

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физ.-мат. наук,
профессора **Александра Эммануиловича ЮНОВИЧА**

о кандидатской диссертации **Владислава Валерьевича ВОРОНЕНКОВА**
**«Оптимизация технологических условий эпитаксиального роста толстых слоев
нитрида галлия»**

Нитрид галлия, GaN, за последние два десятилетия стал одним из основных материалов полупроводниковой оптоэлектроники и перспективным материалом силовой и высокочастотной электроники. Особо важно применение GaN для эффективных светодиодов, являющихся основой освещения будущего. Работа В.В.Вороненкова посвящена выращиванию объемных слоев GaN, которые позволяют выращивать структуры с малой плотностью дефектов и дислокаций. Поэтому тема диссертации является актуальной и с научной, и с практической точки зрения.

Диссертация содержит 175 стр., включающих 80 рисунков, 7 таблиц., 394 ссылки на литературу. Она разделена на введение, 3 главы, заключение и 5 приложений.

Во **введении** сформулирована основная цель работы: повышение качества толстых слоев нитрида галлия, выращиваемых методом хлорид – гидридной газофазной эпитаксии.

В **первой главе** проведен термодинамический и гидродинамический расчет процессов в реакторе для хлорид—гидридной газофазной эпитаксии. Особое внимание уделено анализу коррозионной стойкости конструкционных материалов в зависимости от температуры и состава реагентов; подобраны химически стойкие материалы для изготовления различных элементов ростовой камеры реактора. Численный расчет течения газов показал, что причиной неоднородной толщины осажденного слоя является свободная конвекция газов, вызванная как неоднородным прогревом ростовой камеры, так и различием плотности газов, подаваемых в ростовую камеру. Показано, что при подавлении свободной конвекции неоднородность толщины слоев уменьшается до 5%. **Замечание:** В выводах к главе 1 нет указания конкретных оптимизированных условий, при которых был получен результат, показанный на рис. 35 на стр. 56.

Во **второй главе** исследовано влияние параметров ростового процесса на морфологию толстых слоёв GaN. Обнаружено два различных типа морфологии, которые различаются шероховатостью поверхности, огранкой дефектов и величиной встроенного механического напряжения. Эти различия соответствуют послойному (двумерному) и трехмерному механизмам роста кристалла. Особое внимание уделено V-образным ямкам – характерным макроскопическим дефектам на поверхности толстых слоев GaN.

Определены основные причины появления ямок в процессе выращивания толстых слоев: дефекты и загрязнение подложки; частицы GaN, образующиеся на деталях ростовой камеры и падающие на поверхность растущего слоя; растрескивание слоя GaN, вызванное растягивающим напряжением. Обнаружено два механизма зарастания ямок: смена трехмерного механизма роста на двумерный, и образование быстрорастущей высокоугловой грани на дне ямки. Следует заметить, что анализ перехода от двумерного роста к трехмерному при различных температурах и скоростях осаждения сделан на основе более 50 ростовых экспериментов (рис. 42). Показано, что плотность макроскопических дефектов может быть уменьшена до 1 см^{-2} устранением указанных выше дефектов и загрязнений и использованием процессов зарастивания ямок. **Замечание:** В выводах к главе 2 нет указания конкретных условий, при которых был получен результат о слоях GaN с пониженной плотностью ямок роста на поверхности, показанный на рис. 61 на стр. 90.

В третьей главе рассмотрены механические напряжения, сопровождающие процесс выращивания GaN. Проанализированы данные о структуре и плотности трещин в выращенных слоях GaN, исследована зависимость величины встроенного механического напряжения от параметров ростового процесса.

Показано, что величина встроенного напряжения зависит от плотности прорастающих дислокаций; механизма роста; температуры и скорости осаждения; угла среза подложки. На основании этого сделано заключение, что механизмом возникновения встроенного напряжения является поглощение точечных дефектов прорастающими дислокациями. Исследовано распределение напряжений в толстом слое GaN на подложке сапфира, и предложен способ уменьшения напряжения путем деления слоя на механически несвязанные области.

В заключении сформулированы главные результаты диссертации. Получены важные сведения о процессе кристаллизации GaN: установлено влияние механизма роста на морфологию слоя, определен механизм образования встроенного растягивающего напряжения, описан процесс возникновения и зарастания ямок роста. Проведенные исследования позволили улучшить технологию выращивания и получить слои с неоднородностью толщины, уменьшенной до 5%, плотностью макроскопических дефектов менее 1 см^{-2} , без трещин. Эти слои можно использовать как подложки для эпитаксиального роста приборных гетероструктур. **Замечание (точнее – пожелание):** В заключении было бы полезно описать опыты применения полученных толстых слоев GaN для выращивания приборных гетероструктур.

Следует отметить обширный и подробный список литературы, включающий 394 ссылки на отечественных и зарубежных авторов. **Замечание:** К сожалению, в диссертации

нет списка докладов, опубликованных автором на различных конференциях и семинарах.

В пяти приложениях к диссертации описаны подробности расчетов термодинамического и химического равновесия в рассмотренных многокомпонентных системах, напряжений и деформаций в подложке и пленке.

В целом работа В.В.Вороненкова представляет законченное экспериментальное исследование, подкрепленное теоретическими расчетами. Она содержит новые результаты, важные для совершенствования технологии выращивания толстых слоев нитрида галлия.

Диссертация написана ясным языком и хорошо оформлена. Некоторые опечатки указаны автору. Содержание диссертации известно по 6 статьям автора в отечественных и зарубежных журналах и докладам на международных и всероссийских конференциях. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

Считаю, что работа соответствует требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор – Владислав Валерьевич ВОРОНЕНКОВ - заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 (физика полупроводников).

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук,

профессор физического факультета

Московского Государственного Университета имени М.В.Ломоносова

30.11.2015.

Александр Эммануилович ЮНОВИЧ.

Электронная почта: yunovich@phys.msu.ru (работа) yunovich-a@mail.ru (дом.).

Телефоны: 8-495-939-2994 (лаборатория); 8-906-759-6881 (моб.).

Адрес: Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова (МГУ)

Физический факультет

Ленинские горы, Москва, ГСП-1, 119991,

Дом 1, стр. 2

Декан Физического Факультета МГУ

Профессор

Н.Н.СЫСОЕВ