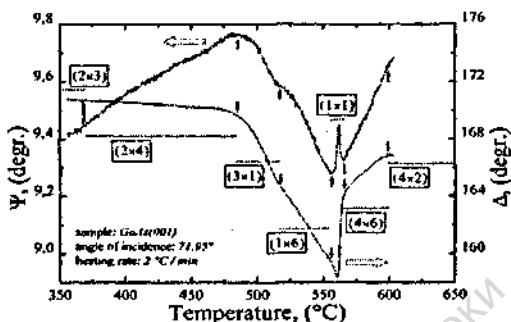


Рис. 1. Эволюция эллипсометрических параметров ψ и Δ при отжиге поверхности GaAs(001) в потоке молекулярного мышьяка с $BEF(As_4) = 1.8 \times 10^{-9}$ Торр. Пунктирные линии на рисунке обозначают определенные методом ДБЭО температурные интервалы существования различных сверхструктурных состояний.

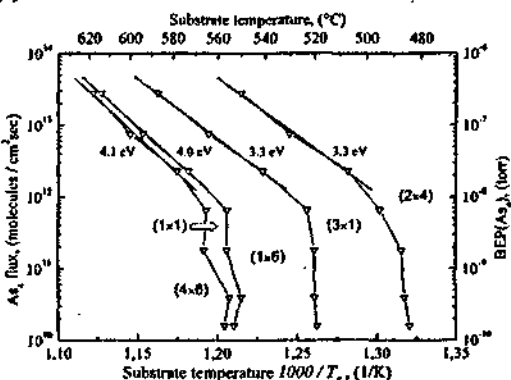


Рис. 2. Фазовая диаграмма переходных сверхструктурных состояний (3x1), (1x6), (1x1) и (4x6) поверхности GaAs(001).

четко фиксируемых сверхструктурных состояний:

$(2 \times 3) \Rightarrow \gamma(2 \times 4) \Rightarrow \beta(2 \times 4) \Rightarrow (3 \times 1) \Rightarrow (1 \times 6) \Rightarrow (1 \times 1) \Rightarrow (4 \times 6) \Rightarrow (4 \times 2)$. Видно, что границы интервалов их существования с хорошей точностью совпадают с моментами резкого изменения производных для температурных зависимостей параметров ψ и Δ (на рисунке эти моменты отмечены стрелочками). Переход между двумя метастабильными реконструкциями (1×6) и (4×6) , характеризуется интенсивным ростом Δ и пикообразным изменением параметра ψ . Согласно ДБЭО-исследованиям, в данном интервале поверхность является разупорядоченной и характеризуется дифракционной картиной с симметрией (1×1) . Таким образом, в интервале температур 555-565°C наблюдается два фазовых перехода $(1 \times 6) \Rightarrow (1 \times 1)$ и $(1 \times 1) \Rightarrow (4 \times 6)$. Или, другими словами, два перехода типа *порядок* \Leftrightarrow *беспорядок* и *беспорядок* \Leftrightarrow *порядок*. Поскольку все остальные наблюдавшиеся на поверхности переходы являлись переходами типа *порядок* \Leftrightarrow *порядок*, можно предположить, что интенсивный рост Δ и пикообразное изменение параметра ψ являются характерными признаками именно перехода типа *порядок* \Leftrightarrow *беспорядок*.

Определение зависимости температур реконструкционных переходов от давления мышьяка над поверхностью позволило построить фазовую диаграмму переходных реконструкций (3×1) , (1×6) , (1×1) и (4×6) , Рис. 2. Из рисунка видно, что в диапазоне давлений от 2.3×10^{-8} до 4×10^{-7} Торр границы между поверхностными состояниями имеют линейный вид. Установлены величины активационных энергий для переходов $(2 \times 4) \Rightarrow (3 \times 1) \Rightarrow (1 \times 6) \Rightarrow (1 \times 1) \Rightarrow (4 \times 6)$ при $VEP(As_4) > 2.3 \times 10^{-8}$ Торр: 3.3, 3.3, 4.0 и 4.1 эВ, соответственно. Значение энергии активации для фазовых переходов $(2 \times 4) \Rightarrow (3 \times 1)$ и $(3 \times 1) \Rightarrow (1 \times 6)$ на ~ 0.8 эВ ниже, чем для переходов $(1 \times 6) \Rightarrow (1 \times 1)$ и $(1 \times 1) \Rightarrow (4 \times 6)$. Этот результат свидетельствует о том, что на разупорядочение поверхности требуется гораздо больше энергии, чем на частичную перестройку.

Результаты, отображающие эволюцию эллипсометрических параметров ψ и Δ в процессе СВВ прогресса GaAs(111)B в парах As_4 с давлением $VEP(As_4) = 4 \times 10^{-8}$ Торр, представлены на Рис. 3. Как и в случае с GaAs(001), изменения оптических свойств поверхности с ростом температуры носят сложный характер, откликаясь на модификацию сверхструктурного состояния приповерхностного слоя.

Количественный анализ данных, полученных во время эллипсометрических измерений, осуществлялся в рамках модели анизотропной пленки, описанной в работах [7,8]. Согласно этой модели можно записать:

$$\frac{\rho^b - \rho^a}{\rho^a} = \frac{2(\psi^b - \psi^a)}{\sin 2\psi^a} + i(\Delta^b - \Delta^a) = \frac{4\pi i \sqrt{\epsilon_2} \cos \theta_2 \epsilon_0 \sin^2 \theta_2}{\lambda(\epsilon_0 - \epsilon_2)(\epsilon_0 \cos^2 \theta_2 - \epsilon_2 \sin^2 \theta_2)} \cdot \delta\Lambda, \quad (1)$$

где $\delta\Lambda = \delta\Lambda_{\text{isotr}} + \delta\Lambda_{\text{anisotr}}$ - функционал оптического отклика поверхности при переходе из состояния "a" в состояние "b", состоящий из изотропной и анизотропной частей:

$$\delta\Lambda_{\text{isotr}} = - \left[\epsilon^b - \epsilon^a + \epsilon_0 \epsilon_2 \left(\frac{1}{\epsilon_x^b} - \frac{1}{\epsilon_x^a} \right) \right] d, \quad (2)$$

