

На правах рукописи

Работа выполнена в Институте физики микроструктур
Российской Академии наук

Данильцев Вячеслав Михайлович

**МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКАЯ ГАЗОФАЗНАЯ
ЭПИТАКСИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ
СОЕДИНЕНИЙ Al – In – Ga - As ДЛЯ ПРИБОРОВ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника,
приборы на квантовых эффектах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2006

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
В.И. Шашкин

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Л.К. Орлов

кандидат физико-математических наук,
Б.Н. Звонков

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие НИИ «Полнос»
им. М.Ф. Стельмаха, г. Москва

Защита состоится 21 декабря 2006 года в 14 часов на заседании
диссертационного совета Д 002.098.01 при Институте физики микроструктур
РАН 603950, Н. Новгород, ГСП-105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики
микроструктур РАН.

Автореферат разослан 20 ноября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

Гайкович К.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Известно, что среди материалов СВЧ и оптоэлектроники лидирующее положение занимают арсенид галлия и другие полупроводниковые соединения A^3B^5 . Основное преимущество GaAs – более высокие подвижность и насыщенная скорость электронов, чем в Si. Это определяет быстродействие, а следовательно, и частотные характеристики полупроводниковых приборов. Поэтому, полупроводниковые структуры на основе арсенида галлия являются основными материалами для создания твердотельных приборов электроники миллиметрового диапазона длин волн.

Получение эпитаксиальных структур для микроволновых приборов является сложным технологическим процессом. Эпитаксиальные приборные структуры должны иметь высокое кристаллическое совершенство и обладать хорошими электрофизическими свойствами. Как правило, это многослойные структуры различного состава и легирования. Толщина отдельных слоев может составлять от нескольких нанометров до нескольких микрон. Состав и уровень легирования слоев должны быть точно выдержаны, граница раздела должна быть резкой и планарной. Большинство структур может быть изготовлено методом молекулярно пучковой эпитаксии (МПЭ) в сверхвысоком вакууме [1]. К недостаткам относится сложность, дороговизна и относительно низкая производительность. С МПЭ конкурирует метод металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ). В МОГФЭ процессе получены все полупроводниковые соединения группы A^3B^5 . При атмосферном давлении в реакторе МОГФЭ получены слои GaAs с подвижностью $\mu_{(50K)} \sim 200000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ [2], в реакторе пониженного давления с $\mu_{(38K)} \sim 335000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ [3]. Использование реакторов пониженного давления с быстродействующими клапанами позволяет выращивать гетероструктуры с резкими интерфейсами. В обоих методах МПЭ и МОГФЭ продемонстрирована возможность зарастивания металлических решеток в матрице полупроводника. Относительная простота и высокая производительность являются неоспоримыми достоинствами метода МОГФЭ.

В настоящее время во всем мире проводятся исследования по созданию твердотельных систем для генерации и преобразования излучения в суб- и терагерцовой области частот ($\sim 1 \text{ ТГц}$) [4], а диод с барьером Шоттки является одним из основных нелинейных элементов, используемых для приёма и преобразования микроволнового излучения. В диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых длин волн в неохлаждаемых приёмниках у него практически нет конкурентов [5]. Изготовление структур для диодов с барьером Шоттки, разработка конструкций, изготовление и исследова-

ние свойств смесительных, умножительных и детекторных диодов является важной и актуальной задачей современной высокочастотной электроники.

Перспективной задачей метода МОГФЭ является разработка методов осаждения металлических пленок непосредственно в реакторе эпитаксиальной установки в едином технологическом процессе эпитаксиальный рост - осаждение металла. В этом случае можно свести к минимуму внешние загрязнения и окисление поверхности полупроводника и получить совершенные контактные слои. Другой важной задачей является контролируемое изменение высоты барьера Шоттки и создание невплавных омических контактов [6,7]. Кроме того, возможность формирования металлических объектов нанометровых размеров с последующим их зарастиванием в полупроводниковую матрицу может привести к созданию искусственного материала с необычными свойствами [1]. Решение перечисленных задач в едином ростовом цикле является интересной и перспективной задачей для метода МОГФЭ.

Цель работы

Основной целью диссертационной работы являлось изучение физических закономерностей формирования: резких профилей легирования и состава в гетероструктурах на основе соединений Al – In – Ga - As и тонких металлических пленок алюминия в реакторе МОГФЭ. Прикладная цель работы состояла в изготовлении гетероструктур для приборов миллиметрового диапазона длин волн.

Научная новизна и практическая значимость работы

1. Продемонстрирована возможность получения методом МОГФЭ атомарно резких профилей распределения примеси при δ -легировании кремнием слоев GaAs. Установлено, что размытие в распределении примеси обусловлено только процессами диффузии в твердой фазе за время осаждения верхнего слоя GaAs.
2. В низкотемпературном процессе МОГФЭ с использованием триметиламиноалана и диметилэтиламиноалана в качестве источников алюминия, продемонстрирована возможность получения пленок металлического алюминия. Установлено, что слои алюминия обладают удельным сопротивлением 6-8 мкОм·см, что близко к значению удельного сопротивления для объемных образцов металлического алюминия.
3. С использованием техники δ -легирования и осаждения слоя металлического алюминия в реакторе МОГФЭ показана возможность создания невплавного омического контакта к n – GaAs с контактным сопротивлением

$\rho_c \leq 10^{-5}$ Ом·см² и прецизионного управления высотой барьера Шоттки Al/GaAs в пределах $0,2 \div 0,7$ эВ.

