



Вороненков Владислав Валерьевич

Оптимизация технологических условий
эпитаксиального роста толстых слоев нитрида галлия

Специальность 01.04.10 физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук,
профессор Юрий Георгиевич Шретер

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: Шретер Юрий Георгиевич,
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Юнович Александр Эммануилович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики полупроводников, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» г. Москва;
Кузнецов Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической химии ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург;

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург;

Защита состоится 18 декабря 2014 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, учебный корпус 4, ауд. 305.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» и на сайте <http://www.spbstu.ru/science/defences/details-0620.html>

Автореферат разослан « » ноября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.229.01, доктор технических
наук, профессор

Коротков Александр Станиславович



Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Нитрид галлия (GaN) – прямозонный полупроводник с шириной зоны при комнатной температуре 3,4 эВ и высокой подвижностью электронов [1]. Твердые растворы на основе нитрида галлия (InGaN, AlGaN) позволяют получить материал с шириной зоны от 0,7 эВ до 6,0 эВ, что определяет GaN как перспективный материал для создания светодиодов и лазеров, работающих в видимом и ультрафиолетовом диапазоне, а также силовых и сверхвысокочастотных (СВЧ) приборов.

Вследствие высокой стоимости и малого объема производства объемного GaN, большинство этих приборов выращиваются по эпитаксиальной технологии на подложках сапфира, кремния или карбида кремния. Слои GaN, полученные на таких инородных подложках, имеют высокую плотность дислокаций, что ухудшает параметры получаемых приборных структур: уменьшается время жизни лазеров [2] и силовых приборов, увеличиваются обратные токи диодов [3], падает быстродействие СВЧ приборов [4], ухудшается теплопроводность материала [5]. Использование “родственной” подложки GaN позволяет выращивать качественные приборные структуры, превосходящие по своим параметрам приборы, выращенные на чужеродных подложках [6, 7, 8]. Ужесточение требований к характеристикам и времени жизни приборов на основе GaN обострило интерес ко всем методам получения объемного GaN с низкой плотностью дислокаций.

По состоянию на сегодняшний день наилучшие результаты достигнуты в области хлорид-гидридной газофазной эпитаксии (ХГФЭ), аммонотермального метода и метода выращивания из раствора натрий-галлий [9, 10, 11].

Полученные методом ХГФЭ толстые слои позволили компании Sumitomo начать серийный выпуск синих лазеров – приборов, крайне требовательных к качеству подложки [12]. Наряду с этим, метод ХГФЭ позволяет получить достаточно высокую скорость роста, обычно порядка первых сотен микрон в час (заявлены скорости до 500 мкм/час [13] и до 1870 мкм/час [14]), что позволяет выращивать слои толщиной в несколько миллиметров [15]. Также методом ХГФЭ можно выращивать нитриды индия [16] и алюминия [17], твердые растворы $Al_xGa_{(1-x)}N$ и $In_xGa_{(1-x)}N$ с заданным составом [18], производить легирование n -типа [19] и p -типа [20], получать полуизолирующие компенсированные слои [21] и создавать приборные структуры [18]. Плотность дислокаций в кристаллах, выращенных методом ХГФЭ составляет порядка $10^5 \sim 10^6$ см⁻² при использовании подложки сапфира и может быть уменьшена до значений менее 10^3 см⁻² при использовании подложек, полученных выращиванием из жидкой фазы [22].

Таким образом, хлорид-гидридная эпитаксия является перспективным методом выращивания объемного GaN для изготовления подложек.

Основными проблемами, с которыми столкнулись исследователи при выращивании толстых слоев GaN методом ХГФЭ, являются образование на поверхности слоя макроскопических дефектов – ямок роста [23] и растрескивание слоя GaN в процессе роста



Рис. 1: Реактор для выращивания слоев нитрида галлия методом хлорид-гидридной газофазной эпитаксии.

из-за растягивающего ростового напряжения [24].

Цели диссертационной работы.

