

ФГБОУ ВО «ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»  
ФГАОУ ВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
АО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА «МИКРАН»

УДК 621.382

На правах рукописи



Сим Павел Евгеньевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ  
НЕМТ ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ GaN**

Специальность 01.04.04 – «Физическая электроника»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Троян Павел Ефимович

Научный консультант:

доктор физ.-мат наук, профессор

Брудный Валентин Натанович

**Томск – 2018**

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. Литературный обзор.....	11
1.1 Полупроводниковые НЕМТ транзисторы.....	11
1.2 Материалы подложек.....	15
1.3 Твердые растворы AlGaN, InAlN .....	17
1.4 Контакты к НЕМТ структурам.....	18
1.5 Выпрямляющий контакт затвора.....	18
1.6 Невыпрямляющий (омический) контакт .....	19
1.7 Требования к омическим контактам.....	21
1.8 Механизм формирования омических контактов .....	23
1.9 Альтернативные методы формирования омических контактов .....	26
ГЛАВА 2. Методика эксперимента.....	28
2.1 Моделирование омических контактов .....	28
2.2 Конструкция гетероструктуры .....	35
2.3 Формирование тестовых структур на пластине .....	36
2.3.1 Оснастка для отжига гетероструктур на подложках SiC и Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	39
2.3.2 Выбор газовой среды для отжига .....	46
2.4 Расчет параметров омических контактов.....	47
2.6 Выводы.....	52
ГЛАВА 3. Разработка омических контактов к НЕМТ транзисторам на AlGaN/GaN и InAlN/GaN.....	53
3.1. Влияние обработки поверхности на контактное сопротивление.....	53
3.2 Выбор состава омических контактов к гетероструктуре AlGaN/GaN .....	58
3.2.1 Исследование контактов с металлизацией Ti/Al/Ni/Au .....	58
3.2.2 Исследование контактов Ta/Ti/Al/Ni/Au и Ti/Al/Ta/Au .....	61
3.2.3 Исследование металлизации Ti/Al/Mo/Au.....	63
3.2.4 Исследование контактов с металлизацией Ti/Al/Mo/W/Au и Si/Ti/Al/Mo/Au .	68
3.2.5 Оптимизация толщин для Ti/Al/Mo/Au металлизации.....	71
3.2.6 Оптимизация режимов отжига контакта Ti/Al/Mo/Au .....	73
3.2.7 Исследование структуры и химического состава омического контакта с Ti/Al/Mo/Au металлизацией.....	74

3.3	Применение Ti/Al/Mo/Au металлизации для формирования омического контакта к InAlN/GaN гетероструктурам .....	79
3.3.1	Выбор режимов отжига омического контакта с Ti/Al/Mo/Au металлизацией к InAlN/GaN гетероструктуре.....	79
3.3.2	Исследование профиля элементного состава омического контакта с Ti/Al/Mo/Au металлизацией к InAlN/GaN гетероструктуры .....	81
3.4	Выводы.....	85
ГЛАВА 4. Применение металлизации Ti/Al/Mo/Au для формирования омического контакта на пластинах большого диаметра.....		87
4.1	Оптимизация режимов отжига контактов с металлизацией Ti/Al/Mo/Au для пластин AlGaN/GaN на подложках 4H-SiC диаметром 100мм.....	87
4.2	Сравнительное исследование контактного сопротивления и рельефа поверхности омических контактов, сформированных к НЕМТ на InAlN/GaN и AlGaN/GaN.....	89
4.3	Транзисторы с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN .....	93
4.4	Испытания омических контактов на воздействие повышенной температуры....	98
4.5	Выводы .....	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....		101
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....		102
Приложения: свидетельства о государственной регистрации топологии ИМС .....		111

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** При разработке полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor, НЕМТ), предъявляются высокие требования к функциональным параметрам омических контактов: сопротивлению контакта, поскольку это в значительной степени определяет величину паразитных сопротивлений истока и стока и крутизну вольт-амперной характеристики транзистора, а также его резистивный нагрев и, в конечном счете, удельную выходную мощность транзистора. Гладкая поверхность контакта и его резкие границы важны при создании коротко-канальных НЕМТ с высоким частотным пределом. При этом термостабильность омического контакта определяет предел рабочих температур транзистора.

Разработка омических контактов к НЕМТ транзисторам на основе кубических полупроводников были начаты несколько десятилетий назад и в этой области были достигнуты значительные успехи. При этом попытки использовать такие контакты к НЕМТ структурам на базе полупроводников III-N с вюрцитной кристаллической решеткой оказались несостоятельными. Это обусловлено высокими температурами плавления GaN и AlN, большой величиной барьеров Шоттки обусловленной широкой запрещенной зоной этих полупроводников, необходимостью выбора металлов пригодных для «подлегирования» приповерхностного слоя нитридов за счет нарушения стехиометрии полупроводника при его химических реакциях с напыляемым металлом.

**Степень разработанности темы.** Среди различных металлизаций, которые используются в качестве омических контактов к гетероструктурам (In, Al, Ga) N/GaN, наибольшее распространение получила металлизация на основе Ti/Al/M/Au, в которой би-слой Ti/Al обеспечивает низкое контактное сопротивление, при этом Ti формирует вакансии азота в приповерхностных слоях GaN вследствие образования соединения TiN, Au служит защитным слоем от образования окислов на поверхности контакта, а М (металл) выполняет роль барьера, который должен препятствовать диффузии металлов и предотвращать

образование эвтектической фазы  $Al_xAu_{1-x}$  с низкой температурой плавления, приводящей к латеральному потоку металлов и размытию краёв контакта. В качестве диффузионного барьера используются различные тугоплавкие металлы - Ti, Ni, Pd, Pt, Mo, Cr, Nb, Ir, Ru, Re, Ta, W, среди которых интерес представляет Mo, имеющий высокую температуру плавления (2623 °C) и низкие коэффициенты диффузии для других металлов. Важно отметить, что Mo практически не образует твёрдых растворов с Au и интерметаллических соединений с другими металлами [1-5]. При этом существенную роль при изготовлении контакта играют способы подготовки поверхности перед металлизацией и режимы отжига контакта (температура и время). Несмотря на значительный объем исследований в этой области, получение воспроизводимых низкоомных омических контактов с малой шероховатостью поверхности контакта и высокой термостабильностью для HEMT транзисторов на основе полупроводников III-N все еще остается актуальной задачей.

**Цель работы** состоит в выявлении технологических закономерностей формирования низкоомных омических контактов с малой шероховатостью поверхности к HEMT транзисторам на базе гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN, выращенных методом MOCVD на подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si и 4H-SiC диаметром до 100 мм.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Численное моделирование параметров омических контактов в программе Silvaco TCAD [A.2., A.3] к HEMT транзисторам на базе гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN, оценка параметров омических контактов;

2. Формирование рабочих и тестовых структур для технологических исследований [A.4], разработка маршрутов технологических операций при изготовлении HEMT AlGaN/GaN и InAlN/GaN гетероструктур, отработка режимов быстрого термического отжига контактов, разработка оснастки и конструкции реактора для отжига тестовых HEMT структур, выбор газовой среды для отжига контактов;

3. Выбор металлизации Ti/Al/Mo/Au для производства омических контактов к гетероструктурам AlGaN/GaN и InAlN/GaN, отработка технологии изготовления омических контактов, включая обработку поверхности полупроводника перед металлизацией для снижения величины контактного сопротивления, определение оптимальной температуры и времени быстрого отжига омических контактов, исследование деградации контактов при длительном высокотемпературном нагреве.

4. Изготовление НЕМТ транзисторов на базе гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN с омическими контактами на основе металлизации Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм), исследование их параметров (токов насыщения, крутизны ВАХ, частотных характеристик) и устойчивости параметров к длительному высокотемпературному нагреву.

#### **Научная новизна работы**

1. Показана возможность использования металлизации Ti/Al/Mo/Au для формирования низкоомных омических контактов с малой среднеквадратичной шероховатостью поверхности при быстром термическом отжиге для НЕМТ транзисторов на базе гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN, выращенных методом МOCVD на подложках 4H-SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Si.

2. При переходе от атмосферы N<sub>2</sub> к атмосфере He при быстром термическом отжиге омических контактов на базе металлизации Ti/Al/Mo/Au для гетероструктур InAlN/GaN и AlGaN/GaN, выращенных на подложках 4H-SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Si большого диаметра, удается получить более однородный нагрев пластины и тем самым снизить разброс величин контактного сопротивления.

3. Предложен способ точного определения контактного сопротивления образцов с высоким слоевым сопротивлением на основе совместного измерения сопротивления контакта методом Ван-дер-Пау и методом Кельвина.

#### **Практическая значимость работы**

Показаны возможности создания низкоомных омических контактов с малой шероховатостью поверхности на основе металлизации Ti/Al/Mo/Au не только для отдельных экспериментальных образцов, но и в случае формирования контактов

для гетероструктур InAlN/GaN и AlGaN/GaN, выращенных на пластинах 4H-SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Si большого диаметра, до 100 мм. Контакты показали высокую устойчивость к длительному высокотемпературному нагреву и пригодность для разработки СВЧ усилителей мощности на базе HEMT транзисторов InAlN/GaN и AlGaN/GaN. Практическая значимость подтверждается выполнением этапов ПНИЭР «Исследование и разработка технологии изготовления сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем на основе гетероструктур InAlN/GaN для изделий космического применения». Соглашение №14.578.21.0240 от 26.09.2017 г.

### **Методология и методы исследования**

Решение поставленных задач потребовало использования комплекса технологических и метрологических методов исследований, включая жидкостную химическую и плазмохимическую обработку полупроводника в кислородной плазме, формирование резистивных пленок методом центрифугирования, контактную литографию, электронно-лучевую литографию, лазерную литографию, электронно-лучевое осаждение тонких пленок, быстрый термический отжиг, плазмохимическое осаждение из газовой фазы, реактивное ионное травление в индуктивно-связанной плазме, рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Закономерности (выбор металлизации, обоснование соотношения толщин металлов, температуры и времени отжига) формирования омических контактов с контактным сопротивлением 0,3 и 0,25 Ом•мм на базе металлизации Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм) к СВЧ HEMT для транзисторов на основе гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN соответственно, выращенных методом MOCVD на подложках 4H-SiC и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

2. Использование тонкого in-situ слоя Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> перед нанесением металлизации Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм) позволяет добиться значения среднеквадратичной шероховатости поверхности контакта не более 14 нм и 24 нм для гетероструктур

AlGaIn/GaN и InAlN/GaN соответственно, и понижения температуры отжига контактов на 40 °С.

3. Быстрый термический отжиг в атмосфере гелия омических контактов на базе металлизации Ti/Al/Mo/Au для гетероструктур InAlN/GaN и AlGaIn/GaN, выращенных на подложках 4H-SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Si большого диаметра, до 100 мм, обеспечивает разброс величины контактного сопротивления по пластине не более 10 %.

### **Степень достоверности и апробация работы**

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных экспериментальных методов исследования, воспроизводимостью полученных результатов и их согласованностью с современными представлениями о физических процессах- формирования омических контактов.

Результаты исследований опубликованы в 11 работах: 3 статьях, входящих в Перечень ВАК РФ, 4 публикациях в сборниках трудов Международных конференций, 2 публикациях в сборниках трудов Российских научных конференций, 2 свидетельствах о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы, и докладывались и обсуждались на 10-я и 11-я всероссийских конференциях «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (2015, 2017 г., Санкт-Петербург, Москва); Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2016» (2016 г., Томск), International Siberian Conference on Control and Communications (2017 г., Астана, Казахстан); XIII международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (2017 г., Томск); 26th Intern. Symposium «Nanostructures: Physics and Technology» (2018 г., Минск, Р. Беларусь).

### **Личный вклад автора**

Автором совместно с научным руководителем и научным консультантом формулировались цели работы, обсуждались пути их достижения, а также анализировались полученные результаты. Основные экспериментальные исследования проведены непосредственно диссертантом.



**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 112 страниц машинописного текста, включая 74 рисунка, 10 формул, 17 таблиц и списка литературы из 71 наименования. В соответствии с поставленными задачами вся диссертационная работа разделена на четыре главы.

Глава 1 посвящена особенностям характеристик транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT), изготовленных на базе кубических кристаллов. Рассмотрены фундаментальные особенности вюрцитных соединений группы III-N, главным образом, GaN, а также параметры СВЧ HEMT транзисторов на базе этих полупроводников – более высокая, чем для кубических кристаллов, выходная удельная мощность транзисторов, высокие рабочие температуры и толерантность к внешним воздействиям. Рассмотрены требования к материалам подложек на основе Si, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiC, используемых при производстве СВЧ HEMT, на базе гетероструктур AlGa<sub>x</sub>N/GaN и InAlN/GaN и особенности смешиваемости/несмешиваемости твердых растворов AlGa<sub>x</sub>N и InAlN, а также особенности формирования омических и выпрямляющих (барьер Шоттки) контактов к нитридным полупроводникам и механизмы их формирования, а также альтернативные методы изготовления низкоомных омических контактов.

В главе 2 рассматриваются: численное моделирование параметров омических контактов к HEMT транзисторам на базе гетероструктур AlGa<sub>x</sub>N/GaN и InAlN/GaN в программе *Silvaco TCAD*, формирование рабочих и тестовых структур для технологических исследований, представлены маршруты технологических операций при изготовлении HEMT гетероструктур, режимы быстрого термического отжига контактов, оснастка и конструкция реактора для отжига тестовых структур, выбор газовой среды для проведения процесса отжига, расчет параметров контактов методом длинных линий и особенности измерения контактного сопротивления структур с высоким слоевым сопротивлением.

В главе 3 приведены результаты проведенных экспериментов по разработке технологии формирования омических контактов к гетероструктурам AlGa<sub>x</sub>N/GaN и InAlN/GaN, подбору состава и толщин используемых слоёв металлизации, выбору

режимов быстрого термического отжига, определению зависимости параметров контактов от осуществляемых химических и плазмохимических обработок поверхности полупроводника перед напылением металлов и влиянию тонкого слоя *in-situ* диэлектрика  $\text{Si}_3\text{N}_4$  под контактом на его параметры. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии исследованы профили элементного состава металлизации Ti/Al/Mo/Au до и после отжига контактов.

Глава 4 посвящена разработке технологии изготовления однородных омических контактов на базе металлизации Ti/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGaN/GaN и InAlN/GaN, выращенных на подложках SiC и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  большого диаметра, до 100 мм, с учетом температурного изгиба пластин, а также испытанию этих контактов на высокотемпературную деградацию. Рассмотрено применение металлизации Ti/Al/Mo/Au в качестве омических контактов к СВЧ НЕМТ на базе гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN и приведены некоторые параметры полученных НЕМТ образцов.

В основных результатах и выводах подведен итог экспериментальным исследованиям, сформулированы основные результаты работы.

## ГЛАВА 1. Литературный обзор

### 1.1 Полупроводниковые НЕМТ транзисторы

При изготовлении НЕМТ транзистора желательно, чтобы полупроводниковые материалы для создания гетероперехода имели близкие параметры кристаллической решетки для уменьшения плотности дислокаций несоответствия на гетерогранице полупроводников. Чаще всего такой гетеропереход изготавливается на основе базового полупроводника и его твердого раствора, двух типов твердых растворов различного состава на основе базового материала или двух полупроводников с близкими параметрами решетки, например, AlAs/GaAs или AlGaAs/InGaAs. В полевом транзисторе с высокой подвижностью электронов в качестве проводящего канала используется квантовая стенка ( $QW$ ) с двумерным электронным газом ( $2DEG$ ), которая формируется на интерфейсе двух полупроводников с различной шириной запрещенных зон.

Типичная энергетическая диаграмма гетероперехода НЕМТ транзистора представлена на рисунке 1.1

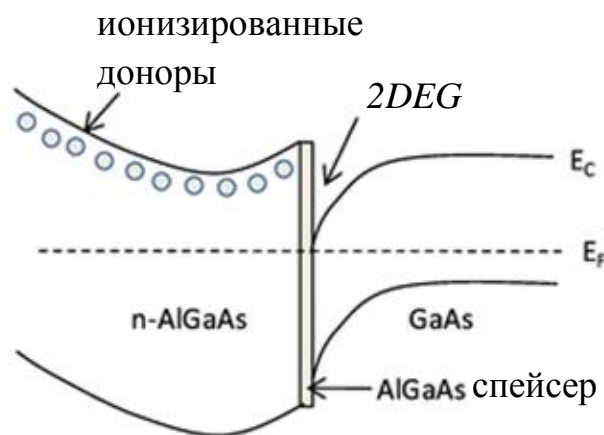


Рисунок 1.1 – Энергетическая диаграмма гетероперехода [1]

В таком гетеропереходе электроны из  $n$ -области легированного полупроводникового слоя с широкой запрещенной зоной перемещаются в слой нелегированного (слабо легированного) узкозонного полупроводника, создавая в

нем проводящий канал на основе двумерного электронного газа с высокой дрейфовой подвижностью электронов, что обеспечивает высокие рабочие частоты НЕМТ транзистора [2]. Типичная гетероструктура НЕМТ транзистора на базе AlGaN/GaN представлена на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Гетероструктура НЕМТ транзистора.

