

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



ФОМИН Александр Владимирович

СИНТЕЗ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ В СИСТЕМЕ GaN/AlGaN МЕТОДОМ ХЛОРИД-
ГИДРИДНОЙ ГАЗОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ И ФОРМИРОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР
НА ИХ ОСНОВЕ

специальность 02.00.21-химия твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата химических наук

Санкт-Петербург
2005

Работа выполнена в лаборатории физики полупроводниковых приборов Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН

Научный руководитель

кандидат физико-математических наук,
доцент

Дрозд В.Е.

Официальные оппоненты:

Доктор химических наук,
профессор

Ежовский Юрий Константинович

Доктор химических наук,
профессор

Михайлов Михаил Дмитриевич

Ведущая организация: Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова.

Защита состоится 10 марта в 15.00 часов на заседании
диссертационного совета Д-212.232.41 по защите диссертаций на соискание ученой
степени доктора химических наук при Санкт-Петербургском Государственном
Университете по адресу: 199004, Санкт-Петербург, Средний проспект 41/43

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им.А.М.Горького СПбГУ.

Автореферат разослан 3 февраля 2005 года

Ученый секретарь

Бальмаков

Бальмаков М.Д.

Актуальность темы

В настоящее время наблюдается стремительный прогресс технологии полупроводниковых нитридов-GaN, InN, AlN. Прежде всего, эти материалы нашли применение при создании твердотельных источников света (светодиодов) синей, фиолетовой и зеленой областей спектра, а также приборов, работающих в ультрафиолетовом диапазоне.

Метод хлорид-гидридной газофазной эпитаксии (ХГФЭ), широко применим для синтеза соединений A^3N . Возможности этого метода позволяют проводить как формирование толстых эпитаксиальных слоев и квазиобъемных кристаллов GaN при высоких скоростях осаждения [1], так и эпитаксию тонких пленок при относительно малых скоростях роста (5-20 микрон в час). Это обуславливает принципиальную возможность формирования многослойных гетероструктур методом ХГФЭ в системе AlGaIn/GaN. Однако практические результаты весьма незначительны. Главная проблема заключается в отсутствии отработанных методик синтеза кристаллически-совершенных слоев AlN и AlGaIn. Сообщение о формировании светодиодных структур ультрафиолетового (УФ) диапазона методом ХГФЭ на подложках 6H-SiC было сделано лишь в 2001 г [2], тогда как предварительные эксперименты проводились в 1970-х годах. Таким образом, исследование газофазных реакций и изучение особенностей эпитаксии AlN и AlGaIn в хлорид-гидридной системе является важной исследовательской работой, результатом которой может стать развитие технологии ХГФЭ и достижение эффективного и экономичного метода для производства светодиодов УФ и синего диапазона.

Цель работы состояла в изучении закономерностей газофазного осаждения алюминосодержащих соединений A^3N из хлоридной газовой фазы с последующим формированием многослойных гетероструктур в системе AlGaIn/GaN.

Научная новизна работы состоит том, что была разработана методика получения многослойных гетероструктур в системе GaCl-AlIn-NFb-Ag, включая следующие аспекты:

- исследованы особенности процесса легирования эпитаксиальных слоев нитридов при их синтезе методом ХГФЭ. Выявлены параметры синтеза, позволяющие контролировать степень легирования как донорными, так и акцепторными примесями. Впервые изучены особенности процесса легирования при использовании кристаллического кремния для

синтеза слоев GaN:Si. Впервые методом ХГФЭ сформированы структуры AlGaIn: Mg, обладающие p-типом проводимости, установлены условия активации акцепторной примеси;

- изучены условия формирования из хлоридной газовой фазы эпитаксиальных слоев AlN и твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ в широком диапазоне содержания компонентов. Предложена методика предварительной обработки поверхности сапфировых подложек в газовой фазе, целесообразная для улучшения кристаллического качества эпитаксиальных слоев. Продемонстрирован направленный синтез кристаллически-совершенных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ заданного химического состава.

- в результате проведенных исследований выявлено влияние параметров газовой фазы на свойства эпитаксиальных слоев, предложена и реализована методика осаждения из хлоридной газовой фазы многослойных гетероструктур с заданной толщиной и составом составляющих слоев общего вида

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{u-GaN}/\text{n-GaN}/\text{n-AlGaIn}/\text{p-GaN}$.

