

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Радам Али Обайд Радам

«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.

Актуальность диссертационной работы. Представленная диссертационная работа посвящена решению комплексной **научной задачи**, связанной с исследованием процессов формирования и оптических свойств эпитаксиальных наноклончатых гетероструктур GaN/AlGaN/GaN, выращенных на гибридных подложках SiC/por-Si/Si(111), которые имеют хорошие перспективы применений в нанoeлектронике. Актуальность выбранной темы обусловлена возрастающей потребностью в создании высококачественных гетероструктур для формирования на их основе элементной базы, обеспечивающей высокоскоростную передачу данных и другие процессы в современных микроэлектронных приложениях. Развитие оптоэлектроники, квантовых вычислений, криптографических ячеек и систем связи, требует разработки стабильных и высокопроизводительных устройств с устойчивыми, воспроизводимыми электрофизическими характеристиками. В этой связи проблемы интеграции полупроводниковых материалов на основе AlN являются ключевыми требованиями к существующим технологическим процессам кремниевой электроники.

Одним из компромиссных подходов к решению данной проблемы является использование гибридных подложек сложного состава, включающих монокристаллический кремний в качестве основы и буферные слои различной природы (пористый кремний и карбид кремния. Однако ключевой сложностью при реализации таких подложек остается обеспечение низкой плотности дислокаций, минимизация остаточных упругих напряжений в эпитаксиальных слоях и достижение высокого качества интерфейсов в конечной структуре.

Таким образом диссертационное исследование представляется весьма актуальным и с точки зрения исследований фундаментальных особенностей формирования полупроводниковых наноклончатых гетероструктур GaN/AlGaN/GaN на гибридных подложках, а также практико-ориентированного анализа взаимосвязей между типом подложки и оптическими характеристиками функциональных гетероструктур.

Научная новизна работы содержит:

- 1) Определение кристаллического состояния эпитаксиальных слоев GaN и AlGaN в составе тонкопленочной нанокolonчатой гетероструктуры, выращенной на гибридных кремниевых подложках;
- 2) Установление направлений преимущественной ориентации роста кристаллических блоков/нанокolonок в эпитаксиальных гетероструктурах и определение дисперсии их разориентации;
- 3) Определение типа и величины плоскостной и внеплоскостной деформаций в слоях GaN и AlGaN, сформированных на разнородных подложках, а также исследование оптических свойств нанокolonчатых структур GaN/AlGaN/GaN.
- 4) Зависимости интенсивности фотолюминесценции и ширины запрещённой зоны у полученных гетероструктур от типа использованной подложки.

Важным аспектом является изучение механизмов релаксации механических напряжений в полученных на гетероструктурах на виртуальных подложках, важных для осуществления операций построста с позиции определения оптимальных операций, необходимых для выполнения гетероэпитаксии AlInN на Si.

Достоверность и обоснованность результатов работы

Результаты сравнительного анализа, представленные в диссертационной работе, а также сделанные на их основе выводы, подтверждаются применением комплекса современных высокоточных методов исследования наноструктур, высокой воспроизводимостью экспериментальных данных, хорошим соответствием существующим теоретическим представлениям, согласованностью с независимыми результатами других ведущих научных коллективов. Представленные в диссертации выводы не противоречат устоявшимся фундаментальным теоретическим представлениям. Достоверность полученных результатов убедительно подтверждается комплексом примененных аналитических методов и не вызывает сомнений.

Теоретическая значимость работы обусловлена применением теории упругости для расчета и анализа параметров деформаций и остаточных напряжений в слоях нанокolonчатых гетероструктур GaN/AlGaN/GaN с учетом из данных рентгеновской дифракции и Рамановского сдвига.

Практическая значимость работы заключается в детальном изучении механизмов формирования гетероструктур на различных типах подложек: монокристаллическом кремнии (c-Si), кремниевых подложках с предварительно сформированным методом Кукушкина слоем карбида кремния (SiC/cSi), а также подложках кремния с пористым подслоем и слоем карбида кремния (SiC/porSi).

Проведенные исследования процессов роста наноклончатых гетероструктур методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота выявили ключевые закономерности их формирования. Полученные результаты представляют значимую практическую ценность, поскольку открывают возможности их непосредственного внедрения в существующие технологические процессы выращивания гетероструктур для оптоэлектронных устройств.

Основными результатами диссертационного исследования являются:

- 1) 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.
- 2) 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 политипа 3C-SiC.
- 3) На основании расчета величин плоскостной и внеплоскостной деформаций по результатам 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.
- 4) Определено, что наноклончатые слои GaN и AlGaN, выращенные на гибридной подложке SiC/porSi, имеют уровень остаточных двусосных напряжений, который в два раза ниже, чем в гетероструктуре, выращенной на кремниевой подложке cSi.

