

ПРОТОКОЛ № 9

заседания диссертационного совета 24.2.288.05

от 2 октября 2025 г.

ЧЛЕНОВ СОВЕТА ВСЕГО: 21

ПРИСУТСТВОВАЛИ: согласно явочному листу 14 членов совета (из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации):

Середин Павел Владимирович	д.ф.-м.н.	1.3.11
Бобрешов Анатолий Михайлович	д.ф.-м.н.	1.3.4
Домашевская Эвелина Павловна	д.ф.-м.н.	1.3.11
Сирота Александр Анатольевич	д.т.н.	2.3.1
Степкин Владислав Андреевич	к.ф.-м.н.	1.3.4
Корчагин Юрий Эдуардович	д.ф.-м.н.	1.3.4
Аверина Лариса Ивановна	д.ф.-м.н.	1.3.4
Переселков Сергей Алексеевич	д.ф.-м.н.	1.3.4
Усков Григорий Константинович	д.ф.-м.н.	1.3.4
Бормонтов Евгений Николаевич	д.ф.-м.н.	1.3.11
Леньшин Александр Сергеевич	д.ф.-м.н.	1.3.11
Турищев Сергей Юрьевич	д.ф.-м.н.	1.3.11
Абрамов Геннадий Владимирович	д.т.н.	2.3.1
Курбатов Виталий Геннадьевич	д.ф.-м.н.	2.3.1

ПОВЕСТКА ДНЯ

Защита диссертации Радам Али Обайд Радам на тему: «Субструктура и оптические свойства эпитаксиальных наноклончатых гетероструктур GaN/AlGaN/GaN, сформированных на гибридных подложках SiC/porSi», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, доцент, Середин Павел Владимирович, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет», физический факультет, кафедра физики твердого тела и наноструктур, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Кудрин Алексей Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского",

кафедра физики полупроводников, электроники и наноэлектроники, профессор;

Вайнштейн Илья Александрович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», научно-образовательный центр «Наноматериалы и нанотехнологии», главный научный сотрудник.

Ведущая организация федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

СЛУШАЛИ: Защиту диссертации Радам Али Обайд Радам на тему: «Субструктура и оптические свойства эпитаксиальных наноклончатых гетероструктур GaN/AlGaIn/GaN, сформированных на гибридных подложках SiC/porSi», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Вопросы по защищаемой диссертации задали: д.ф.-м.н. Домашевская Э.П., д.ф.-м.н. Турищев С.Ю., д.ф.-м.н. Сирота А.А.

В дискуссии приняли участие: д.ф.-м.н. Домашевская Э.П.

ПОСТАНОВИЛИ:

1. На основании результатов тайного голосования присудить Радам Али Обайд Радам ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.
Результаты голосования: за - 14, против - нет, недействительных бюллетеней - нет.
2. Принять заключение диссертационного совета по кандидатской диссертации Радам Али Обайд Радам.

(Стенограмма заседания, протокол счетной комиссии и заключение диссертационного совета прилагаются)

Заместитель председателя
диссертационного совета 24.2.288.05

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.288.05



Бобрешов
Анатолий Михайлович

Степкин
Владислав Андреевич

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.288.05,
созданного на базе федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Воронежский
государственный университет» Минобрнауки России, по диссертации на
соискание ученой степени кандидата наук
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 02.10.2025 № 9

О присуждении Радам Али Обайд Радам, гражданину Республики Ирак
ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Субструктура и оптические свойства эпитаксиальных
нанокolonчатых гетероструктур GaN/AlGa_N/Ga_N, сформированных на
гибридных подложках SiC/porSi» по специальности 1.3.11. Физика
полупроводников принята к защите 4 июля 2025 года (протокол заседания № 8)
диссертационным советом 24.2.288.05, созданным на базе федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Воронежский государственный университет», Минобрнауки
России, 394018, г. Воронеж, Университетская пл. 1, приказ Минобрнауки России
№105/нк от 11.04.2012.

Соискатель Радам Али Обайд Радам, 12 мая 1982 года рождения, обучался
в очной аспирантуре и работал лаборантом-исследователем (в области физики) в
Совместной учебно-научной лаборатории физики наногетероструктур и
полупроводниковых материалов ВГУ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе и СПБАУ РАН им.
Ж.И. Алферова федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Воронежский государственный
университет» Минобрнауки России.