Группой исследователей, в которой участвовал автор данной работы, был разработан и построен ХГФЭ реактор, предназначенный для выращивания толстых слоев нитрида галлия на подложке диаметром 50 мм. Фотография реактора приведена на рис. 1. Целью данной работы было:

1. улучшить такие характеристики реактора, как однородность толщины получаемого слоя нитрида галлия по подложке и коррозионная стойкость ростовой камеры;
2. определить механизм возникновения ямок роста и предложить способы выращивания слоев нитрида галлия без ямок;
3. определить механизм возникновения растягивающего ростового напряжения и предложить пути его уменьшения.

Задачи диссертационной работы.

Достижение означенных целей потребовало решения следующих задач:

1. Создание программного пакета для расчета химического равновесия в многокомпонентной системе. Для того, чтобы можно было учитывать в расчете все участвующие в процессе вещества, включая материалы реактора и продукты их разложения, потребовалась разработка модифицированного алгоритма, обеспечивающего устойчивую сходимость в сложных задачах.
2. Создание численной модели реактора, и проверка того, верно ли эта модель описывает реальные процессы в реакторе.
3. Микроскопическое исследование морфологии поверхности слоев нитрида галлия, выращенных в ХГФЭ реакторе.
4. Микроскопическое исследование структуры трещин в слоях нитрида галлия, выращенных при различных параметрах ростового процесса.

Основные полученные в работе результаты:

1. Оптимизированы режимы работы ХГФЭ реактора: осаждения нитрида галлия, хлорирования галлия и очистки ростовой камеры. Подобраны материалы, наиболее устойчивые к атмосфере ХГФЭ реактора.
2. Определены причины возникновения ямок роста, предложены методы предотвращения образования ямок и описаны механизмы зарастания уже возникших ямок.
3. Определено влияние параметров ростового процесса на растрескивание слоев нитрида галлия. Предложены способы подавления растрескивания. Оптимизирован процесс самоотделения толстых слоев нитрида галлия от подложки.

Научная значимость работы:

1. Определены параметры процесса хлорид – гидридной газофазной эпитаксии нитрида галлия, при которых происходит переход от трехмерного режима роста к двумерному.
2. Определены параметры ростового процесса, влияющие на величину ростового напряжения. Предполагается, что механизмом возникновения растягивающего ростового напряжения при выращивании нитрида галлия методом хлорид–гидридной газофазной эпитаксии является поглощение точечных дефектов прорастающими дислокациями.

Практическая значимость:

1. Создан алгоритм нахождения химического равновесия в многокомпонентной системе, устойчиво сходящийся на задачах, возникающих при анализе процесса хлорид – гидридной газофазной эпитаксии.

2. Неоднородность толщины слоев нитрида галлия по подложке понижена с 30% до 5%.
3. Плотность V-образных ямок на поверхности слоев толщиной 2 мм понижена до 1 см^{-2} .
4. Предложен и апробирован ряд новых конструкционных материалов для использования в качестве арматуры в реакторах ХГФЭ.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Ростовое напряжение – механическое растягивающее напряжение, возникающее в слоях нитрида галлия в процессе выращивания на чужеродной подложке, увеличивается с повышением температуры подложки, уменьшением скорости роста, уменьшением угла среза подложки. При трехмерном режиме роста величина напряжения существенно ниже, чем при двухмерном режиме.
2. Наблюдается два режима роста нитрида галлия: двухмерный и трехмерный. Слои нитрида галлия, выращенные в двухмерном и трехмерном режимах, различаются шероховатостью поверхности, огранкой ямок роста и величиной ростового напряжения, причем при изменении режима роста скачкообразно изменяются все перечисленные параметры.
3. Переход от двухмерного режима роста нитрида галлия к трехмерному, происходит резко при плавном изменении температуры подложки T или скорости роста v . Граница между областями двухмерного и трехмерного режимов роста описывается следующим выражением: $v = v_0 \exp\left(-E\left(\frac{1}{kT} - \frac{1}{kT_0}\right)\right)$, где $E = 7.5 \pm 0.5 \text{ эВ}$, $v_0 = 100 \text{ мкм/час}$, $T_0 = 1320 \text{ К}$.