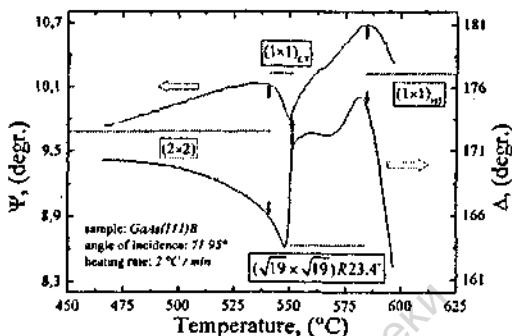


Рис. 3. Эволюция эллипсометрических параметров ψ и Δ при отжиге поверхности GaAs(111)B в потоке мышьяка с $VEP(As_4) = 4 \times 10^{-8}$ Торр. Пунктирные линии на рисунке обозначают определенные методом ДБЭО температурные интервалы существования различных сверхструктурных состояний.

$$\delta\Delta_{\text{анализ}} = \frac{\Delta\epsilon^* - \Delta\epsilon''}{\epsilon_0 \sin^2 \theta_2} \left[\left[\epsilon_{xx} (1 + \cos^2 \theta_2) - 2\epsilon_z \sin^2 \theta_2 \right] \cos 2\alpha + \right. \\ \left. + 2 \frac{\sqrt{\epsilon_0 - \epsilon_z \sin^2 \theta_2}}{\sqrt{\epsilon_z}} \left[\epsilon_z \sin^2 \theta_2 \cdot \csc 2A - \sqrt{\epsilon_0 \cos \theta_2 \sqrt{\epsilon_0 - \epsilon_z \sin^2 \theta_2}} \cdot \text{ctg} 2A \right] \sin 2\alpha \right] d \quad (3)$$

В этих выражениях $\bar{\epsilon} = (\epsilon_{yy} + \epsilon_{xx})/2$ и $\Delta\epsilon = (\epsilon_{yy} - \epsilon_{xx})/2$; ϵ_{xx} , ϵ_{yy} и ϵ_{zz} – компоненты тензора диэлектрической функции ϵ_i реконструированного слоя поверхности; ϵ_0 и ϵ_z – изотропные диэлектрические функции объемного кристалла и внешней среды (для вакуума $\epsilon_z = 1$), соответственно; A – положение анализатора; ρ_0 , ψ_0 и Δ_0 – эллипсометрические параметры, характеризующие отражение света на границе *внешняя среда/подложка*. Выражение (1) получено варьированием логарифма левой и правой частей основного уравнения эллипсометрии:

$$\rho = R_p/R_s = \text{tg} \psi \cdot e^{i\Delta} \quad (4)$$

в приближении точкой пленки ($d \ll \lambda$), где R_p и R_s – коэффициенты отражения света, поляризованного параллельно (P) и перпендикулярно (S) плоскости падения; значения ψ и Δ характеризуют амплитуду и фазу комплексного отношения R_p/R_s .

Анализ вклада $\delta\Delta_{\text{анализ}}$ в величину полного оптического отклика для поверхности GaAs(001) при переходе $(2 \times 3) \Rightarrow \dots \Rightarrow (4 \times 2)$ показал, что он не превышает 5% от $\delta\Delta$. Для поверхности GaAs(111)В $\delta\Delta_{\text{анализ}}$ тождественно равен нулю. Таким образом, с хорошей точностью выполняется равенство $\delta\Delta \approx \delta\Delta_{\text{пов}}$.

Избрав в качестве "b" состояние при наивысшей температуре отжига "hot", а в качестве "a" текущее состояние поверхности "now", можно для поверхностей GaAs(001) и (111)В записать:

$$\delta\Delta_{\text{GaAs(001)}}^{\text{now}} = \Lambda_{\text{GaAs(001)}}^{\text{hot}} - \Lambda_{\text{GaAs(001)}}^{\text{now}} \quad \text{и} \\ \delta\Delta_{\text{GaAs(111)B}}^{\text{now}} = \Lambda_{\text{GaAs(111)B}}^{\text{hot}} - \Lambda_{\text{GaAs(111)B}}^{\text{now}} \quad (5)$$

Функционалы $\delta\Delta_{\text{GaAs(001)}}$ и $\delta\Delta_{\text{GaAs(111)B}}$, в отличие от эллипсометрических параметров ψ и Δ , более явно иллюстрируют изменения диэлектрической функции в процессе реконструкционных переходов, Рис. 4. Необходимо отметить, что изменение толщины реконструированного слоя d при изменении сверхструктурного состояния также вносит свой вклад в эволюцию $\delta\Delta$. Таким образом, более корректно рассматривать поведение $\bar{\epsilon}d$ и

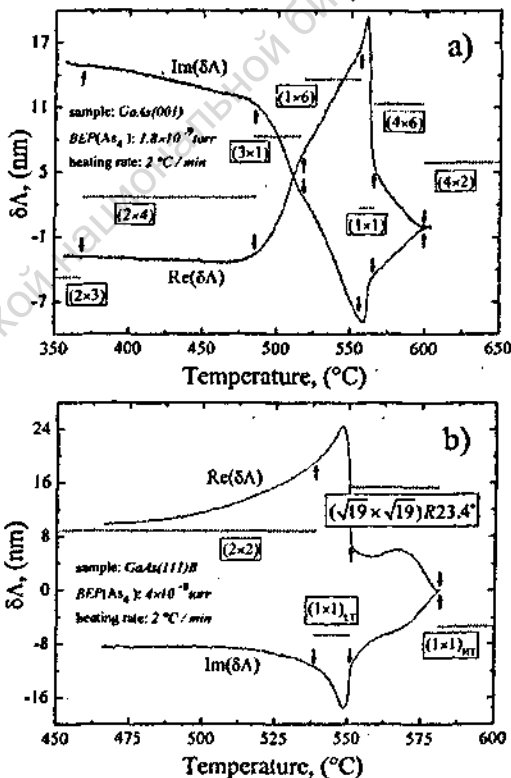


Рис. 4. Эволюция а) $\delta\Delta_{\text{GaAs(001)}}$ и б) $\delta\Delta_{\text{GaAs(111)B}}$ в процессе вакуумного отжига GaAs.

