

Утверждаю  
и.о. проректора по научной работе

\_\_\_\_\_ С.В. Микушев

07 октября 2015 года

## **ОТЗЫВ**

ведущей организации

на диссертацию Вороненкова Владислава Валерьевича «Оптимизация технологических условий эпитаксиального роста толстых слоев нитрида галлия», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 «физика полупроводников».

### **Актуальности темы диссертации**

Нитрид галлия является перспективным материалом для создания светодиодов и лазеров, работающих в видимом и ультрафиолетовом диапазоне, а также силовых и сверхвысокочастотных (СВЧ) приборов. Сегодня большинство приборов на основе нитрида галлия выращивается на чужеродных подложках, что приводит к высокой плотности дефектов в получаемых приборных слоях. Повысить параметры и надежность приборов можно, используя подложки нитрида галлия с низкой плотностью дефектов. В настоящий момент основным методом производства таких подложек является хлорид—гидридная газофазная эпитаксия (ХГФЭ). Работа посвящена исследованию физических основ технологии выращивания толстых слоев нитрида галлия методом хлорид-гидридной газофазной эпитаксии, а также исследованию структуры и механизмов возникновения макродефектов в толстых слоях нитрида галлия.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертация изложена на 175 стр., хорошо иллюстрирована, содержит 3 главы с описанием оригинальных результатов и их обсуждением, обширный список литературы из 394 наименований, охватывающий всю историю и достижения в получении и исследовании

кристаллического нитрида галлия, а также 5 приложений с необходимыми формулами, расчетами и табличными данными, использованными в работе.

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. Описаны численные алгоритмы расчетов состояния равновесия, использованные автором. Произведен расчет процессов в лодочке, ростовой камере и выпускной части ХГФЭ реактора; рассмотрена коррозионная стойкость различных материалов в среде ХГФЭ реактора.

Во **второй главе** исследовано влияние параметров ростового процесса на качество получаемого слоя нитрида галлия. Описаны два режима роста GaN – двумерный и трехмерный и их зависимость от параметров ростового процесса. Предложена модель, объясняющая различие свойств кристаллических слоев, выращенных в разных режимах.

Исследованы причины возникновения и механизмы зарастания ямок роста – макроскопических дефектов на поверхности толстых слоёв нитрида галлия. 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** рассмотрены механические напряжения, возникающие при выращивании GaN на чужеродных подложках. Исследована зависимость величины растягивающего ростового напряжения от режима роста, температуры, скорости осаждения, угла среза подложки. Предложено, что механизмом возникновения растягивающего напряжения в процессе выращивания слоя GaN является поглощение точечных дефектов прорастающими дислокациями, происходящее на поверхности слоя и сопровождающееся переползанием дислокаций.

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

В **Заключении** диссертационной работы сформулированы **основные результаты и выводы**.

**Основные научные результаты, имеющие существенную новизну, заключаются в следующем:**

1. Обнаружено два режима роста нитрида галлия, различающиеся шероховатостью поверхности, огранкой ямок роста и величиной механического напряжения. Обнаружено, что тип режима определяется температурой подложки и скоростью осаждения, причём переход от одного режима к другому происходит скачкообразно при малом изменении температуры или скорости осаждения.
2. Установлено, что величина ростового напряжения – растягивающего механического напряжения, возникающего в процессе роста слоев GaN, зависит от температуры подложки, скорости осаждения, плотности дислокаций и угла среза подложки. Предложен механизм возникновения ростового напряжения, состоящий в поглощении сверхравновесных точечных дефектов прорастающими дислокациями.
3. Показано, что основными причинами возникновения ямок роста при выращивании объемных слоев GaN методом ХГФЭ являются посторонние частицы и растрескивание. Обнаружены два механизма зарастания ямок: путем изменения механизма роста с двумерного на трехмерный и путем образовании быстрорастущей грани на дне ямки.