В 2017 году с отличием окончил магистратуру федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Воронежский государственный университет» по направлению 03.04.02 - «Физика».

В 2024 году окончил очную аспирантуру федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский
государственный университет» по направлению подготовки 03.06.01 - «Физика
и астрономия».

Диссертация выполнена на кафедре физики твердого тела и наноструктур
физического факультета в федеральном государственном бюджетном
образовательном учреждении высшего образования «Воронежский
государственный университет» Минобрнауки России.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, доцент,
Середин Павел Владимирович, федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Воронежский
государственный университет», физический факультет, кафедра физики
твердого тела и наноструктур, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Кудрин Алексей Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского", кафедра физики полупроводников, электроники и наноэлектроники, профессор;

Вайнштейн Илья Александрович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», научно-образовательный центр «Наноматериалы и нанотехнологии», главный научный сотрудник;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург в своем положительном отзыве, подписанном Пихтиным Никитой Александровичем, кандидатом физико-математических наук, руководителем Центра физики наногетероструктур, указала, что диссертационная работа представляет самостоятельный законченный научно-квалификационный труд, дающий представление о состоянии проблемы формирования наногетероструктур на основе полупроводниковых соединений группы GaN, контроля остаточных напряжений в эпитаксиальных слоях, а также типа и распределения дефектов в них, которые могут оказывать негативное воздействие на структурные, электронные и оптические характеристики финальных устройств. Научная новизна работы заключается в разработке и применении гибридных подложек на основе пористого кремния и карбида кремния (SiC/porSi), что представляет собой инновационный подход к интеграции оптически активных элементов A_{III}-N с кремниевой технологической платформой. Комплексное исследование субструктуры, морфологии поверхности, дислокационной структуры и оптических характеристик полученных систем имеет фундаментальное и прикладное значение для развития новых технологий в области оптоэлектроники, интегральной фотоники и сенсорики. Научные результаты, впервые полученные соискателем, вносят существенный вклад в физику полупроводников и материаловедение, углубляя понимание механизмов формирования многослойных наногетероструктур на гибридных подложках и их влияния на физические свойства. Достоверность и практическая значимость результатов обоснованы комплексом экспериментальных данных и подтверждены их сопоставимостью с данными, опубликованными в ведущих отечественных и зарубежных рецензируемых изданиях.

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.

Соискатель имеет 12 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 12 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 7 работ. Работы посвящены определению кристаллического состояния эпитаксиальных слоев GaN и AlGaN в составе тонкопленочных наноклончатых гетероструктур, сформированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на кремниевых и гибридных SiC/porSi подложках, а также установлению взаимосвязей между параметрами роста, субструктурой, морфологией и оптическими характеристиками наноклончатых гетероструктур.

В диссертации Радам Али Обайд Радам отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Авторский вклад составляет 81%. Общий объем научных изданий по теме диссертации составляет 6.75 п.л.

Наиболее значительные работы:

1. Рост тонкопленочных AlGaN/GaN эпитаксиальных гетероструктур на гибридных подложках, содержащих слой карбида кремния и пористого кремния/ П.В Середин, Али Обайд Радам, Д.Л Голощапов, А.С. Леньшин, Н.С. Буйлов, К.А. Барков, Д.Н. Нестеров, А.М. Мизеров, С.Н. Тимошнев, Е.В Никитина, И.Н. Арсентьев, Ш. Шарофидинов, Л.С. Вавилова, С.А. Кукушкин, И.А. Касаткин// Физика и техника полупроводников. – 2022. – Т. 56, № 6. С. 547-551.

2. Comparative study of nanostructured ultra-thin AlGaN/GaN heterostructures grown on hybrid compliant SiC/porSi substrates by molecular beam epitaxy with plasma nitrogen activation/ P.V Seredin, D. Goloshchapov, Ali Obaid Radam, A.S. Lenshin, N.S. Builov, A.M. Mizerov, I.A. Kasatkin // Optical Materials. – 2022. – V. 128. – P. 112346.