Степень достоверности и апробация диссертационной работы.

Теоретические расчеты, проведенные автором, основываются на хорошо известных методах химической термодинамики, гидродинамики и теории упругости и подтверждаются экспериментальными результатами, как приведенными в литературе, так и полученными автором. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях:

1. 219 ECS Meeting (Канада, Монреаль 2011),
2. VIII Всероссийской Конференции "Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы" (Санкт-Петербург 2011),
3. 4th International Symposium on Growth of III-Nitrides (Санкт-Петербург 2012),
4. International Workshop on Nitride Semiconductors 2012 (Япония, Саппоро 2012),
5. 8th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors (Германия, Зеон 2013).

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 6 статьях в рецензируемых изданиях и 11 тезисах докладов.

Личный вклад автора.

Вклад автора заключался в проведении теоретических расчетов, осуществлении микроскопических исследований морфологии образцов, анализе и обсуждении результатов исследований, представлении результатов на конференциях и семинарах, подготовке статей к публикации.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, пяти приложений, списка сокращений и списка литературы. Объем работы составляет 174 страницы, в том числе 80 рисунков и 7 таблиц. Список литературы включает 393 наименования.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цели работы, научная новизна и практическая значимость полученных в работе результатов, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена теоретическому анализу процессов, происходящих в ХГФЭ реакторе. Целью анализа было решение следующих основных задач:

1. В настоящее время в качестве переносчика галлия используется монохлорид галлия GaCl, получаемый в лодочке, расположенной внутри ХГФЭ реактора. Использование лодочки усложняет конструкцию реактора. Требовалось предложить способ получения хлоридов галлия вне реактора и доставки их в реактор по “теплым” (прогреваемым не более, чем до 200°C) трубам.
2. В ходе длительных ростовых процессов на деталях ростовой камеры реактора образуется поликристаллический осадок нитрида галлия. Требовалось разработать методику очистки деталей реактора от этого осадка.
3. Основным конструкционным материалом деталей высокотемпературной части практически всех, известных нам, ХГФЭ реакторов является кварц, которому присущи следующие недостатки: кварц реагирует с галлием, что приводит к загрязнению кремнием выращиваемых слоев нитрида галлия. Детали из кварца нежелательно нагревать выше 1100°C, что ограничивает температурный диапазон ростовых условий. Изготовление деталей сложной формы из кварца затруднительно, вследствие чего

конструкция ограничивается простыми формами. Для разработки реактора, пригодного для промышленной эксплуатации, ставилась задача подбора жаростойких, химически устойчивых, простых в обработке материалов для замещения кварца.

4. Неоднородность толщины выращенных слоев нитрида галлия составляла около 30%. Требовалось уменьшить неоднородность скорости осаждения до значений менее 10%.

В разделе 1.1 приводятся численные алгоритмы расчетов состояния равновесия. Использование стандартных алгоритмов обнаружило их плохую сходимость в задачах, возникающих при анализе ХГФЭ реактора. Для решения таких задач был разработан модифицированный, устойчиво сходящийся алгоритм.

В разделах 1.2–1.4, с использованием модифицированного алгоритма, анализируются процессы в лодочке, ростовой камере и выпускной части ХГФЭ реактора; рассматривается коррозионная стойкость различных материалов в среде ХГФЭ реактора.

Показано, что вынести источник галлия за пределы реактора можно, если для переноса галлия использовать трихлорид галлия GaCl_3 . Определены два режима хлорирования при которых основным продуктом является GaCl_3 : хлорирование при низкой температуре и хлорирование в избытке хлора.

Рассмотрены различные потенциальные травители для удаления поликристаллического осадка нитрида галлия. Оптимальным представляется использование хлористого водорода, в виду высокой летучести хлоридов галлия. Предложены два рецепта очистки ростовой камеры от паразитного осадка.