4. Показана возможность создания трёхмерной искусственной среды, представляющей собой монокристаллический GaAs с внедренными наноструктурами Al.

5. Экспериментально показано, что снижение температуры роста и использование подложек GaAs(100) с малым углом разориентации ($<0,3^\circ$), приводит к увеличению критической толщины упругонапряженных эпитаксиальных слоев InGaAs на подложках арсенида галлия.

Практическая значимость работы состоит в разработке методик МОГФЭ гетероструктур полупроводниковых соединений A^3B^5 и осаждения металла "in situ" для создания селективно легированных гетероструктур металл - полупроводник. На их основе изготовлены: смесительные, детекторные диоды с барьером Шоттки, и умножительные матрицы для применения в миллиметровом диапазоне длин волн. Характеристики приборов превосходят или соответствуют лучшим из известных аналогов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанные методики очистки и высокотемпературного отжига графитового подложкодержателя и подложек GaAs в атмосфере арсина и водорода обеспечивают подготовку атомарно чистой поверхности GaAs, необходимой для МОГФЭ высококачественных полупроводниковых структур.

2. Оптимизация процесса δ -легирования кремнием соединений A^3B^5 в условиях МОГФЭ позволяет исключить влияние процессов в газовой фазе на размытие профиля легирования. Диффузия атомов кремния в твердой фазе за время роста покрывающих слоёв незначительна при температурах до 650 °С, что даёт возможность реализовать атомарно резкие профили δ -легирования.

3. Пиролиз триметиламиноалана и диметилэтиламиноалана на поверхности GaAs при температуре $150 \div 250$ °С в реакторе МОГФЭ позволяет получать чистые и гладкие пленки металлического алюминия с удельным сопротивлением $6 \div 8$ мОм·см, что близко к значению объёмного материала.

4. Осаждение алюминия в процессе МОГФЭ "in situ" в сочетании с прецизионным приповерхностным δ – легированием кремнием позволяет изготавливать контакты Шоттки с эффективной высотой барьера $0,2 \div 0,7$ эВ и неплавные омические контакты Al/n - GaAs.

5. Методом МОГФЭ создана новая искусственная среда - монокристаллический полупроводниковый GaAs с внедренными наноструктурными слоя-

ми Al, обладающая пикосекундной временной динамикой отклика на межзонное оптическое возбуждение.

Апробация работы

Основные результаты представлялись на внутренних семинарах ИФМ РАН, российских и международных конференциях, в том числе:

1 Всесоюзной конференции "Физика окисных пленок", (Петрозаводск, 24-25 февраля, 1982); Всероссийской научно технической конференции "Электроника и Информатика" (Зеленоград, 15-17 ноября, 1995); Всесоюзной конференции по физике полупроводников (Кишинев, 3-5 октября 1988); I, II и V Российских конференциях по физике полупроводников (Нижний Новгород, 10-14 сентября 1993; Зеленогорск, 26 февраля- 1 марта, 1996; Нижний Новгород, 10-14 сентября 2001); Всероссийских совещаниях "Нанопотоника" (Нижний Новгород, 20 -23 марта 2000 и 17 -20 марта 2003); Всероссийском симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 25 – 29 марта 2005); Российской конференции «Микроэлектроника-94» (Звенигород, 28ноября-3декабря 1994); Седьмой Российской конференции "Арсенид галлия" (Томск, 21-23 октября 1999); 11-ой международной микроволновой конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (Севастополь, Крым, Украина, 10-14 сентября 2001); Международных симпозиумах «Наноструктуры» (Санкт – Петербург, 24- 28июня 1996, 23- 27 июня, 1997); 10-ой Международной микроволновой конференции по сверхрешеткам, микроструктурам и микроприборам (США, Небраска, Ликольн 8-10 июля 1997); 10-м Европейском рабочем совещании по металлоорганической газофазной эпитаксии (Италия, Лечче, 8-11 июня 2003); 23 Международном симпозиуме по сложным полупроводникам (Санкт –Петербург, 23-27 сентября 1996); 23-ей Международной конференции по микроэлектронике (Югославия, Нис, 2002); Международных симпозиумах по исследованию приборов (США, Шарлоттсвилль, 1 – 3 декабря 1993 и 10 – 13 декабря 1997); Всероссийских рабочих совещаниях «Сканирующая зондовая микроскопия» (Нижний Новгород, 28 февраля – 2 марта 2000; 26 февраля – 1 марта 2001; 3 – 6 марта 2002; 2 – 5 марта 2003).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 50 работ, включая 23 статьи в научных журналах и 27 публикаций в сборниках тезисов докладов, материалах и трудах конференций. Полный список публикаций приводится в диссертационной работе.