3. Properties of Compliant Substrates Based on Porous Silicon Formed by Two-Stage Etching/ P. V. Seredin, A. S. Len'shin, Ali Obaid Radam, Abduljabbar Riyad Khuder, D. L. Goloshchapov, M. A. Harajidi, I. N. Arsentyev, I. A. Kasatkin// Semiconductors. – 2022. – V. 56. – №. 4. – P. 259-265.

4. Особенности роста и состава гетероструктур $Al_xGa_{1-x}N/AlN/porSi/Si(111)$, выращенных с использованием буферного слоя пористого кремния/ А.С. Леньшин, П.В. Середин, Д.С. Золотухин, А.Н. Бельтюков, А.М. Мизеров, И.А. Касаткин, А.О. Радам, Э.П. Домашевская// Конденсированные среды с межфазные границы. 2022. – Т. 24, № 1. – С. 51–58.

5. Comparative studies of nanoscale columnar $Al_xGa_{1-x}N/AlN$ heterostructures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy on cSi, porSi/cSi and SiC/porSi/cSi substrates/ P.V. Seredin, D.L. Goloshchapov, N.A. Kurilo, Ali Obaid Radam, V.M. Kashkarov, A.S. Lenshin, N.S. Buylov, D.N. Nesterov, A.M. Mizerov, S.A.

Kukushkin, S.N. Timoshnev, K. Yu Shubina, M.S. Sobolev//Optical Materials. – 2023. – V. 145. – P. 114451.

6. MicroRaman Study of Nanostructured Ultra-Thin AlGa_N/Ga_N Thin Films Grown on Hybrid Compliant SiC/Por-Si Substrates/ Aleksandr Lenshin, Pavel Seredin, Dmitry Goloshchapov, Ali O. Radam, Andrey Mizerov//Coatings. – 2022. – V. 12. – №. 5. – P. 626.

7. Исследования полуполярного нитрида галлия, выращенного на т-сапфире хлоридной газофазной эпитаксией/ П.В. Середин, Н.А. Курило, Али О. Радам, Н.С. Буйлов, Д.Л. Голощапов, С.А. Ивков, А.С. Леньшин, И.Н. Арсентьев, А.В. Нащекин, Ш.Ш. Шарофидинов, А.М. Мизеров, М.С. Соболев, Е.В. Пирогов, И.В. Семейкин// Конденсированные среды и межфазные границы. – 2023. – Т. 25. – №. 1. – С. 103-111.

На диссертацию и автореферат поступил 1 отзыв:

Валеев Ришат Галеевич, кандидат физико-математических наук (01.04.07 – физика конденсированного состояния), ведущий научный сотрудник лаборатории атомной структур и анализа поверхности, Отдела физики и химии поверхности, физико-математического института федерального государственного бюджетного учреждения науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук».

Отзыв положительный, замечаний нет. Отмечается актуальность, научная новизна и практическая ценность результатов, важность полученных результатов для практики.

Обоснованность выбора официальных оппонентов и ведущей организации определяется их компетенцией по специальности 1.3.11. Физика полупроводников, способностью определить научную значимость и практическую ценность диссертации, а также наличием публикаций по теме диссертации в рецензируемых научных журналах.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан и экспериментально реализован новый подход к формированию эпитаксиальных нанокolonчатых гетероструктур GaN/AlGa_N/Ga_N с использованием гибридных кремниевых подложек SiC/porSi для эффективной релаксации упругих напряжений;

разработана новая экспериментальная методика диагностики нанокolonчатых гетероструктур GaN/AlGa_N/Ga_N с применением комплекса структурно-спектроскопических методов, что позволило установить фундаментальные взаимосвязи между параметрами роста, субструктурой, морфологией и оптическими характеристиками нанокolonчатых гетероструктур GaN/AlGa_N/Ga_N;

предложено: использование гибридной подложки SiC/porSi с нанослоем кубического политаипа карбида кремния 3C-SiC, сформированного методом атомного замещения на пористом кремнии, для ориентированного роста плотноупакованных нанокolonок GaN/AlGa_N/Ga_N;

показано: 1) что сформированная на гибридной подложке SiC/porSi нанокolonчатая гетероструктура имеет наименьшую разориентацию