В случае НЕМТ транзисторов на базе кубических полупроводников обычно используются подложки из материала, входящего в состав гетероструктуры, поскольку в большинстве случаев имеются соответствующие объемные кристаллы достаточных размеров для изготовления таких подложек. На подложке эпитаксиальными методами выращивается буферный слой базового полупроводника, на котором формируется сравнительно тонкий слой широкозонного полупроводника. В некоторых конструкциях между этими слоями располагается тонкий нелегированный каналный слой узкозонного полупроводника. Также в некоторых конструкциях гетероструктур над узкозонным полупроводником наращивается тонкий разделительный (спейсерный) слой, который способствует пространственному разделению *2DEG* между каналным слоем и расположенным выше широкозонным полупроводником. НЕМТ транзисторы на основе кубических полупроводников демонстрируют отличные частотные характеристики, достигающие до нескольких сотен ГГц, но при этом имеют малые мощностные параметры из-за невысоких напряжений поля пробоя и низких рабочих температур.

С целью улучшения мощностных параметров НЕМТ транзисторов разрабатываются полупроводниковые материалы с более высокими напряжениями пробоя и рабочими температурами, такими как карбид кремния (SiC) и нитриды галлия, индия и алюминия (Al, Ga, In)-N. Эти полупроводниковые соединения имеют преимущества перед кубическими кристаллами при работе в области высоких температур и напряжений. Рабочая температура, изготовленных на базе карбида кремния структур, достигает 300°C, а по мере совершенствования качества таких структур и технологии их производства рабочая температура НЕМТ транзисторов на базе GaN может быть увеличена до 350–400°C [3]. Изобретателем данного вида транзисторов обычно считается Такаси Мимуру (Fujitsu, Япония) [3-4]. Однако, транзисторы на основе SiC имеют достаточно низкие рабочие частоты, поэтому основное внимание привлекли соединения группы III-N (AlN, GaN, InN) и их твердые растворы, которые в последние годы получили широкое использование в производстве как электронных, так и оптоэлектронных приборов. Этому способствовало развитие методов эпитаксиального выращивания данных соединений, таких как газофазная эпитаксия металлоорганических соединений (metal-organic chemical vapour deposition, MOCVD) и молекулярно-пучковая эпитаксия, (molecular beam epitaxy, MBE).

Особенностями нитридов группы III-N являются большие напряжения пробоя ( $U_{\text{проб}}$ ) и скорости дрейфа электронов в режиме насыщения ( $V_{\text{нас}}$ ), высокие рабочие температуры и устойчивость нитридов к внешним высокоэнергетическим воздействиям. Это способствовало их широкому применению в промышленном производстве приборов высокой удельной мощности, способных работать при высоких температурах и в условиях внешних высокоэнергетических воздействий, включая космические излучения. Некоторые фундаментальные параметры нитридных соединений и материалов, используемых в качестве подложек при производстве гетероструктур для НЕМТ транзисторов, представлены в Таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Некоторые параметры GaN, InN, AlN, 4H-SiC, 6H-SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si

Соединение	AlN	GaN	InN	4H-SiC	6H-SiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Si(111)
$E_g$ , эВ	6,2	3,42	0,7	3,26	3,03	9,4	1,12
$E_A$ , эВ	2,05;1,9	4,16	5,75	3,2	3,4	4,44	4,05
CNL, эВ	3,5	2,7	1,7	1,81	1,78	-	0,4
$K_{300}$ , Вт/см К	2,5-3,3	1,3-2,9	0,45; 0,8	4,9	4,9	0,5	1,5
КТР, 10-6/К	4,2	5,59	-	4,2	4,2	7,5	3,59
$U_{\text{проб}}$ , В/см	$8,4 \cdot 10^6$	$3,3 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^5$
$V_{\text{нас}}$ , см/с	$2 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^7$	$3,8 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^7$	-	$1 \cdot 10^7$
$T_{\text{пл}}$ , К	3487	2791	1373	3003	3003	2345	1688
$a$ , Å	3,111	3,189	3,544	3,070	3,081	4,758	5,431
$c$ , Å	4,978	5,185	5,718	10,053	15,12	12,991	-

Здесь  $E_g$  – ширина запрещенной зоны,  $E_A$  - электронное сродство,  $CNL$  - уровень зарядовой нейтральности,  $K_{300}$  – коэффициент теплопроводности, КТР – коэффициент теплового расширения.

Соединения (Al, Ga, In) N с кристаллической решеткой вюрцита демонстрируют значительную спонтанную поляризацию. При этом би-аксиальные напряжения растяжения/сжатия на интерфейсе широкозонный/узкозонный полупроводники индуцируют эффект пьезополяризации. Большой разрыв зон проводимости в сочетании с индуцированным эффектом поляризации зарядом обеспечивает значительную плотность, более  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>, двумерного электронного газа в проводящем канале на интерфейсе нитридных полупроводников без легирования широкозонного материала и позволяют в разы раз повысить удельную выходную мощность НЕМТ транзистора на основе нитридных полупроводников группы III-N по сравнению с транзисторами на базе кубических кристаллов. Так, НЕМТ транзисторы AlGaN/GaN, выращенные на подложках сапфира, изолирующего 4H-SiC, а также на подложке GaN показывают более высокие, чем транзисторы на основе GaAs, уровни выходной СВЧ мощности. Использование широкозонных нитридов группы III-N для производства транзисторов не только увеличило выходную мощность, но и температурную и радиационную устойчивость схем.

Конструкция НЕМТ транзистора на базе полупроводников группы III-N в целом подобна соответствующим конструкциям на основе кубических кристаллов. Их основное отличие состоит в отсутствии качественных GaN подложек большого диаметра для нитридных гетероструктур, что в значительной степени усложнило технологию эпитаксиального выращивания транзисторных структур на базе нитридных полупроводниковых соединений. Структура AlGaN/GaN НЕМТ обычно включает (сверху вниз): верхний (*cap*) слой нелегированного AlGaN (или GaN) толщиной от 2 до 10 нм выращенный при низких температурах ( $T \sim 550^\circ\text{C}$ ), слой  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $0,15 < x < 0,5$ ), проводящий канал на основе легированного,  $n = (2 - 5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  или (нелегированного) GaN толщиной порядка 50 нм, легированный примесями р типа для подавления фоновой проводимости буферный слой GaN толщиной от 0,5 до 2 мкм, зародышевый слой GaN, AlGaN или AlN и подложку SiC, Si или  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [5, 6].

Главное отличие нитридных транзисторов от транзисторов на базе кубических кристаллов состоит в использовании подложек из отличных от GaN материалов, которые должны обеспечивать минимальное расхождение с базовым полупроводником по параметрам решетки, иметь высокую теплопроводность для снятия тепловых ограничений и хорошие изолирующие свойства, обеспечивающие малые потери на высоких частотах [7-9].

## 1.2 Материалы подложек

Подложки нитридных полупроводников – критические компоненты в производстве НЕМТ транзисторов. Основными критериями при выборе материала для подложек при выращивании НЕМТ транзисторов на основе соединений III-N являются:

- а) соответствие параметров решеток подложки и полупроводникового материала;
- б) соответствие коэффициентов теплопроводности и термического расширения пленка/подложка;

- в) максимальная электрическая изоляция подложки;
- г) низкая плотность остаточных дефектов подложки;
- д) качество и свойство поверхности подложки;
- ж) коробление и прогиб подложки;
- з) механические и химические свойства подложки, проявляющиеся при утонении и травлении отверстий;
- и) цена за единицу площади подложки и доступность подложки с учетом ее диаметра.

Среди наиболее используемых материалов в качестве подложек для нитридных структур выступают сапфир ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), кремний (Si) и карбид кремния (SiC).

В таблице 1.1 представлены наиболее важные параметры этих материалов сравнительно с полупроводниками группы III-N.

Подложки из кремния Si (111) технологичны, доступны, дешевы и характеризуются достаточно высокой теплопроводностью, практически не ограничены по диаметру пластин и имеют низкую плотность дефектов. Но при этом сильное различие коэффициентов теплового расширения и параметров решетки кремния и GaN достаточно сильно усложняет процесс выращивания качественных эпитаксиальных структур на основе нитрида галлия на таких подложках. Основным недостатком Si (111) подложек состоит в их низкой теплопроводности.

Сапфир ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) доступен по стоимости и технологической разработанности. Недостатком его являются низкая теплопроводность и значительное несоответствие  $a$ -параметров решеток  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и GaN (~13 %), что приводит к формированию высокой плотности дислокаций несоответствия на интерфейсе GaN/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  прорастающих в активную область НЕМТ структуры. Для снижения плотности дислокаций проводится нитридизация поверхности  $\text{Al}_2\text{O}_3$  или его высокотемпературный ( $T \sim 1100^\circ\text{C}$ ) отжиг, а также наращивание низкотемпературного ( $T \sim 550^\circ\text{C}$ ) зародышевого слоя GaN, AlN, AlGaIn. К тому же особенности коэффициентов теплового расширения GaN и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  приводят к



биаксиальному сжатию пленки GaN в базальной плоскости, до  $\sim (0,2-1,0)$  ГПа, в зависимости от условий ее роста и толщины [10].

Монокристаллические подложки карбида кремния (4H-SiC) удовлетворяют большинству перечисленных требований к подложечному материалу для GaN. Нитридные гетероструктуры, выращенные на таких подложках, как правило, имеют высокие мощностные и частотные характеристики. В настоящее время большинство производителей СВЧ компонентной базы используют в производстве и разработках СВЧ GaN транзисторов гетероструктуры, выращенные на подложках карбида кремния. Есть ряд производителей, использующих подложки кремния для производства и разработки СВЧ GaN транзисторов и МИС для отдельных сегментов рынка: недорогих транзисторов и МИС с невысокими параметрами и маломощных СВЧ МИС миллиметрового диапазона. Основным недостатком карбида кремния, препятствующим его широкому использованию, является дороговизна по сравнению с подложками на основе сапфира или кремния. Так, соотношение стоимости единицы площади (отн. ед.) подложек на основе Si, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiC составляет около 1:10:100.

### 1.3 Твердые растворы AlGaN, InAlN

Твердые растворы AlGaN, InAlN используются в качестве широкозонных слоев при создании AlGaN/GaN HEMT, что позволяет сформировать квантовую яму с плотностью двумерного электронного газа более  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Незначительное несоответствие параметров решёток AlN/GaN (3,5%) обеспечило возможность получения таких растворов практически во всем интервале составов, что и обеспечило широкое распространение таких структур. В то же время HEMT структуры InAlN/GaN позволяют достигнуть более высокой плотности *2DEG* в проводящем канале и тем самым повысить удельную выходную мощность транзистора. Однако, такие растворы формируются на основе AlN и InN с сильно различающимися параметрами - температурой плавления, теплопроводностью, а также постоянными кристаллических решёток AlN/InN (13,5%), что это приводит

к существенному различию в условиях их выращивания. Если AlN выращивают при температурах ( $T \geq 1100^{\circ}\text{C}$ ) и низких отношениях V/III в газовой фазе, то InN при низких температурах ( $T \leq 700^{\circ}\text{C}$ ) и высоких отношениях V/III в газовом потоке. Это усложняет возможности получения качественных твердых растворов InAlN, которые имеют области не смешиваемости, за пределами которых они демонстрируют гомогенный состав, достаточно совершенную структуру и высокую термическую стабильность [11]. При этом твердый раствор  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  при составах  $x \approx (0,17-0,19)$  имеет  $a$ -постоянную решетки хорошо согласованную с соответствующим параметром решетки GaN.

#### 1.4 Контакты к НЕМТ структурам

Величина удельного сопротивления омических контактов имеет большое значение, поскольку это в значительной степени определяет крутизну вольтамперной характеристики (ВАХ) и ток насыщения транзистора, его резистивный разогрев и тем самым выходную удельную мощность СВЧ структуры. В технологии формирования низкоомных и термически стабильных омических контактов к НЕМТ транзисторам на основе соединений группы III-N существует ряд проблем, включая: выбор металлов с необходимыми работами выхода и температурами плавления, предварительная химическая и плазмохимическая обработка поверхности полупроводника перед нанесением металлов, обоснование и выбор температуры и времени вплавления контактов, обеспечение гладкой морфологии поверхности контакта и его долговременной термостабильности. Для изготовления полевого НЕМТ транзистора необходимо сформировать как выпрямляющие контакты (как правило для этого применяют контакт с барьером Шоттки) для затвора, так и невыпрямляющие (омические) контакты для истока и стока.

#### 1.5 Выпрямляющий контакт затвора

Затвор полевого транзистора должен иметь значительный энергетический барьер для управления потоком двумерных электронов в проводящем канале между истоком и стоком и уменьшения обратных токов транзистора. Высоту барьера Шоттки определяют работа выхода металла ( $WF$ ), а энергетическое положение уровня  $CNL$  полупроводника относительно уровня вакуума дает работу выхода полупроводника. Измерения структур металл/n-GaN показали, что эффективная высота барьера для электронов, оцененная из измерений ВАХ и CV характеристик структур, составляет около (0,8-1,0) эВ [12]. В НЕМТ структурах более жесткое закрепление уровня Ферми вблизи  $CNL$  может быть обеспечено за счет выращивания на поверхности полупроводника тонкого низкотемпературного ( $T \approx 550^{\circ}\text{C}$ ) дефектного слоя GaN (*cap layer*), удельное сопротивление которого оценивается на уровне  $10^9$  Ом/см. Высокая дефектность этого слоя приводит к закреплению уровня Ферми вблизи  $\sim E_v + 2,5$  эВ, что в целом близко к данным полученным в облученных нейтронами кристаллах GaN [10]. Этот слой позволяет обеспечить высоту барьера металл/n-GaN на уровне  $\sim 1,0$  эВ практически независимо от работы выхода металла [13]. К тому же этот слой предположительно пассивирует проникающие дислокации, ответственные за токи утечки НЕМТ транзистора.

## 1.6 Невыпрямляющий (омический) контакт

Низкое сопротивление контакта является одним из основных требований при производстве НЕМТ транзистора, поскольку контакт в значительной степени определяет крутизну ВАХ и ток насыщения НЕМТ транзистора, а также резистивный разогрев при больших плотностях тока. В идеале такой контакт должен иметь нулевой энергетический барьер для носителей заряда. В реальности это сводится к необходимости понижения высоты барьера Шоттки и/или увеличения его туннельной прозрачности. При изготовлении омических контактов используются различные металлы, некоторые параметры которых, (температура

плавления  $T_{пл}$ , удельное сопротивление  $\rho$  (300 К), работа выхода ( $WF$ ) представлены в таблице 1.2 [14].

Таблица 1.2 –  $T_{пл}$ ,  $\rho \times 10^4$  и  $WF$  металлов для формирования омических контактов

Металл	Al	Ag	Au	Ni	Pd	Ti	Pt	V	Ru	Nb	Mo	W
$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	660	962	1064	1455	1554	1668	1758	1910	2334	2447	2623	3422
$\rho$ , Ом·мм	0,28	0,16	0,24	0,87	1,1	5,5	1,1	2,0	4,3	1,6	0,59	0,54
$WF$ , эВ	4,2	4,7	4,8	4,95	4,98	4,32	5,45	3,8	4,52	3,99	4,20	4,54

При этом используются однослойные, но чаще многослойные композиции различных металлов. Высота барьера металл/полупроводник для электронов может быть частично понижена за счет выбора металла с малой работой выхода (для дырок с большой работой выхода металла). Однако, эти возможности ограничены, поскольку для большинства металлов  $WF \approx (4,2 - 5,4)$  эВ близка работе выхода полупроводников около 4,7 эВ. Другой путь понижения эффективной высоты барьера металл/полупроводник - легирование контактной площадки полупроводника изоморфными примесями путем диффузии или ионного внедрения, что в значительной степени усложняет технологию производства контактов. В некоторых случаях возможно «подлегирование» приповерхностного слоя полупроводника за счет нарушения его стехиометрии при химическом взаимодействии металлов контакта с поверхностью полупроводника, а также при химической (плазмохимической) обработке поверхности полупроводника перед металлизацией.

Базовой композицией металлов при производстве омических контактов к  $n$ -GaN и твердым растворам на основе соединений III-N является структура типа Ti/Al/Металл/Au, в которой Au обеспечивает защиту контакта от окисления, а барьерный слой металл выбирается из тугоплавких материалов (Ti, Ni, Pd, Pt, Mo, Cr, Nb, Ir, Ru, Re, Ta) и используется для ограничения диффузии металлов к

поверхности полупроводника и к поверхности контакта. Формирование омического контакта Ti/n-GaN рассматривается как результат образования при отжиге соединения TiN ( $WF=4.74$  эВ) под слоем титана, что энергетически выгодно с учетом энтальпии образования соединений AlN, GaN, InN и TiN (-318,4; -109,6; -138,1 и -265,5 кДж/моль) [14]. Алюминий при этом применяется для уменьшения сопротивления контакта. Исследования контактов Ti, TiN и Ti/TiN показали, что простое нанесение TiN на поверхность GaN не приводит к формированию омического контакта. Необходим высокотемпературный отжиг, в результате которого под слоем Ti образуется нейтральная вакансия азота ( $V_N^0$ ) с резонансным донорным уровнем вблизи  $E_C+0,51$  эВ в GaN [15]. Образование  $V_N^0$  приводит к сдвигу приповерхностного уровня Ферми в направлении дна зоны проводимости GaN и, соответственно, уменьшению толщины барьера металл/n-GaN, что приводит к эффекту уменьшения сопротивления контакта как за счет уменьшения барьера, так и увеличения его туннельной прозрачности. При этом контактное сопротивление зависит не только от типа металлизации, но и от уровня исходного легирования полупроводника, обработки его поверхности перед металлизацией, температуры и времени отжига металлизации.

