

ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертационную работу 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.

Научная работа Радам Али Обайд Радам посвящена исследованию и анализу структурных, морфологических и оптических свойств наноклончатых полупроводниковых систем GaN/AlGa/GaN, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота (МПЭ ПА) на подложках cSi, SiC/cSi и SiC/porSi, изучению влияния типа подложки на остаточные механические напряжения, возникающие в различных слоях гетероструктур.

Проблемы роста высококачественных слоев $A_{III}N$ на коммерчески доступных инородных (кремний, сапфир, карбид кремния) подложках для производства изделий микроэлектроники все еще преодолеваются исследователями с использованием различных технологических подходов. Следствием гетероэпитаксии $A_{III}N$ на инородных подложках является высокая плотность дислокаций в активной области полупроводниковой гетероструктуры, приводящая к возникновению большого числа центров безизлучательной рекомбинации, что заметно сказывается на рабочих характеристиках устройства, в том числе их эффективности. При этом все время возрастающие требования к характеристикам конструируемых оптоэлектронных приборов, снижение их энергопотребления, а значит, повышения эффективности и, что немаловажно, уменьшения издержек их производства, требуют интегрирования оптических функциональных элементов $A_{III}N$ с подложкой. В последнее время высокий интерес проявляется к использованию для эпитаксии гетероструктур $A_{III}N$ гибридных подложек SiC/Si и SiC/porSi. Однако следует отметить, что многообещающий подход к использованию для эпитаксии гетероструктур $A_{III}N$ более решеточно-согласованных гибридных подложек SiC/porSi до сих пор не получил широкого технологического распространения, в т.ч. из-за отсутствия воспроизводимой технологии получения бездефектных слоев карбида кремния на предварительно сформированном предслое пористого кремния Si достаточно большой площади по приемлемой цене.

В своей диссертационной работе Радам А.О.Р. за время обучения в аспирантуре проанализировал большой объём научной литературы, посвященной анализу гетероструктур на основе $A_{III}N$, выращенных различными эпитаксиальными методами на инородных и наиболее распространённых подложках (Si, SiC, Al_2O_3 , AlN), в том числе гетероструктур AlGaN/GaN. Полученная информация во многом помогла ему при анализе экспериментальных результатов исследований гетероструктур GaN/AlGaN/GaN, выращенных на подложках cSi, SiC/cSi и SiC/porSi методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота.

Во время выполнения научных исследований Радам А.О.Р. продемонстрировал умение выполнять поставленные задачи по исследованию сложных полупроводниковых систем с использованием современного аналитического оборудования. Им качественно были использованы различные методы рентгеновской дифракции для интерпретации структурных свойств и анализа остаточных механических напряжений и плотности дислокаций в слоях эпитаксиальных гетероструктур. Результативно использованы данные спектроскопии комбинационного рассеяния, подтверждающие результаты рентгеновской дифракции, люминесцентной и УФ спектроскопии, наглядно представлены результаты микроскопических исследований, визуализирующих формирование нанокolonчатой структуры GaN/AlGa/GaN, сформированной на различных подложках.

Радам А.О.Р. получил новые результаты, показывающие, что использование гибридной податливой подложки, содержащей подслой пористого кремния и, сформированный на нем слой карбида кремния, имеет ряд неоспоримых преимуществ для эпитаксиального роста ультратонких GaN/AlGaN/GaN наногетероструктур без использования толстых буферных слоев $A_{III}N$. Непосредственный рост на гибридной податливой подложке приводит к существенной релаксации упругих напряжений между кремнием и карбидом кремния, что в итоге отражается на структурном качестве и оптических характеристиках транзисторных ультратонких структур на основе нитридов $A_{III}N$.

Полученные Радам А.О.Р. результаты опубликованы в ведущих Российских и международных журналах и представлены на международных и всероссийских конференциях. Таким образом, фундаментальная подготовка и владение широким спектром современных методов исследования атомного и электронного строения позволили получить новые

данные о субструктуре наноклонок GaN/AlGa/GaN, ϵ_{xx} и ϵ_{zz} компонент двухосной и ϵ_h гидростатической деформаций, уровне остаточных напряжений и фотолюминесценции наноклончатой пленки.

К моменту представления диссертации Радам Р.А.О. имеет 12 публикаций, из которых 7 – статьи в ведущих рецензируемых журналах, соответствующих перечню ВАК, в которых полностью отражено основное содержание работы. Обучаясь в аспирантуре показал Радам Р.А.О. себя квалифицированным специалистом в области физики полупроводников. Таким образом, представленная Радам Али Обайд Радам диссертационная работа по актуальности, научной и практической значимости, новизне удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Научный руководитель,
доктор физико-математических наук,
(01.04.10 – Физика полупроводников)
заведующий кафедры физики твердого тела и наноструктур ВГУ,
доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный университет».

Середин П.В.

12 мая 2025 года

Почтовый адрес:

394018, Россия, г. Воронеж,
Университетская площадь, 1.
телефон: +7 (473) 2208363
e-mail: paul@phys.vsu.ru тел.

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный университет»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

Подпись Середин П.В.

заверяю _____ должность
Зверева И.И. 12.05.2025
подпись, расшифровка подписи