Практическая ценность работы.

В данном исследовании была показана возможность формирования гетероструктур в системе AlGaIn/GaN из хлорид-гидридной газовой фазы, что делает возможным применение полученных результатов при разработке технологии светодиодных структур синего диапазона методом ХГФЭ.

Апробация результатов. Материалы диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- 3-ий Международный семинар по карбиду кремния и родственным материалам ISSCRM-2000 . Великий Новгород, 2000г.
- 4-е Всероссийское Совещание " Нитриды галлия, алюминия, индия-структуры и приборы". С-Петербург, 2000г.
- 1-я Всероссийская Конференция "Нитриды галлия, индия и алюминия". Москва, 2001г.
- 4th International Conference on Nitride Semiconductors ICNS-4., USA, Denver 2001г.

IV Международная конференция "Химия высокоорганизованных веществ и научные основы нанотехнологии. С-Петербург, 2004 г.

Положения, выносимые на защиту.

1. Формирование гетероструктур в системе AlGa_xN/GaN реализовано методом хлорид-гидридной газофазной эпитаксии.
2. Использование кристаллического кремния в качестве источника донорной примеси позволяет проводить управляемое легирование слоев GaN в широком диапазоне содержания легирующей примеси при сохранении кристаллического совершенства слоев.
3. Вхождение AlN в твердую фазу при синтезе трехкомпонентных твердых растворов Al_xGa_{1-x}i-N лимитируется побочными реакциями в газовой фазе.
4. Улучшение структурных свойств эпитаксиальных слоев твердых растворов Al_xGa_{1-x}i-N достигается предварительным формированием буферного слоя оксинитридов на поверхности сапфира.
5. Дырочная проводимость в структурах Al_xGa_{1-x}i-N:Mg реализуется при содержании AlN менее 0.1. Структуры с составом по AlN > 0.1 являются изолирующими или n-типа проводимости вследствие высокой концентрации структурных дефектов донорной природы.

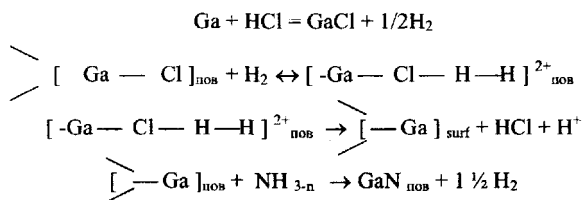
Публикации: Основные результаты работы опубликованы в 10 печатных работах, в том числе в 5 научных статьях и в материалах 5 конференций.

Структура и объем. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав заключения и списка литературы, изложенных на 108 машинописных листах. Диссертация включает также 62 рисунка, 6 таблиц и список литературы из 103 наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, сформулирована цель диссертации, представлены научные положения, выносимые на защиту, а так же кратко изложено содержание разделов диссертации.

Первая глава содержит обзор литературы по свойствам широкозонных полупроводниковых соединений типа A^3N . Приводятся основные методы эпитаксиального осаждения слоев нитридов. Синтез GaN в методе ХГФЭ осуществляется при взаимодействии GaCl и NH_3 . Реакция термического разложения аммиака лимитирована кинетически, вследствие чего при температуре синтеза GaN ($1000^\circ C - 1100^\circ C$) реакционноспособным оказывается менее 10% вводимого в газовую смесь NH_3 . Это требует значительного избытка аммиака. Обсуждается химизм процесса образования нитридов в методе ХГФЭ. В частности, W.Seifert предполагал участие водородсодержащих комплексов в промежуточных стадиях образования GaN [3]:



Приводятся характеристики слоев GaN, синтезированных различными исследовательскими группами. Приведены литературные данные по пригодности различных материалов в качестве подложек для эпитаксии нитридов. Описываются методики и результаты синтеза объемных монокристаллов GaN как перспективного материала для подложек. Обсуждается проблема синтеза алюмосодержащих соединений методом ХГФЭ: AlN и твердых растворов