## 1.7 Требования к омическим контактам

Паразитные сопротивления истока и стока – один из важнейших факторов, влияющих на усилительные характеристики данных приборов [16-20]. Сопротивление истока складывается из сопротивлений омического контакта и сопротивления слоя полупроводника между истоком и затвором. В отличие от GaAs транзисторов, на сопротивление истока в GaN транзисторах влияют примерно в равной степени оба слагаемых. Так происходит из-за того, что в технологии GaN транзисторов редко используется сильнолегированный приконтактный слой n-типа и травление заглубления затвора. Минимизация сопротивления омического контакта и сопротивления слоя исток-затвор предполагает оптимизацию омического контакта в соответствии с требованием

минимального сопротивления при минимальном рельефе и неровности края контакта. С учетом того, что слоевое сопротивление гетероструктуры AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> составляет 300-400 Ом/□, а расстояние затвор-исток как правило, составляет менее 1 мкм, вклад в сопротивление истока от полупроводниковой гетероструктуры можно оценить в 0,3-0,4 Ом·мм для расстояния затвор-исток 1 мкм. Вклад в сопротивление истока гетероструктуры InAl<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> еще меньше за счет в 1,5-2 раза меньшего слоевого сопротивления гетероструктуры. Существенно уменьшить сопротивление истока можно, не меняя конструкцию, только за счет уменьшения расстояния затвор-исток, что невозможно сделать, если контакт после отжига меняет форму и габариты, а неровность края омического контакта составляет более 0,2-0,3 мкм.

Типичные значения для контактного сопротивления находятся в диапазоне 0,3÷0,8 Ом·мм, минимальными требованиями к омическому контакту можно считать сопротивление 0,3-0,4 Ом·мм (т.е. сопротивление, при котором вклады в сопротивление истока от сопротивления омического контакта и сопротивления слоя исток-затвор примерно равны).

В большинстве публикаций, посвященных Ga<sub>N</sub> транзисторам, авторы используют структуры Ti/Al/Ni/Au в омических контактах, причем такие структуры обладают довольно низким контактным сопротивлением, но имеют RMS поверхности порядка 40-60 нм [21-23], при этом рельеф на них крупный, что может приводить к неоднородностям толщины резиста при литографии затвора. Типичный вид контактов с барьерным слоем никеля показан на рисунке 1.3.

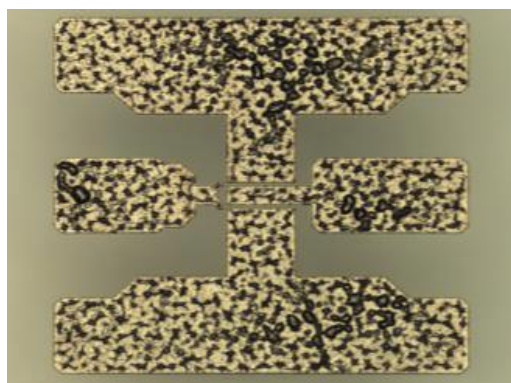


Рисунок 1.3 – Типичный вид контактов на основе Ti/Al/Ni/Au [24].

В литературе проблемы с качеством омических контактов связывают с образованием в ходе отжига высокоомных соединений:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Au}_5\text{Al}_2$  и  $\text{AuAl}_2$  [25,26].

Среди тугоплавких металлов особый интерес представляют Mo ( $T_{\text{пл}}=2623$  °C) имеющий низкие коэффициенты диффузии для других металлов. Важно отметить, что Mo практически не образует твёрдых растворов с Au и интерметаллических соединений с другими металлами. К тому же омические контакты Ti/Al/Mo/Au после отжига обладают относительно хорошими электрическими, морфологическими и структурными параметрами [27,28]. Поскольку это является важным критерием оценки качества контактов создании коротко-канальных приборов, для исследования была выбрана металлизация на основе Ti/Al/Mo/Au.

## 1.8 Механизм формирования омических контактов

Попытки использования одних и тех же схем металлизации контактов различными исследователями приводят к сильно отличающимся друг от друга результатам. Например, использование металлизации с тонким слоем Ti/Al (без напыления барьерного слоя и золота, т.к. образцы использовались лишь для разового тестирования) дало противоречивые данные [29-34]: заявленные значения контактного сопротивления для исследованных образцов у различных групп разработчиков составляют от 0,3 до 1 Ом·мм. Предлагаемый в различных работах механизм формирования омических контактов также сильно отличается в различных исследованиях. Считается, что для успешного формирования омического контакта, на границе раздела GaN/контакт должны соблюдаться определенные условия. Так, различные соотношения толщин одних и тех же металлов омического контакта ведут к появлению различных продуктов реакции, что в свою очередь оказывает влияние на значение контактного сопротивления. Две группы исследователей [29,30] получили следующие результаты: группа 1 использовала металлизацию вида Ti/Al (20/100 нм) на n-GaN подвергнутому

реактивному ионному травлению (RIE) и установили, что слой TiN сформировался на границе раздела металл/полупроводник при температуре отжига 900° С и времени 30 сек, вторая группа исследователей исследовала Ti/Al с соотношением толщин (35/15 нм) и нашла слой с высокой концентрацией Al при температуре отжига 600° С и времени отжига 15 сек. Данные контакты, хотя и одинаковые по элементному составу, требовали существенно различающихся условий быстрого термического отжига для получения практически одинаковых значений контактного сопротивления.

В настоящее время нет единого мнения о механизме формирования омических контактов к AlGaN/GaN. Известно, что Al имеет малую высоту барьера, наименьший среди металлов барьер к GaN, чем и было обусловлено его использование в составе металлизаций омического контакта, начиная с самых первых работ по омическим контактам на GaN [35]. Использование Ti имеет менее однозначное объяснение. По одной из гипотез, Ti участвует в реакции с нитридами, при этом формируя TiN или AlTi<sub>2</sub>N после быстрого термического отжига. В то же время, диффундировавшие Ti и Al снижают содержание собственного окисла галлия на поверхности AlGaN/GaN. В таких структурах также используется Au, за счет чего предотвращается окисление Ti и Al во время процесса отжига. Таким образом, омический контакт образуется при реакции Ti с AlGaN, при этом образующийся TiN способствует понижению высоты и ширины потенциального барьера. Когда времени и температуры отжига недостаточно, омические контакты оказываются некачественными в связи с малым количеством прореагировавших Al и Ti. С увеличением температуры и времени отжига, всё большее количество Al диффундирует внутрь AlGaN и реагирует с Ti, тем самым понижая контактное сопротивление. Значительная взаимодиффузия металлов наблюдается при температурах выше 900°С, что уже ведёт к деградации контактных характеристик.

В других работах [32] высказывается предположение, что после проведения операции быстрого термического отжига рядом со слоем AlGaN/GaN создается пограничный слой (рисунок 1.4). Сверху данного слоя формируется слой TiN



представляющий из себя небольшие (около 10 нм) зерна, также содержащий примеси золота и алюминия, а на поверхности контакта формируется насыщенный молибденом слой (содержащий Au, Al и Ti).

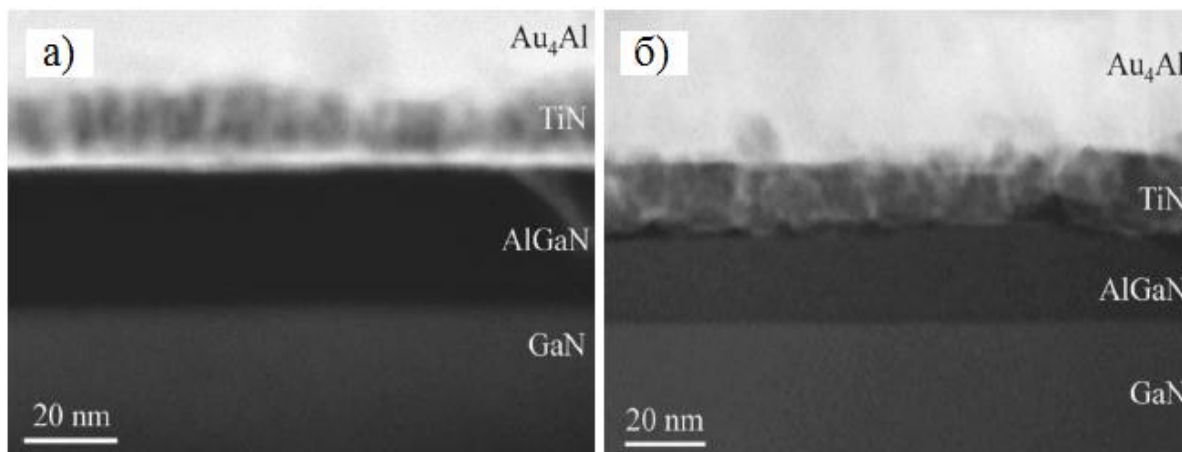


Рисунок 1.4 – STEM-изображения Ti/Al/Mo/Au контактов после БТО при 775 ° C (а) и 800° C(б).

Рассмотренная модель применима для образцов с *in-situ* Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> пассивацией, так как предполагается, что за счет химических реакций на границе раздела металл/полупроводник Si блокирует формирование соединения TiN, тем самым позволяя формироваться слою AlN. Считается, что при отжиге контактов слой Al расплавляется при температуре около 600° C и сплавляется с окружающими металлами (Au и Mo). Сплав молибдена, в свою очередь не является эффективным диффузионным барьером для золота. Нитрид титана формируется вследствие реакции Ti и GaN, после чего Au (или Au<sub>4</sub>Al) диффундирует сквозь TiN (золото и алюминий почти всегда могут быть найдены в слое TiN). Присутствие Al и формирование AlN на границе раздела имеет резкую зависимость от температуры отжига и может быть связано с переходом контакта Шоттки к омическому контакту при температурах отжига 800° C с возможным образованием вакансий азота.

## 1.9 Альтернативные методы формирования омических контактов

В подавляющем большинстве исследований для получения качественных омических контактов используются типичные для GaAs технологии методы предварительной обработки поверхности в растворе HCl и кислородной плазме (для удаления окислов с поверхности AlGaIn/GaN). Основные варианты технологического маршрута изготовления омических контактов включают:

а) жидкостное/плазмохимическое травление поверхности перед операцией напыления – например, в случае травления в SiCl<sub>4</sub> плазме с напряжением смещения минус 300 В, в течении 60 сек, полагается, что бомбардировка поверхности улучшает контактные характеристики [36];

б) включение тонкого (5-10 нм) слоя Si в Ti/Al/X/Au – например, Ti/Si/Al/Si/Mo/Au приводит к формированию TiSi<sub>x</sub> на границе раздела металл/полупроводник и понижению высоты потенциального барьера [37];

в) использование несплавных контактов – после легирования (либо за счет ионной имплантации и последующей активации при ~1260° С в атмосфере N<sub>2</sub> и NH<sub>3</sub>, либо за счет селективного эпитаксиального роста n+ слоя в областях омических контактов). Сопротивление полученных таким методом омических контактов лежит в диапазоне от 0,8 до 1 Ом·мм [38];

г) V/Al/Pt/Au контакты – замена титана на ванадий исходя из предположения, что V может сформировать термически стабильный нитрид, имеющий низкую работу выхода. При отжиге в 650° С, данный вид контактов имел сопротивление порядка 0,8 Ом·мм ± 0,1 Ом·мм [39];

д) контакты, отжигаемые через слой *in-situ* пассивации – слой Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> наносится методом МЛЭ сразу же после выращивания структуры транзистора с высокой подвижностью электронов. Эффективность такой пассивации доказана методом сравнения устройств, полученных с использованием данной методики и транзисторов, пассивированных *ex-situ* методами, в которых слой диэлектрика наносился до или после формирования затворов [25];

е) контакты с бездрагметальной технологией (Ti/Al/Ni/Pt, Ta/Al, Ti/Al/W) имеют сопротивление порядка 0,5 Ом·мм [40,41].

## ГЛАВА 2. Методика эксперимента

### 2.1 Моделирование омических контактов

Физическое моделирование омического контакта к гетероструктуре InAlN/GaN проводилось в программном продукте в Silvaco TCAD с целью определения параметров, позволяющих получать результаты расчетов вольт-амперных характеристик полупроводниковых гетероструктур с омическими контактами, соответствующие экспериментальным данным. Модуль Atlas в программном пакете Silvaco TCAD позволяет задавать модель электродов – омических контактов и Шоттки. По умолчанию электрод, контактирующий с полупроводниковым материалом, считается омическим. Если задана функция работы выхода, электрод обрабатывается как контакт Шоттки. В простом случае, для задания электрода достаточно указать его геометрические параметры посредством оператора ELECTRODE и указать его вид в строке CONTACT. Atlas поддерживает несколько граничных условий, некоторые из которых непосредственно связаны с омическими контактами. Одним из таких условий являются граничные условия по напряжению – «Voltage boundary conditions». При этом омические контакты реализуются как простые граничные условия Дирихле, где фиксируются поверхностный потенциал, концентрация электронов и концентрации дырок ( $\psi_s$ ,  $n_s$ ,  $p_s$ ). Квазипотенциалы Ферми основных и неосновных носителей равны приложенному смещению электрода (т.е.  $\varphi_n = \varphi_p = V_{\text{applied}}$ ). К электродам можно подключать сосредоточенные элементы между приложенными смещениями и границей с полупроводником.

Модель омического контакта приведена на рисунке 2.1. Модель для симуляции электрода и расчета его параметров представляет собой гетероструктурный резистор толщиной в 100 мкм. В качестве барьерного слоя использовались AlGaIn или InAlN слои, под ними располагался слой GaN. На основе расчетов и проведенных измерений, были подобраны параметры гетероструктуры. Для структуры AlGaIn/GaN были выбраны значения мольной

доли Al в соединении ( $X_{Al}$ ) 23 % при толщине слоя AlGaN – 20 нм. При таких характеристиках барьерного слоя расчетная концентрация электронов в *2DEG* составляет  $N_{2DEG} = 7.67 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , что хорошо согласуется с экспериментальными данными. В расчетах использовалось значение подвижности электронов в GaN равное  $1300 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Для структуры InAlN/GaN были выбраны значения мольной доли In в соединении ( $X_{In}$ ) 12-13 % при толщине барьерного слоя InAlN 5 нм. Расчетная слоевая концентрация *2DEG* составила  $N_{2DEG} = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , что согласуется с экспериментальными данными. Используемая в расчетах подвижность электронов составляла  $800 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ .

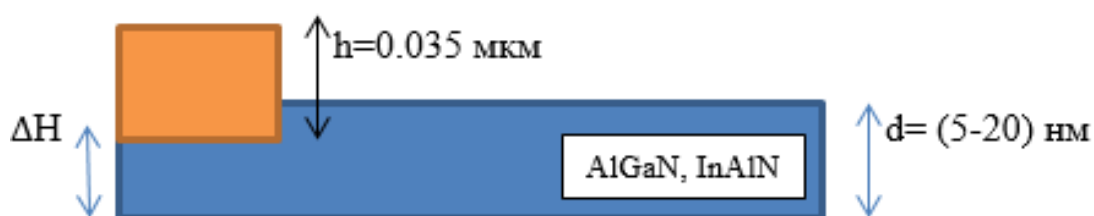


Рисунок 2.1 – Модель омического контакта

В симуляции кроме численных величин прибора необходимо учитывать и физические процессы, свойственные данному типу устройства [42]. Для расчета учитывались такие свойства и особенности выбранных гетероструктур, как поляризационные эффекты и вектора их направленности в структуре. Решалась самосогласованная задача Шредингера – Пуассона для нахождения концентрации основных носителей.

Для управления величиной сопротивления контактов  $R_c$  варьировались положение контакта относительно границы с полупроводником (барьерным слоем гетероструктуры), параметры легирования подконтактных областей и работа выхода.

Структура полупроводникового резистора (транзистора без затвора), использованная в расчетах, включает в себя гетероструктуру InAlN/AlN/GaN с толщинами 5/1/500 нм (рисунок 2.2).