Личный вклад автора в получение результатов

- Определяющий вклад в создание методик роста и изготовление всех типов гетероструктур, описанных в работе (совместно с соавторами работ [A1 – A20]).
- Определяющий вклад в исследование влияния свойств подложки GaAs на переходную область подложка эпитаксиальный слой и в разработку предэпитаксиальной подготовки подложек непосредственно в реакционной камере [A6, A7].
- Основной вклад в разработку методики очистки графитового подложкодержателя установки МОГФЭ (совместно с В.И.Шашкиным и О.И.Хрыкиным) [A5].
- Основной вклад в разработку технологии получения атомарно – резких δ – легированных кремнием слоев GaAs (совместно с В.И.Шашкиным и А.В.Мурелем) [A9, A10].
- Основной вклад в методики низкотемпературного осаждения металлического алюминия и наностроек Al на GaAs “in situ” в реакторе МОГФЭ (совместно с В.И.Шашкиным и О.И.Хрыкиным) [A13 – A15].
- Равнозначный вклад в разработку методик изготовления структур Al - δ (Si)- GaAs “in situ” с заданной высотой барьера Шоттки и процессов формирования омических контактов Al/GaAs (совместно с В.И.Шашкиным и А.В.Мурелем) [A12, A16].
- Основной вклад в разработку методов формирования алюминиевых наностроек в объеме монокристаллической полупроводниковой матрицы (совместно с В.И.Шашкиным) [A14, A17].

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Объем диссертации составляет 156 страниц, включая 57 рисунков и 6 таблиц. Список цитированной литературы составляет 116 наименований, список работ автора по теме диссертации 50 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обоснована актуальность темы исследований, показана ее научная значимость, сформулированы цели работы, представлены сведения о структуре и содержании работы, а также приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе рассмотрения литературных данных представлены основные закономерности металлоорганической газофазной

эпитаксии гомо- и гетероструктур на подложках GaAs. Рассмотрены основные приемы управления процессом МОГФЭ при изготовлении эпитаксиальных структур. Обсуждаются возможности создания эпитаксиальных структур с резкими гетеропереходами, закономерности роста и легирования эпитаксиальных слоев GaAs. Проведено сопоставление различных легирующих примесей, описаны их достоинства и недостатки при получении эпитаксиальных гетероструктур с резкими интерфейсами.

Во второй главе дано краткое описание используемой установки МОГФЭ. Приведены конструктивные усовершенствования оборудования, позволяющие: повысить чистоту водорода, сократить время выхода установки на рабочий режим, повысить точность дозирования металлоорганических соединений. Перечислены методы контроля и диагностики образцов.

Описана тестовая структура, состоящая из 16 слоев арсенида галлия разделенных маркерами (метками) AlAs, которая использовалась для определения ростовых параметров. Для первых трех слоев (время роста 4, 2 и 1 мин, соответственно) температура роста составляла 600 °С. Следующие 3 слоя выращивались при 550 °С (4, 2 и 1 мин), затем 2 слоя при 525 °С (4 и 8 мин) и 2 слоя при 500 °С (4 и 8 мин). Следующие 5 слоев GaAs (600 °С, 1 мин) составляли AlAs/GaAs периодическую структуру используемую как стандарт толщины при рентгеноструктурных исследованиях. Величина периода сверхрешетки определялась методом рентгеновской дифракции и использовалась для калибровки атомно - силовой микроскопии поперечного скола. АСМ изображение скола указанной структуры приведено на рис.1а).

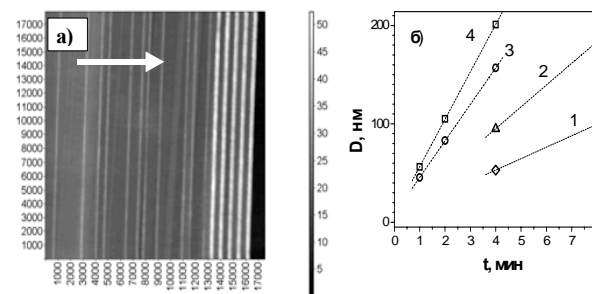


Рис.1 а) - АСМ – изображение структуры с 16 метками AlAs. Все расстояния приведены в ангстремах. Стрелка показывает направление роста. б)- Расстояние между маркерами AlAs(D) в зависимости от времени роста GaAs (t) для температур наращивания 500°С (1), 525°С (2), 550°С (3) и 600°С (4).

Толщина (h_{GaAs}) слоя GaAs определялась как:

$$h_{\text{GaAs}} = D - h_{\text{AlAs}}, \quad (1)$$

где D расстояние между маркерами AlAs, и h_{AlAs} толщина маркеров. Все расстояния измерялись в пяти различных местах. Шаг АСМ сканирования составлял 2,5 нм, ошибка измерения D не превышала 2 нм, что сравнимо с непланарностью окисленных маркеров AlAs. Было установлено, что расстояние между маркерами линейно зависело от времени роста GaAs, для каждой температуры роста, что демонстрирует рис.1б). Толщина AlAs равна величине D при времени роста GaAs равном 0. Угол наклона линий на рис.1б) давал скорость роста для каждой температуры. Погрешность определения скорости роста при такой методике не превышала 1 нм/мин. Значение энергии активации определенной из зависимости скорости роста GaAs от обратной температуры составляло $E_a = 33 \text{ кКал/моль}$, что соответствует энергии активации процесса разложения адсорбированных молекул ТМГ и арсина при высоких отношениях V/III в газовой фазе.