Рассмотрена коррозионная стойкость различных конструкционных материалов в атмосфере ХГФЭ реактора. Показано, что наряду с традиционным кварцем, в конструкции реактора целесообразно применять оксид алюминия, нитрид бора, молибден, вольфрам и металлы платиновой группы.

В разделе 1.5 рассмотрен процесс роста нитрида галлия в приближении локального термодинамического равновесия. Рассматриваются границы применимости такого приближения, и рассчитывается зависимость скорости роста GaN от температуры и состава газовой среды.

В разделе 1.6 приведен расчет течения газов в ХГФЭ реакторе. Рассчитано течение газов в ХГФЭ реакторе при типичном режиме эксплуатации. Обнаружено, что получению однородного осаждения препятствует естественная конвекция. Описаны несколько способов подавления естественной конвекции. Предложен оптимизированный режим, при котором пространственная неоднородность толщины слоя GaN уменьшена до 5%.

Во второй главе рассмотрены параметры, влияющие на качество получаемого слоя нитрида галлия.

В разделе 2.1 приведен обзор известных из литературы методов обработки подложки перед выращиванием GaN , позволяющих улучшить качество выращиваемого слоя. Описаны результаты наших опытов по выращиванию слоев на подложке сапфира, на подложке сапфира со слоем GaN , нанесенном методом МОГФЭ (так называемом “темплейте”), и на подложке сапфира с применением низкотемпературного буферного слоя GaN .

В разделе 2.2 описаны два режима роста GaN, двухмерный и трехмерный, и их зависимость от параметров ростового процесса. Выращенные в разных режимах слои различались шероховатостью поверхности, огранкой ямок роста, и величиной растягивающего ростового напряжения. Слои, выращенные в трехмерном режиме, имели шероховатую поверхность. Ямки роста в таких слоях имели форму перевернутого конуса с углом раствора более 80° градусов. Растрескивания слоев в процессе роста не наблюдалось. Слои, выращенные в двухмерном режиме имели гладкую поверхность. Ямки роста имеют форму шестигранной пирамиды с углом раствора от 57° до 60° градусов. В процессе роста в таких слоях образовывались трещины, что свидетельствует о растягивающем ростовом напряжении, величина которого превысила предел прочности нитрида галлия. Обнаружено, что тип режима – двухмерный или трехмерный, определяется температурой подложки и скоростью роста. Полученная зависимость режима роста от температуры и скорости роста приведена на рис. 2. Граница между областями двухмерного и трехмерного роста в координатах Аррениуса имеет наклон, соответствующей энергии активации 7.5 ± 0.5 эВ, и может быть описана эмпирическим выражением

$$v_{2D \rightarrow 3D} = v_0 \exp \left(-E \left(\frac{1}{kT_{2D \rightarrow 3D}} - \frac{1}{kT_0} \right) \right),$$

где $T_{2D \rightarrow 3D}$ и $v_{2D \rightarrow 3D}$ есть температура и скорость роста, при которых происходит переход, а $E = 7.5 \pm 0.5$ эВ, $v_0 = 100$ мкм/час, $T_0 = 1320$ К – экспериментально определенные параметры. Предложена модель, объясняющая различие свойств слоев, выращенных в разных режимах.

В разделе 2.3 описаны ямки роста – характерные дефекты на поверхности толстых слоев GaN. Приведен обзор работ, в которых изучались ямки роста. Описаны методы наблюдения ямок роста и подготовка образцов. Показано, что основными причинами возникновения ямок в процессе выращивания толстых слоев являются частицы нитрида галлия, образовавшиеся на деталях ростовой камеры реактора и упавшие на поверхность.

В третьей главе рассмотрена одна из ключевых проблем в технологии выращивания толстых слоев GaN – механические напряжения.

В разделе 3.1 рассмотрены основные механизмы возникновения напряжения при выращивании нитрида галлия на подложке сапфира. Особое внимание уделяется так называемому “ростовому” напряжению – растягивающему механическому напряжению, возникающему в слое нитрида галлия в процессе роста.