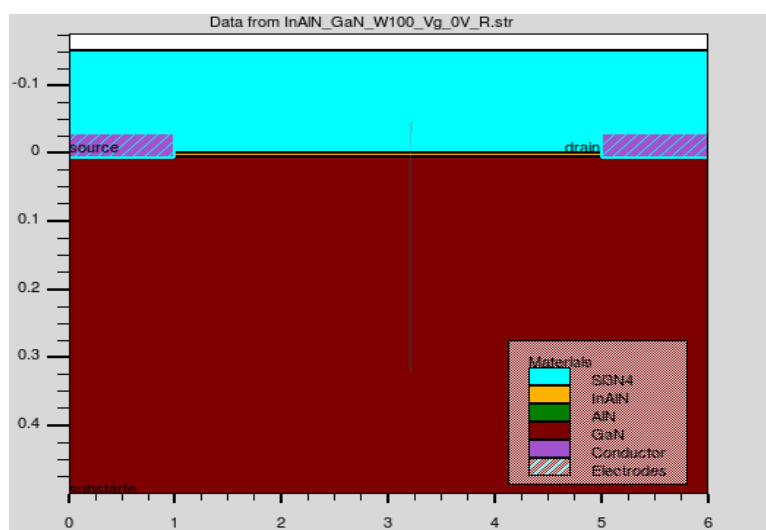


Рисунок 2.2 – Модель омического контакта к гетероструктуре InAlN/AlN/GaN

Вертикальная линия на рисунке 2.2 указывает область среза, распределение концентрации в котором указано на рисунке 2.3.

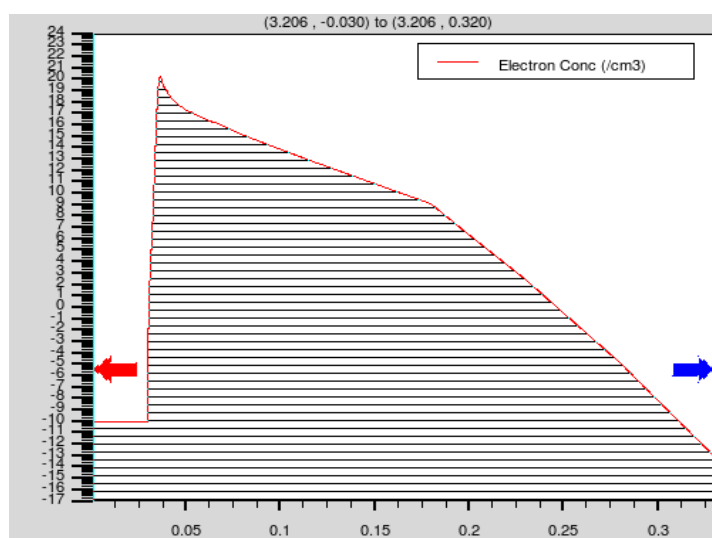


Рисунок 2.3 – Распределение концентрации 2DEG в разрезе гетероструктуры InAlN/AlN/GaN.

Слоевое сопротивление для структуры, полученное из формулы 2.1 с учетом данных о подвижности и слоевой концентрации, составляет 260 Ом/□.

$$R_{sh} = \frac{1}{N_{sh} \cdot \mu \cdot q}, \quad (2.1)$$

Где  $R_{sh}$  – слоевое сопротивление;  $N_{sh}$  – слоевая концентрация  $2DEG$ ;  $\mu$  – подвижность носителей;  $q$  – заряд электрона;

Для характеристики контактного сопротивления омических контактов структур с планарным протеканием тока (в т.ч. полевых транзисторов) обычно используется сопротивление, приведенное к ширине контакта, равной 1мм, т.е. в Ом·мм.

Общее сопротивление структуры  $R_{total}$  представляет собой суммарное значение слоевого и контактного сопротивлений (формула 2.2):

$$R_{total} = R_{sh} \cdot \frac{d}{W} + 2 \cdot R_c \cdot \frac{1000}{W}, \quad (2.2)$$

Где  $d$  – расстояние исток – сток ( $d = 4$  мкм),  $W$  – ширина резистора, выбранная для расчета равной 100 мкм,  $R_c$  – контактное сопротивление.

Из полученного при расчете значения  $R_{total}$  определялось значение контактного сопротивления  $R_c$ .

Для получения совпадающего с экспериментальными значениями сопротивления контактов были рассмотрены различные конфигурации моделей омических контактов. При расположении омических контактов непосредственно на поверхности барьерного слоя и отсутствия легирования под ними расчет показал отсутствие линейной вольт-амперной характеристики в резисторе. Углубление такого контакта до середины барьерного слоя (рисунок 2.4) дает ВАХ, представленную на рисунке 2.5.

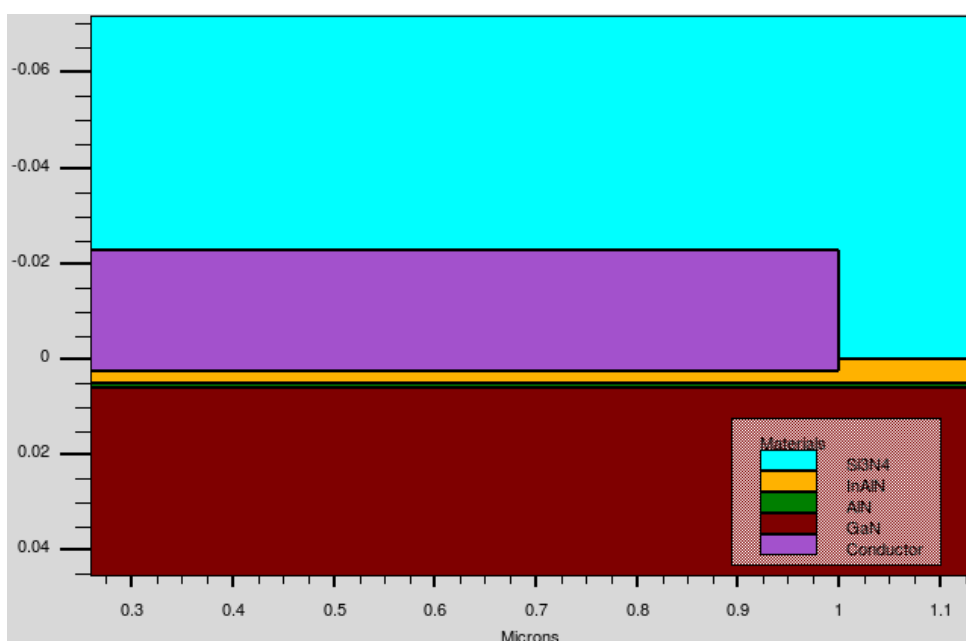


Рисунок 2.4 - Конфигурация омического контакта с углублением

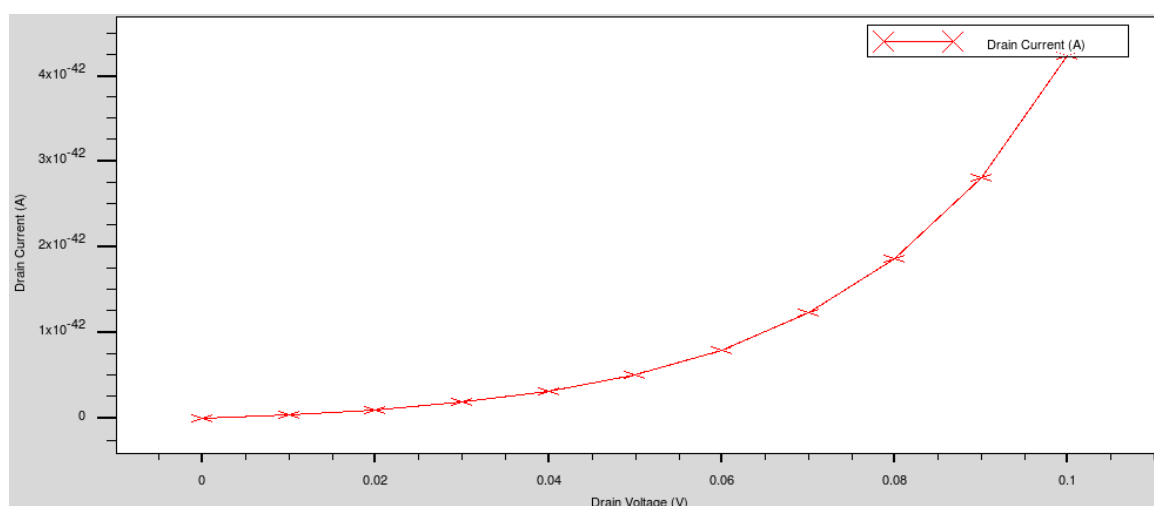


Рисунок 2.5 – Вольт-амперная характеристика контакта с углублением

Поскольку понижение границы омического контакта не дало необходимых результатов, далее рассмотрены модели контакта с углублением до слоя GaN и ниже, а также контакты, металлизация в которых полностью расположена на поверхности, а области под контактами легированы до концентраций мелких доноров ( $10^{17} - 10^{20}$ )  $\text{см}^{-3}$  с учетом данных [44-47]. ВАХ таких контактов для гетероструктуры InAlN/AlN/GaN структуры представлены на рисунке 2.6-2.8.



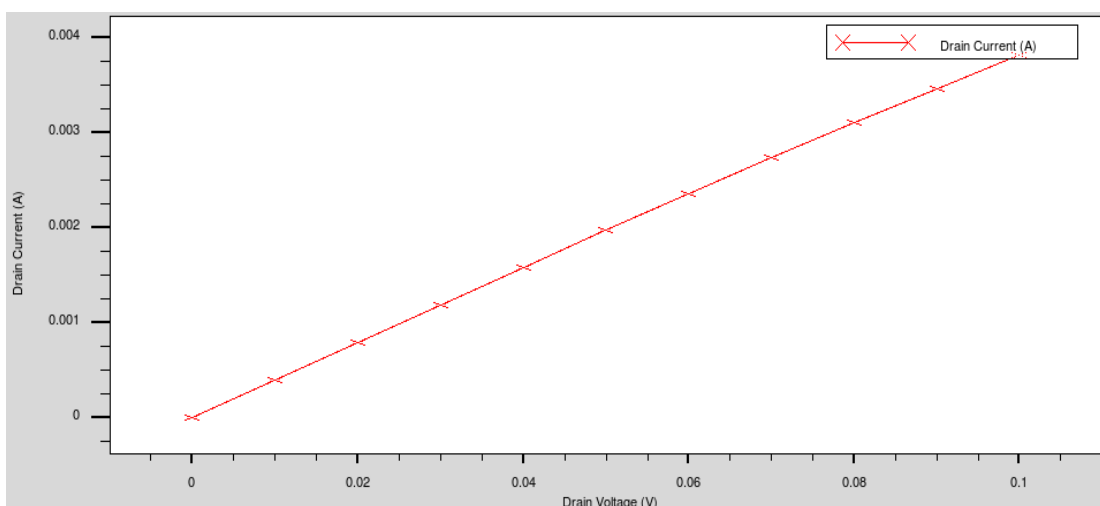


Рисунок 2.6 – Вольт-амперная характеристика InAlN/AlN/GaN структуры с легированием ( $n=10^{17}$  см<sup>-3</sup>) подконтактных областей и расположением электродов на границе с слоев AlN/GaN

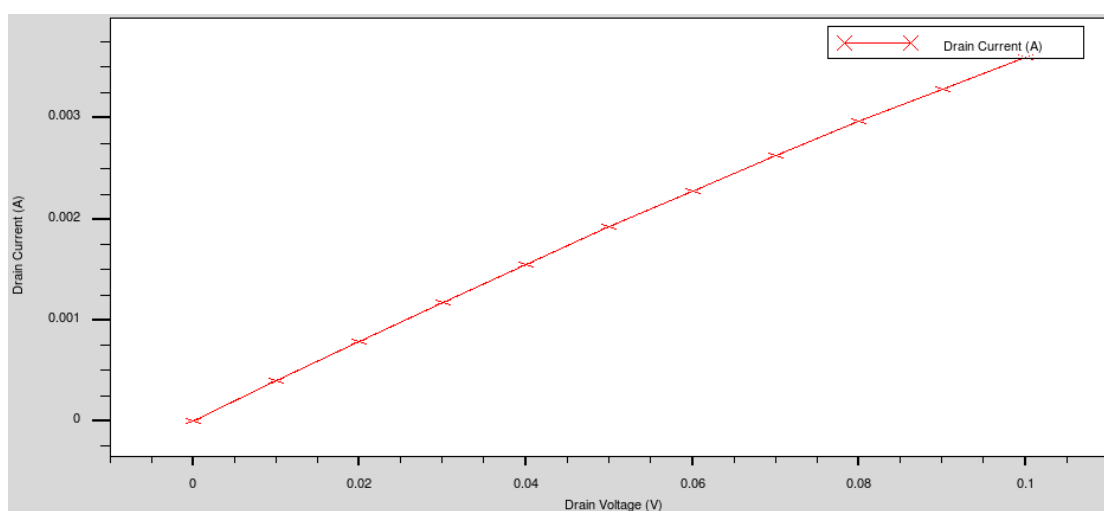


Рисунок 2.7 – Вольт-амперная характеристика InAlN/AlN/GaN структуры с легированием ( $n=10^{17}$  см<sup>-3</sup>) подконтактных областей и расположением электродов в слое AlN

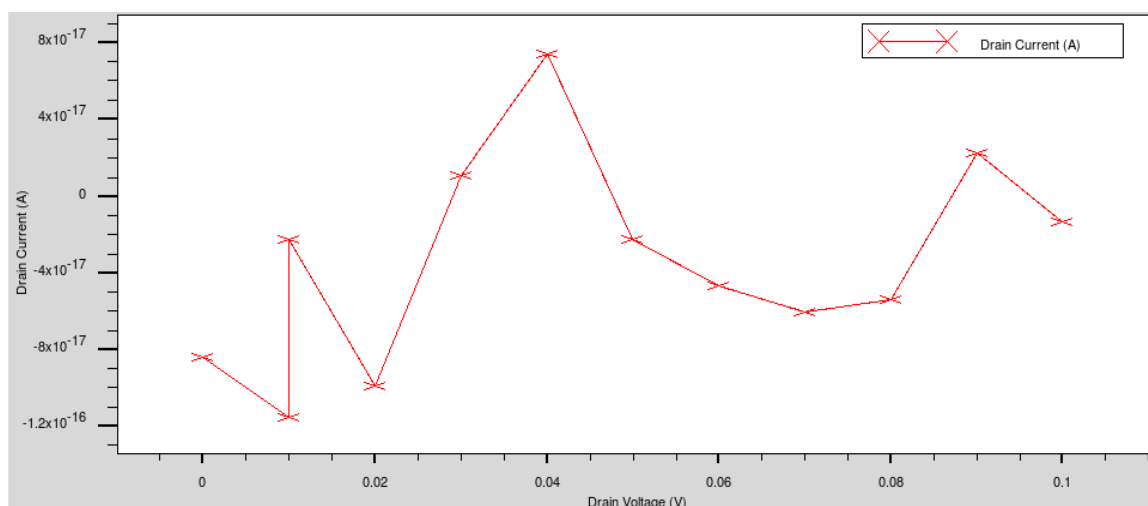


Рисунок 2.8 – Вольт-амперная характеристика InAlN/AlN/GaN структуры с легированием ( $n=10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) подконтактных областей и расположением электродов на поверхности барьерного слоя InAlN

Таблица 2.1 – Результаты моделирования омических контактов с различной степенью залегания и уровня легирования подконтактной области

№	$R_s$ , Ом/□	$N_{OK}$ , $\text{см}^{-3}$	X (глубина залегания ОК относительно границы канала), нм	Контактное сопротивление, Ом·мм
1	260	$10^{17}$	0	6,29
			2	6,86
			4	7,05
2	260	$10^{18}$	0	1,09
			2	0,97
			4	0,91
3	260	$10^{19}$	0	0,27
			2	0,29
			4	0,24
4	260	$10^{20}$	0	0,21
			2	0,15
			4	0,19

Таким образом, наличие примеси в подконтактной области обеспечивает линейность ВАХ. В дальнейшем использованы модели контакта на границе с канальным слоем и заглубленные в слое GaN (рисунок 2.6 и 2.7).

Значения сопротивлений контактных структур полученных в ходе симуляции в Silvaco TCAD приведены в таблице 2.1.

Из данных таблицы 2.1, что увеличение уровня легирования приводит к уменьшению сопротивления контакта. Для того, чтобы модель удовлетворяла значению  $R_c=0,3 \text{ Ом}\cdot\text{мм}$  необходимо задавать электроды на границе с канальным слоем и уровнем легирования  $N_{OK}=1\cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

## 2.2 Конструкция гетероструктуры

Использованы гетероструктуры, выращенные методом MOCVD на подложках 4H-SiC диаметром 100 мм. Значения слоевого сопротивления, Холловской концентрации и подвижности электронов для структур  $\text{In}_{0.14}\text{Al}_{0.86}\text{N}/\text{GaN}$  составили  $220 \text{ Ом}/\square$ ,  $2\cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и  $1200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  соответственно, а для  $\text{Al}_{0.25}\text{GaN}_{0.75}/\text{GaN}$  –  $330 \text{ Ом}/\square$ ,  $1.3\cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и  $2100 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Для InAlN условиями роста являются компромисс между InN и AlN, а именно давление в газовом потоке 200 мбар, использование азота в качестве несущего газа, относительно низкие потоки аммиака и скорости роста порядка 0,1-0,3 мкм/час. Были выбраны ростовые параметры, обеспечивающие формирование слоев с содержанием In около 14%, как дающего максимальное качество материала.

Конструкции гетероструктур на представлены на рисунке 2.9.