$Al_xGa_{1-x}N$. Вследствие неудачных попыток синтеза этих соединений в 70-е годы, долгое время эпитаксия алюмосодержащих нитридов из хлорид-гидридной фазы считалась бесперспективной. Высокая реакционная способность AlCl₃ в температурном диапазоне синтеза нитридов ($800^\circ C - 1000^\circ C$) является причиной разрушения кварцевых частей установок синтеза, загрязнения эпитаксиальных слоев кремнием и синтеза материала с неприемлемым для приборных структур качеством. Лишь в середине 1990-х годов были продемонстрированы монослои AlN и $Al_xGa_{1-x}N$ с хорошим кристаллическим качеством, полученные методом ХГФЭ [4]. В 2003 г. сообщалось о формировании светодиодных структур УФ диапазона (см.[2]). Раскрывается проблема реализации p-типа проводимости в соединениях A^3N . Введение акцепторной примеси (Mg) не обеспечивает p-тип проводимости в легированных слоях вследствие образования комплексов Mg-H.

Диссоциация комплексов и активация акцепторной примеси происходит при послеростовом отжиге.

Вторая глава содержит описание технологического оборудования, приводятся методики эпитаксиального осаждения соединений Ш-N и методы исследования полученных образцов. Эпитаксиальные слои GaN, AlN, $\text{Al}_x\text{Gai}_{1-x}\text{N}$ и гетероструктуры GaN/ $\text{Al}_x\text{Gai}_{1-x}\text{N}$ были синтезированы методом ХГФЭ в установке атмосферного давления с проточным реактором горизонтального типа.

Система газораспределения реализовывала питание реактора газом носителем - Ar (99.997%) и реакционными газами - NH_3 (99.999%) и HCl (99.998%) по шести независимым каналам для источников и по одному фоновому каналу.

Эпитаксия осуществлялась на Si-границы подложек 6H-SiC толщиной 0.2 мм производства Cree Research Inc., (США) и (0001) границы подложек a-AbOз толщиной 0.4 мм. производства Bicon Inc., (США) и Unisapph (Россия).

В зону источников загружался металлический Ga (99.9997%), взаимодействие которого с газообразным HCl приводило к образованию GaCl. Током газа-носителя реагенты (GaCl и NH_3) транспортировался в зону роста. В зоне роста при температурах 1000 °C -1050°C происходил синтез GaN.

При синтезе AlN и $\text{Al}_x\text{Gai}_{1-x}\text{N}$ в параллельный газовый канал установки загружался металлический Al (99.9999%). Газовая фаза обогащалась парами AlCl₃ при взаимодействии Al и HCl. Состав твердых растворов $\text{Al}_x\text{Gai}_{1-x}\text{N}$ определялся соотношением парциальных давлений $P_{\text{AlCl}_3} / P_{\text{GaCl}}$.

Конструкция установки синтеза позволяла в одном ростовом процессе формировать многослойные гетероструктуры, состоящие из слоев разного состава. Приведена методика формирования многослойных гетероструктур. Представлены методы характеризации эпитаксиальных слоев.

В третьей главе обсуждаются результаты экспериментов по осаждению нелегированных слоев u-GaN. Выявлены условия кинетического и диффузионного лимитирования процесса синтеза GaN. Экспериментальным путем подобраны оптимальные условия синтеза GaN для данного реактора. Температура синтеза составляла 1000 °C -1020°C при 70-кратном стехиометрическом избытке V группы и скорости роста 0.3-0.5 мкм/мин. При

выбранных условиях синтеза полуширина дифракционного максимума от слоев u-GaN в режиме ©-сканирования составляла 150-240 угловых секунд.

Приводятся характеристики легированных слоев n-GaN:Si и p-GaN:Mg. В качестве источника донорной примеси было предложено использовать монокристаллический кремний, хлорирование которого происходило в соответствии с уравнением реакции:



Концентрация легирующей примеси регулировалась температурой источника. Метод вторично-ионной массовой спектрометрии (ВИМС) применялся для измерения концентрации донорной примеси в слоях GaN:Si и изучения профиля её распределения. Обнаружена линейная зависимость между температурой источника примеси и ее концентрацией в слоях GaN:Si. Доля электрически-активной донорной примеси составляла 30%-50% от значения ее абсолютной концентрации. Энергия ионизации доноров составила 26 мэВ. Полученные данные хорошо согласуются с приводимыми в литературе. Отмечено сохранение кристаллического качества эпитаксиальных слоев GaN:Si во всем диапазоне легирования. Полуширина дифракционного максимума в геометрии со-сканирования составляла 144 угл.с и 116 угл.с. для образцов с содержанием $[\text{Si}] = 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $[\text{Si}] = 2.5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, соответственно. Приводятся результаты фотолюминесцентного (ФЛ) и катодолюминесцентного (КЛ) анализа слоев GaN:Si. Спектры ФЛ получены при накачке азотным лазером мощностью 50 кВт/см^2 . Интенсивность краевого пика полосы (3.435 эВ; 361 нм) возрастала с увеличением уровня легирования. В спектрах КЛ при охлаждении до 77К кроме экситонной полосы обнаружены полосы безфононной донорно-акцепторной рекомбинации (382,7 нм) и полоса, связанная с глубокими уровнями (561-574 нм).

Для оценочного определения плотности дислокаций проведено селективное химическое травление слоев GaN:Si. В качестве травителя использовалась горячая концентрированная H_3PO_4 с добавлением алюминия. [5].

Проведены эксперименты по синтезу слоев GaN:Mg. Концентрация некомпенсированных акцепторов N_a -Nd в слоях GaN:Mg возрастала с повышением температуры источника примеси. Исследованы люминесцентные свойства слоев GaN:Mg. Для реализации p-типа проводимости в слоях GaN:Mg применялся послеростовой отжиг структур в атмосфере азота при 800°C в течение 10 минут.

В четвёртой главе обсуждаются результаты экспериментов по осаждению слоев AlN и твердых растворов $\text{Al}_x\text{Gai}_{1-x}\text{N}$. Исследовано влияние температуры синтеза на кристаллическое качество и морфологию поверхности слоев AlN, выращенных на подложках 6H-SiC. Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследовалась поверхность эпитаксиальных слоев AlN, синтезированных при различных температурах (рис.1). Осаждение при низких температурах обуславливало образование мелкокристаллической структуры без четко выраженных кристаллографических направлений. Слои, синтезированные при температуре выше 950°C, имели четко выраженную гексагональную огранку.

Шероховатость поверхности главным образом определялась толщиной слоя. Наименьшая шероховатость ($R_a < 10 \text{ \AA}$) обнаружена у слоев, толщина которых не превышала 0.1 мкм. Это значение сравнимо с величиной шероховатости $R_a = 20 \text{ \AA}$ для слоев AlN/SiC, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [6].

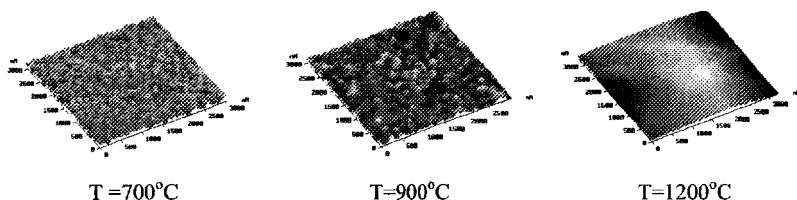
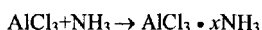


Рис.1. АСМ изображения поверхности слоев AlN (3 мкм х 3 мкм) синтезированных при разных температурах.

При эпитаксии твердых растворов $\text{Al}_x\text{Gai}_{1-x}\text{N}$ обнаружено насыщение состава твердой фазы по AlN с повышением $P_{\text{AlCб}}$. Предел пропорциональности между $P_{\text{AlCб}}$ и мольной долей AlN в твердой фазе соответствовал $\text{Al}_{0.3}\text{Gao}_{0.7}\text{N}$. В методе МОС-гидридной эпитаксии данная тенденция объясняется протеканием побочных газофазных реакций образования металлоорганических аммиачных комплексов. По аналогии, высказано предположение о комплексообразовании в хлоридной газовой фазе, приводящее к понижению концентрации AlCб:



Повышение P_{AlC} ведет к смещению равновесия реакций комплексообразования вправо. Увеличение мольной доли AlN в твердых растворах может быть достигнуто при понижении P_{GaCl} или добавлении в газовую фазу сверхэквивалентного количества HCl . Выявленные закономерности состава твердой фазы от условий синтеза позволили проводить направленный синтез слоев $Al_xGa_{1-x}N$ в широком диапазоне содержания AlN как на сапфировых, так и на карбидкремниевых подложках. Экспериментально определена ширина запрещенной зоны E_g твердых растворов $Al_xGa_{1-x}N$ с различным содержанием AlN . Исследовано влияние азотирования поверхности сапфировых подложек на структурные свойства эпитаксиальных слоев $Al_xGa_{1-x}N$. Показано, что увеличение времени азотирования с 3 до 30 минут приводит к улучшению кристаллического качества слоев вследствие формирования поверхностного слоя оксинитридов AlN_xO_{1-x} .

Синтезированы структуры $Al_xGa_{1-x}N/AlO_3$ ($0.05 < x < 0.25$). После напыления никелиевых полупрозрачных барьеров Шоттки исследована фоточувствительность этих структур. Максимальная чувствительность, равная 210 mA/Wt (квантовая эффективность $\sim 75\%$) обнаружена для слоя $Al_{0.06}Ga_{0.94}N$ р-типа в слоях $Al_{0.06}Ga_{0.94}N:Mg$ была достигнута при послеростовом отжиге структуры в токе азота. Время отжига составляло 20 мин. при температуре выше 850°C . Реализовать р-тип проводимости в слоях $Al_xGa_{1-x}N:Mg$ ($x > 0.06$) не удалось. Вероятно, с увеличением мольной доли AlN происходит возрастание плотности дефектов кристаллической структуры, выступающих в роли доноров. Приводятся результаты исследования механизмов протекания тока в омических контактах к слоям $Pd-p-Al_xGa_{1-x}N:Mg$. Установлено, что основным механизмом протекания тока в омическом контакте $Pd-p-Al_{0.06}Ga_{0.94}N$ при $N_s-N_d = 3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ является термоэлектронная эмиссия. С увеличением концентрации нескомпенсированных акцепторов в твердом растворе до $N_s-N_d = 1 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ наблюдался переход от термоэлектронной эмиссии (при высоких температурах) к туннелированию (при низких температурах).

В пятой главе обсуждаются результаты исследований оптических и электрических свойств гетероструктур $AhCVu-GaN/n-GaNiSi/n-AlGaN/p-GaN:Mg$ и $SiC/u-GaN/n-GaN:Si/n-AlGaN/p-GaN:Mg$. Для формирования гетероструктур были использованы подходы, разработанные при синтезе моноэпитаксиальных слоев

u-GaN, n-GaN:Si, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, p-GaN:Mg. Предложенная методика роста и конструкция установки синтеза обеспечивали формирование резких гетерограниц между слоями разного состава (рис.2). Формированию гетероструктур реализовано при контроле толщины слоев, заданном уровне легирования областей п и р типа проводимости, заданном составе широкозонной области $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Проведено плазмохимическое травление мезаструктур и сформированы контакты p-GaN/ Ni /Au и n-GaN/ Al. Исследованы электролюминесцентные свойства структур.

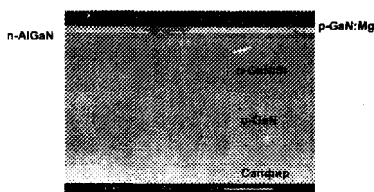


Рис.2. СЭМ-фото поперечного среза гетероструктуры с $\text{Al}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{N}$

Максимум ЭЛ находился в диапазоне 460-500 нм. Значительная полуширина максимума электролюминесценции свидетельствует о дефектной природе излучательной рекомбинации. Наблюдаемое коротковолновое смещение максимума ЭЛ при увеличении приложенного тока связано с насыщением глубоких рекомбинационных центров и начале рекомбинации через более мелкие уровни (рис.3).