Подробно изложена методика предэпитаксиального термического отжига подложек GaAs в атмосфере $\text{AsH}_3 + \text{H}_2$ и $\text{AsH}_3 + \text{SiH}_4 + \text{H}_2$ для удаления окисного слоя с их поверхности. Отжиг позволяет получать атомарно чистую поверхность, о чем свидетельствует резкий концентрационный $n - p+$ переход на границе подложка – эпитаксиальный слой. Измеренная $C-V$ методом протяженность переходов сравнима с дебаевским радиусом экранирования, рассчитанным для слоя с меньшей величиной легирования.

Источником загрязнения слоев при температурах роста выше 600 °С могут быть примеси из графитового подложкодержателя. Разработана методика очистки подложкодержателя путем высокотемпературного отжига непосредственно в реакторе. По резкому улучшению вакуума при медленном охлаждении после отжига можно оценить температуру, при которой прекращается десорбция примеси и становится возможным получение качественных эпитаксиальных слоев.

Показана возможность получения гетероструктур AlGaAs – GaAs с резкими и планарными интерфейсами. При этом размытие гетерограниц, измеренное с применением послойного Оже– анализа, не превышало 1 нм, что составляет предел разрешения по глубине данного метода. Также были выращены квантовые ямы GaAs в матрице $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0,20$). Обработка спектров люминесценции подтверждала наличие квантовых ям GaAs толщиной 1,6; 3,3; 5,8; 9 нм.

Исследован эпитаксиальный рост упругонапряженных тонких слоев InGaAs на GaAs с целью получения качественных слоев InGaAs большого состава. Температура роста была $T_g = 500^\circ\text{C}$ (LT - структуры) или 600°C (HT). Подложками служили пластины GaAs(100) с отклонением $0,2^\circ$ либо 2° . Структуры состояли из последовательности слоев GaAs/

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x \approx 0,35$). Промежуточный и покрывающий слои GaAs имели толщину около 14 нм, а толщина двух одинаковых слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ варьировалась. С помощью АСМ анализировались дефекты поверхности покрывающего слоя GaAs, связанные с слоями InGaAs, с температурой роста и с отклонением среза подложки от (100). Структурные и оптические свойства слоев InGaAs контролировали методами рентгеновской дифрактометрии и фотолюминесценции. Сводные данные о структурах приведены в Таблице 1.

Оценка шероховатости R производилась по формуле:

$$R = \sum |h_i - h_{\text{mid}}| / N, \quad (2)$$

где N - полное число точек на АСМ - изображении, h_i - высота в i -й точке, h_{mid} - среднее по всем h_i .

Таблица 1. Данные о структурах и результаты измерений

Структура	T_g , °С	$\delta(100)$, град.	$h(\text{InGaAs})$, нм	R , нм	Пик PL, эВ
LT1A	500	0,2	9	0,15	1,118
LT1B	500	2	9	0,25	1,118
HT3A	600	0,2	8,5	0,39	1,16
HT3B	600	2	8,5	4,1	1,14

Примечания: $\delta(100)$ - отклонение среза подложки; $h(\text{InGaAs})$ - толщина одного слоя $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}$; R - шероховатость поверхности по данным АСМ; пик PL - положение пика фотолюминесценции.

Как следует из таблицы 1, шероховатость слоев увеличивалась с возрастанием температуры эпитаксии и увеличением угла отклонения среза подложки. Повышение критической толщины с понижением температуры - факт хорошо известный и легко объяснимый, поскольку процессы дефектообразования носят термоактивационный характер и имеют определенную энергию активации. Практическое использование таких слоев, тем не менее, ограничено, из-за ухудшения электрических и оптических свойств гетероструктур. В этих условиях использование слабоотклоненных срезов может предоставлять альтернативный путь увеличения толщины напряженного слоя InGaAs высокого качества.

В главе 2 приводятся результаты изучения возможностей метода МОГФЭ с точки зрения формирования резких распределений примеси при получении легированных кремнием δ -слоев арсенида галлия. Получение δ -легированных структур проводили с прерыванием роста GaAs на время введения примеси. Показано, что таким способом могут выращиваться δ -слои с шириной пика легирования на полувысоте (FWHM) < 5 нм при температурах роста 550-700 °С. При этом максимальная концентрация свободных электронов в δ -слое при заданной температуре и фиксиро-

ванном потоке водорода и реагентов определялась количеством молей $\text{SiH}_4 - Q$, поданных в реактор за время формирования δ -слоя:

$$Q = f * t, \quad (3)$$

где f - поток силана (моль/мин), t - время формирования δ -слоя (мин). Температура роста значительно влияет на концентрацию электронов в δ -слоях. Большие концентрации электронов в слое при высокой температуре эпитаксии существуют в достаточно узком диапазоне значений Q , что соответствует достаточно малым временам подачи SiH_4 в зону роста при умеренном его расходе. При очень больших значениях Q и высоких температурах процесса может наблюдаться “перелегирование”, приводящее к полному исчезновению пиков от δ -слоя, по данным $C-V$ метода. Применение методов нестационарной проводимости и емкости показало, что в “перелегированных” образцах имеются глубокие состояния. Плотность их монотонно спадает с удалением от дна зоны проводимости вглубь запрещенной зоны. Часть атомов кремния в “перелегированных” образцах компенсируется этими глубокими состояниями, а другая часть попадает на места мышьяка и становится акцепторами. Таким образом возникает механизм автокомпенсации. Следует отметить, что получению резких профилей при высоких температурах роста ($> 650^\circ\text{C}$) препятствует диффузия в твердой фазе, которая приводит к уширению профиля распределения примеси. При понижении температуры роста до $550\text{-}600^\circ\text{C}$ становится возможным получение более резких профилей распределения примеси. δ -слои, выращенные при 600°C , имели поверхностную концентрацию электронов $N_{s0} = 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $\text{FWHM} = 2,5 \text{ нм}$ по результатам $C-V$ измерений при 300 К и $N_s = 6,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $\text{FWHM} = 1,6 \text{ нм}$ при 77 К , что сопоставимо с лучшими известными результатами для данных материалов. Холловские измерения позволили независимо определить концентрацию свободных носителей в δ -слое, поскольку вклад носителей из объема эпитаксиального слоя мал (по оценкам $< 10^{11} \text{ см}^{-2}$). Результаты измерений ($N_s = 3,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $\mu = 2500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при 300 К и $N_s = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $\mu = 3700 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при 77 К) свидетельствуют о высоком качестве структур.

В третьей главе изложены результаты исследований роста слоев Al на GaAs в процессе МОГФЭ. Осаждение пленок Al осуществлялось на подложках GaAs (100) с различным отклонением в направлении $[110]$ при давлении в зоне роста $50\text{-}100$ мбар. Алюминий осаждался из триметиламиноалана ($\text{AlH}_3\text{-N}(\text{CH}_3)_3$) или диметилэтиламиноалана ($\text{AlH}_3(\text{CH}_3)_2(\text{C}_2\text{H}_5)$). Газом носителем являлся водород. Вначале осаждался арсенид галлия толщиной не менее 100 нм , а затем - слой Al . Рост GaAs производился при температурах выше 600°C , осаждение алюминия проводили при температурах $130\text{-}500^\circ\text{C}$.

В ходе экспериментов обнаружено, что осаждение алюминия на эпитаксиальный арсенид галлия происходит при температурах более 120°C . На рис. 2 а) показано АСМ - изображение структуры с малым количеством осажденного алюминия на эпитаксиальный GaAs . Как видно из рисунка, происходит послойно-ступенчатый рост алюминия. При большем количестве осаждаемого Al , происходит формирование nanoостровков. На рис. 2 б) приведено АСМ-изображение такой структуры. При малом количестве осаждаемого алюминия на GaAs , металлический слой вначале декорирует поверхность полупроводника. При превышении толщины слоя алюминия критической величины, равной нескольким монослоям, происходит формирование алюминиевых nanoостровков, поперечные размеры которых зависят от температуры осаждения. Дальнейшее увеличение времени осаждения приводило к росту линейных размеров nanoостровков и заполнению всей поверхности.

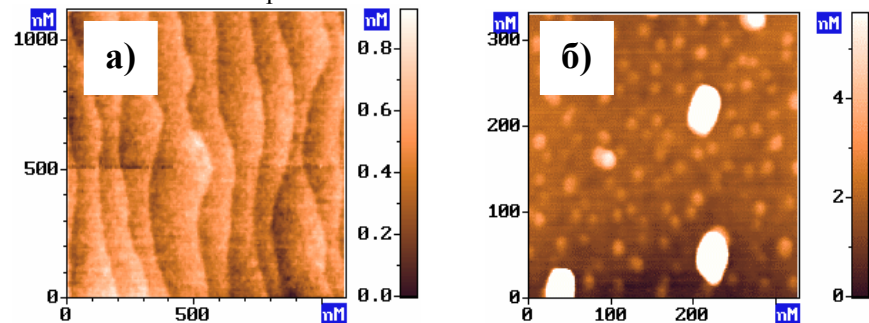


Рис.2. АСМ - изображения структур с различным количеством осажденного алюминия. а) –монослойные покрытия, б) –nanoостровки.

Проводился анализ состава толстых слоев алюминия. Результаты исследования элементного состава пленок методом послойного Оже- анализа показывали, что кроме углерода и кислорода атмосферного происхождения примеси в пленке алюминия отсутствуют. Данные рентгенофлуоресцентного анализа, также подтверждают чистоту слоев алюминия.

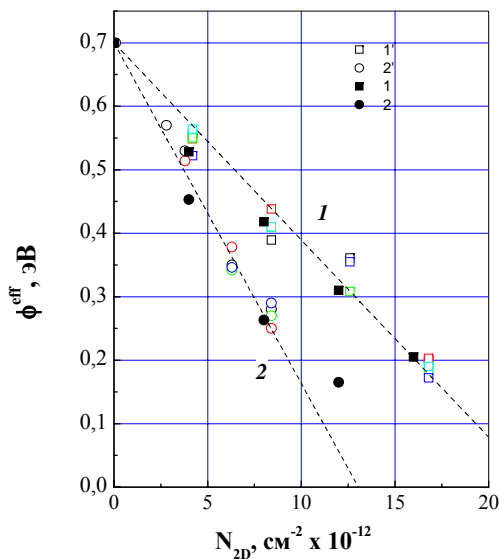
Исследования электрофизических свойств пленок алюминия толщиной $\sim 200 \text{ нм}$ показывали ухудшение электрических характеристик при повышении температуры осаждения. Наблюдается увеличение сопротивления (ρ) с ростом температуры осаждения, причем минимальные значения остаются несколько выше, чем для объемного Al ($3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$), что обычно связывается с загрязнением границ зерен в пленке и использованием в расчете ρ эффективной толщины слоя, которая превышает толщину сплошного слоя из-за развитого рельефа поверхности. Температурный

коэффициент сопротивления, измеренный в интервале от 80 К до 300 К для слоя алюминия, выращенного при 200 °С, оказался несколько выше, чем для объемного металла ($\alpha=4.5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ против $3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$).