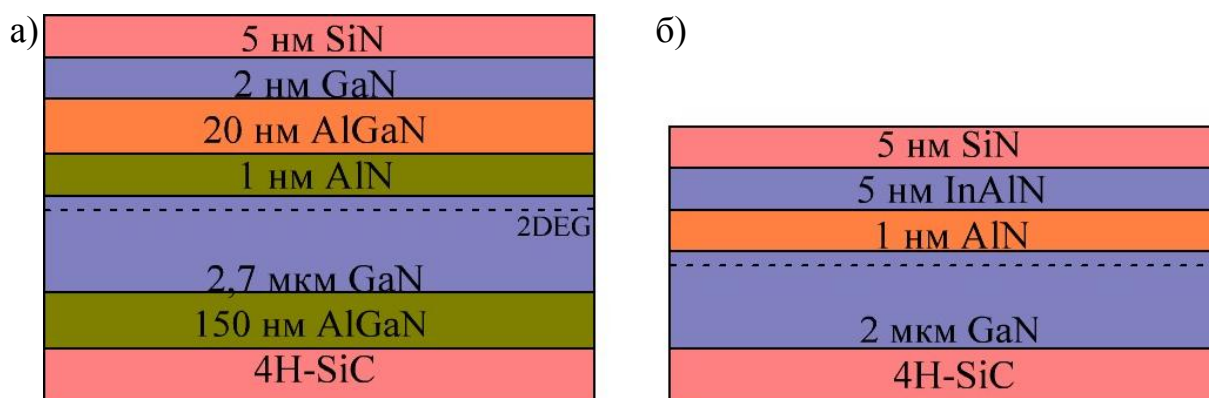


Рисунок 2.9 – Гетероструктуры AlGaN/GaN (а) и InAlN/GaN (б)

В обеих конструкциях в ходе эпитаксиального роста на поверхности сформирован *in-situ* слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , поскольку он предохраняет поверхность полупроводника от загрязнений и не препятствует проведению операций при формировании электродов транзистора.

### 2.3 Формирование тестовых структур на пластине

Технологические процессы, проводимые в ходе исследований, включали циклы операций фотолитографии, вакуумного напыления и плазменного травления.

Химическая обработка пластин перед нанесением фоторезиста проводилась для очистки поверхности от органических загрязнений. Для выполнения операции в качестве растворителей использовались метилпирролидон или диметилформамид (ДМФА) и изопропиловый спирт (ИПС).

После выращивания структур пластины подвергались обработке в ДМФА и ИПС с последующим формированием межэлементной изоляции. Технологический блок формирования меза-изоляции с помощью плазмохимического травления включал в себя операции нанесения фоторезиста (для данного блока использовался фоторезист ma-P 1225) на образец, экспонирования резиста на установке SUSS MJB4 с длиной волны 405 нм, проявления фоторезиста с помощью проявителя на основе гидроксида

тетраметиламмония (ТМАН), плазмохимического травления в смеси  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{BCl}_3$  и  $\text{Ar}$  при давлении 10 мТорр и снятия резиста (рисунок 2.10).

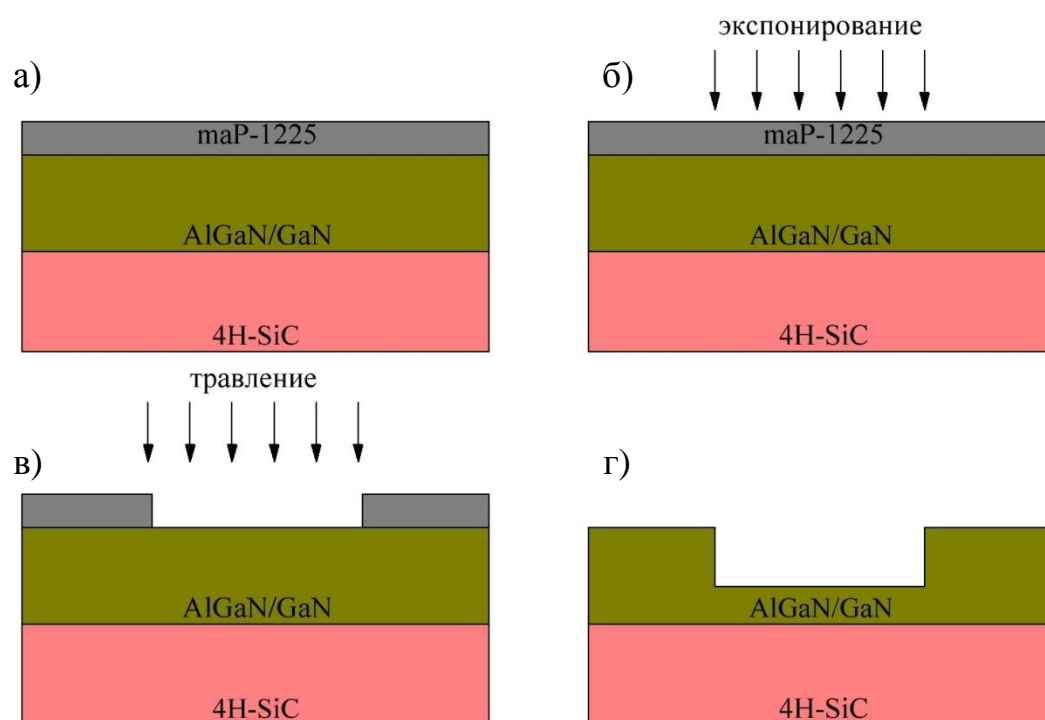


Рисунок 2.10 – Формирование межэлементной изоляции: а – нанесение фоторезиста, б – экспонирование, в – плазмохимическое травление, г – структура после снятия резиста

Скорость травления образцов составила  $\sim 45$  нм/мин, минимальная глубина для появления межэлементной изоляции составила порядка 0,1 мкм. После проявления резиста и контроля в оптическом микроскопе проводилась очистка поверхности на установке плазменной обработки YES CV200RFS в плазме кислорода.

Далее методом «взрывной» литографии с использованием двухслойной резистивной маски на основе резистов LOR5B и AZ1505 (рисунок 2.11) формировалась металлизация контакта.

После проявления резиста производилась химическая активация для удаления окислов в окнах резиста. Активация проводилась в водном растворе соляной кислоты, после чего образец помещался в установку электронно-

лучевого испарения (Orion-B). Операция электронно-лучевого испарения оказывает прямое влияние на электрические параметры омических контактов. Основные факторы, влияющие на качество контакта: чистота напыляемых металлов (в связи с тем, что Ti и Al легко окисляются), давление в камере, несоответствие толщины металла заданному значению (ошибки при калибровке), нестабильность процесса при напылении Al (неправильно подобранные режимы напыления, коэффициенты ПИД-регулятора).

Операция удаления фоторезиста (взрыв) проводилась после напыления в нагретых до 40°C растворителях - метилпирролидоне или диметилформамиде и изопропиловом спирте.

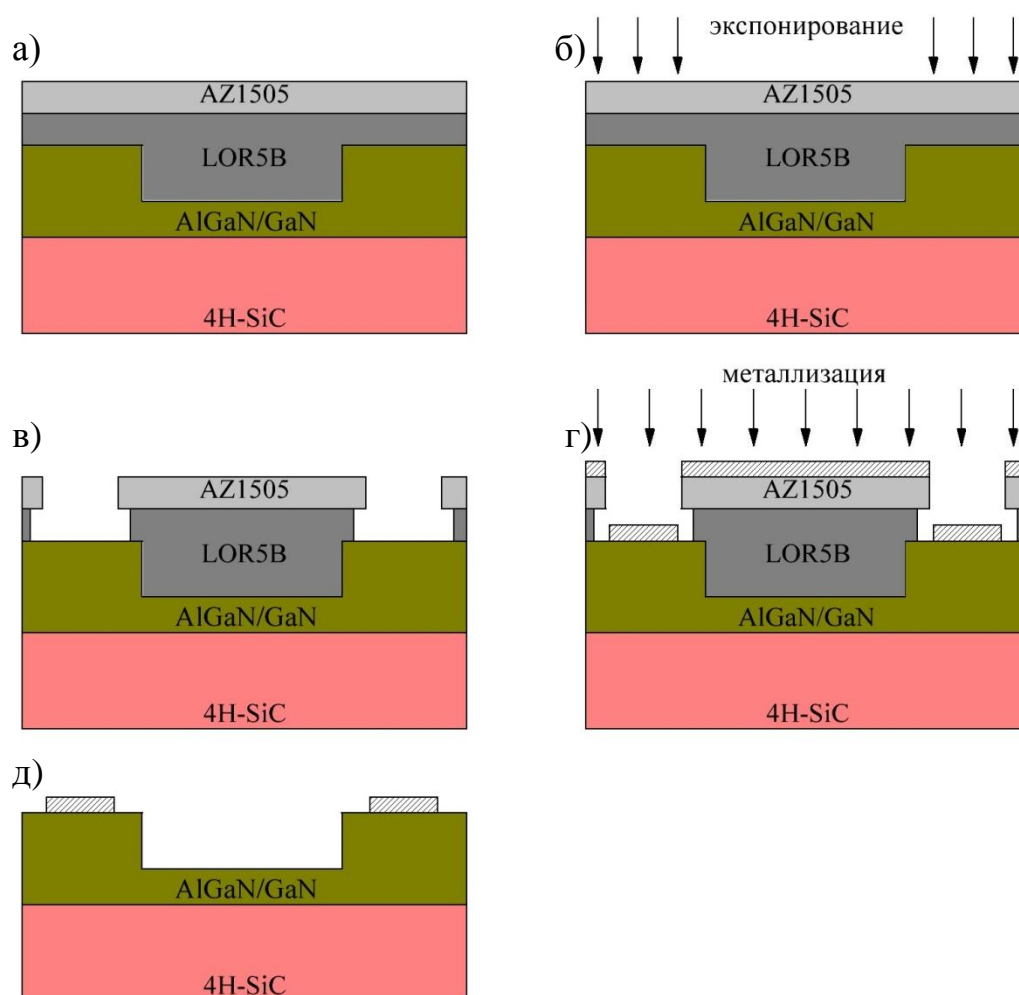


Рисунок 2.11 – Формирование омических контактов: а – нанесение резистов LOR5B и AZ1505, б – экспонирование, в – маска после проявления верхнего и нижнего слоя резиста, г – напыление металлизации, д – структура после “взрыва”.

### 2.3.1 Оснастка для отжига гетероструктур на подложках SiC и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Чтобы сформировать омический контакт к структурам AlGaN/GaN или InAlN/GaN, необходимо провести быстрый термический отжиг образцов. Данная операция является самой критичной при формировании омических контактов, так как небольшие изменения в динамике разогрева образца приводят к изменению  $R_c$  и морфологии поверхности образца [48] (рисунок 2.12).

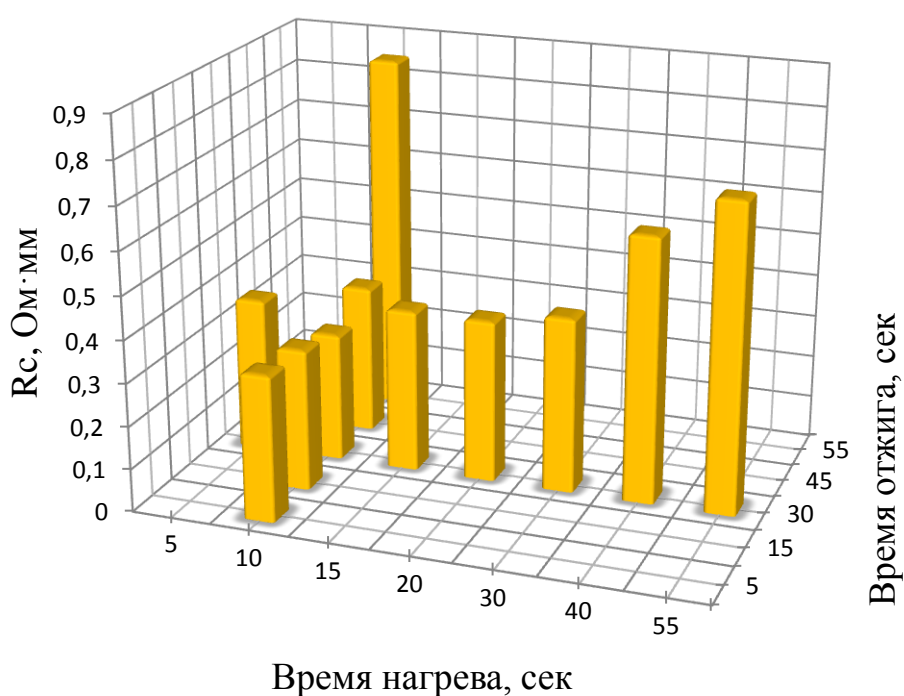


Рисунок 2.12 – Зависимость контактного сопротивления от динамики разогрева при быстром термическом отжиге

Отжиг проводился в продуваемом азотом кварцевом реакторе с графитовым держателем, на который устанавливался образец. Нагрев проводился галогенными лампами с общей мощностью 1,5 кВт (рисунок 2.13). Как правило, для контроля температуры при быстром термическом отжиге используют пирометры и/или термопары, располагая точки контроля температуры в центре и на краях пластины [49-51]. В работе использовалась установка отжига, оборудованная пирометром и

термопарой. В базовой конфигурации оснастки пластина располагалась на носителе, к краю которого была присоединена термопара.

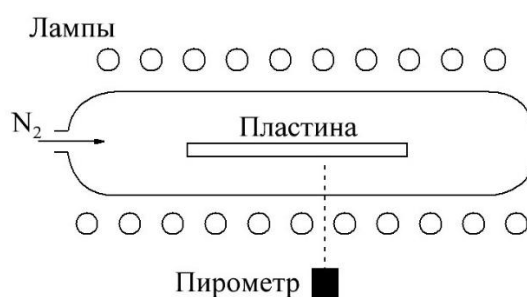


Рисунок 2.13 – Конструкция реактора установки быстрого термического отжига

На рисунке 2.14 представлена фотография типичной временной зависимости мощности нагревательных ламп и измеряемой датчиками температуры, где ось абсцисс - время процесса  $t$ , сек, ось ординат – температура процесса, °С. Параметры процесса – нагрев до 800 °С, время нагрева 10 сек, время отжига 30 сек. Синим цветом обозначена мощность галогенных ламп, красным и черным – показания термопары и пирометра соответственно.

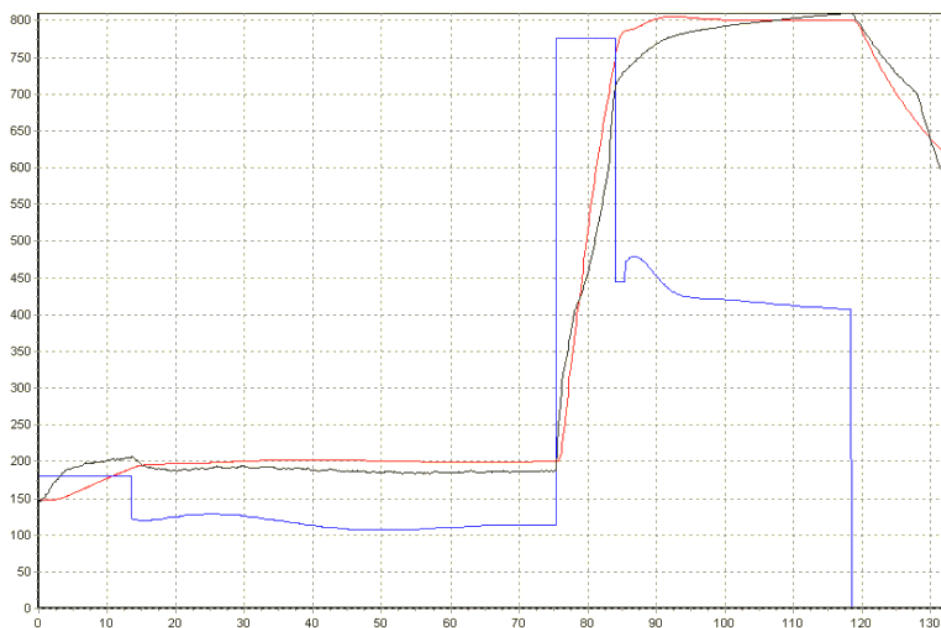


Рисунок 2.14 – Временная зависимость мощности нагревательных ламп и измеряемой датчиками температуры при использовании



Процесс отжига включает прокаливание образцов при  $T=200^{\circ}\text{C}$  для обезгаживания поверхности с последующим нагревом образца до  $800^{\circ}\text{C}$  с помощью грубой (ручное задание мощности) и плавной (ПИД-регулятор) подстройки температуры, выдержки в течение выбранного времени с поддержанием постоянной температуры ПИД-регулятором и остывания в потоке газа. Скорость разогрева, помимо задаваемых мощностей, зависит от следующих факторов [52]: а) качество и состояние галогенных ламп; б) давление в реакторе; в) величина потока газа.