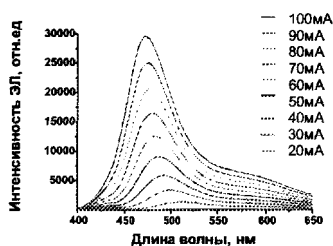


Рис.3. Спектры электролюминесценции структуры $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{u-GaN}/\text{n-GaN:Si}/\text{n-Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{p-GaN:Mg}$ ($\text{Na-Nd} = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

Выводы

1. На модифицированной установке синтеза получены кристаллически-совершенные слои GaN. Оптимальные условия достигались варьированием температурных, газодинамических и концентрационных параметров синтеза.
2. Впервые показана возможность использования кристаллического кремния в роли источника донорной примеси при синтезе слоев GaN:Si. На основе сопоставления результатов измерений ВИС и ВФХ определено, что доля электрически-активных доноров в слоях GaN:Si составляет 30%-50% от значения абсолютной концентрации примеси. Энергия активации доноров составляет 26 мэВ.
3. Установлены закономерности процесса синтеза, позволяющие получать эпитаксиальные слои трехкомпонентных соединений $Al_xGa_{1-x}N$ с заданным химическим составом твердой фазы. Показано, что содержание AlN в твердой фазе возрастает с повышением P_{AlCl_3} при постоянном P_{GaCl} до состава $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$. Синтез слоев $Al_xGa_{1-x}N$ с мольной долей AlN выше 0.3 необходимо проводить при пониженном P_{GaCl} и фиксированном значении P_{AlCl_3} .
4. Установлено, что азотирование сапфировых подложек компонентами газовой фазы приводит к улучшению структурных характеристик эпитаксиальных слоев $Al_xGa_{1-x}N$. Вероятным механизмом является образование поверхностного слоя состава $Al_xN_{1-x}O$, уменьшающего рассогласование параметров кристаллических решеток подложки и эпитаксиального слоя.
5. Впервые показана применимость метода ХГФЭ к синтезу слоев твердых растворов p-Al_{0.06}Ga_{0.94}N:Mg. В структурах $Al_xGa_{1-x}N:Mg$ при $x > 0.06$ p-тип проводимости не реализован вследствие возрастания дефектности слоев. Установлено, что основным механизмом протекания тока в омическом контакте Pd-p-Al_{0.06}Ga_{0.94}N при $N_a - N_i = 3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ является термоэлектронная эмиссия. С увеличением концентрации нескомпенсированных акцепторов в твердом растворе до $N_a - N_d = 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ наблюдается переход от термоэлектронной эмиссии (при высоких температурах) к туннелированию (при низких температурах).
6. Продемонстрирована принципиальная применимость метода ХГФЭ к формированию светоизлучающих структур на сапфировых подложках в системе $Al_xGa_{1-x}N/GaN$.

Цитируемая литература

- [1] O. Oda, T. Inoue, Y. Seki, K. Kainosho, S. Yaegashi, A. Wakahara, A. Yoshida, S. Kurai, Y. Yamada, T. Taguchi GaN Bulk Substrates for GaN based LEDs and LDs.// Phys. Stat. Sol. (a).2000. Vol. 180. P. 51-58.
- [2] D. Tsvetkov, Yu. Melnik, A. Davydov, A. Shapiro, O. Kovalenkov, J.B. Lam, J.J. Song, V. Dmitriev Growth of Submicron AlGa_N/Ga_N/AlGa_N Heterostructures by Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE).// Phys. Stat. Sol.(a).2001.Vol. 188. P.429-432.
- [3] Seifert W, Fitzl G and Butter E. Study on the growth rate in VPE of GaN // J.Crystal Growth. 1981. Vol 52. P 252-262.
- [4] A.E.Nikolaev, Yu.V. Melnik, N.I.Kuznetsov, A.M.Strelchuk, A.P.Kovarsky, K.V.Vassilevsky, and V.A.Dmitriev GaN p-n-structures grown by Hydride Vapor Phase Epitaxy. // Mat. Res. Soc. Symp. Prog. 1998. Vol 482. P. 251-256.
- [5] M. G. Mynbaeva, Yu. V. Melnik, A. K. Kryganovskii and K. D. Mynbaev Wet Chemical Etching of GaN in H₃PO₄ with Al Ions. // Electrochemical and Solid-State Letters. 1999. Vol 2. P. 8-12.
- [6] C.Zetterling, M.Ostling, K.Wongchotigul, M.G.Spencer, X.Tang, C.I.Harris, N.Nordell, S.S.Wong Investigation of aluminum nitride grown by metal-organic chemical-vapor deposition on silicon carbide. // J.Appl.Phys. 1997.Vol 82. P. 3003-3013