кристаллитов в эпитаксиальной пленке, рассчитанную из рентгеновских кривых качания; 2) что интенсивность фотолюминесценции 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 выше, чем от структуры на подложке SiC/cSi;

установлено: 1) что биаксиальные деформации в слоях GaN и AlGaN в плоскости роста являются растягивающими, в то время как в направлении роста являются сжимающими; 2) что нанокolonчатые слои GaN и AlGaN, выращенные на податливой гибридной подложке SiC/porSi, имеют наименьший уровень остаточных двуосных напряжений, который в два раза ниже, чем в гетероструктуре, выращенной на кремниевой подложке cSi;

доказано: что снижение уровня остаточных упругих напряжений и возрастание интенсивности фотолюминесценции от нанокolonчатой гетероструктуры GaN/AlGaN/GaN, выращенной на гибридной подложке SiC/porSi, происходит за счет снижения плотности дислокаций в эпитаксиальных слоях GaN и AlGaN;

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что развиты фундаментальные представления об особенностях формирования и релаксации упругих напряжений в эпитаксиальных нанокolonчатых гетероструктурах GaN/AlGaN/GaN, выращенных на гибридных кремниевых подложках типа SiC/porSi;

обосновано применение теории упругости для расчета и анализа величин компонент деформаций и остаточных упругих напряжений в слоях нанокolonчатых гетероструктур GaN/AlGaN/GaN исходя из данных рентгеновской дифракции и математического моделирования спектров Рамановского рассеяния;

изложены экспериментальные закономерности влияния податливой гибридной подложки SiC/porSi на ориентацию роста, уровень остаточных напряжений и интенсивность фотолюминесценции в нанокolonчатых гетероструктурах.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

определены закономерности формирования гетероструктур и взаимосвязи между типом используемой подложки и ориентацией плотноупакованных нанокolonнок GaN/AlGaN/GaN, уровнем остаточных напряжений и плотностью дислокаций в эпитаксиальных слоях, шириной запрещенной зоны и люминесцентными характеристиками;

показано влияние слоя нанопористого кремния в составе гибридной подложки на релаксацию упругих напряжений и, как следствие, дефектность эпитаксиальных слоев ультратонких нанокolonчатых эпитаксиальных гетероструктур GaN/AlGaN/GaN.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: достоверность результатов диссертационной работы основана на современных методах исследования структуры, морфологии и оптических свойств, дающих полную информацию о сформированных наногетероструктурах; воспроизводимостью результатов измерений; сравнительным анализом экспериментальных результатов с использованием международных баз данных;

использованием современного программного обеспечения обеспечивающего необходимую точность, надежность и обоснованность научных положений, выносимых на защиту, подтверждены независимыми экспертными оценками рецензентов научных журналов, в которых опубликованы статьи, содержащие основные результаты диссертации. Апробация диссертационной работы выполнена на международных и всероссийских научных конференциях.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в получении экспериментальных данных, а также в анализе, обработке, интерпретации и сопоставлении полученных результатов по данным используемых структурно-спектроскопических методов, личном участии соискателя в апробации результатов исследования и подготовке публикаций по выполненной работе.

В ходе защиты критических замечаний высказано не было.

Были заданы вопросы:

1. Слои SiC играют важную роль в производстве нитридных полупроводников, и в литературе имеются данные о синтезе тонких/толстых слоев нитридов на карбиде кремния. Также есть работы по росту нитридов на пористых слоях кремния. В вашей работе, вы одновременно ввели в состав сложной гибридной подложки оба эти подслоя. Почему такая очередность слоев в гибридной подложке и в чем заключается преимущество такой подложки?

2. Толщина пленки в гетероструктуре порядка 300 нм. Вы использовали разнообразные методы анализа, такие как рентгеновская дифракция, фотолюминесценция, УФ спектроскопия и Рамановская микроспектроскопия. Глубина анализа у методов разная. Коррелируют ли полученные разными методами результаты?

3. Какая процедура использовалась для разложения Рамановских спектров на компоненты. Как вы выбирали функции для компонент? Какое условие сходимости экспериментальной и модельной кривой вы использовали?