Конструкция камеры позволяет расположить рабочую пластину диаметром до 100мм на дне кварцевого реактора, либо на кварцевом держателе для пластин. Поскольку прозрачные пластины SiC и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с металлизацией омических контактов нагреваются неравномерно при засветке лампами установки, так как металл контактов нагревается быстрее, чем окружающая его область пластины, то было необходимо обеспечить равномерный нагрев пластины. Были использованы непрозрачные носители – пластины из пиролитического графита и монокристаллического кремния, достоинства и недостатки которых представлены в таблице 2.2

Таблица 2.2 – Достоинства и недостатки кремниевых и графитовых носителей

	Кремний	Графит
Достоинства	высокое качество поверхности подложки; низкая теплоемкость.	непрозрачность в ИК диапазоне; высокая точность контроля температуры пирометром; возможность контроля температуры термопарой.
Недостатки	невозможность использования контроля температуры по термопаре; низкая теплопроводность; прозрачность в ИК диапазоне; погрешность контроля температуры пирометром.	низкое качество поверхности графитовой пластины; высокая теплоемкость (в том числе из-за большей толщины графита по сравнению с кремниевой пластиной).

Типичные временные зависимости температуры от времени нагрева для графита приведены на рисунке 2.14, для кремния – на рисунке 2.15.

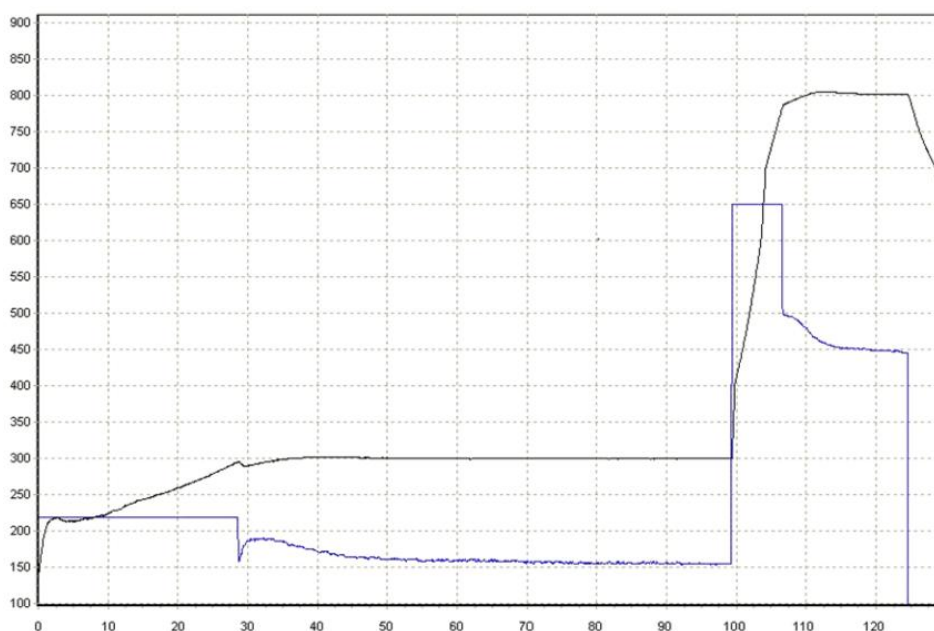


Рисунок 2.15 – Кривая отжига при использовании кремниевого носителя

Из рисунков 2.14 и 2.15 видно, что графитовый носитель нагревается и остывает значительно дольше кремниевого. Поэтому кремниевого носителя позволяет получить контакты с меньшим  $R_c$  и лучшим рельефом поверхности (рисунок 2.16).

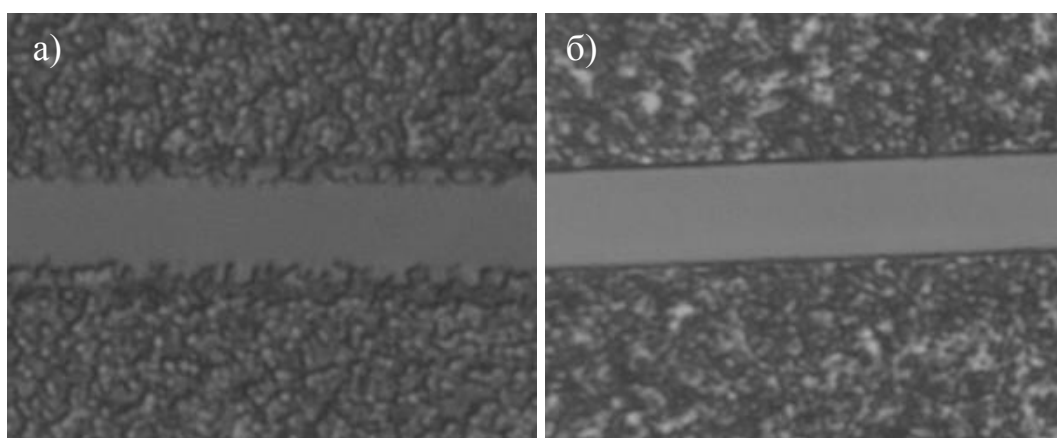


Рисунок 2.16 – Рельеф поверхности омических контактов при отжиге пластины на графитовом носителе (а) и кремниевом носителе (б)

Сравнение качества поверхности омических контактов, полученных на пластинах, на которых омическими контактами занято менее 20% площади, с контактами на пластинах, поверхность которых омические контакты занимают 50% площади, показало, что необходимо исключить прямую засветку образца нагревательными лампами. Различные образцы и даже области на пластинах с большой площадью контактов, нагреваются неконтролируемо и, судя по рельефу и сопротивлению контактов, скорость и температура отжига на них локально сильно отличаются от образцов с маленькой площадью контактов. Необходимо также исключить воздействие ИК излучения на металл контактов. Для этого на лицевую сторону кремниевой пластины был напылён слой Ti, а на держатель с пластиной, был установлен другой графитовый носитель, выполняющий роль экрана от ламп, расположенных над реактором установки (рисунок 2.17). Поскольку скорость нагревания носителя из графита ниже, чем скорость нагревания кремния, это предотвращало риск перегрева образца за счет излучения и теплопередачи через газовую среду.



Рисунок 2.17 – Конструкция оснастки внутри кварцевого реактора. Точки соприкосновения реактора и носителя выделены красным цветом

Установка БТО имеет штатный держатель из кварца, его конструкция предполагает, что между нагревательными лампами установки и кремниевым носителем находятся две кварцевые трубки. При использовании кремниевого носителя это приводит к локальной неоднородности нагрева образца и носителя, что отражается как на сопротивлении, так и на внешнем виде контактов (на областях пластины, обозначенных пунктирной линией на рисунке 2.18, внешний вид и сопротивление омических контактов отличаются от соседних областей

пластины из-за неоднородности температуры в данных областях в ходе процесса отжига).



Рисунок 2.18 – Расположение кремниевой пластины на стандартном кварцевом держателе

Установка носителя непосредственно на реактор приводит к неоднородности нагрева носителя и, как следствие, неоднородности контактного сопротивления по пластине рядом с областями контакта носителя с реактором (контакт кремниевой пластины и кварцевого реактора на рисунке 2.17). Области контакта носителя с пластиной с реактором располагались с правого и левого краев пластины, результирующая величина контактного сопротивления указана в Ом·мм и приведена на рисунке 2.19.

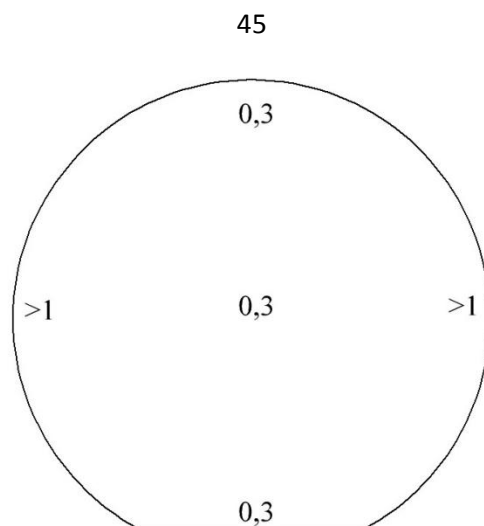


Рисунок 2.19 – Распределение контактного сопротивления по пластине при расположении носителя на реакторе

Оптимизированная в результате проведенных исследований оснастка для отжига имеет конструкцию, уменьшающую контакт носителя и пластины с реактором за счёт расположения под кремнием кварцевых трубок, вдоль которых сформирована щель для пластины (рисунок 2.20).

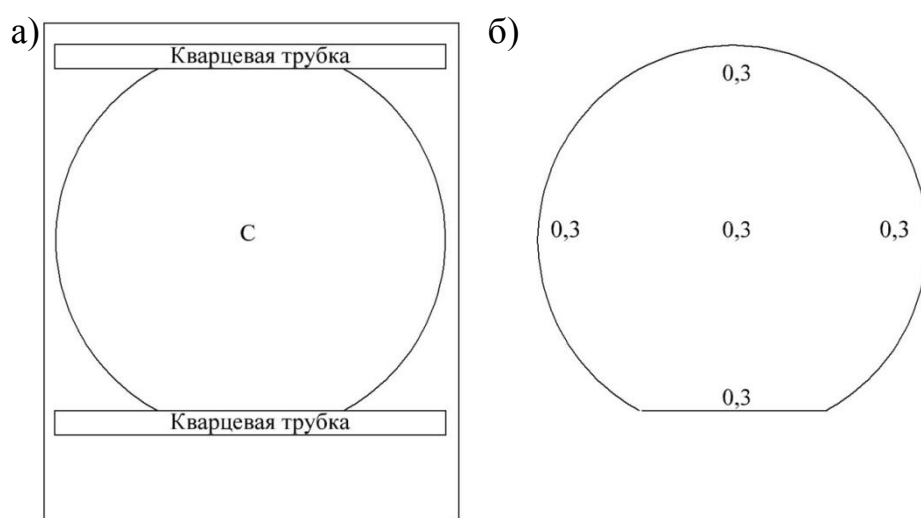


Рисунок 2.20 – Конструкция оптимизированной оснастки внутри кварцевого реактора (а) и распределение контактного сопротивления по пластине (б)

Как видно из рисунка 2.20, минимизировать разброс параметров омических контактов по пластине после операции отжига удастся при использовании конструкции из кремния, титана и графита в качестве держателя пластины

(рисунок 2.17), которая не находится в непосредственном контакте с реактором установки.

### 2.3.2 Выбор газовой среды для отжига

С увеличением диаметра образца в параметрах процесса отжига начинают играть большую роль процессы конвекции в газовой среде камеры, в ходе которых тепло передается от более нагретого носителя к менее нагретой рабочей пластине. Пластины SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с выращенными на них слоями GaN и гетероструктурой AlGaN/GaN имеют напряженную кристаллическую решетку из-за рассогласования постоянных решетки подложки и нитридной структуры. В зависимости от режимов роста, составов и толщин эпитаксиальных слоев, а также диаметра пластины выгиб пластины может достигать 100 мкм. Такая пластина находится в контакте с носителем только в нескольких точках, причем из-за разницы в температурных коэффициентах расширения материалов в ходе нагрева изгиб пластины будет изменяться. Проведенные эксперименты на пластинах диаметром 100 мм показали, что для переноса процесса отжига, отработанного на небольших образцах, на процессы отжига больших пластин, необходимо максимально использовать конвекционный механизм нагрева.

Выбор газов для процесса отжига, как правило, ограничен инертными газами (гелием и аргоном) и близким к ним по инертности азотом. Химически активные газы могут повлиять на химические процессы в отжигаемом омическом контакте. Поскольку на границе раздела металлизации омического контакта с полупроводником всегда имеется определенное количество адсорбированных на поверхности CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и O<sub>2</sub>, при отжиге Al омического контакта образуется некоторое количество оксида алюминия, который всплывает на поверхность. Это наблюдается как по результатам послойного анализа химического состава методами РФЭС, так и по результатам анализа просвечивающей электронной микроскопии (разделы 3.2 и 3.3). Поэтому одним из требований к газовой среде реактора является также минимизация парциального давления кислорода.

Важнейшим параметром при выборе газа является его теплопроводность (табл. 2.3) [53].

Таблица 2.3 – Теплопроводность гелия, азота и аргона

Газ	Коэффициент теплопроводности, Вт·м <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup> при P=1 атм	
	T=300K	T=1000K
гелий	152	355
азот	25.7	65.4
аргон	17.7	37.7

Из таблицы 2.3 видно, что наибольшую теплопроводность имеет гелий, однако при выборе режимов отжига необходимо учесть, что из-за высокой теплопроводности газа будет увеличиваться и разогрев рабочей камеры установки БТО. Проведенные эксперименты показали, что при коротком процессе нагрева и быстром остывании образцов камера не успевает перегреться. При выборе режимов отжига необходимо выбрать рабочее давление. Поскольку теплопроводность газов при пониженном давлении начинает снижаться при сопоставимости длины свободного пробега в газе с расстоянием между поверхностями, обменивающимися теплом [54], а в рассматриваемом в данной работе случае оно может быть в диапазоне от нуля (в точке контакта с поверхностью носителя) до 100мкм, то было выбрано давление порядка 0,1 атм. – максимальное давление, при котором, по наблюдению скорости натекания, вакуумное уплотнение камеры установки БТО остается герметичным.

## 2.4 Расчет параметров омических контактов

Для расчёта контактного сопротивления, как правило, используется метод длинных линий (Transmission Line Method, TLM). На образце шириной  $W$ , изготавливается тест, вид которого показан на рисунке 2.21. В нем имеются омические контакты с зазором  $x_1$  между ними ( $x_1 < x_2 < x_3$ ). Для определения

контактного сопротивления измеряется сопротивление между соседними площадками теста.

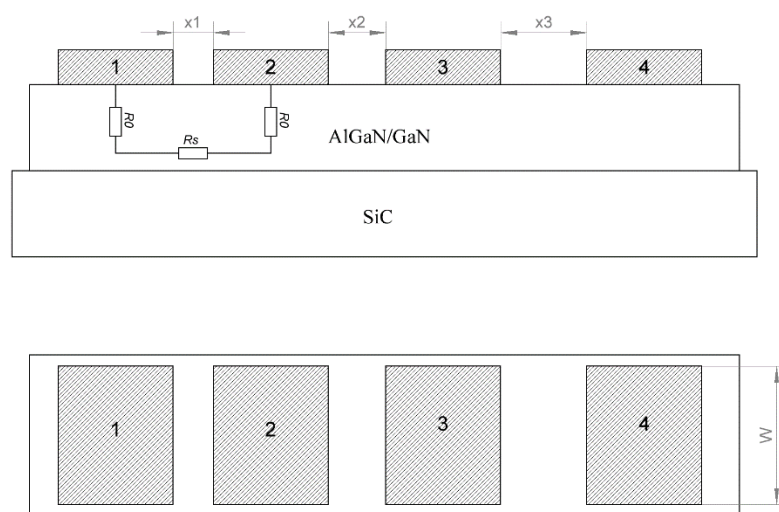


Рисунок 2.21 – Тестовая структура TLM

Для определения сопротивления используют метод Кельвина. По полученным данным строится зависимость сопротивления от расстояния между омическими контактами,  $x_1$ ,  $x_2$  и т.д. (рисунок 2.22).

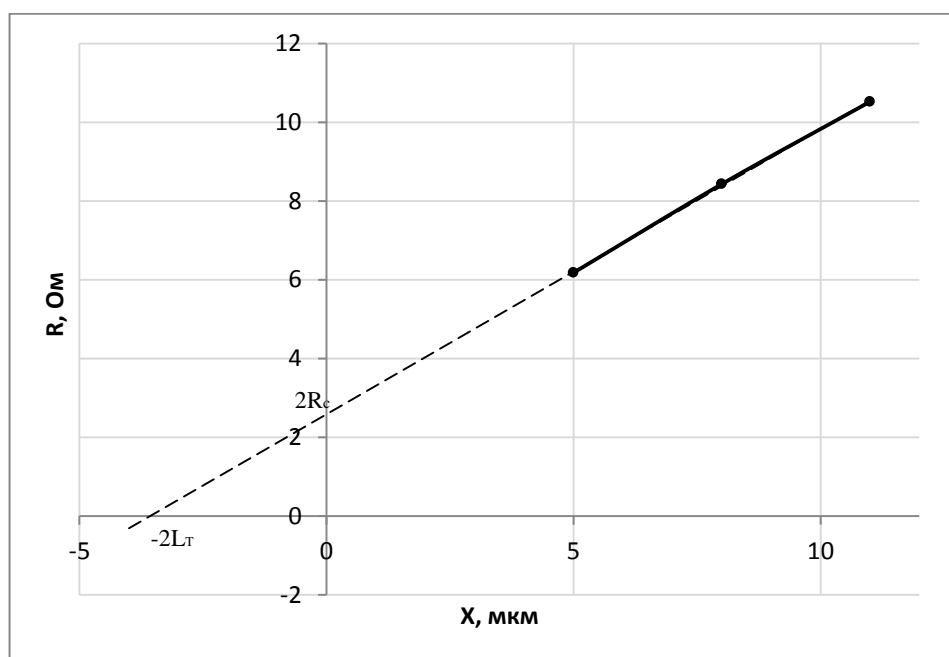


Рисунок 2.22 – Метод TLM: зависимость сопротивления омических контактов от расстояния между ними



Согласно рисунку 2.21, величина сопротивления равна:

$$R = 2R_0 + R_s \left( \frac{X}{W} \right), \quad (2.3)$$

где  $R$  – суммарное сопротивление омических контактов;  $R_0$  – контактное сопротивление образца данной ширины;  $R_s$  – слоевое сопротивление;  $X$  – величина зазора между контактными площадками;  $W$  – ширина активной области.