В разделе 3.2 приведены результаты исследования растрескивания слоев GaN в процессе ХГФЭ. На основе данных о типе и плотности трещин получена оценка абсолютной величины напряжения, имевшегося в слое нитрида галлия во время роста. Установлено, что в процессе роста в слоях GaN развивалось растягивающее напряжение, величина которого достигает 500 МПа. Определена зависимость напряжения от режима роста, температуры, скорости роста и угла среза подложки. Предполагается, что механизмом возникновения растягивающего напряжения в процессе выращивания слоя GaN является поглощение точечных дефектов прорастающими дислокациями, происходящее на поверх-

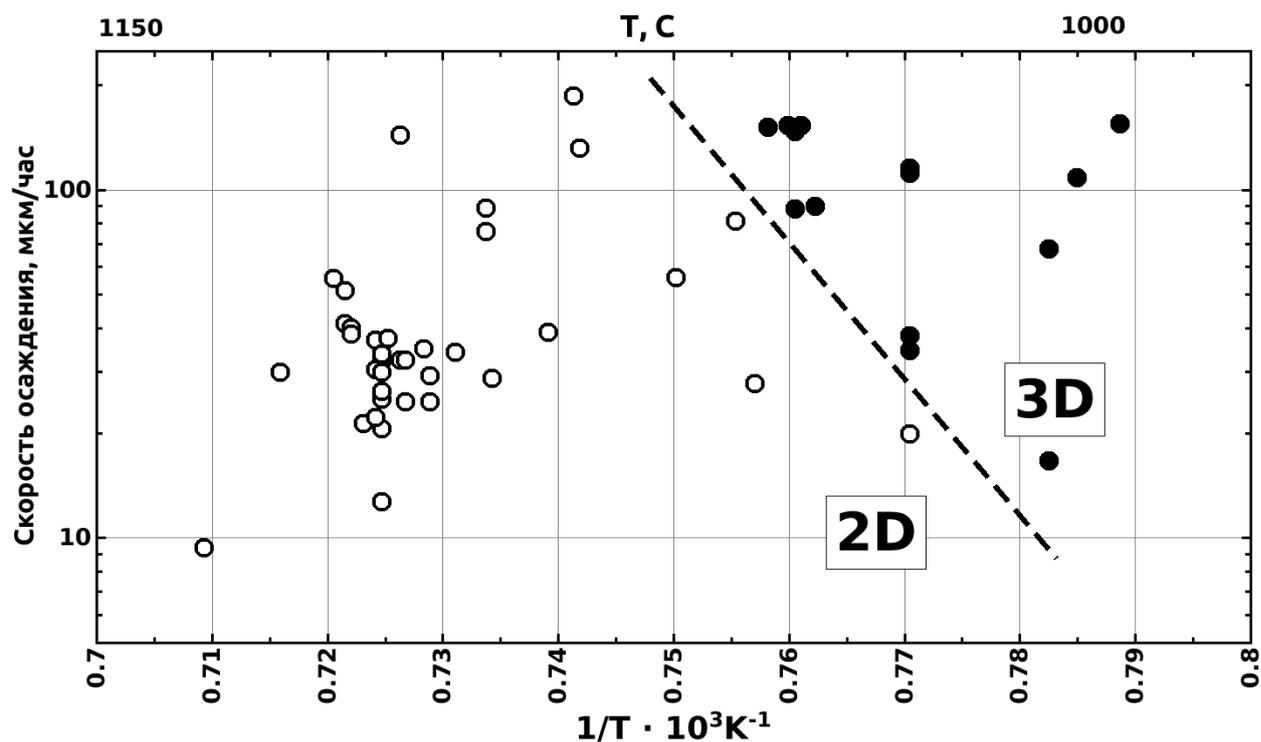


Рис. 2: Зависимость режима роста от температуры и скорости осаждения, построенная в координатах Аррениуса. Каждой точке на графике соответствует пленка, выращенная в отдельном ростовом эксперименте. Пленки с морфологией, соответствующей двумерному росту обозначены светлыми кружками, пленки с морфологией, соответствующей трехмерному росту обозначены темными кружками. Пунктирной линией обозначена предполагаемая граница между областями двумерного и трехмерного роста.