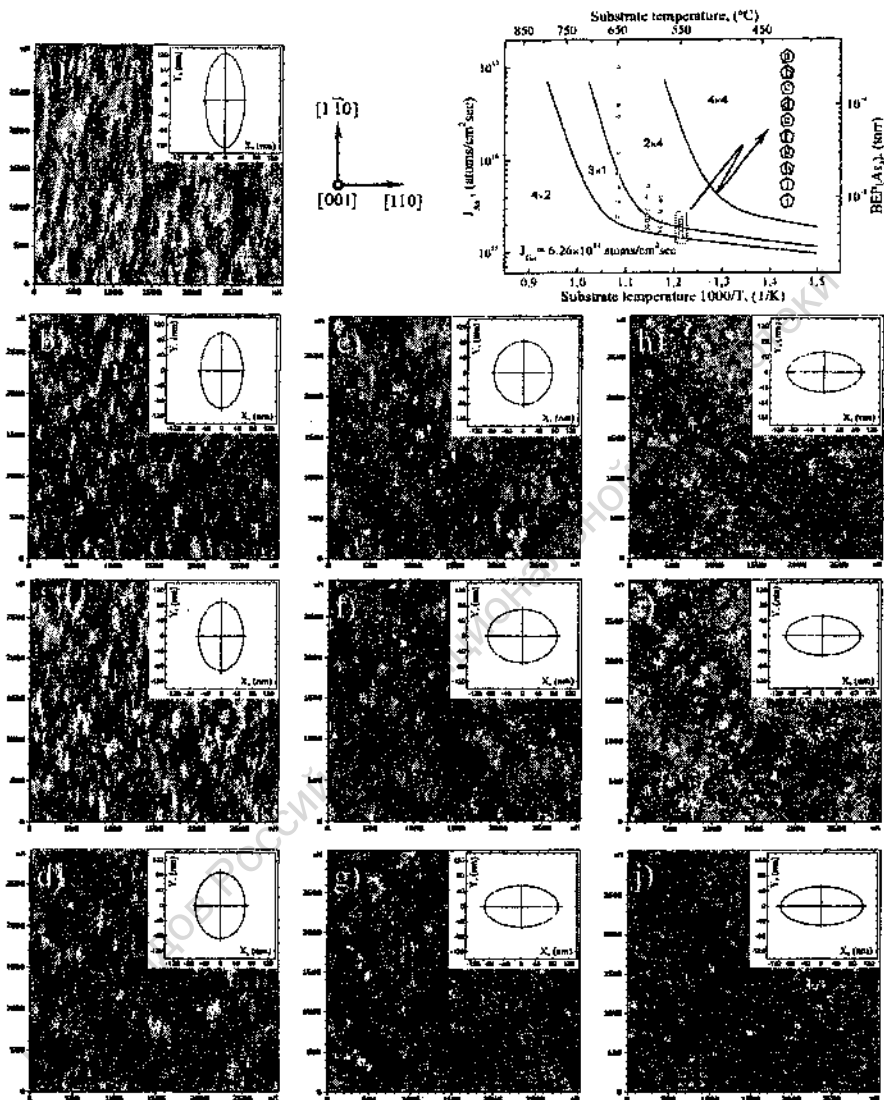


Рис. 5 Эволюция рельефа ростовой поверхности GaAs(001) при изотермическом ($T_s = 550^\circ\text{C}$) изменении $VEP(\text{As}_4)$ (в Torr): а) 5.9×10^{-6} ; б) 5.6×10^{-6} ; в) 5.4×10^{-6} ; д) 5.1×10^{-6} ; е) 4.9×10^{-6} ; ф) 4.6×10^{-6} ; г) 4.4×10^{-6} ; б) 4.13×10^{-6} ; и) 3.9×10^{-6} ; ж) 3.6×10^{-6} . Вставки к рисункам иллюстрируют характер изменения анизотропии рельефа с уменьшением $VEP(\text{As}_4)$.

d/ε_{zz} , нежели отдельных величин $\tilde{\varepsilon}$, ε_{zz} и d , см. выражение (2).

Как уже отмечалось, анизотропная часть вклада $\Delta\lambda_{\text{анисотр.}}$ оптического отклика пренебрежимо мала по сравнению с $\Delta\lambda$, а значит мала и $\Delta\varepsilon d$. Выражение $(\tilde{\varepsilon}_{\text{анисотр.}} - \tilde{\varepsilon}_{\text{изотр.}})d$ по величине одного порядка с $\Delta\varepsilon d$, следовательно, им также можно пренебречь. Поскольку температурные зависимости $\varepsilon_{zz(\text{анисотр.})}$ и ε_0 являются функциями плавными и без особенностей, то можно заключить, что резкие изменения в эволюции $\Delta\lambda$ отражают особенности поведения лишь $d/\varepsilon_{zz(\text{анисотр.})}$.

Из сказанного следует, что эволюция именно ортогональной компоненты ε_{zz} , а не латеральных компонент ε_{xx} и ε_{yy} , вызывает максимальный оптический отклик в процессе сверхструктурных переходов. Это связано с образованием новых химических связей, не лежащих в плоскости образца. Подобные связи характерны для структур элементарных ячеек переходных реконструкционных состояний.

Чувствительность оптических методов, регистрирующих в процессе сверхструктурных переходов изменения анизотропных свойств поверхности (разностная спектроскопия отражения), на порядок меньше, чем чувствительность методов, имеющих возможность регистрировать также и изменения изотропных свойств (эллипсометрия, спектроскопия поверхностного фотопоглощения).

В четвертой главе приведены результаты исследований влияния реконструкционного состояния поверхности GaAs(001) на характер её морфологических изменений в ходе эпитаксии и вакуумного отжига.