В главе 3 также описана возможность формирования совершенных барьеров Шоттки и управления эффективной высотой барьера. Известно, что высоту барьера можно менять путём дополнительного сильного легирования приповерхностной области полупроводника. Особенно эффективно это реализуется при прецизионном δ -легировании. Результаты экспериментов и численного моделирования для высоты барьера Шоттки в зависимости от значения поверхностной концентрации заряженных доноров - N_{2D} и глубины залегания δ -слоя от поверхности хорошо согласуются, что и показано на рис. 3.

Исследована возможность формирования несплавленных омических контактов. Показано что при использовании метода δ -легирования и осаждения металлического алюминия "in situ" возможно изготовление омического контакта с контактным сопротивлением $\rho_c < 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$.

В конце третьей главы описана методика заравнивания металлических nanoостровков в объём монокристаллической полупроводниковой матрицы GaAs. В результате была создана искусственная среда, представляющая собой монокристаллический полупроводниковый GaAs с внедренными nanoостровками Al. Обсуждаются структурные свойства слоев.



В четвертой главе приведены результаты применения эпитаксиальных структур в макетах приборов.

Эпитаксиальные структуры на основе GaAs были апробированы в микроволновых планарных смесительных диодах с барьером Шоттки. Смесительные диоды Шоттки с субмикронным размером анода изготавливались на базе гетероструктур n-GaAs-n+GaAs-AlGaAs. Тонкие слои $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x \geq 0,4$ использовались в качестве стоп-слоев, что позволяет полностью удалять подложку. Параметры изготовленных диодов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры диодов Шоттки с субмикронными размерами анода

Диаметр анода, мкм	$V_{\text{проб}}, \text{ В}$	η	$R_s, \text{ Ом}$	$C_{jo}, \text{ фФ}$	$f_{co}, \text{ ТГц}$
0,6-0,8	3,5-4,5	1,07-1,1	7-12	0,8-1,2	>10

Примечания: $V_{\text{проб}}$ - обратное напряжение пробоя, C_{jo} - барьерная емкость, f_{co} - предельная частота, η - фактор неидеальности, R_s - последовательное сопротивление диода.

Предельная частота рассчитывалась по формуле:

$$f_{co} = 1/(2\pi R_s C_{jo}), \quad (4)$$

Приводятся результаты использования структур Al-(In)GaAs- δ (Si)-GaAs с пониженной эффективной высотой барьера Шоттки в планарных детекторных диодах, работающих без постоянного смещения. Применение таких диодов в детекторах миллиметрового диапазона обеспечивает низкий шум и высокую чувствительность приёма. При детектировании сигналов в диапазоне 80÷140 ГГц получены рекордные значения вольт-ваттной чувствительности $\gamma=5000 \text{ В/Вт}$ и пороговой мощности $\text{NEP}=3 \times 10^{-12} \text{ Вт}\times\text{Гц}^{-1/2}$.

В заключительном параграфе Главы 4 приводятся результаты исследования динамики фотовозбужденных носителей при воздействии мощного светового импульса на 9-слойную периодическую структуру с nanoостровками Al зарощенными в матрицу GaAs. Было получено, что такая искусственная среда обладает пикосекундной временной динамикой отклика на межзонное оптическое возбуждение.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты работы

1. Методом МОГФЭ получены атомарно-резкие профили распределения примеси при δ -легировании кремнием слоев GaAs. Согласно данным C-V

профилирования характерный масштаб области локализации электронов составляет 2,5 нм (при 300 К) и 1,6 нм (при 77 К). Превышение поверхностной концентрации $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ приводит к уширению в распределении примеси и автокомпенсации из-за возникновения глубоких уровней в запрещенной зоне.

2. Предложена оригинальная методика калибровки скорости роста путём выращивания тестовой гетероструктуры, состоящей из последовательно слоёв GaAs, разделенных нанометровыми маркерами AlAs. Использована визуализация слоёв на поперечном срезе структуры с помощью АСМ и калибровочные данные РД о периоде встроенной сверхрешётки GaAs/AlAs. Точность определения скорости роста для слоёв нанометровой толщины составляла $<1 \text{ нм/мин}$. Для реактора МОГФЭ в диапазоне температур $500 \div 600^\circ\text{C}$ и давлении 100 мБар уточнено значение энергии активации разложения адсорбированных молекул ТМГ в присутствии арсина ($E_a = 33 \text{ кКал/моль}$).

3. Впервые исследованы закономерности осаждения алюминия на GaAs при пиролизе ТМАО и ДМЭАО в реакторе МОГФЭ пониженного давления "in situ". Определена структура, морфология и электрофизические характеристики плёнок разной толщины. При температурах $150 \div 250^\circ\text{C}$ формируются чистые и гладкие плёнки алюминия. Значения удельного сопротивления $6 \div 8 \text{ мОм}\cdot\text{см}$ и температурного коэффициента $3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}/^\circ\text{C}$ близки к параметрам объёмного материала.

