

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. КУЗНЕЦОВА Владимира Владимировича на диссертационную работу 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.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Выбор в качестве объекта исследования нитрида галлия, являющегося базовым материалом новых светотехнических устройств, обосновывает очевидную актуальность представляемой работы. Действительно спектр применения нитридов A^3B^5 весьма широк: светодиоды сине-зеленой области видимого спектра и светодиоды ближнего ультра-фиолетового диапазона. активные среды лазерных диодов, элементная база силовой и СВЧ-электроники. В то же время GaN с технологической точки зрения материал весьма проблемный: недостоверность сведений по механизму зародышеобразования и роста приводит к нестабильности технологического процесса получения эпитаксиальных слоев с заданными свойствами. Поставленная перед автором задача совершенствования технологических условий эпитаксиальной кристаллизации GaN представляется нам современной и важной.

НОВИЗНА ИССЛЕДОВАНИЙ И НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Главные научные результаты, полученные диссертантом, можно сформулировать в виде следующих положений:

- Переход механизма зарождения и роста эпитаксиального GaN от двухмерного к трехмерному определяется конкуренцией между термодинамическими условиями синтеза, кристаллохимическими свойствами подложки и кинетическими параметрами эпитаксиального процесса.
- Внутренние растягивающие напряжения при двухмерном зародышеобразовании выше растягивающих напряжений трехмерного зародышеобразования для гетероэпитаксиального GaN.

- Уменьшение дефектообразования в пленках нитрида галлия возможно за счет понижения энергетического барьера между двумерным и трехмерным механизмами зарождения и роста при управляемом переходе от трехмерного к двумерному в процессе ХГФ эпитаксии.

Переходя к общей оценке работы считаем необходимым отметить следующее. Представляемая работа характеризуется четкой предметной ориентацией – хлорид-гидридная газофазная гетероэпитаксия нитрида галлия на сапфире. Целевая направленность – численное моделирование процессов хлорид-гидридной ГФЭ на основе минимизации изобарно-изотермического потенциала многокомпонентной системы и последующее объяснение процесса гетероэпитаксиального осаждения GaN для совершенствования технологии прогнозируемого синтеза.

На наш взгляд диссертант вполне справился с этими непростыми задачами.

Автором рассчитаны и построены зависимости основных характеристик эпитаксиальных слоев от технологических параметров: парциального давления и скорости потока реагентов. Проведен расчет и анализ тепловых полей и концентрационного распределения основных реагентов в ростовой камере для типичных режимов хлорид-гидридной ГФЭ эпитаксии. Определены условия предотвращения паразитных реакций в разных частях реакционной зоны ректора при синтезе GaN методом ХГФЭ.

Изучены механизмы зародышеобразования и роста эпитаксиального GaN. Определена энергия активации процесса перехода от двумерного механизма зарождения и роста к трехмерному, которым можно управлять технологическими параметрами синтеза. Эффектным доказательством обнаруженных механизмов роста служит результат проведения ХГФЭ GaN в условиях поверхностного градиента температур.

Исследован характер возникновения и релаксации напряжений в гетероструктурах GaN/Al₂O₃(сапфир) в зависимости от параметров технологического процесса. Весьма интересны описание и анализ причин появления V-образных макродефектов на поверхности растущего слоя, так называемых ямок роста. Предложены и реализованы на практике способы уменьшения плотности ямок роста в толстых гетероэпитаксиальных слоях GaN.

СТЕПЕНЬ ОБОСНОВАННОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЙ.

Обоснованность выводов и заключений диссертанта основывается на корректной постановке задачи, методической проработке порядка и последовательности исследований. Тщательное описание применяемых методов исследований не вызывает нареканий. Автором выполнен большой объем термодинамических расчетов как для обоснования и совершенствования эпитаксиального процесса, так и для определения стойкости конструкционных материалов реактора в атмосфере для хлорид-гидридной эпитаксии. Результаты расчетов использованы для совершенствования технологических режимов эпитаксиального процесса.