Изучение влияния термодинамических условий на морфологию ростовой поверхности GaAs(001) осуществлялось методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и ДБЭО. Особое внимание в исследованиях уделялось выявлению корреляции между реконструкционным состоянием ростовой поверхности и характером наблюдаемых на ней морфологических изменений. В ходе эксперимента анализировалась эволюция параметров рельефа, наблюдающаяся при изотермическом изменении величины $J_{\text{III}}/J_{\text{V}}$ (изменении J_{III} , при фиксированном $J_{\text{V}} = 6.26 \times 10^{14}$ атомов / см² сек).

На Рис. 5 представлены результаты АСМ исследований морфологии ростовой поверхности эпитаксиального слоя GaAs(001), выращенного методом МЛЭ в условиях сильной неоднородности плотности потока As по поверхности подложки. Эффект неоднородности достигался путем ориентации нормали образца к оси потока под углом $\sim 75^\circ$. Подобная схема эксперимента эквивалентна изотермическому ($T_s = 550^\circ\text{C}$) изменению ВЕР(As_2) от 5.9×10^{-6} до 3.6×10^{-6} Торр при смещении от одного края образца к другому. Вставка в центре рисунка иллюстрирует положение термодинамических параметров эксперимента на динамической фазовой диаграмме поверхности GaAs(001). Согласно этой вставке, образцы а), б), с), d) и е) Рис. 5 были выращены в условиях существования на ростовой поверхности реконструкции (2×4), а образцы г), б) и и) Рис. 5 – в условиях реализации состояния (3×1). Образцы ж) и з) Рис. 5 характеризует собой условия роста на границах (2×4)/(3×1) и (3×1)/(4×2), соответственно. Визуальный анализ данных, представленных на Рис. 5, позволяет четко фиксировать факт смены направления анизотропии рельефа ростовой

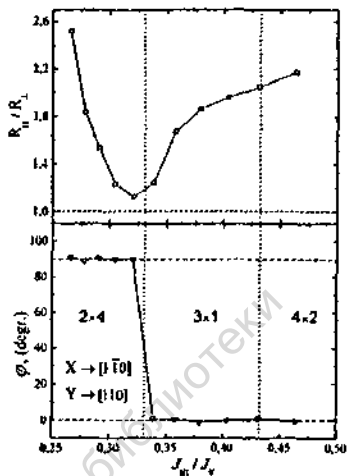


Рис. 6 Зависимость параметров основного пика автокорреляционной функции от величины $J_{\text{III}}/J_{\text{V}}$.

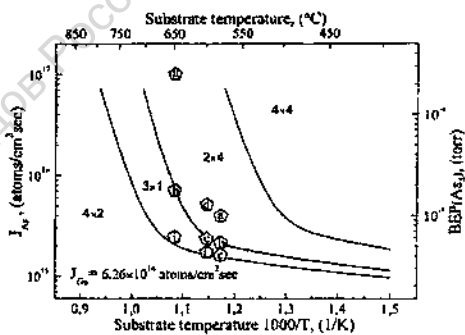
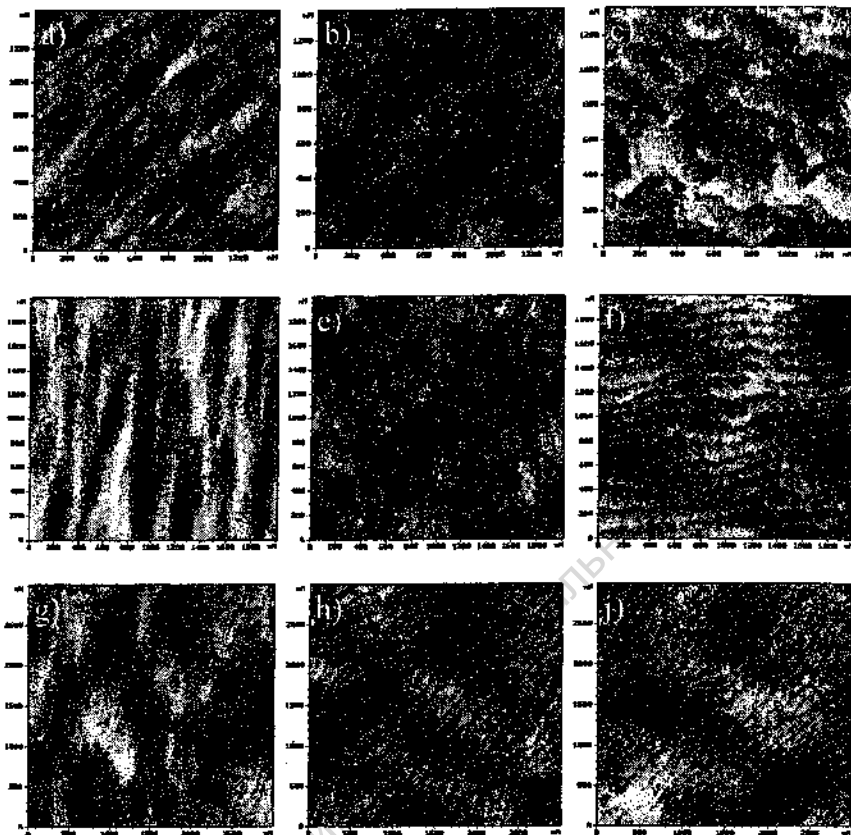


Рис. 7. Эволюция рельефа ростовой поверхности GaAs(001) при изотермическом изменении $BEP(As_4)$.
 $T_S = 580^\circ\text{C}$: а) 1×10^{-5} ; б) 5.4×10^{-6} ; в) 4.1×10^{-6} Torr.
 $T_S = 600^\circ\text{C}$: д) 1.3×10^{-5} ; е) 6.3×10^{-6} ; ф) 4.4×10^{-6} Torr.
 $T_S = 650^\circ\text{C}$: г) 2.5×10^{-4} ; з) 1.8×10^{-5} ; и) 6.1×10^{-6} Torr.