Из пересечения прямой, представленной на рисунке 2.22, с осью ординат получается значение сопротивления  $2R_0$ . Формулы 2.4 и 2.5 позволяют рассчитать  $R_c$  и  $R_s$ .

$$R_c = \frac{b}{2} W = R_0 \cdot W, \quad (2.4)$$

$$R_s = 2R_0 \cdot W, \quad (2.5)$$

где  $b$  – тангенс угла наклона прямой на рисунке 2.22.

Для пересчета  $R_c$  в удельное контактное сопротивление  $\rho_c$ , используется формула:

$$\rho_c = R_0 \cdot A_c, \quad (2.6)$$

где  $A_c$  – эффективная площадь контакта.

В связи с тем, что ток не протекает равномерно по всей площади металлизации, величина эффективной площади контакта отличается от его реальной площади (рисунок 2.23).

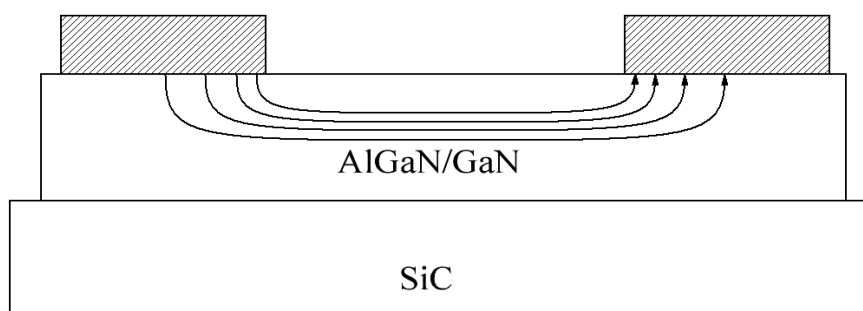


Рисунок 2.23 – Протекание тока между омическими контактами

Как видно из рисунка 2.23, максимальная величина тока наблюдается на прилежащих друг к другу краях омических контактов, при удалении от них она

уменьшается. В связи с этим вводится понятие “длины переноса” (transfer length),  $L_T$ , характеризующей расстояние от края контакта, на котором 63% тока попадает в металл. Данную величину можно получить из уравнения прямой, представленной на рисунке 2.22, она соответствует точке пересечения прямой с осью абсцисс:

$$L_T = \frac{R_0 \cdot W}{R_s} \quad (2.7)$$

Таким образом, приняв за эффективную площадь контакта  $A_c$  величину  $L_T \cdot W$ , получим:

$$\rho_c = R_0 \cdot L_T \cdot W = \frac{R_0^2 \cdot W^2}{R_s} = \frac{R_c^2}{R_s} \quad (2.8)$$

Для оценки качества сопротивления омических контактов, как правило, вводят поправку на ширину контактной площадки и представляют как контактное сопротивление  $R_c$ , выраженное в Ом·мм (формула 2.6).

При применении данного метода для расчёта параметров сплавных контактов следует учитывать, что данный метод принимает слоевое сопротивление полупроводника, находящегося непосредственно под контактом, равным слоевому сопротивлению полупроводника. То есть, при измерении параметров сплавных контактов, величина  $R_{su}$  может быть меньше  $R_s$  [55], а для технологии КНИ – больше [56,57].

Еще одним методом для определения слоевого сопротивления омических контактов является метод Ван дер Пау. Данный метод является разновидностью четырехзондового метода и нашел широкое применение в определении сопротивления тонких плёнок в полупроводниковой промышленности. Для проведения измерений необходимо наличие тестовой структуры имеющей четыре омических контакта по краям [58-60].

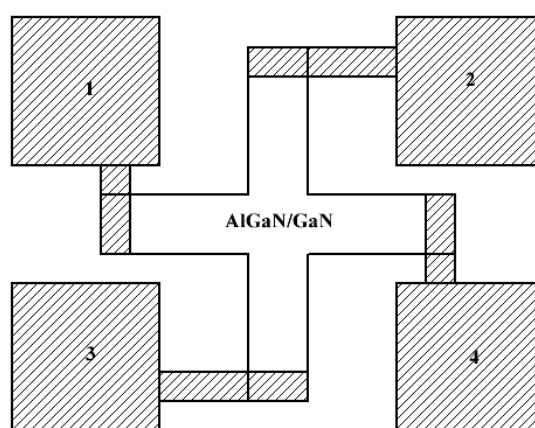


Рисунок 2.24 – Структура для измерения слоевого сопротивления методом Ван дер Пау

Слоевое сопротивление ( $R_s$ ) можно определить, измеряя напряжения  $U_{12}$  и  $U_{24}$  при пропускании тока между контактами 3 и 4 и между контактами 1 и 3 (рисунок 2.24) соответственно. Слоевое сопротивление определяется по формуле:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \left( \frac{R_{1234} + R_{2431}}{2} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\ln 2}{2} \left( \frac{R_{1234} - R_{2431}}{R_{1234} + R_{2431}} \right) \right), \quad (2.9)$$

где  $R_{1234}$  и  $R_{2431}$  – сопротивления структур, рассчитанные для падений напряжения  $V_{12}$ ,  $V_{23}$ , рассчитываются следующим образом:

$$R_{1234} = \frac{U_{12}}{I}; \quad R_{2431} = \frac{U_{24}}{I}. \quad (2.10)$$

Слоевое сопротивление, измеренное методом Ван дер Пау, может быть использовано в уравнении 2.6. Таким образом, если величина  $R_s$  уже известна, пропадает необходимость в формировании структур с несколькими зазорами между омическими контактами (рисунок 2.21) и остается установить лишь значение  $R_0$ , что может быть осуществлено методом Кельвина. Для точного измерения низкоомных контактов необходим правильный выбор конструкции тестов, позволяющий минимизировать погрешности и ошибки измерения, исключив ситуации при которых в измеренной величине сопротивления TLM теста входит относительно низкое сопротивление омического контакта и высокое слоевое сопротивление полупроводниковой структуры [61,62]. В работе [63]

установлено, что для измерения сопротивления омических контактов и слоевого сопротивления гетероструктур с типичными для AlGaIn/GaN гетероструктур диапазонами значений оба метода позволяют измерять  $R_s$  с небольшой относительной погрешностью (метод длинной линии (TLM) с использованием метода Кельвина имеет  $\varepsilon(R_s)=5\%$ ; метод длинной линии (TLM) с использованием методов Кельвина и Ван дер Пау имеет  $\varepsilon(R_s)=8,5\%$ ). При этом метод длинной линии (TLM) с использованием методов Кельвина и Ван дер Пау дает меньшую погрешность. В данной работе типичные значения  $R_s$  для гетероструктур AlGaIn/GaN составляли 300-350 Ом/кв. и 200-300 Ом/□ для InAlIn/GaN, поэтому выводы работы [63] актуальны и для InAlIn/GaN гетероструктур.

## 2.6 Выводы

Выполнено моделирование омических контактов к HEMT транзисторам на базе гетероструктур AlGaIn/GaN InAlIn/GaN, определена конструкция тестовых структур для исследования электрических параметров омических контактов, разработан реактор для отжига рабочих пластин включая оптически прозрачные пластины SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> большого диаметра (до 100 мм), разработан и обоснован режим быстрого термического отжига омических контактов.

При оценке контактного сопротивления образцов AlGaIn/GaN и InAlIn/GaN для определения  $R_s$  следует применять метод Ван дер Пау совместно с методом Кельвина, что позволяет с меньшей погрешностью определить контактное и слоевое сопротивления на образцах с высоким  $R_s$ , исключив метод длинных линий (TLM), который для низкоомных контактов к высокоомным гетероструктурам вносит большую погрешность.

### ГЛАВА 3. Разработка омических контактов к HEMT транзисторам на AlGaN/GaN и InAlN/GaN

#### 3.1. Влияние обработки поверхности на контактное сопротивление

Обработка поверхности в жидкостной среде и плазме, по сравнению с ионной имплантацией и эпитаксией, является упрощённым методом снижения контактного сопротивления за счёт отсутствия необходимости в проведении дополнительной операции литографии. Такая обработка производится после операции проявления маски омических контактов и непосредственно перед загрузкой в камеру электронно-лучевого напыления.

В работе исследовалось влияние обработки образцов AlGaN/GaN в жидкости и плазме Ar, BCl<sub>3</sub>, CHF<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub> на контактное сопротивление при режимах травления, приведенных в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Обработка поверхности на образцах

№	Обработка	Поток, стандартных куб. см/мин	Мощность ICP, Вт	Мощность RF, Вт	P, мторр	t, с
1	-	-	-	-	-	-
2	Плазма: O <sub>2</sub> (300 Вт, 2') Жидкость: HCl+H <sub>2</sub> O (1:9, 1')	-	-	-	-	180
3	Плазма: SF <sub>6</sub>	SF <sub>6</sub> =50	0	60	20	30
4	Плазма: SF <sub>6</sub> +CHF <sub>3</sub>	SF <sub>6</sub> =50, CHF <sub>3</sub> =25	0	20	40	45
5	Плазма: Cl <sub>2</sub> +BCl <sub>3</sub> +Ar	Cl <sub>2</sub> =100, BCl <sub>3</sub> =50, Ar=20	0	100	10	10

Было проведено 12 экспериментов (6 на каждую гетероструктуру) [64]. Помимо пластин, обработанных плазмохимическим методом, были изготовлены контрольные образцы без обработки и со стандартной обработкой в кислородной плазме и соляной кислоте (табл. 3.1, №1 и №2, соответственно). Стоит заметить, что обработка в плазме не внесла изменений в морфологию поверхности омических контактов, которые можно было бы зафиксировать с помощью сканирующего электронного микроскопа (рисунок 3.1).

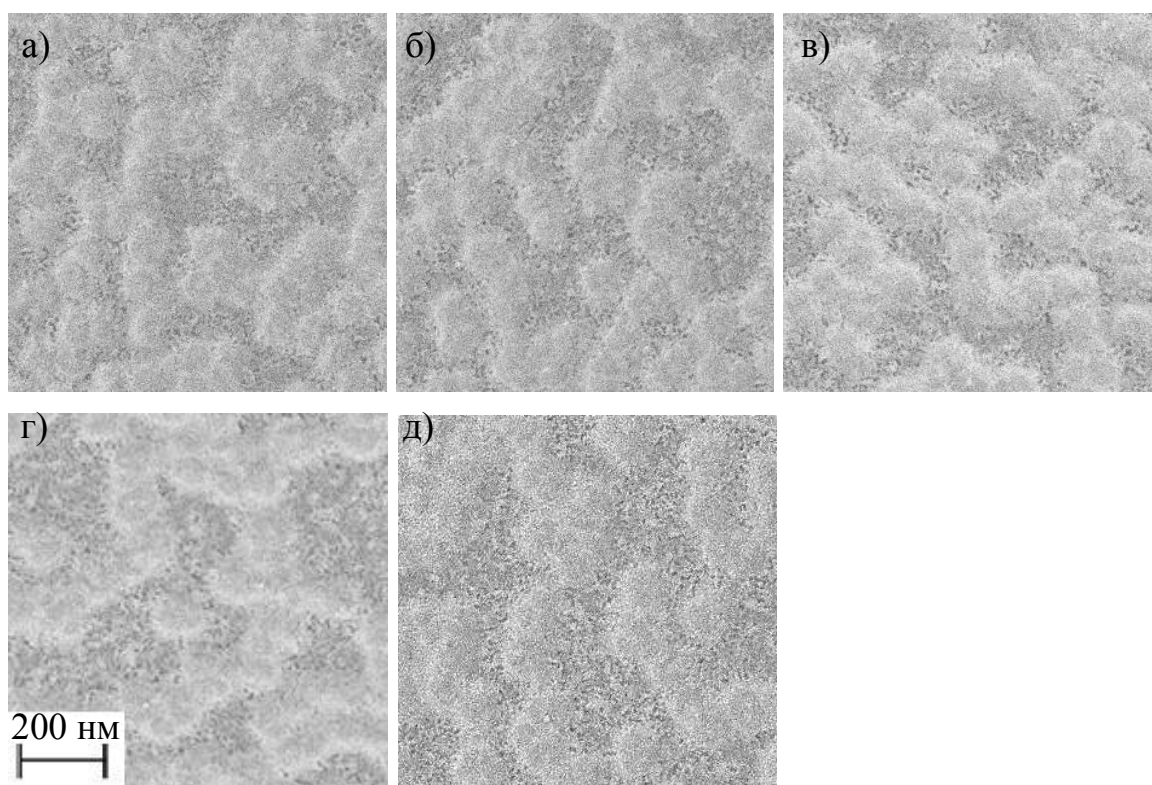


Рисунок 3.1 – Поверхность омических контактов после быстрого термического отжига: №1 (а), №2 (б), №3 (в), №4 (г), №5 (д)

Как видно из рисунка 3.1, рельеф контактов не изменился даже в случае проведения процесса, в результате которого под контактами была вытравлена область глубиной до 10 нм (режим №5 из табл. 3.1).

В таблице 3.2 приведены значения контактного и слоевого сопротивления. Следует заметить, что данный эксперимент проводился на омических контактах,

используемых материалы, толщины и режимы быстрого термического отжига, в соответствии с разделом 3.3 данной работы.

Таблица 3.2 – Зависимость контактного  $R_c$  и слоевого  $R_s$  сопротивлений от обработки поверхности образцов на гетероструктуре AlGaIn/GaN

№	$R_c$ , Ом·мм	$R_s$ , Ом/□
1. без обработки	0,45	336
2. O <sub>2</sub> (плазма), HCl+H <sub>2</sub> O (1:9)	0,3	333
3. SF <sub>6</sub>	0,35	334
4. SF <sub>6</sub> +CHF <sub>3</sub>	0,34	331
5. Cl <sub>2</sub> +BCl <sub>3</sub> +Ar	0,52	329

Из таблицы 3.2 следует, что минимальному значению контактного сопротивления соответствуют образцы, обработанные в кислородной плазме и HCl (№2), их  $R_c$  на 55% меньше, чем у контрольного образца (№1). Обработка образцов InAlIn/GaN в растворе HCl позволила снизить  $R_c$  с 0,35 Ом·мм до 0,3 Ом·мм. При этом показатель среднеквадратичной шероховатости поверхности (RMS) InAlIn/GaN не вырос и находится в пределах 5 нм, это может означать, что рабочая поверхность не подверглась агрессивному воздействию раствора HCl (рисунки 3.2 и 3.3). Шероховатость поверхности осталась неизменной и на образцах AlGaIn/GaN (на рисунке 3.4 представлена рабочая поверхность после проведённой обработки) [65].

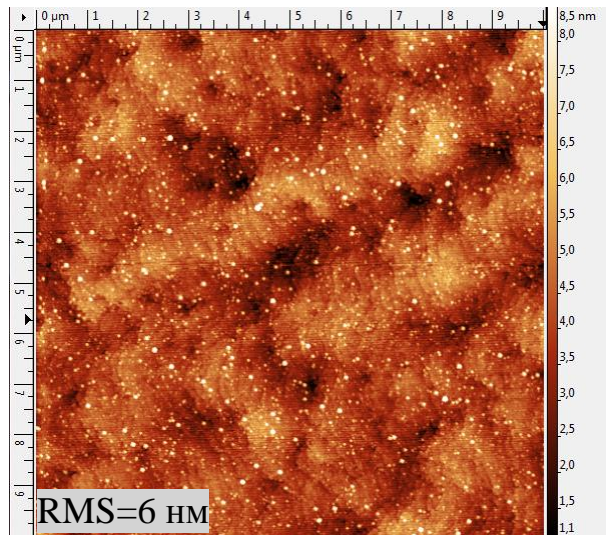


Рисунок 3.2 – Поверхность образцов на InAlN/GaN до обработки в кислородной плазме и растворе HCl

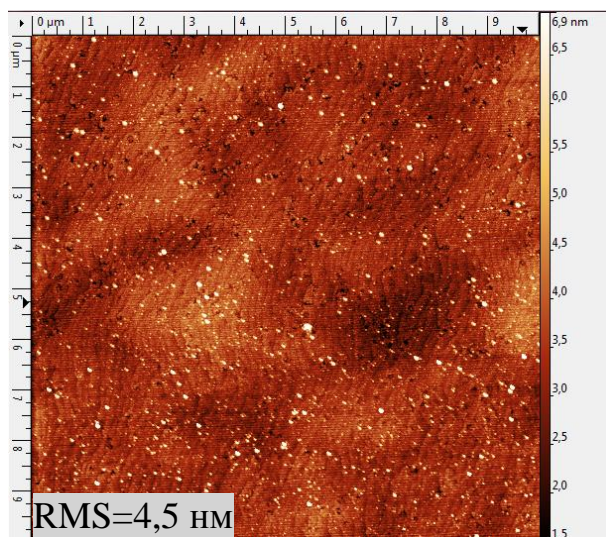


Рисунок 3.3 – Поверхность образцов на InAlN/GaN после обработки в кислородной плазме и растворе HCl



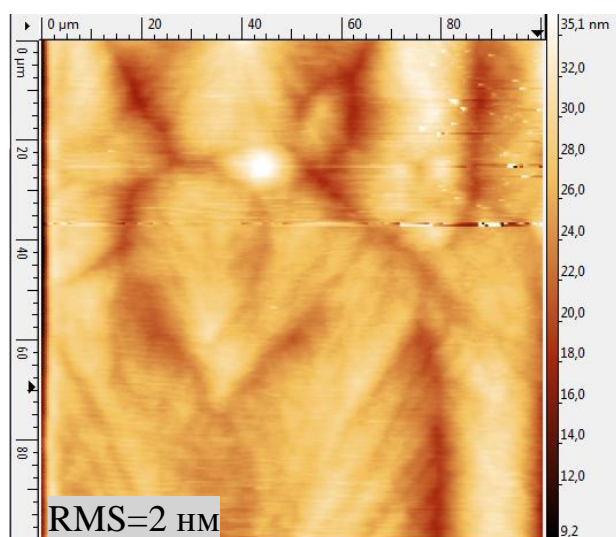


Рисунок 3.4 – Поверхность образцов на AlGaIn/GaN после обработки в кислородной плазме и растворе HCl

При этом  $R_c$  образцов InAlN/GaN снизилось до 0,25 Ом·мм, а образцов на AlGaIn/GaN – до 0,3 Ом·мм, таким образом вероятно, что обработка очистила поверхность от загрязнения. Величина тока насыщения и напряжения отсечки остались неизменными и не зависели от методов воздействия на поверхность, максимальный ток насыщения  $I_d$  составлял 1,3 А/мм для НЕМТ на основе AlGaIn/GaN и 2,2 А/мм для НЕМТ на InAlN/GaN, величина напряжения отсечки  $V_{th}$  для обоих образцов составила 3-4 В. В связи с этим можно сделать вывод о том, что обработка образцов в кислородной плазме (300 Вт, 2") и растворе соляной кислоты ( $HCl + H_2O = 1:9$ ) непосредственно перед операцией электронно-лучевого напыления позволяет снизить величину контактного сопротивления, при этом не оказывая отрицательного воздействия на морфологию поверхности и электрические параметры НЕМТ.