Вместе с тем, с некоторыми выводами и заключениями автора можно не согласиться. Так, один из выбранных параметров эпитаксиального осаждения – скорость кристаллизации – не является задаваемым, а определяется в свою очередь температурой процесса, парциальным давлением компонентов, геометрией реактора и проч., т.е. не может быть использован в качестве исходного технологического параметра. Не приведено обоснование возможности применения теории Гриффитса для объяснения трещинообразования в пленках GaN. Как известно, теория Гриффитса основана на представлении о зарождении трещин в условиях упругой деформации и не учитывает возможной пластической деформации перед разрушением. Для роста трещины нужна высокая плотность только одноименных дислокаций. Нельзя считать удачным введение автором понятия «ростовое напряжение». По тексту работы автор относит к ростовому напряжению напряжения разной природы, как внутренние – дислокационное, концентрационное, термическое, так и внешние – напряжение темплетта, напряжения индуцированные подложкой и т.д. Разная природа напряжений в кристаллической гетероструктуре определяет и разный механизм релаксации упругих напряжений при переходе системы в низкоэнергетическое состояние. Упругая релаксация напряжений в гетеропаре может приводить к упругому изгибу гетероструктуры, что и наблюдал автор работы. Различие в симметрии структур подложки и слоя, которое имеет место в системе GaN/Al₂O₃, не позволяет априори предсказать порядок возникновения межфазных дефектов. В этом случае для определения конечного состояния в процессе релаксации толстослойной гетеросистемы целесообразно применить геометрическую теорию решеток совпадающих узлов.

Вызывают досаду встречающиеся в работе терминологическая

неряшливость и языковая небрежность. («эпитаксиально ориентированные пленки?») «встроенные напряжения» с.92. «удельная энтальпия... вместо мольной...») и т.д.

ЗНАЧИМОСТЬ ДЛЯ НАУКИ И ПРАКТИКИ ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ ДИССЕРТАНТА

Проблемы, затронутые автором, тесно связаны с применением их в области современных высоких технологий. Еще раз доказана эффективность эпитаксиальных методов получения полупроводниковых пленок. В работе сделан серьезный шаг на пути к реализации получения толстых эпитаксиальных слоев нитрида галлия высокого структурного совершенства с прогнозируемыми свойствами.

Результаты диссертационной работы представляют интерес для использования в учреждениях РАН, на предприятиях электронной промышленности, также для организаций, специализирующихся на создании и применении приборов полупроводниковой оптоэлектроники: ФГУП «НИИ «Полюс» (Москва), ФГУП «НПО» Орион» (Москва), «ГИРЕДМЕТ» и др.

СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫМ К ДИССЕРТАЦИЯМ

Оценивая работу в целом, можно сказать, что она представляет собой законченное научное исследование; методы исследования современны и соответствуют поставленной задаче. Личное участие автора в работе заключается в проведении теоретических расчетов, осуществлении микроскопических исследований образцов эпитаксиального нитрида галлия, последующей интерпретации экспериментальных данных, выявлении закономерностей и формулировке основных результатов.

Основные положения диссертации изложены в 11 докладах на всероссийских и международных конференциях, и опубликованы в 6 статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Диссертация Вороненкова В.В. является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований представлены рекомендации по совершенствованию технологии выращивания толстых слоев нитрида галлия. Получены слои с неоднородностью по толщине не выше 5% и плотностью макродефектов менее 1 см^{-2} .

Считаю, что диссертационная работа Вороненкова В. В. «Оптимизация технологических условий эпитаксиального роста толстых слоев нитрида галлия», удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденных правительством Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г (пп. 9 – 14), а ее автор Вороненков Владислав Валерьевич заслуживает присуждения искомой степени по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Официальный оппонент – доктор
физико-математических наук, профессор
кафедры физической химии
Санкт-Петербургского государственного
электротехнического университета

КУЗНЕЦОВ В.В.

197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)
тел. +7 (812) 346-17-23
факс: +7 (812) 346-27-58
E-mail: vvkuznetsov@inbox.ru
<http://www.eltech.ru/>

Подпись Кузнецова В.В. "ЗАВЕРЯЮ"
Начальник ОДС

Русяева Т. Л.