ности слоя и сопровождающееся переползанием дислокаций.

В разделе 3.4 рассмотрен метод уменьшения напряжения в слое GaN путем разделения слоя на механически несвязанные области. Показана эффективность такого подхода для уменьшения кривизны и предотвращения растрескивания в толстых слоях GaN, выращенных на подложке сапфира.

В разделе 3.5 проанализирован процесс самопроизвольного отделения объемного слоя GaN от подложки в процессе охлаждения. Одной из проблем такой технологии отделения подложки являлось раскалывание слоя GaN. Предложено несколько путей предотвращения раскалывания.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы:

- Исследована химическая термодинамика процессов, протекающих в ХГФЭ реакторе.
 - Для проведения термодинамических расчетов написана программа, реализующая метод итерационного уравнивания химических реакций.
 - Показано, что вынести источник галлия за пределы реактора можно, используя для переноса галлия его трихлорид GaCl₃. Показано два режима хлорирования для получения GaCl₃: хлорирование при низкой температуре и хлорирование в избытке хлора.
 - Предложена методика очистки деталей реактора от поликристаллического осадка GaN путем термического разложения GaN с последующим травлением образовавшегося металлического галлия при пониженной температуре.
 - Проанализирована химическая стойкость к атмосфере ХГФЭ реактора различных конструкционных материалов, выявлены возможные источники загрязнения, предложены более стойкие заменители.
- Проведен расчет полей температуры, скорости и концентраций реагентов в ХГФЭ реакторе. Показано, что неоднородность осаждения связана с возникновением естественной конвекции в ростовой камере. Подавление естественной конвекции позволило уменьшить неоднородность скорости роста до 5%.
- Исследованы слои GaN, выращенные в двухмерном и трехмерном режимах. Обнаружено, что выращенные в разных режимах слои различаются шероховатостью поверхности, огранкой ямок роста и величиной растягивающего ростового напряжения, причем при изменении режима роста скачкообразно изменяются все три перечисленных параметра слоя. Определены температура и скорость осаждения, при которых происходит изменение режима роста. Установлено, что скорость роста, при которой происходит переход от двухмерного режима роста к трехмерному, экспоненциально зависит от температуры.
- Исследованы ямки роста – V-образные дефекты на поверхности толстых слоев GaN. Показано, что при выращивании объемных слоев GaN методом ХГФЭ основными

причинами возникновения ямок роста являются частицы GaN, образовавшиеся на деталях ростовой камеры и упавшие на поверхность. Предлагается заравнивать ямки роста, для этого был изучен процесс зарастания ямок роста. Описано два механизма зарастания: зарастание при изменении механизма роста и зарастание при образовании быстрорастущей грани на дне ямки.

- Исследованы механические напряжения в слоях нитрида галлия на подложке сапфира. Показано, что основными механизмами возникновения напряжений при ХГФЭ нитрида галлия является так называемое ростовое напряжение – растягивающее напряжение, величина которого определяется следующими факторами: механизмом роста, температурой, скоростью роста, плотностью прорастающих дислокаций и углом среза подложки. Предполагается, что механизмом возникновения растягивающего ростового напряжения является поглощение точечных дефектов на прорастающих дислокациях. Кроме того, при охлаждении после роста возникает термическое напряжение, из-за различия коэффициентов термического расширения сапфира и нитрида галлия
- Разработана методика уменьшения напряжения при выращивании толстых слоев, путем разделения слоя на механически несвязанные области, размер которых сопоставим с толщиной подложки. Исследован и оптимизирован процесс самопроизвольного отделения толстого слоя GaN от подложки в процессе охлаждения. Основной проблемой при самопроизвольном отделении являлось раскалывание объемного слоя GaN. Показано, что предотвратить раскалывание можно, увеличив отношение толщины слоя GaN к толщине подложки.

