



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)



УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов

20 25 г.

М.П.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук на диссертацию Радам Али Обайд Радам **«Субструктура и оптические свойства эпитаксиальных наноклончатых гетероструктур GaN/AlGaN/GaN, сформированных на гибридных подложках SiC/porSi»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников

Актуальность диссертации связана с решением проблемы создания интегрированных структурно-совершенных гетероструктур $A_{III}N/Si$. Интеграция удивительных характеристик полупроводниковых соединений группы GaN и передовых технологий кремниевой электроники является ключом к производству коммерчески-выгодных эпитаксиальных гетероструктур и приборных решений нового поколения на их основе. Однако проблемы роста высококачественных слоев $A_{III}N$ на наиболее доступных для производства изделий микроэлектроники кремниевых подложках, связанных с значительными различиями в параметрах кристаллических решеток и коэффициентах теплового расширения, все еще преодолеваются исследователями с использованием различных технологических подходов. Разработка и использование гибридных подложек, включающих пористый кремний и карбид кремния (SiC/por-Si) представляет собой

инновационный подход интегрирования оптических функциональных элементов Al_xN с кремниевой подложкой. Изучение субструктуры, морфологии, распределения дефектов и оптических характеристик таких систем имеет высокую значимость для развития технологий для задач оптоэлектроники, фотоники и сенсорики.

Диссертация Радам Али Обайд Радам посвящена комплексному исследованию нанокolonчатых гетероструктур $\text{GaN}/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на гибридных подложках SiC/porSi . Автором детально изучены взаимосвязи между параметрами роста, субструктурой, морфологией и оптическими характеристиками, что позволяет по-новому взглянуть на проблему инженерии гетероэпитаксиальных систем.

Для определения особенностей эпитаксиального синтеза ультратонких нанокolonчатых AlGaIn/GaN наногетероструктур на гибридных подложках, включающих в себя слои SiC и porSi и без использования толстых буферных, в диссертации был проведен целый комплекс исследований:

- 1) Определение кристаллического состояния эпитаксиальных слоев GaN и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ в составе тонкопленочной нанокolonчатой гетероструктуры, выращенной на разнородных кремниевых подложках, в том числе гибридной, имеющей в своем составе нанослой 3C-SiC , сформированный методом атомного замещения на подслое пористого кремния porSi .
- 2) Установление направлений преимущественной ориентации роста кристаллических блоков/нанокolonнок в эпитаксиальных гетероструктурах и определение дисперсии их разориентации в зависимости от типа использованной для их роста подложки;
- 3) Определение типа и величины плоскостной ϵ_{xx} и внеплоскостной ϵ_{zz} деформаций в эпислеях GaN и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ сформированных на различных разнородных подложках, а также уровень остаточных напряжений в слоях.
- 4) Исследование оптических свойств нанокolonчатых структур $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, выращенных на различных подложках.
- 5) Определение ширины запрещенных зон в эпитаксиальных нанослоях GaN и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с учетом остаточных упругих напряжений и их релаксации.

Обширный спектр исследований позволил расширить фундаментальные представления об особенностях формирования, микроструктуре и оптических свойствах эпитаксиальных наноклончатых гетероструктур GaN/AlGaN/GaN, выращенных на гибридных кремниевых подложках SiC/porSi, и влиянии типа подложки на уровень остаточных напряжений в эпитаксиальных слоях.

Таким образом, результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы для разработки и оптимизации технологических режимов роста нитрид-галлиевых наногетероструктур на гибридных кремниевых подложках, что делает представленную работу **актуальной**.

Основные результаты, их новизна, научная и практическая значимость.

Положения, выносимые автором на защиту, и основные научные результаты получены впервые и являются оригинальными. Они вносят вклад в решение задач по установлению взаимосвязи между составом, электронным строением, оптическими и электрическими свойствами эпитаксиальных $A_{III}N$ наногетероструктур и параметрами их синтеза и, как следствие, добиться уникальных оптических и электрофизических характеристик.

В диссертации Радам Али Обайд Радам получил ряд новых результатов, представляющих научный и практический интерес, среди которых следует отметить следующие:

- Определено, что сформированная на гибридной подложке SiC/porSi наноклончатая гетероструктура GaN/AlGaN/GaN имеет преимущественную ориентацию роста в направлении [111] и имеет относительно направления роста наименьшую дисперсию разориентации кристаллитов в эпитаксиальной пленке, рассчитанную из рентгеновских кривых качания.
- Установлено, что эпитаксиальные слои GaN и AlGaN в составе тонкопленочной наноклончатой гетероструктуры кристаллизуются в гексагональную структуру с решеткой вюрцита, в то время как сформированный на кремниевой подложке методом атомного замещения нанослой SiC имеет симметрию кубического политапа 3C-SiC.
- На основании расчета величин плоскостной ϵ_{xx} и вне-плоскостной ϵ_{zz} деформаций из результатов рентгеновской дифрактометрии, показано, что биаксиальные деформации

в слоях GaN и AlGaN в плоскости роста являются растягивающими, в то время как в направлении роста являются сжимающими.

- Определено, что нанокolonчатые слои GaN и AlGaN, выращенные на податливой гибридной подложке SiC/porSi, имеют наименьший уровень остаточной двуосных напряжений, который в два раза ниже, чем в гетероструктуре, выращенной на кремниевой подложке cSi.
- Установлено, что интенсивность фотолуминесценции от наногетероструктуры, выращенной на податливой гибридной подложке SiC/porSi, более чем в 3 раза выше, чем от структуры, выращенной на подложке cSi, и почти в 2 раза чем ФЛ структуры на подложке SiC/cSi.