Основное содержание диссертации опубликовано в статьях и тезисах докладов:

1. A.V.Fomin, I.P.Nikitina, A.A.Lavrent'ev, N.V. Seredova. Hydride vapor phase epitaxy growth of AlGa_N on 6-H SiC. // Abs. III International Seminar on Silicon Carbide and related materials. Russia. Novgorod the Great, 2000. P. 53 - 54.
2. Т.В.Бланк, Ю.В.Голдберг, Е.В.Калинина, О.В.Константинов, А.Е.Николаев, В.Фомин, А.Е.Черенков. Механизм протекания тока в омическом контакте Pd-силыю легированный p-AlGa_N.// ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 5. С. 529-532
3. Т.В. Blank, Yu.A.Goldberg, E.V.Kalinina, O.V.Konstantinov, A.E. Nikolaev, A.V.Fomin.// The conduction mechanism in Pd-Highly Doped p-Al_xGa_{1-x}N Ohmic Contact Structures.// Journal of Wide Bandgap Materials. 2000. Vol. 8, P. 34-40.
4. М.Г.Минбаева, А.А.Лаврентьев, А.В.Фомин, К.Д.Минбаев А.А.Лебедев. Диффузия магния из подложек пористого карбида кремния при автолегировании эпитаксиальных слоев нитрида галлия. // ПЖТФ. 2003. Т.29. Вып 11. С.72-78.
5. A.V.Fomin, A.E.Nikolaev, A.S.Zubrilov, M.G.Mynbaeva, I.P.Nikitina, N.I.Kuznetsov, A.P.Kovarsky B.Ja.Ber, and D.V.Tsvetkov. Properties of Si-doped GaN layers grown by HVPE.// Phys.stat.sol.(a).2001 Vol. 188. No. 1. P. 433-437.
6. G.Onushkin, A.Nikolaev, A.Fomin, O.Yu.Ledaev. A.Cherenkov, I.Nikitina, E.Kalinina.O.V.Kovalenkov,V.A.Dmitriev. Photoelectrical properties of AlGa_N epitaxial layers grown by HVPE// Phys.stat.sol.(c). 2002. Vol 0. No. 1 P 465-468.
7. О.Юледаев, А.Е.Николаев, И.П.Никитина, А.В.Фомин, В.А.Дмитриев. Свойства слоев AlN выращенных на подложках SiC в широком диапазоне температур методом ХГФЭ.// Тез.докл. 1-ой Всероссийской Конференции "Нитриды галлия, алюминия, индия-структуры и приборы". Москва. Россия 2001. С.9.

8. Г.Онушкин, Л.Николаев, А.Фомин, А.Черенков, Е.Калинина, И.Никитна. AlGaN эпитаксиальные слои для фотодетекторов.// Тез.докл.1-ой Всероссийской Конференции "Нитриды галлия, алюминия, индия-структуры и приборы". Москва. Россия. 2001. С.П.
9. А.В.Фомин, А.Е.Николаев, И.П.Никитина, Г.А.Онушкин. Предростовая обработка поверхности нитрида галлия для гомоэпитаксии. // Тез.докл. 1-ой Всероссийской Конференции "Нитриды галлия, алюминия, индия-структуры и приборы". Москва. Россия. 2001.С. 5.
10. А.В.Фомин, Г.А.Онушкин, В.Е.Дрозд. Формирование гетероструктур в системе AlGaIn/GaN методом ХГФЭ.// Тез.докл. IV Международной конференции "Химия высокоорганизованных веществ и научные основы нанотехнологии. С-Петербург. Россия. 2004. С. 305-306.

Подписано в печать 1.02.2005 г. Формат бумаги 60X84 1/16. Бумага офсетная.

Печать ризографическая. Объем 1 усл. п. л. Тираж 100 экз. Заказ 3476.

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии НИИХ СПбГУ
с оригинал-макета заказчика.

198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 26.

02.00

16 FEB 2005

99