В **Приложении А** для удобства читателя приведены основные понятия химической термодинамики.

В **Приложении В** описан предложенный в данной работе модифицированный алгоритм расчета химического равновесия.

В **Приложении С** приведен расчет деформации подложки с напряженным слоем, учитывающий нелинейные эффекты, возникающие при больших деформациях.

В **Приложении D** приведены использованные методы расчета коэффициентов диффузии и исходные данные.

В **приложении E** приведены некоторые свойства переходных металлов, использованные для оценки их пригодности в качестве конструкционного материала ХГФЭ реактора.

Список цитируемой литературы

- [1] Morkoc Hadis. General Properties of Nitrides // Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. — Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2009. — P. 1–129.
- [2] High-power GaN-based semiconductor lasers / M. Ikeda, T. Mizuno, M. Takeya et al. // Physica Status Solidi (c). — 2004. — Vol. 1, no. 6. — P. 1461–1467.

- [3] Electrical characterization of GaN p-n junctions with and without threading dislocations / P. Kozodoy, J.P. Ibbetson, H. Marchand et al. // *Applied Physics Letters*. — 1998. — Aug. — Vol. 73, no. 7. — P. 975–977.
- [4] Correlation of device performance and defects in AlGaIn/GaN high-electron mobility transistors / A.P. Zhang, L.B. Rowland, E.B. Kaminsky et al. // *Journal of Electronic Materials*. — 2003. — Vol. 32, no. 5. — P. 388–394.
- [5] Accurate dependence of gallium nitride thermal conductivity on dislocation density / C. Mion, J. F. Muth, E. A. Preble, D. Hanser // *Applied Physics Letters*. — 2006. — Vol. 89, no. 9. — P. 092123.
- [6] Optoelectronic devices on bulk GaN / S. Figge, T. Bottcher, J. Dennemarck et al. // *Journal of Crystal Growth*. — 2005. — Vol. 281, no. 1. — P. 101–106.
- [7] 1000V Vertical Jfet Using Bulk GaN / Quentin Diduck, Hui Nie, Brian Alvarez et al. // *ECS Transactions*. — 2013. — Vol. 58, no. 4. — P. 295–298.
- [8] Very high performance GaN-on-GaN diodes / I.C. Kizilyalli, A. Edwards, D. Bour et al. // *Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), 2013 IEEE Workshop on*. — 2013. — Oct. — P. 1–5.
- [9] GaN synthesis by ammonothermal method / R. Dwilinski, A. Wyszomolek, J. Baranowski et al. // *Acta Physica Polonica A*. — 1995. — Vol. 88, no. 5. — P. 833–836.
- [10] Preparation of GaN single crystals using a Na flux / H. Yamane, M. Shimada, S.J. Clarke, F.J. DiSalvo // *Chemistry of Materials*. — 1997. — Vol. 9, no. 2. — P. 413–416.
- [11] Ehrentraut Dirk, Meissner Elke, Bockowski Michal. *Technology of gallium nitride crystal growth*. — Springer, 2010. — Vol. 133.
- [12] Preparation of large freestanding GaN substrates by hydride vapor phase epitaxy using GaAs as a starting substrate / Kensaku Motoki, Takuji Okahisa, Naoki Matsumoto et al. // *Japanese Journal of Applied Physics*. — 2001. — Vol. 40. — P. 140.
- [13] Boule-like growth of GaN by HVPE / Eberhard Richter, Ute Zeimer, Frank Brunner et al. // *Physica Status Solidi (c)*. — 2010. — Vol. 7, no. 1. — P. 28–31.
- [14] Ultrahigh-speed growth of GaN by hydride vapor phase epitaxy / T. Yoshida, Y. Oshima, K. Watanabe et al. // *Physica Status Solidi (C)*. — 2011. — Vol. 8, no. 7-8. — P. 2110–2112.
- [15] Bulk GaN crystals grown by HVPE / Kenji Fujito, Shuichi Kubo, Hirobumi Nagaoka et al. // *Journal of Crystal Growth*. — 2009. — Vol. 311, no. 10. — P. 3011 – 3014.
- [16] Growth of InN by Chloride-Transport Vapor Phase Epitaxy / Haruo Sunakawa, Atsushi Yamaguchi, Akitaka Kimura, Akira Usui // *Japanese Journal of Applied Physics*. — 1996. — Vol. 35, no. Part 2, No. 11A. — P. L1395–L1397.