Полученные экспериментальные данные серьезного объема с использованием разносторонних физических методов и установленные на их основе закономерности важны для понимания физики и технологии AlGaN/GaN наногетероструктур и будут способствовать их потенциальному применению в оптоэлектронике.

Результаты диссертации могут быть полезными для организаций, занимающихся как созданием новых устройств микро и оптоэлектроники, так и их изучением. Среди таковых можно отметить ЗАО «Светлана-Рост» (г. Санкт-Петербург), АО «НИИЭТ» (г. Воронеж), ННГУ им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород), и другие.

Общие замечания по диссертации:

К диссертационной работе имеется ряд замечаний. По существу диссертационной работы можно выделить следующее:

1. В составе описанной в работе гибридной подложки одним из слоев является сформированный методом атомного замещения карбид кремния кубической модификации (3C-SiC). Однако есть лишь упоминание метода формирования без каких-либо деталей.
2. Представленные в диссертационной работе данные сканирующей электронной микроскопии, не в полной мере демонстрирует кристаллическое качество сформированных нанокolonчатых GaN/AlGaN/GaN гетероструктур. Подтверждение качества нанокolonнок должно быть дано методом просвечивающей электронной микроскопии.

3. Почему остаточные упругие напряжения в наноклончатых структурах (пленках), выращенных на гибридных подложках SiC/porSi, значительно ослабевают? Объяснение этого механизма отсутствует в диссертационной работе.
4. Гетеропара AlGaN/GaN является основным компонентом НЕМТ. Однако в работе не представлена информация о двумерной концентрации электронного газа в гетеропереходе и влиянии типа подложки на эту величину.
5. В тексте диссертации присутствуют орфографические и грамматические ошибки, имеются замечания к оформлению графиков, в подписях осей которых присутствуют надписи на английском языке.

Отмеченные замечания не снижают общей высокой оценки большого объема проведенной экспериментальной и теоретической работы, качества ее апробации и не влияют на общую положительную оценку работы и достоверность сделанных выводов.

Приведенные в диссертации результаты, сделанные выводы и выдвигаемые на защиту положения соответствуют научной специальности 1.3.11 – Физика полупроводников. Автореферат диссертации полно отражает её содержание, а положения, выносимые на защиту, соответствуют основным результатам работы.

Заключение

Диссертация Радам Али Обайд Радам «Субструктура и оптические свойства эпитаксиальных наноклончатых гетероструктур GaN/AlGaN/GaN, сформированных на гибридных подложках SiC/porSi» представляет собой законченное исследование ультратонких эпитаксиальных пленок GaN/AlGaN/GaN, выращенных на гибридных подложках, включающих в себя слои SiC и porSi без использования толстых буферных/переходных слоев.

Научные результаты, впервые полученные автором, имеют значение для физики полупроводников, важны для понимания механизмов формирования многослойных наногетероструктур на гибридных подложках и их влияния на физические свойства данных структур. Основные результаты диссертации докладывались на международных и национальных научных конференциях и семинарах. Представленные в диссертационной работе основные результаты и выводы обладают **научной аргументацией, практической значимостью**

полученных результатов, подкреплены как экспериментальными данными, так и сопоставимостью с результатами других работ, представленных данными, опубликованными в ведущих отечественных и зарубежных изданиях.

Работа содержит достаточное количество иллюстраций, что облегчает восприятие результатов и подтверждает сделанные выводы.

В целом, представленный в диссертационной работе материал хорошо представлен и последовательно изложен. Каждая глава завершается выводами, акцентирующими внимание на основных положениях, представленных к защите.

Диссертация представляет самостоятельный труд, дающий полное представление, как о состоянии проблемы влияния контроля остаточных напряжений в эпитаксиальном слое, типа и распределения дефектов, которые могут оказывать негативное воздействие на структурные, электронные и оптические свойства гетероструктур $A_{III}N/Si$, а также снижать долговечность приборных решений. Структура, содержание и оформление диссертации и автореферата отвечают требованиям нормативных документов, а тема диссертации полностью соответствует выбранной научной специальности. Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертации.

Радам Али Обайд Радам имеет 12 научных работ по теме диссертации, из которых 7 статей в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ и включенных в международные базы данных Scopus и Web of Science. Результаты работы докладывались на Всероссийских и Международных научно-технических конференциях.

По объёму выполненной работы, актуальности полученных результатов, новизне и значимости основных положений, выносимых на защиту, диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе критериям, установленным п.9-11, 13, 14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г. (с изменениями постановления Правительства Российской Федерации от 11 сентября 2021 г. №1539), а её автор,

Радам Али Обайд Радам, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Диссертационная работа, автореферат и отзыв на диссертацию Радам Али Обайд Радам рассмотрены и одобрены на семинаре Центра физики наногетероструктур Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе «14» июля 2025 года.

Отзыв подготовил руководитель Центра физики наногетероструктур Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, к.ф.-м.н. по специальности 01.04.10. Физика полупроводников.

Пихтин Никита Александрович



Подпись Пихтина Н.А. заверяю
Заведующий отделом кадров



Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Почтовый адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Электронная почта: post@mail.ioffe.ru

Факс: (812) 297-1017

Телефон: (812) 297-2245