

УТВЕРЖДАЮ  
Ректор ФГАОУ ВО «ТУСУР»  
В.М. Рулевский



« 04 » \_\_\_\_\_ 2025г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Малина Тимура Валерьевича «Эпитаксиальные слои GaN на кремниевых подложках для AlGaIn/GaN гетероструктур с высокой подвижностью электронов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников

#### Актуальность диссертационной работы

Полевой транзистор с высокой подвижностью электронов в канале (HEMT) на основе  $A_3$ -нитридных гетероструктур (ГЭС) с двумерным электронным газом (2DEG) уже является общепризнанным лидером в области разработки базовых элементов для нового поколения приборов СВЧ и силовой электроники. Преимущества транзисторов на основе  $A_3$ -нитридных структур состоят в возможности получения более высокой проводимости канала, по сравнению со структурами на основе кремния и классических  $A_3B_5$  (AlGaAs/GaAs) ГЭС, значительно большей напряженности пробойного поля и большей теплопроводности, а также меньшей чувствительности к температуре и радиации, что обеспечивает возможность работы приборов в экстремальных условиях.

Развитие GaN силовой электроники приводит к конкуренции транзисторов на основе GaN с кремниевыми биполярными транзисторами с изолированным затвором (IGBT) и транзисторами на основе карбида кремния (SiC). Применение подложек SiC для роста GaN гетероструктур, используемых при создании транзисторов, ограничивается значительно более высокой ценой на подложки SiC по сравнению с подложками лейкосапфира ( $Al_2O_3$ ) и кремния (Si), последние из которых являются фундаментальным материалом современной электроники. Основными подложками для роста GaN гетероструктур для силовой электроники на данный момент остаются подложки Si(111). Обеспечение достаточного теплоотвода от кремниевой подложки позволяет использовать СВЧ транзисторы на основе нитрид галлиевых ГЭС, выращенных на кремниевых подложках, вплоть до 18ГГц, что стимулирует исследования, направленные на развитие технологии роста GaN-на-Si.

## СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация Малина Т.В. изложена на 124 страницах, содержит 4 таблицы, 47 рисунков и список литературных источников из 119 наименований. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, содержащего основные результаты, списка сокращений и условных обозначений, списка цитируемой литературы и списка основных публикаций автора по теме работы.

Во **Введении** обоснована актуальность исследования и степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, научная новизна полученных результатов и практическая значимость работы, кратко описаны объекты и методы исследования, а также представлен личный вклад автора.

В **Главе 1** представлен обзор развития GaN СВЧ и силовой электроники на основе Аз-нитридов, описано явление спонтанной поляризации в Аз-нитридах и природа формирования 2DEG в Аз-нитридных гетероструктурах, проведено сравнение различных конструкций гетероструктур с 2DEG, а также перечислены технологические задачи, требующие решения при выращивании слоёв GaN на кремниевых подложках для приборных применений.

**Глава 2** содержит описание конструкций современных установок NH<sub>3</sub>-МЛЭ, обзор технических проблем, возникающих при NH<sub>3</sub>-МЛЭ, и пути их решения, а также описание оригинального оптического метода контроля температуры на поверхности растущей плёнки. Суть используемого метода контроля температуры сводится к записи спектра излучения нагретого образца и дальнейшей его аппроксимации с использованием фундаментального закона Планка. Глава включает в себя раздел, посвящённый контролю скорости роста Аз-нитридов методом оптической рефлектометрии. Помимо описания особенностей метода NH<sub>3</sub>-МЛЭ глава содержит раздел, посвящённый описанию используемого оборудования для характеристики ГЭС, применяемого в данной диссертации для исследования физическими методами твёрдого тела.

**Глава 3** посвящена отработке технологии роста свободных от трещин слоёв GaN, выращиваемых на кремниевых подложках методом NH<sub>3</sub>-МВЕ, включая исследование границы раздела зародышевого AlN и кремниевой подложки при различных условиях нитридизации кремния. Помимо этого, глава включает в себя результаты поисковых ростовых исследований, направленных на получение пригодной для формирования резких гетерограниц морфологии слоёв GaN, выращиваемых методом NH<sub>3</sub>-МВЕ и результаты исследований влияния температуры роста на сопротивление слоёв GaN-на-Si.

**Глава 4** содержит описание результатов сравнения структурных свойств слоёв GaN и электрофизических параметров 2DEG в AlGaIn/GaN гетероструктурах,

выращенных методом  $\text{NH}_3$ -МВЕ на подложках сапфира и кремния с использованием одинаковых конструкций буферного слоя. Полученные методами атомно-силовой микроскопии и фотолюминесценции результаты исследования выращенных слоёв GaN на подложках сапфира и кремния наглядно демонстрируют отсутствие влияния остаточных механических напряжений на морфологию слоёв GaN, которая определяется исключительно ростовыми условиями.