4. Впервые методом МОГФЭ изготовлены эпитаксиальные структуры на основе GaAs с металлическим контактом Al. При оптимальных температурах осаждения алюминия $150 \div 200^\circ\text{C}$ формируются барьеры Шоттки с высотой $\sim 0,7 \text{ эВ}$ и фактором неидеальности $1,02 \div 1,06$. За счёт д-легирования кремнием приповерхностного слоя GaAs можно управлять эффективной высотой барьера Шоттки в диапазоне $0,2 \div 0,7 \text{ эВ}$. При высокой поверхностной концентрации $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$ получены неплавные омические контакты к n-GaAs с контактным сопротивлением $< 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$.

5. На основе структур Al-(In)GaAs- δ (Si)-GaAs с пониженной эффективной высотой барьера Шоттки изготовлены детекторные диоды, работающие без постоянного смещения. Применение таких диодов в детекторах миллиметрового диапазона обеспечивает низкий шум и высокую чувствительность приёма. При детектировании сигналов в диапазоне $80 \div 140 \text{ ГГц}$ получены рекордные значения вольт-ваттной чувствительности $\gamma = 5000 \text{ В/Вт}$ и пороговой мощности $\text{NEP} = 3 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$.

Список цитированной литературы

1. The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy. Edited by E.H.C. Parker/ New York and London: Plenum Press, 1985. - 686p.
2. Hanna, M.C. Atmospheric pressure organometallic vapor phase epitaxy growth high – mobility GaAs using trimethylgallium and arsine/ M.C. Hanna, Z.H. Lu, E.G. Oh, E. Mao, and A. Majerfeld// Applied Physics Letters – 1990. V.57 - P. 1120 –1122.
3. Razeghi, M. High – purity GaAs layers grown by low- pressure metalorganic chemical vapor deposition/ M. Razeghi, F. Ohmes, J. Nagle, M. Defour, O. Acher, and P. Bove// Applied Physics Letters – 1989. V. 55 - P.1677 –1679.
4. Crowe, T.W. Progress toward solid - state local oscillators at 1 THz/ T.W. Crowe, T.C. Grein, R. Zimmermann, and P. Zimmermann// IEEE Microwave and Guided Wave Letters – 1996. V.6 - P. 207 – 208.
5. Crowe, T.W. GaAs Schottky diodes for THz mixing applications/ T.W. Crowe, R.J. Mattauch, H.P. Roser, W.L. Bishop, W.C.B. Peatman, X. Liu// Proceedings of the IEEE. – 1992. V.80 P. 1827 - 1841.
6. Sassen, S. Barrier height engineering on GaAs THz shottky diodes by means of high – low doping, InGaAs - and InGaP – layers/ S. Sassen, B. Witzigmann, C. Wolk, H. Brugger// IEEE Transaction on Electron Devices – 2000. V. 47 – P. 24 - 32.
7. Schubert, E.F. Delta-doped ohmic contacts to n-GaAs/ E.F. Schubert, J.E. Cunningham, W.T. Tsang, and T.H. Chiu// Applied Physics Letters - 1986. V. 49 - P. 292-294.

Список работ автора по теме диссертации

- A 1. Дроздов, М.Н. Сверхвысокое разрешение при послойном оже-анализе гетероструктур InGaAs/GaAs с глубоко залегающими квантовыми ямами/ М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, Д.В. Мастеров, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин// Письма в ЖТФ. – 1996. - Т.22. - Вып.18. - С.61-66.
- A 2. Дроздов, М.Н. Субнанометровое разрешение по глубине при послойном анализе с использованием скользящих Оже-электронов/ М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин //Письма в ЖТФ. - 2001. - Т.27. - Вып.5. – С. 59-66.
- A 3. Дроздов, М.Н. Новый метод определения резкости гетеропереходов InGaAs/GaAs при послойном Оже-анализе/ М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин// Письма в ЖТФ. – 2001. - Т.27. - Вып. 20. – С. 51-56.
- A 4. Drozdov, Yu.N. Cross-Sectional AFM of GaAs-based Multilayer Heterostructure with Thin AlAs Marks /Yu.N. Drozdov, V.M.Danil'tsev, N.V.

Vostokov, G.L. Pakhomov, V.I. Shashkin //Physics of Low-Dimensional Structures. – 2003. - Vol.3/4. - P. 49-54.

А 5. Данильцев, В.М. Применение АСМ для исследования режимов эпитаксиального роста гетероструктур AlGaAs / GaAs/ В.М. Данильцев, Н.В. Востоков, Д.М. Гапонова, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Мурель, Д.А. Пряхин, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин// Всероссийский Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 25–29 марта, 2005, Материалы Симпозиума. – С. 118-119.

А 6. Болдыревский, П.Б. Формирование селективных структур GaAs в процессе обработки анодных окисных пленок/ П.Б. Болдыревский, В.М. Данильцев, А.А. Краснов, В.А. Соловьев// Электронная техника - сер.6, "Материалы" - 1984. - вып.7 (192). – С. 76 – 78.