По представленной диссертационной работе имеются **вопросы и замечания:**

1. В работе описывается метод молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота для роста колончатых наноструктур GaN и AlGaN. Учитывались ли в работе известные особенности роста подобных систем? Это могло бы помочь при обсуждении остаточных напряжений в структуре сформированных GaN и AlGaN слоёв и соответствующих механизмов релаксации.
2. В работе не представлена экспериментальная информация о структурных свойствах и морфологических особенностях гибридных подложек, на которых производился рост гетероструктур GaN/AlGaN/GaN. Анализировался ли

- возможный вклад каждой подложки в характеристики исследуемых гетероструктур?
3. Спектральный профиль собранных данных комбинационного рассеяния для исследуемых наноклончатых гетероструктур формируется, в том числе, за счет сигнала от гибридной подложки. Несмотря на предложенный автором способ учёта данного вклада и выделения полезного сигнала, следовало бы провести исследование методом атомно-силовой спектроскопии в связке с методом комбинационного рассеяния. На мой взгляд, это бы способствовало улучшению представлений о наблюдаемых особенностях спектров наноклонок GaN и AlGaN.
 4. На рис. 3.16 для определения ширины запрещенной зоны в исследуемых гетероструктурах выполнено построение Тауца для прямых разрешенных межзонных переходов. Приведенные линейные аппроксимации для соответствующих участков экспериментальных кривых проведены не совсем аккуратно и не показаны пересечения с осью абсцисс при значении $(Dh\nu)^2 = 0$. Какова при этом ошибка выполненной оценки и на основании каких данных для анализа был выбран только прямой тип межзонных переходов?
 5. В тексте диссертации присутствуют погрешности в оформлении, языковые опечатки, орфографические ошибки и другие неточности. Например, на стр. 100 дана ссылка на несуществующую Таблицу 2, по всей видимости, должна быть ссылка на Таблицу 3.2; нет ссылки в тексте на рис. 1.3; в Главе 2 наблюдается путаница с нумерацией разделов – 2.4, 2.9 и т.д., при этом отсутствуют разделы 2.6, 2.7, 2.8; рисунки 2.1 и 3.1 являются идентичными, в Главе 3 достаточно было сослаться на рисунок 2.1; и другие замечания.

Необходимо отметить, что сформулированные вопросы и замечания носят рекомендательный и дискуссионный характер, не влияют на высокую научную оценку диссертационной работы, которая оформлена по рекомендованным правилам и выполнена на хорошем научном уровне.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов:

Результаты диссертационного исследования были опубликованы в 12 научных работах, в том числе 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ и индексируемых в Web of Science и/или Scopus. Работа прошла необходимую апробацию на российских и международных конференциях, опубликованы тезисы 5 докладов. Научные положения и выводы, представленные в диссертации, хорошо обоснованы. Автореферат соответствует содержанию и структуре диссертации, адекватно отражает полученные в работе результаты.

Диссертационная работа Радам Али Обайд Радам **соответствует** паспорту специальности 1.3.11. Физика полупроводников с учетом пунктов 2. Структурные и морфологические свойства полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе, 4. Поверхность и граница раздела полупроводников, полупроводниковые гетероструктуры, контактные явления. и пункту 7. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках и в композиционных полупроводниковых структурах.

Таким образом, диссертационная работа Радам Али Обайд Радам представляет собой законченное научное исследование с логичным изложением материала и необходимой научной новизной. Объем проведенных исследований, их значимость, степень апробации и достигнутые публикационные показатели **соответствуют требованиям** «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 для кандидатских диссертаций. Автор, Радам Али Обайд Радам, **заслуживает присуждения** учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (01.04.07 Физика конденсированного состояния), профессор, профессор РАН, главный научный сотрудник, Научно-образовательный центр «Наноматериалы и нанотехнологии», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Подпись *Вайнштейн Илья Александрович*

Вайнштейн Илья Александрович

02 *сентября* 2025 г.

Я заверяю. Кудряшова Н.Н.

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента

России Б.Н. Ельцина»

Тел.: +7 343 375 93 74

e-mail: i.a.weinstein@urfu.ru

Адрес: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

ГЛАВНЫЙ СПЕЦИАЛИСТ
УЧЕНОГО СОВЕТА УРФУ
КУДРЯШОВА Н.Н.

Я, Вайнштейн Илья Александрович даю согласие на обработку персональных данных, связанных с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Вайнштейн И.А.
Вайнштейн И.А.