поверхности при переходе границы $(2 \times 4) / (3 \times 1)$. На образцах a), b), c), d) и e) Рис. 5 выделенным направлением является $[1\bar{1}0]$ – направление As-димерных рядов в доменах с реконструкцией (2×4) . На образцах g), h) и i) Рис. 5 это направление меняется на $[110]$ – направление Ga-димерных рядов в доменах с реконструкцией (4×2) .

Результаты визуального наблюдения совпадают с итогами численной обработки АСМ данных. О характере латеральных свойств рельефа (размерах и степени повторяемости основных морфологических элементов поверхности в выбранном направлении, существовании выделенного направления и его ориентации относительно основных кристаллографических осей, величины анизотропии) можно судить по параметрам сечения основного пика автокорреляционной функции исследуемой поверхности. На Рис. 6 приведены зависимости параметров эллипса сечения от величины J_{11} / J_{22} для образцов a) + j) Рис. 5.

Видно, что между параметрами рельефа и сверхструктурным состоянием поверхности наблюдается легко прослеживаемая корреляция. Смена выделенного направления происходит на границе между реконструкционными состояниями (2×4) и (3×1) . Образец f) Рис. 5, выращенный на этой границе, имеет изотропный рельеф.

На Рис. 7 a) + c), d) + f) и g) + j) представлена эволюция рельефа ростовой поверхности GaAs(001) в процессе изотермического изменения $BER(As_4)$ при температурах 580, 600 и 650°C, соответственно. Из рисунка видно, что с повышением температуры роста тенденция формирования на поверхности GaAs(001)- (2×4) выделенного направления $[1\bar{1}0]$ сохраняется (наблюдаются сильно вытянутые в направлении $[1\bar{1}0]$ 3D объекты типа *wedding-cake*). Переход через границу $(2 \times 4) / (3 \times 1)$ также остается условием смены характера развития морфологии – от 3D к 2D. В то же время, на GaAs(001)- (3×1) 2D рельеф заметно видоизменяется. Наблюдается процесс выравнивания краев ступеней и формирования комплекса эквидистантно расположенных монослойных (высотой 2.8 Å) террас, ширина которых задается отклонением подложки. Как следствие, помимо реконструкционного состояния поверхности еще одним важным фактором, влияющим на направление анизотропии рельефа, становится направление отклонения.

При температуре выше 650°C влияние реконструкции на формирование морфологических свойств ростовой поверхности становится слабо выраженным.

ДБЭО исследования влияния термодинамических условий на морфологию ростовой поверхности GaAs(001) осуществлялись непосредственно в процессе процедуры МЛЭ (*real time*). В ходе процедуры роста регистрировалась эволюция интенсивности зеркального рефлекса картины ДБЭО. Измерения осуществлялись в

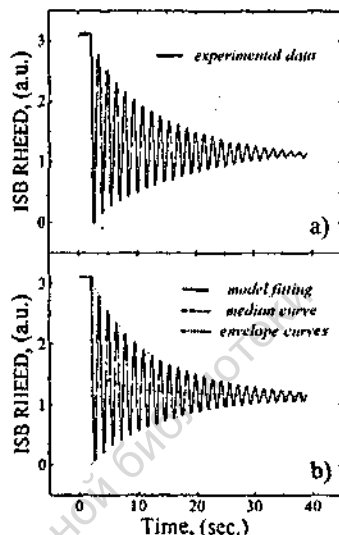


Рис. 8. Обработка экспериментальных данных, полученных методом ИЗР ДБЭО.

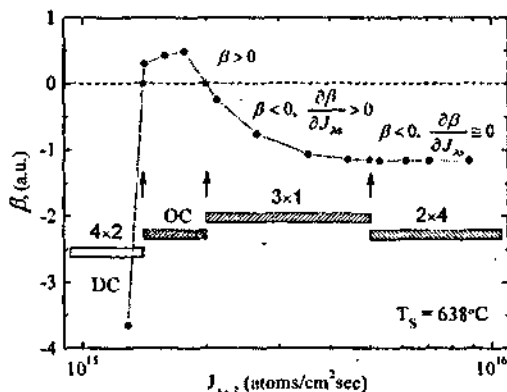


Рис. 9. Эволюция параметра β в процессе изотермического ($T_s = 638^\circ\text{C}$) изменения $BER(As_4)$.

азимуте [110], угол падения пучка электронов на поверхность составлял $\theta = 1.36^\circ$.

Анализ ДБЭО данных осуществлялся в рамках разработанной нами модели, основанной на представлениях [9,10], связывающих природу ДБЭО-осцилляций с изменением реконструкционного состояния ростовой поверхности. На Рис. 8 а) и б) представлен результат фитинга экспериментальных ИЗР ДБЭО данных с использованием разработанной модельной функции. Эта процедура позволяет получить информацию о форме средней линии ИЗР ДБЭО-осцилляций. Угол наклона ϕ средней линии ИЗР ДБЭО-осцилляций характеризует скорость протекающих на ростовой поверхности морфологических изменений, $\beta = \text{tg}(\phi)$.

Кроме того, он характеризует и их направление. Положительные значения β соответствуют выглаживанию поверхности, а отрицательные – ее деградации.

Эволюция параметра β в процессе изотермического изменения $ВЕР(As_x)$ можно рассмотреть на примере серии ИЗР ДБЭО измерений, выполненных при 638°C , Рис. 9. Как видно из рисунка, в процессе роста на поверхности GaAs(001)-(2 \times 4) для параметра β выполняются соотношения $\beta < 0$

и $\frac{\partial\beta}{\partial J_{As}} \approx 0$. Это свидетельствует об ухудшении морфологии в ходе эпитаксии. При пересечении

границы (2 \times 4)/(3 \times 1) значения параметра β начинают монотонно возрастать с уменьшением $ВЕР(As_x)$, т.е. $\frac{\partial\beta}{\partial J_{As}} > 0$. Таким образом, при эпитаксии на поверхности GaAs(001)-(3 \times 1) могут

реализоваться три различных ситуации, когда $\beta^{(0)} < 0$, $\beta^{(0)} = 0$ и, наконец, $\beta^{(0)} > 0$. Очевидно, что в первом случае морфология ростовой поверхности будет ухудшаться. Необходимо лишь добавить, что это ухудшение будет не столь интенсивным, как для поверхности GaAs(001)-(2 \times 4). Если $\beta = 0$, то морфология поверхности остается неизменной. Условия роста, когда морфология поверхности в процессе эпитаксии улучшается, соответствуют случаю $\beta^{(0)} > 0$. На ФД GaAs(001) была получена область условий МЛЭ роста слоев со структурно-совершенной поверхностью, Рис. 10. Эпитаксия за границей фазового перехода (3 \times 1) \rightarrow (4 \times 2) сопровождается резким падением значения параметра β и ухудшением морфологии ростовой поверхности.