**В Заключение** сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

К наиболее значимым научным результатам можно отнести следующие:

1. Продемонстрировано, что высокотемпературная нитридизация кремния приводит к увеличению остаточных растягивающих напряжений в зародышевых слоях AlN из-за формирования на границе раздела AlN/Si аморфной фазы SiN.

2. Определены три основные моды роста слоёв GaN, выращиваемых методом  $\text{NH}_3$ -МВЕ, соответствующие определённым ростовым условиям: нестабильный послойный рост, режим квазитечения ступеней, закручивающихся вокруг мест выхода прорастающих дислокаций и режим, характеризующийся локальным разложением GaN в местах выхода дислокаций на поверхность.

3. Установлено, что нитридизация кремния наряду с конструкциями буферного слоя влияет на образование трещин в слоях GaN, выращиваемых методом аммиачной МЛЭ на подложках Si(111).

4. Продемонстрировано, что остаточные механические напряжения не влияют на морфологию, выращиваемых слоёв GaN, которая определяется ростовыми условиями.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Предложен оригинальный способ контроля температуры на поверхности растущей плёнки, основанный на записи и последующей аппроксимации спектров излучения подложки.
2. Создана технология роста свободных от трещин слоёв GaN, включающая в себя контролируемую низкотемпературную нитридизацию подложек кремния, и предложены конструкции буферных слоёв, снижающих растягивающие напряжения в  $\text{A}_3$ -нитридных ГЭС.
3. Определены условия роста (температура роста  $800\text{ }^\circ\text{C}$ ; поток аммиака  $200\text{ норм. см}^3/\text{мин}$ ) слоёв GaN, выращиваемых методом  $\text{NH}_3$ -МВЕ, с гладкой морфологией поверхности, удовлетворяющей приборным применениям.
4. Продемонстрирована возможность создания AlGaN/GaN гетероструктур с 2DEG на подложках кремния методом  $\text{NH}_3$ -МВЕ.

**Достоверность результатов**, представленных в диссертации, обеспечивается использованием современных экспериментальных методов исследования, воспроизводимостью результатов, согласованием полученных экспериментальных данных с литературными.

**По содержанию диссертации имеются следующие замечания:**

1. Исследуемые в диссертационной работе слои GaN/Si имеют толщину около 1 мкм, вследствие чего остаётся не ясным какой максимальной толщины могут достигать свободные от трещин слои GaN, выращиваемые методом аммиачной МЛЭ на кремниевых подложках с применением низкотемпературной нитридации и предлагаемых конструкций буферного слоя.

2. Из литературных данных известно, что при неравномерных прогревах и отжигах кремниевых подложек на их поверхности формируются линии скольжения дислокаций. При этом для метода МЛЭ характерным является наличие градиента температуры, который наиболее ярко проявляется на краях подложки в местах её контакта с держателем. Подобного рода макродефекты и трещины несовместимы с планарной постростовой технологией формирования транзисторов на подложках, однако обсуждение данного важного технического вопроса никак не затрагивается в диссертации.

3. Проведённое сравнение электрофизических параметров НЕМs гетероструктур, выращенных на подложках сапфира и кремния с применением одинаковых конструкций буферных слоёв, представляется не полным из-за отсутствия сравнения параметров с идентичными гетероструктурами, выращенными на подложках SiC.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Отмеченные замечания не имеют принципиального характера и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Диссертация Малина Т.В. представляет собой законченную научное исследование на актуальную научную тему. Основные результаты работы полностью опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ и рецензируемых научных изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science.

Диссертационная работа Малина Тимура Валерьевича «Эпитаксиальные слои GaN на кремниевых подложках для AlGaIn/GaN гетероструктур с высокой подвижностью электронов» удовлетворяет требованиям пунктов 9, 10, 11, 13, 14 действующего Положения о присуждении ученых степеней, а её автор, Малин Тимур Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Отзыв на диссертацию Т.В. Малина обсужден и одобрен на расширенном заседании кафедры физической электроники с участием представителей кафедры электронных приборов, протокол №57 от 13.03.2025г. (Проголосовало 10 человек, за – 10 человек, против - нет, воздержалось - нет).

Председатель заседания:

Ведущий научный сотрудник Лаборатории интегральной оптики и радиофотоники кафедры физической электроники, доктор технических наук, профессор

 Троян Павел Ефимович

Секретарь заседания:

Заместитель директора по науке передовой инженерной школы "Электронное приборостроение и системы связи" им. А.В. Кобзева, кандидат технических наук, доцент

 Кулинич Иван Владимирович

Подписи П.Е. Трояна и И.В. Кулинича зав  
Ученый секретарь

Сведения о ведущей организации:



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственной университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Адрес: 634050, г. Томск, проспект Ленина, 40.

Тел.: +7 (382 2) 510-530, факс: +7 (382 2) 513-262, 526-365.

E-mail: office@tusur.ru.

Официальный сайт: www.tusur.ru.

  
Поступил в секрет 07.04.2025   
Ознакомлен 07.04.2025 