А 7. Болдыревский, П.Б. Исследование процессов получения и термообработки анодных окисных пленок на GaAs/ П.Б. Болдыревский, В.М. Данильцев, В.Н. Кванин, А.А. Краснов// 1 Всесоюзная конференция "Физика окисных пленок", Петрозаводск, 24-25 февраля, 1982, Тезисы докладов. – С. 77-78.

А 8. Данильцев, В.М. Применение метода Брюстеровской рефлектометрии для контроля состояния поверхности GaAs в MOCVD реакторе атмосферного давления/ В.М. Данильцев, А.Ю. Лукьянов, М.А. Новиков, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин// Заводская лаборатория - 1995. - № 10. - С. 16–19.

А 9. Данильцев, В.М. Получение предельно резких профилей распределения примесей в дельта - легированных слоях GaAs при металлоорганической газофазной эпитаксии/ В.М. Данильцев, И.В. Ирин, А.В. Мурель, В.И. Шашкин// Неорганические материалы – 1994. - Т. 30. №8. – С. 1026 - 1029.

А 10. Алешкин, В.Я. Глубокие состояния в δ - легированном кремнием GaAs. В.Я. Алешкин, В.М. Данильцев, А.В. Мурель, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин// Физика и техника полупроводников – 1998. - Т.32. - №6. – С. 733-738.

А 11. Востоков, Н.В. Исследование структур со сдвоенными слоями InGaAs вблизи перехода через критическую толщину /Н.В.Востоков, Д.М.Гапонова, В.М.Данильцев, М.Н.Дроздов, Ю.Н.Дроздов, А.В.Мурель, О.И.Хрыкин, В.И.Шашкин //Микросистемная техника. – 2001. - №12. - С. 18-22.

А 12. Шашкин, В.И. Управление эффективной высотой барьера в эпитаксиальных структурах Al/ n-GaAs, изготовленных в едином цикле металлоорганической газофазной эпитаксии/ В.И. Шашкин, А.В. Мурель, Ю.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, О.И. Хрыкин// Микроэлектроника – 1997. - Т. 26. №1. – С. 57–61.

А 13 . Данильцев, В.М. Осаждение пленок алюминия на арсенид галлия в

процессе металлоорганической газофазной эпитаксии с использованием триметиламиналана / В.М. Данильцев, С.А. Гусев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин, Б.М. Булычев// Поверхность. РСНИ. –1996. №1. - С. 36-41.

А 14. Востоков, Н.В. Формирование и исследование металлических нанобъектов Al на GaAs /Н.В.Востоков, В.М.Данильцев, Ю.Н. Дроздов, А.В.Мурель, О.И.Хрыкин, В.И.Шашкин //Поверхность. РСНИ. – 2000. - №11. - С.84-88.

А 15. Востоков, Н.В. Формирование нанокластеров Al и их зарачивание слоем GaAs в условиях металлоорганической газофазной эпитаксии /Н.В. Востоков, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Мурель, В.И. Шашкин //Известия Академии Наук: Серия физическая – 2004. - Т. 68. – №1. - С.55-57.

А 16. Шашкин, В.И. Управление характером токопереноса в барьере Шоттки с помощью δ – легирования: расчет и эксперимент для Al/GaAs/ В.И. Шашкин, А.В. Мурель, В.М. Данильцев, О.И. Хрыкин// Физика и техника полупроводников – 2002. - Т. 36. Вып. 5, с. 537-542.

А 17. Востоков, Н.В. Изучение свойств структур с нанокластерами Al, внедренными в матрицу GaAs/ Н.В. Востоков, С.А. Гусев, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, А.И. Корытин, А.В. Мурель, В.И. Шашкин// Физика и техника полупроводников –2005. - Т.39. №1. - С.92-95.

А 18. Molodnyakov, S.P. Submicron Planar Schottky Diodes for Submillimeter Wavelengths/ S.P. Molodnyakov, V.I. Shashkin, D.G. Paveliev, L.V. Sukhodoev, V.M. Daniltsev, A.S. Molodnyakov// International Semiconductor Device Research Symposium, Charlottesville, USA, December 1-3, 1993. Proceedings. – P. 377-380.

А 19. Шашкин, В.И. Разработка технологии встречно включённых торцевых диодов для терагерцовых умножителей частоты/ В.И. Шашкин, В.Л. Вакс, Е.А. Вopilкин, В.М. Данильцев, А.Ю. Климов, М.И. Кузнецов, А.В. Мурель, В.В. Рогов, О.И. Хрыкин// 11-ая международная микроволновая конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, Крым, Украина, 10-14 сентября 2001. Материалы конференции. - С. 430 - 431.

А 20. Шашкин, В.И. Микроволновые детекторы на основе низкобарьерных планарных диодов Шоттки и их характеристики/ В.И.Шашкин, В.Л.Вакс, В.М.Данильцев, А.В.Масловский, А.В. Мурель, С.Д.Никифоров, О.И. Хрыкин, Ю.И. Чеченин// Известия вузов. Радиофизика – 2005. – Т. XLVIII. №6. - С. 544 – 551.

Данильцев Вячеслав Михайлович

**МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКАЯ ГАЗОФАЗНАЯ
ЭПИТАКСИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ
СОЕДИНЕНИЙ Al – In – Ga - As ДЛЯ ПРИБОРОВ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

Автореферат

Подписано к печати 13.11.2006 г. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН,
603950, г. Н. Новгород, ГСП-105