О характере процессов, происходящих на ростовой поверхности GaAs(001)-(2 \times 4), можно судить по поведению параметра $\beta^{(2\times 4)}$ в зависимости от значений температуры T_s , Рис. 11. Из рисунка видно, что при развитии морфологии на ростовой поверхности GaAs(001)-(2 \times 4) доминирует процесс с активационной энергией $E = 1.1 \pm 0.3$ эВ. Энергия E по величине совпадает с измеренной Y. Ren *et al.* [11] активационной энергией формирования больших островков из маленьких кластеров 1.15 ± 0.20 эВ. Как указывают авторы, основным процессом при этом является поверхностная диффузия галлия.

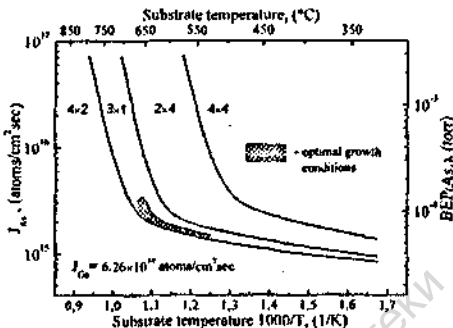


Рис. 10 Оптимальные условия роста структурно совершенной поверхности GaAs(001).

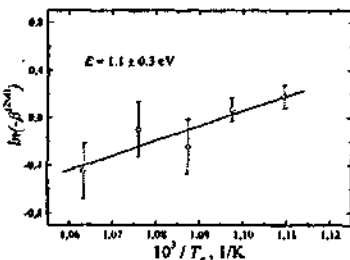


Рис. 11 Температурная зависимость параметра $\beta^{(2\times 4)}$.

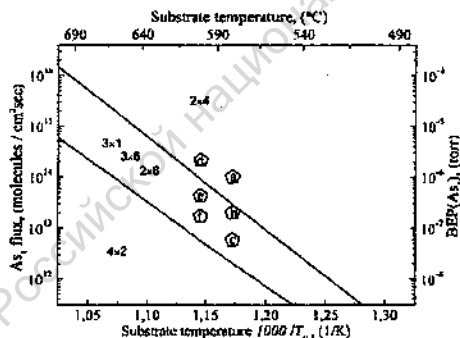
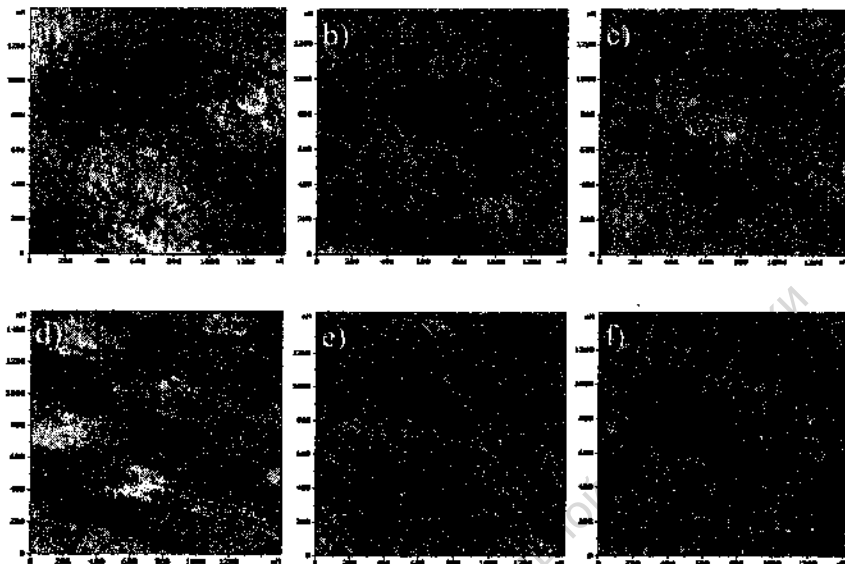


Рис. 12. Эволюция рельефа грани GaAs(001) при изотермическом изменении давления паров мышьяка $BEP(As_4)$ (в Торр) над отжигаемой поверхностью
 $T_s = 580^\circ C$: а) 1.0×10^{-6} ; б) 2.0×10^{-7} ; в) 6.0×10^{-8} .
 $T_s = 600^\circ C$: д) 2.2×10^{-6} ; е) 4.3×10^{-7} ; ф) 1.7×10^{-7} .

При изучении влияния сверхструктурного состояния отжигаемой поверхности на характер протекающих на ней морфологических изменений, использовались гомоэпитаксиальные слои GaAs(001), выращенные при температуре $T_s = 580^\circ C$ в условиях существования реконструкции $\alpha(2 \times 4)$. Сверхструктурное состояние поверхности задавалось интенсивностью падающего на нее потока молекул As_4 и контролировалось методом ДБЭО. Время отжига составляло 15 минут. Для "замораживания" морфологии отожженной поверхности образцы подвергались быстрому охлаждению в потоке мышьяка. Исследования параметров рельефа осуществлялись *ex situ* методом АСМ.