**Практическая значимость результатов состоит в следующем:**

1. Предложен улучшенный алгоритм проведения термодинамических расчетов, на основе которого создан программный пакет, позволяющий рассчитывать состояние химического равновесия в многокомпонентной системе.
2. Проанализирована химическая стойкость различных конструкционных материалов в условиях хлорид-гидридной газофазной эпитаксии, выявлены возможные источники загрязнения, предложены более стойкие заменители.
3. Показано, что неоднородность осаждения связана с возникновением естественной

конвекции в ростовой камере. Неоднородность скорости роста по площади подложки, имеющей диаметр 50 мм, уменьшена до 5%.

4. Предложена методика, позволяющая выращивать толстые слои нитрида галлия с низкой плотностью ямок роста.
5. Предложен метод уменьшения механического напряжения путем выращивания пленки, разделённой на механически несвязанные области.

#### **Достоверность результатов и выводов диссертации:**

Достоверность теоретических расчетов, произведённых автором, основывается на хорошо известных методах химической термодинамики, гидродинамики и теории упругости и подтверждаются экспериментальными результатами, как приведенными в литературе, так и полученными автором. Экспериментальные результаты по исследованию процессов роста и возникновения дефектов и напряжений получены с помощью хорошо апробированных методов. Выводы о механизмах протекающих процессов являются внутренне непротиворечивыми и согласуются с данными других авторов.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1. Диссертационная работа хорошо написана и логически выстроена. Вместе с тем, некоторые формулировки представляются не вполне удачными. Так, положения, изложенные автором под названиями «Основные... результаты», « Научная значимость» и «Практическая значимость» следовало бы распределить иначе, чем это сделано в диссертации. Так, например, положения «Оптимизированы режимы...», «Определены причины...» относятся на наш взгляд к практической значимости, а «Определены параметры перехода от трехмерного режима роста к двумерному» – к одному из основных результатов по заявленной специальности 01.04.10. Название диссертации «Оптимизация технологических условий...», большая часть которой посвящена изучению процессов роста кристаллов полупроводникового нитрида

галлия, также следовало приблизить к ее физическому содержанию.

2. Один из интересных и важных результатов работы был получен при исследовании ростовых напряжений. В диссертации описана модель, объясняющая их появление поглощением сверхравновесных вакансий ростовыми дислокациями. При этом неявно предполагается, что должны возникать вакансии в обеих подрешетках GaN. Однако механизм появления указанных вакансий остался, к сожалению, без обсуждения.
3. Другим впечатляющим результатом является обнаружение резкого перехода между двумя режимами роста на «фазовой» диаграмме температура/скорость роста. Очевидно, что величина температуры является весьма важным параметром, однако представленная в диссертации информация недостаточна для оценки погрешностей ее экспериментального определения.

Сделанные замечания не ставят под сомнение основные результаты и выводы диссертации и не снижают общую положительную оценку работы в целом. Диссертация Вороненкова В.В. является завершенным научным исследованием, выполненным автором на высоком экспериментальном и научном уровне. Автореферат и публикации полно и правильно отражают содержание диссертации и ее основные положения и выводы.

Таким образом, по объему, научной новизне, практическому значению и достоверности диссертационная работа Вороненкова В.В. «Оптимизация технологических условий эпитаксиального роста толстых слоев нитрида галлия» полностью отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Автор диссертации Вороненков Владислав Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Отзыв заслушан и обсужден на совместном семинаре сотрудников кафедр фотоники,

электроники твердого тела и физики твердого тела Физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета 6 октября 2015 года .

**Отзыв составил**

Заведующий кафедрой физики твердого тела

Физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета

доктор физико-математических наук, профессор

---

Вадим Фадеевич Агемян

Адрес: Санкт-Петербург 198504, Петергоф ул. Ульяновская д. 3 Физический факультет СПбГУ

Телефон: (812)-428-4545

e-mail: v.agekyan@spbu.ru