- [17] Chu T.L., Noreika A.J. Epitaxial growth of aluminum nitride // *Solid-State Electronics*. — 1967. — Vol. 10, no. 10. — P. 1023–1027.
- [18] Growth of submicron AlGa_N/Ga_N/AlGa_N heterostructures by hydride vapor phase epitaxy (HVPE) / D. Tsvetkov, Y. Melnik, A. Davydov et al. // *Physica Status Solidi (a)*. — 2001. — Vol. 188, no. 1. — P. 429–432.
- [19] Properties of Si-Doped Ga_N Layers Grown by HVPE / A. V. Fomin, A. E. Nikolaev, I. P. Nikitina et al. // *Physica Status Solidi (a)*. — 2001. — Vol. 188, no. 1. — P. 433–437.
- [20] Electrical and optical properties of thick highly doped p-type Ga_N layers grown by HVPE / A. Usikov, O. Kovalenkov, V. Soukhoveev et al. // *Physica Status Solidi (c)*. — 2008. — Vol. 5, no. 6. — P. 1829–1831.
- [21] Characteristics of semi-insulating, Fe-doped Ga_N substrates / Robert P. Vaudo, Xueping Xu, Allan Salant et al. // *Physica Status Solidi (a)*. — 2003. — Vol. 200, no. 1. — P. 18–21.
- [22] HVPE-Ga_N growth on ammonothermal Ga_N crystals / Tomasz Sochacki, Mikolaj Amilusik, Boleslaw Lucznik et al. // *SPIE OPTO / International Society for Optics and Photonics*. — 2013. — P. 86250B–86250B.
- [23] Paskova T., Goldys E.M., Monemar B. Hydride vapour-phase epitaxy growth and cathodoluminescence characterisation of thick Ga_N films // *Journal of Crystal Growth*. — 1999. — Vol. 203, no. 1. — P. 1–11.
- [24] Etzkorn E.V., Clarke D.R. Cracking of Ga_N films // *Journal of Applied Physics*. — 2001. — Vol. 89, no. 2. — P. 1025–1034.

Список публикаций автора по теме диссертации

- [1] Effect of growth parameters on stress in HVPE GaN films / A. Tsyuk, R. Gorbunov, V. Voronenkov et al. // ECS Transactions. — 2011. — Vol. 35, no. 6. — P. 73–81.
- [2] Two modes of HVPE growth of GaN and related macrodefects / V.V. Voronenkov, N.I. Bochkareva, R.I. Gorbunov et al. // Physica Status Solidi (c). — 2013. — Vol. 10, no. 3. — P. 468–471.
- [3] Nature of V-Shaped Defects in GaN / V. Voronenkov, N. Bochkareva, R. Gorbunov et al. // Japanese Journal of Applied Physics. — 2013. — Vol. 52, no. 8S. — P. 08JE14.
- [4] Thick GaN Films Grown on Patterned Sapphire Substrates / V. Voronenkov, R. Gorbunov, A. Tsyuk et al. // ECS Transactions. — 2011. — Vol. 35, no. 6. — P. 91–97.
- [5] Механические напряжения в плёнках нитрида галлия, выращенных на подложках с маской / В. В. Вороненков, А.И. Цюк, А.С. Зубрилов и др. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2011. — Т. 129, № 3. — С. 14.
- [6] Режимы роста нитрида галлия при хлоридгидридной газофазной эпитаксии / А.И. Цюк, В.В. Вороненков, Р.И. Горбунов и др. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2011. — Т. 129. — С. 10.