На Рис. 12 а) + с) и д) + ф) представлены результаты отжига поверхности GaAs(001) в условиях существования реконструкций (2×4) и (3×1) для температур 580°C и 600°C, соответственно. Вставка в нижней части рисунка демонстрирует положение термодинамических параметров эксперимента на статической фазовой диаграмме поверхности GaAs(001). Согласно вставке, образцы а) и д) Рис. 12 отжигались в условиях существования реконструкции (2×4), с) и ф) Рис. 12 – (3×1), б) и е) Рис. 12 – вблизи границы (2×4)/(3×1). Сопоставляя АСМ данные для образцов а) + с) и д) + ф) Рис. 12, можно легко убедиться, что структурное совершенство поверхности скачкообразно улучшается при переходе границы (2×4)/(3×1).

Основные результаты и выводы диссертации:

1. Установлено, что метод ОАЭ позволяет регистрировать начало сверхструктурных переходов на поверхности GaAs(001) с прецизионной точностью.
2. Показано, что в процессе сверхструктурных переходов эволюция ортогональной компоненты ϵ_{xx} тензора диэлектрической функции реконструированного слоя сопровождается оптическим откликом δA , превышающим аналогичный отклик для латеральных компонент ϵ_{yy} и ϵ_{zz} , более чем на порядок. Обнаружено, что наиболее интенсивным оптическим откликом характеризуется появление на поверхности переходных As-обедненных реконструкционных состояний.
3. Впервые построена фазовая диаграмма поверхности GaAs(001) для области существования переходных сверхструктурных состояний (3×1), (1×6), (1×1) и (4×6). Установлены величины активационных энергий для переходов (2×4) \rightleftharpoons (3×1) \rightleftharpoons (1×6) \rightleftharpoons (1×1) \rightleftharpoons (4×6) при $VEP(As_d) > 2.3 \times 10^{-3}$ Торр; 3.3, 3.3, 4.0 и 4.1 эВ, соответственно.
4. Установлена связь сверхструктурного состояния ростовой поверхности GaAs(001) с характером морфологических изменений при МПЭ в диапазоне температур 550+650°C. При температуре выше 650°C влияние реконструкции на формирование морфологических свойств ростовой поверхности слабо выражено.
5. При температуре роста ниже 550°C поверхность GaAs(001) характеризуется ярко выраженной анизотропией рельефа. Показано, что переход от реконструкции (2×4) к (3×1) на ростовой поверхности сопровождается изменением ориентации выделенного направления рельефа на 90°. При эпитаксии на границе этого перехода рельеф поверхности изотропен.
6. Определена область условий роста GaAs(001), эпитаксии при которых позволяет получать слой, характеризующийся высокой степенью структурного совершенства поверхности.
7. Установлено влияние сверхструктурного состояния поверхности GaAs(001) на характер морфологических изменений, происходящих на ней в процессе вакуумного отжига. Показано, что эффективность процедуры отжига с целью выглаживания поверхности скачкообразно повышается при переходе границы между реконструкциями (2×4) и (3×1).

По теме диссертации опубликованы следующие работы

- A1. Васев А.В., Чикичев С.И., Швец В.А. Температурная зависимость диэлектрической функции и параметров критических точек в зоне Бриллюэна $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ // Автометрия - 1999. - Т. 5. - стр. 25-33.
- A2. Vasev A.V., Chikichev S.I. In-situ ellipsometric monitoring of reconstruction transitions during vacuum heating of chemically prepared GaAs surface: Thesis of Sixth International Workshop on Expert Evaluation & Control of Compound Semiconductor Materials & Technologies, (EXMATEC 2002) (26-29 May, 2002, Budapest, Hungary) - P. 45.
- A3. Васев А.В., Чикичев С.И. Исследование конденсации аморфного мышьяка на атомарно-чистой поверхности GaAs(001) (4×2)/(8×2) методом in-situ эллисометрии: Труды VIII Российской Конференции "Арсенид Галлия и Полупроводниковые Соединения Группы III-V" (GaAs - 2002) (1-4 октября, 2002, Томск, Россия) - стр. 196-198.