Соискатель Радам Али Обайд Радам ответил на заданные в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию, основанную на результатах проведенных теоретических и экспериментальных исследований:

1. Действительно, в литературе имеется большое количество работ, посвященных влиянию различных промежуточных слоев на качество роста нитридов AlN. Ключевой проблемой гибридных интегральных гетероструктур остается нерешенная проблема создания высокопроизводительной монолитной интеграции пленок нитридов AlN с кремниевыми подложками. При этом важно контролировать деформацию и остаточные напряжения в эпитаксиальном слое, а также тип и распределение дефектов, которые могут негативно влиять на электронные и оптические свойства гетероструктур. Для решения этой проблемы обычно используются буферные слои нитридов, многопериодные сверхрешетки, слои с чередующейся 2D- и 3D-морфологией, слои с градиентом состава, а также их комбинации. Однако буферные слои представляют собой сложную многослойную гетероструктуру толщиной до десятков микрометров. Такой подход коммерчески не выгодный. В последнее время наблюдается высокий интерес к использованию согласованных по параметру решетки

гибридных подложек SiC/Si для эпитаксии $A_{III}N$ -гетероструктур. Еще одним перспективным подходом к росту гетероструктур на основе нитридов галлия является использование нанопористых кремниевых слоев (porSi) или нанопрофилированных поверхностей кремниевых подложек. Эпитаксиальные слои нитридов галлия, выращенные с использованием газофазной или молекулярно-пучковой эпитаксии в рамках данного подхода, уже демонстрируют хорошее структурное качество и оптические свойства по сравнению с аналогичными слоями, выращенными в аналогичных условиях на кристаллическом кремнии cSi. В моей работе удалось объединить в рамках гибридной подложки SiC/porSi обе стратегии. Вначале на кремниевой подложке методом электрохимического травления формируется нанопористый слой кремния, а далее методом атомного замещения формируется слой SiC, который более согласован по параметру решетки с $A_{III}N$, что позволяет снизить напряжения на начальных стадиях роста гетероструктур $A_{III}N/Si$, перераспределяя их в пористый подслой. Результаты, представленные в диссертационной работе, демонстрируют перспективность предложенной технологии.

2. Действительно, полученные различными методами результаты коррелируют. Как известно рентгеновская дифракция даёт интегрированную усреднённую величину из всей области эпитаксиального слоя, а глубина анализа пленки гетероструктуры с использованием Рамановской и ФЛ спектроскопии порядка ~ 400 и ~ 100 нм, соответственно. Это хорошо видно исходя из величины остаточных напряжений, определенных разными методами, которая принимает близкие значения.

3. Спектры комбинационного рассеяния для всех образцов снимались в одинаковых условиях чтобы учесть влияние геометрии съёмки на сигнал рассеяния. Моделирование было выполнено с использованием программной среды Fytk, предназначенной для деконволюции спектрального сигнала, в частности Рамановского рассеяния. В качестве аппроксимирующей функции выбрана 4-х параметрическая функция Пирсона. В ряде работ, в том числе и наших показано, что ее использование обеспечивает лучшую аппроксимацию узких полос в спектре комбинационного рассеяния. Определение числа экстремумов выполнялось с использованием второй и четвёртой производной. Все эти особенности позволили найти необходимый критерий сходимости и воспроизводимости результатов моделирования, а также обеспечили однозначность разложения. При этом качество разложения определялось с учетом критерия минимизации ошибки (Chi-квадрат). Разложение проводилось таким образом, чтобы учесть вклад от низкоинтенсивных полос присутствующих в спектре. На этапе выполнения деконволюции экспериментальных спектров мы не корректировали базовую линию и не удаляли из спектра самую интенсивную моду, приписываемую ТО фону кремния, т.к. это могло внести погрешность в определение точного положения мод колебаний, относящихся к эпитаксиальным слоям.

На заседании 2 октября 2025 года диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи установления особенностей формирования и

микроструктуры, а также оптических свойств эпитаксиальных наноклончатых гетероструктур GaN/AlGaN/GaN, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на гибридных кремниевых подложках SiC/porSi/Si, и контроля остаточных упругих напряжений в слоях гетероструктуры, имеющей существенное значение для современной физики полупроводников, присудить Радам Али Обайд Радам ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 14, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя
диссертационного совета
24.2.288.05



Бобрешов Анатолий Михайлович

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.288.05

Степкин Владислав Андреевич

2 октября 2025 г.