

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Радам Али Обайд Радам «Субструктура и оптические свойства эпитаксиальных нанокolonчатых 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

Развитие современной электроники требует создания новых материалов, способных значительно повысить скорость обработки и передачи данных. Обработка больших объемов информации, системы параллельных вычислений, многозадачность и минимизация энергозатрат требуют поиска нестандартных решений для разработки новых систем на кристалле. Актуальность использования новых материалов определяется их возможностью интеграции в существующие технологические процессы, сложностью реализации и затратами на производство, а также условиями и сроками эксплуатации. Учитывая широкое применение кремниевой электроники и развитую технологическую инфраструктуру для кремниевых систем, а также высокую стоимость производства структур, важными задачами являются поиск методов и разработка интегрированных с кремниевыми структурами гетероструктур на основе полупроводников  $A^{III}B^V$  и  $A^{III}N$ . Значительное количество исследований, посвященных данной тематике, подчеркивает как важность, так и востребованность этого направления. В диссертационной работе Радам Али Обайд Радам «Субструктура и оптические свойства эпитаксиальных нанокolonчатых гетероструктур GaN/AlGaN/GaN, сформированных на гибридных подложках SiC/porSi» рассматриваются новые подходы к интеграции полупроводниковых материалов группы  $A^{III}B^V$  на кремнии, закономерности снижения остаточных напряжений в гетероструктурах и структурно

зависимые кристаллические и оптические свойства гибридных материалов, что несомненно **является актуальным**.

Наиболее важными результатами, имеющими несомненную **научную новизну**, являются:

1) Установлено, что в случае эпитаксиального роста гетероструктур GaN и AlGaN методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота на сформированном на кремниевой подложке методом атомного замещения нанослое карбида кремния SiC гетероструктуры кристаллизуются в гексагональную структуру с решеткой вюрцита, в то время как нанослой SiC имеет симметрию кубического политапа 3C-SiC.

2) На основании расчета величин плоскостной  $\epsilon_{xx}$  и вне-плоскостной  $\epsilon_{zz}$  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.

3) Определено, что наноколончатые 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

**Практическая значимость работы** заключается в том, что результаты можно использовать в технологических процессах интеграции систем A<sup>III</sup>N с кремниевой электроникой, разрабатывать новые технологические подходы к созданию устройств, совершенствовать приборы для оптоэлектроники. Установленные основные закономерности формирования структур GaN/AlGaN/GaN, на гибридных подложках SiC/porSi раскрывают новые возможности управления остаточными напряжениями для функциональных наноматериалов следующего поколения.

**Достоверность и обоснованность** положений выносимых на защиту, а также выводов диссертации обеспечивается использованием современных исследовательских методов: прецизионной рентгеновской дифрактометрии, растровой электронной микроскопии, спектроскопии пропускания,

фотолюминесценции, Рамановской спектроскопии, фотоэлектронной спектроскопии, дающих надёжную информацию о составе, структуре, оптических свойствах материалов и сопоставлении собственных результатов с результатами ведущих научных групп, непротиворечивости информации полученной различными методами

В качестве **замечаний** можно отметить следующие:

1) В главе 3 автором описываются процессы роста исследуемых гетероструктур GaN/AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> на подложках Si, SiC/cSi и SiC/porSi/Si, но не приводится аргументация по выбору толщин гетероструктур и обоснования выбранного дизайна гетероструктуры, в частности, не проводится варьирование толщин слоев гетероструктуры. Отсутствует сравнительный анализ по приведённым системам известным из литературы. Небольшое количество исследованных структур накладывает определенные ограничения на применимость полученных результатов к гетероструктурам GaN/AlGa<sub>N</sub>, отличающимся от исследованных толщиной, температурой роста, уровнем легирования.

2) Проведенные исследования методом рентгеновской дифракции и фотолюминесценции свидетельствуют о более высоком кристаллическом совершенстве гетероструктуры GaN/AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>, полученной на подложке SiC/porSi/Si, относительно гетероструктур GaN/AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>, полученных на подложках Si, SiC/cSi, при этом, согласно АСМ данным, гетероструктура на подложке SiC/porSi/Si имеет в 2 раза большую шероховатость. В работе не обсуждаются возможные ограничения для будущих приборных структурах на основе GaN/AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>, связанные с относительно высокой шероховатостью поверхности.

3) При определении оптической плотности структур используется только спектр пропускания, и не используется спектр отражения. Для получения корректной спектральной зависимости коэффициента поглощения для полупроводниковых структур должны учитываться спектры пропускания и

отражения. В работе не приводится обоснованность отказа от спектров отражения.

4) В работе отсутствуют какие-либо электрические характеристики исследованных структур, даже оценка слоевого сопротивления. Исследования электрофизических свойств структур хорошо бы дополняли проведенные исследования.

5) В работе присутствуют некоторые недостатки в оформлении. В частности, на оси абсцисс рисунка 1.11 вместо размерности В/см должно быть указано кВт/см. Непонятен источник данных для рисунка 2.8. Не очень наглядным является рисунок 3.2 с результатами СЭМ исследований. Для спектра фотолюминесценции структуры на подложке SiC/porSi/Si указана ширина на полувысоте  $\sim 0.12$  эВ, хотя эта величина ближе к  $0.17$  эВ. Рисунок 3.16 не очень наглядный (желательно было кривые изобразить в цвете). Исследуемые структуры называются "транзисторными", что, считаю, некорректно.

Однако, вышеперечисленные недостатки носят характер пожеланий для будущей работы и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Рассматривая диссертационную работу Радам Али Обайд Радам в целом, следует отметить, что она является законченной научно-исследовательской работой, обладающей актуальностью, новизной, научной и практической значимостью.

#### **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов**

Основные результаты работы достаточно подробно опубликованы в 7 статьях в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ и индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus. Содержание диссертации с необходимой полнотой отражено в автореферате.

В заключении необходимо отметить, что Диссертация Радам Али Обайд Радам «Субструктура и оптические свойства эпитаксиальных наноклончатых гетероструктур GaN/AlGa<sub>n</sub>/GaN, сформированных на

гибридных подложках SiC/porSi» представляет собой завершенное научное исследование и своей актуальностью, степенью обоснованности положений, результатов и выводов соответствует всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Радам Али Обайд Радам заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

*Согласен на обработку моих персональных данных*

Официальный оппонент:

Кудрин Алексей Владимирович,

доктор физико-математических наук (специальность 1.3.11),

доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского", кафедра физики полупроводников, электроники и наноэлектроники, профессор

03 сентября 2025 г.  Кудрин Алексей Владимирович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского"

Адрес организации:

603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корпус 3, Физический факультет.

Тел.: +7 9307153154, E-mail: kudrin@nifti.unn.ru

ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ

Зам. начальника управления  
НИГУ им. Н.И. Лобачевского



Т.А. СУБОТИНА