- A4. Vasev A.V., Chikichev S.I. Condensation and sublimation of thin amorphous arsenic films studied by ellipsometry: Proceedings of Fifth International Conference Single Crystal Growth and Heat & Mass Transfer (ICSC-03) (22-26 September, 2003, Obninsk, Russia) - P. 285-291.
- A5. Васев А.В., Чикичев С.И. Пепренелевская аномалия в эллипсометрии поверхности GaAs(001): Тезисы VI Российской Конференции по Физике Полупроводников "ПОЛУПРОВОДНИКИ-2003" (27-31 октября, 2003, Санкт-Петербург) - стр. 273-274.
- A6. Vasev A.V., Chikichev S.I. Ellipsometric detection of transitional surface structures on decapped GaAs(001) // Key Eng. Mater. - 2005. - V. 295-296. - P. 45-50.
- A7. Vasev A.V., Chikichev S.I., Semyagin B.R. Ellipsometric detection of transitional surface structures on decapped GaAs // Surf. Sci. - 2005. - V. 588. - P. 149-159.
- A8. Васев А.В., Чикичев С.И. In-situ эллипсометрия поверхности GaAs(111)В в процессе сверхструктурных переходов: Тезисы VII Российской Конференции по Физике Полупроводников "ПОЛУПРОВОДНИКИ - 2005" (18-23 сентября, 2005, Москва, Россия) - стр. 154.
- A9. Васев А.В., Путьято М.А., Преображенский В.В. Исследование структуры и морфологии поверхности GaAs(001) при вакуумном отжиге методами эллипсометрии и дифракции быстрых электронов: Труды IX Российской Конференции "Арсенид Галлия и Полупроводниковые Соединения Группы III-V" (GaAs - 2006) (3-5 октября, 2006, Томск, Россия) - стр. 223-226.
- A10. Васев А.В. Исследование взаимодействия молекулярного водорода с поверхностью GaAs(001) методом эллипсометрии: Труды IX Российской Конференции "Арсенид Галлия и Полупроводниковые Соединения Группы III-V" (GaAs - 2006) (3-5 октября, 2006, Томск, Россия) - стр. 185-188.
- A11. Васев А.В., Путьято М.А., Семягин Б.Р., Преображенский В.В. Роль сверхструктурных фазовых переходов в формировании морфологии поверхности GaAs(001): Тезисы VIII Российской Конференции по Физике Полупроводников "ПОЛУПРОВОДНИКИ - 2007" (30 сентября - 5 октября, 2007, Екатеринбург, Россия) - стр. 100.
- A12. Васев А.В., Путьято М.А., Семягин Б.Р., Преображенский В.В. Кинетика сверхструктурного перехода $(2 \times 4) \Rightarrow (3 \times 1(6))$ на поверхности GaAs(001): Тезисы VIII Российской Конференции по Физике Полупроводников "ПОЛУПРОВОДНИКИ - 2007" (30 сентября - 5 октября, 2007, Екатеринбург, Россия) - стр. 82.
- A13. Путьято М.А., Семягин Б.Р., Васев А.В., Преображенский В.В. Встраивание мышьяка из потоков молекул As₂ и As₄ при МЛЭ GaAs на поверхности (001) с различными сверхструктурными состояниями: Тезисы VIII Российской Конференции по Физике Полупроводников "ПОЛУПРОВОДНИКИ - 2007" (30 сентября - 5 октября, 2007, Екатеринбург, Россия) - стр. 115.
- A14. Vasev A.V. Ellipsometric detection of GaAs(001) surface hydrogenation in H₂ atmosphere // Surf. Sci. - 2008. - V. 602. - P. 1933-1937.
- A15. Путьято М.А., Семягин Б.Р., Васев А.В., Преображенский В.В. Влияние реконструкционного состояния поверхности на процессы встраивания мышьяка при молекулярно-лучевой эпитаксии арсенида галлия // Вестник ИГУ. Серия Физика - 2008. - Т. 3. - стр. 81-87.
- A16. Васев А.В., Путьято М.А., Семягин Б.Р., Преображенский В.В. Кинетика реконструкционного перехода $(2 \times 4) \Rightarrow (3 \times 1(6))$ на поверхности арсенида галлия // Вестник ИГУ. Серия Физика - 2008. - Т. 3. - стр. 88-94.
- A17. Васев А.В., Путьято М.А., Семягин Б.Р., Селезнев В.А., Преображенский В.В. Роль реконструкционных состояний в формировании рельефа поверхности арсенида галлия при молекулярно-лучевой эпитаксии и вакуумном отжиге // Вестник ИГУ. Серия Физика - 2008. - Т. 3. - стр. 9-19.
- A18. Путьято М.А., Семягин Б.Р., Васев А.В., Преображенский В.В. Встраивание мышьяка в кристалл GaAs при молекулярно-лучевой эпитаксии // Изв. Вузов. Физика - 2008. - Т. 9/3. - стр. 23-28.
- A19. Васев А.В., Путьято М.А., Семягин Б.Р., Преображенский В.В. Исследование сверхструктурного перехода $(2 \times 4) \Rightarrow (3 \times 1(6))$ на поверхности GaAs(001) методом ДБЭО // Изв. Вузов. Физика - 2008. - Т. 9/3. - стр. 34-39.

- A20. Васев А.В., Пулято М.А., Семягин Б.Р., Селезнев В.А., Преображенский В.В. Влияние структурного состояния поверхности на формирование рельефа и морфологию слоев GaAs(001) при молекулярно-лучевой эпитаксии и вакуумном отжиге // Изв. Вузов. Физика - 2008. - Т. 9. - стр. 5-13.

Цитируемая литература

1. GaAs FET principles and technology, Edited by DiIorenzo J.V., Khandelwal D.D. - Dedham: Artech House, 1982. - 787 P.
2. Shur M.S. GaAs devices and circuits - 1 edition - New York: Plenum Press, 1986, 684 P.
3. The technology and physics of molecular beam epitaxy, Edited by Parker E.H.C. - New York: Plenum Press, 1985. - 706 P.
4. Molecular beam epitaxy and heterostructures, Edited by Chang L.L., Ploog K.H. - Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1985. - 719 P.
5. Преображенский В.В. Роль структуры поверхности в формировании слоев GaAs и AlGaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии. - Диссертация *** канд. физ.-мат. наук. - Новосибирск, 2000, - 229 С.
6. Preobrazhenskii V.V., Putyato M.A., Semyagin B.R. Control of parameters during GaAs molecular-beam epitaxy at low growth temperature // Semiconductors - 2002. - V. 36. - P. 837-840.
7. Pfingerl K., Aspnes D.E., Kamiya I. Comparison of reflectance difference spectroscopy and surface photoabsorption used for the investigation of anisotropic surfaces // Surf. Sci. - 1993. - V. 287-288. - P. 686-692.
8. Jungk G., Jahne E. Optical properties of film-substrate systems with an anisotropic, spatially varying dielectric function of the surface layer // Thin Solid Films - 1999. - V. 348. - P. 279-284.
9. Sakamoto T. RHEED oscillations in MBE and their applications to precisely controlled crystal growth - Physics, fabrication and applications of multilayered structures. Edited by: Dhez P., Weisbuch C. - New York: Plenum Publishing Corporation, 1988, P. 93-110.
10. Dobson P.J., Joyce B.A., Neave J.H., Zhang J. Current understanding and applications of the RHEED intensity oscillation technique // J. Crystal Growth - 1987. - V. 81. - P. 1-8.
11. Ren Y., Zinke-Allmang M., Feldman L.C., Van Saarloos W. Cluster-size distributions in different temperature regimes: the systems Ga on GaAs(001) // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. - 1992. - V. 237. - P. 255-260.

Из фондов Российской национальной библиотеки

Васев Андрей Васильевич

**Реконструкции поверхности GaAs(001) и их влияние на морфологию слоёв
при МЛЭ в вакуумном отжиге**

Авторсф. дисс. на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.
Подписано в печать 10.11.2009. Заказ № 106. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии Института катализа СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 5

№ - 2527

20104
2527

Из фондов Российской национальной библиотеки