## 3.2 Выбор состава омических контактов к гетероструктуре AlGaN/GaN

### 3.2.1 Исследование контактов с металлизацией Ti/Al/Ni/Au

В качестве омических контактов к *n*-AlGaN/GaN используется множество композиций, но наиболее часто встречается сочетание Ti/Al/Ni/Au. В данной серии экспериментов была исследована металлизация типа Ti/Al/Ni/Au. Толщина Ti/Al оставалась неизменной и была равна 30/60 нм. Были изготовлены структуры AlGaN/GaN на подложке 4H-SiC с различающейся металлизацией. После формирования металлизации на поверхности образцов, они подверглись последующему разделению и БТО при различных режимах отжига. Результирующие параметры представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Зависимость  $R_c$  металлизации Ti/Al/Ni/Au от соотношения толщин Ni/Au ( $t_{\text{отжига}} = 30$  с)

№ серии	Толщина Ni, нм	Толщина Au, нм	$T_{\text{БТО}}, ^\circ\text{C}$	$R_c, \text{Ом}\cdot\text{мм}$
1	40	25	790	1,55
			810	1,4
			830	1,75
			850	2,3
2	40	150	790	нелинейный
			810	1,6
			830	0,76
			850	0,65

На рисунке 3.5 представлена поверхность омического контакта, обладающего наименьшим значением  $R_c$  в серии №1. Неровность края данного контакта находится на приемлемом уровне, не наблюдается значительного растекания металлизации в горизонтальной плоскости, однако его качество не удовлетворяет поставленным в разделе 1.5 требованиям по минимальному сопротивлению, так как при  $R_c > 0,6-0,8 \text{ Ом}\cdot\text{мм}$  наблюдается заметное ухудшение характеристик НЕМТ.

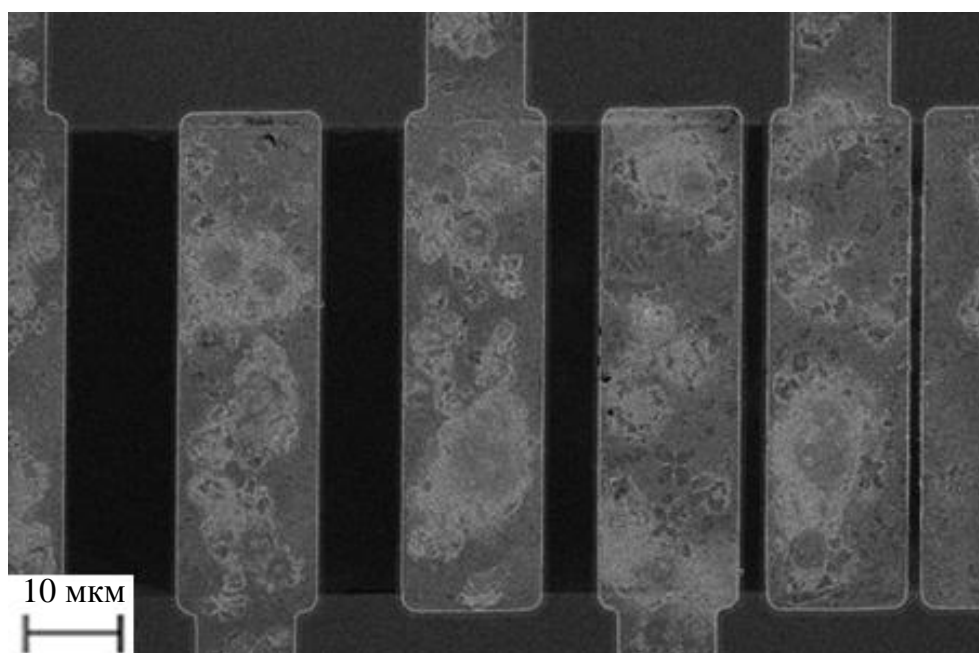


Рисунок 3.5 – Омические контакты Ti/Al/Ni/Au. Серия №1,  $T_{\text{отжига}}=810\text{ }^{\circ}\text{C}$

Представленные в таблице 3.3 омические контакты к серии образцов №2, сформированные при температуре отжига  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  обладают  $R_c$  равным  $0,65\text{ Ом}\cdot\text{мм}$ . По характеру зависимости сопротивления от температуры для образца №2 можно сделать вывод, что дальнейшее увеличение температуры быстрого термического отжига может привести к снижению значения  $R_c$ , однако даже на образцах, изготовленных при температуре  $790\text{ }^{\circ}\text{C}$ , наблюдается значительное латеральное растекание металлизации. На рисунке 3.6 представлена микрофотография поверхности омических контактов, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа.

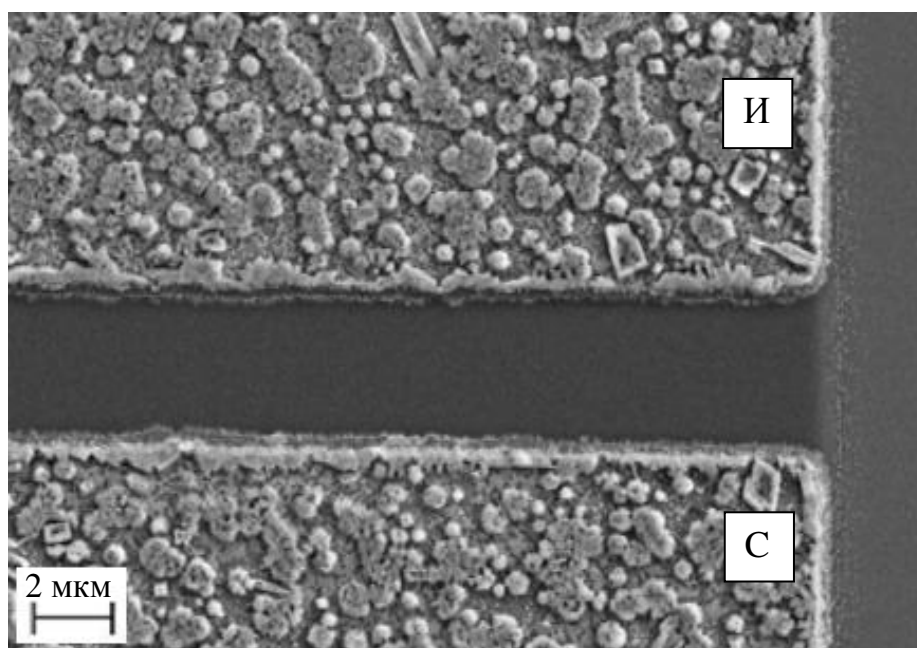


Рисунок 3.6 – Омические контакты Ti/Al/Ni/Au к истоку (И) и стоку (С). Серия №2,  $T_{\text{отжига}}=790\text{ }^{\circ}\text{C}$

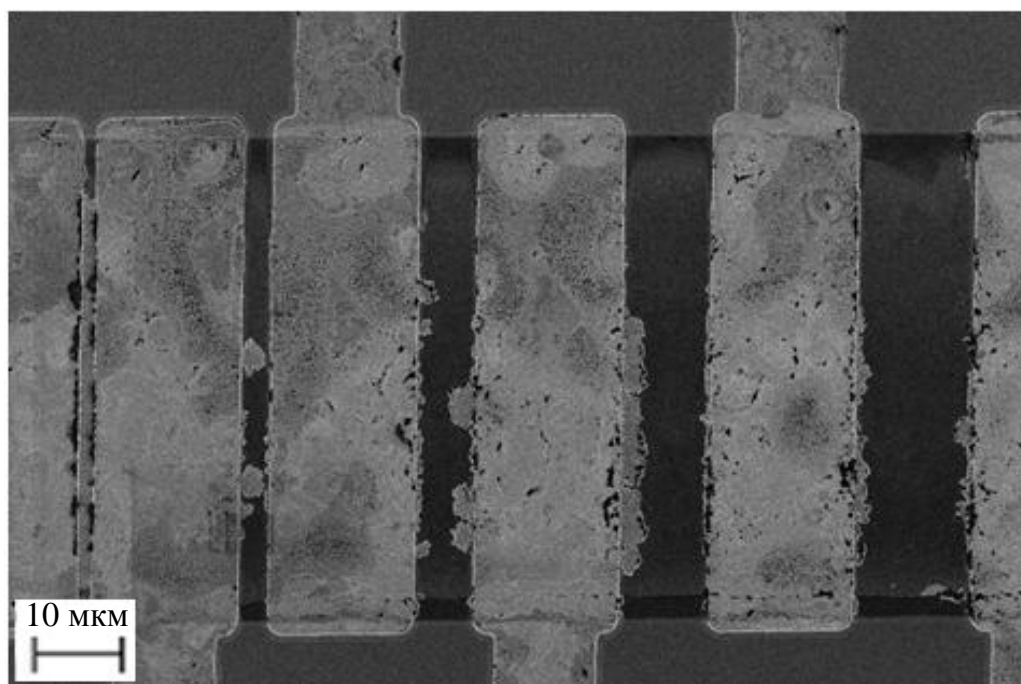


Рисунок 3.7 – Омические контакты Ti/Al/Ni/Au. Серия №2,  $T_{\text{отжига}}=850\text{ }^{\circ}\text{C}$

Как видно из рисунка 3.6, на краях контактов появляются неровности, которые, в связи с расстояниями от затвора до истока порядка 1 мкм, сделают невозможным проведение литографии затвора. Дальнейшее увеличение

температуры отжига привело к появлению локальных соединений между контактом стока и истока (рисунок 3.7).

Дальнейшее увеличение температуры отжига для образцов серии №2 (табл. 3.3) нежелательно в связи с растеканием металлизации. Эксперименты по оптимизации толщин омического контакта вида Ti/Al/Mo/Au привело к следующим результатам: минимальная величина контактного сопротивления среди сформированных контактов составила порядка 0,65 Ом·мм, морфология поверхности оказалась неудовлетворительной в связи с расплыванием металла.

### 3.2.2 Исследование контактов Ta/Ti/Al/Ni/Au и Ti/Al-Ta/Au

Так как для металлизации Ti/Al/Ni/Au не удалось получить необходимого значения  $R_c$ , помимо слоя Ti, предположительно формирующего TiN, который снижает сопротивление за счёт уменьшения ширины и высоты потенциального барьера, был исследован контакт Ta/Ti/Al/Ni/Au с различным соотношением толщин Ti/Al, в частности для Ni/Au (40/25 нм), так как, такое соотношение толщин приводит к минимальному растеканию металла при отжиге (образцы серии №1 таблицы 3.3). В таблице 3.4 приведены результаты экспериментов по БТО Ta/Ti/Al/Ni/Au(10/x/y/40/25 нм). В таблице представлена температура отжига, соответствующая минимальному значению  $R_c$ .

Как видно из результатов, представленных в таблице 3.4, минимальные  $R_c$  равное 0,7 и 0,8 Ом·мм имеют контакты №5 и №6. По сравнению со структурами типа Ti/Al/Ni/Au, величина  $R_c$  уменьшилась незначительно, однако использование слоя Ta позволило снизить эффект расплывания металла даже при температурах порядка 850 °С (рисунок 3.8).

Таблица 3.4 - Зависимость  $R_c$  для металлизации Ta/Ti/Al/Ni/Au от соотношения толщин Ti/Al и температуры быстрого термического отжига

№ образца	$d_{Ti}$ , нм	$d_{Al}$ , нм	$T_{БТО}$ , °С	$R_c$ , Ом·мм
1	15	90	810	0,62
2	15	120	820	1,36
3	15	150	850	1
4	25	150	840	0,8
5	30	90	860	0,7
6	30	120	830	0,86
7	30	150	870	0,92
8	30	180	900	1,84

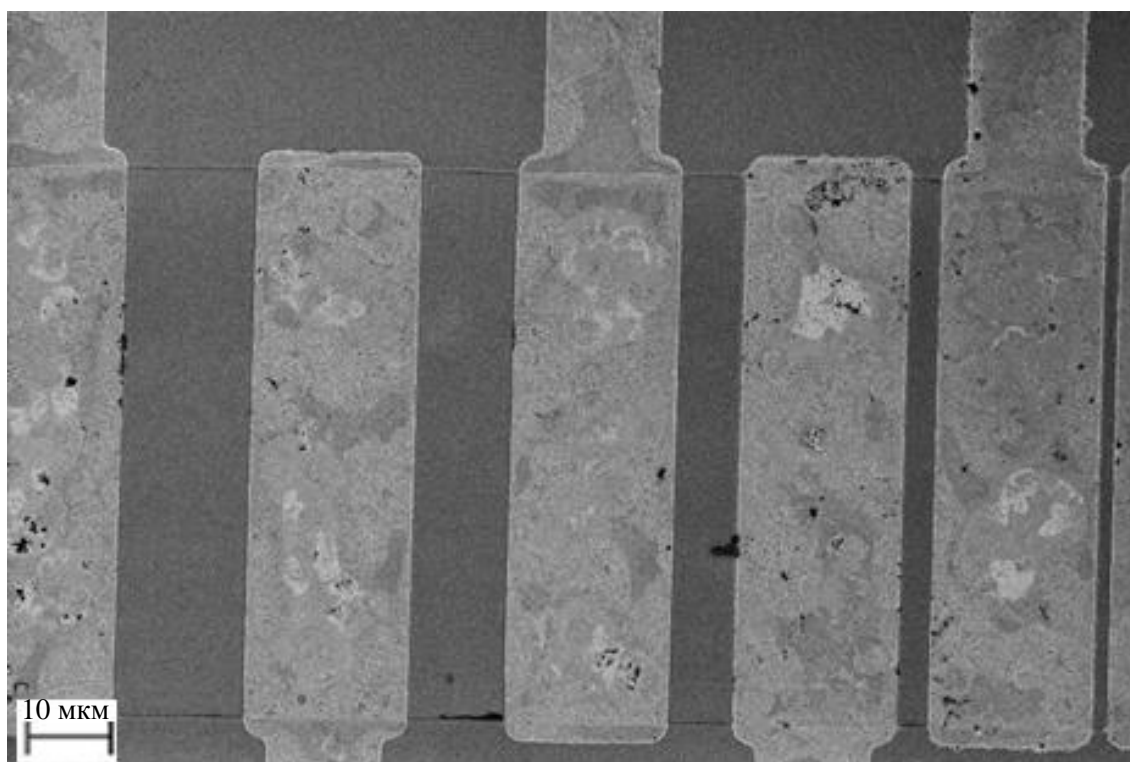


Рисунок 3.8 – Омические контакты Ta/Ti/Al/Ni/Au (образец №5)  $T_{отжига} = 860$  °С

Высокая температура отжига может быть вызвана увеличением суммарной толщины контакта и добавлением дополнительного материала в состав металлизации. Использование дополнительного слоя тантала в металлизации Ta/Ti/Al/Ni/Au не повлияло на величину  $R_c$  омических контактов, но позволило улучшить их морфологию поверхности. На рисунке 3.9 представлены результаты отжига структуры Ti/Al/Ta/Au (30/60/40/25 нм).

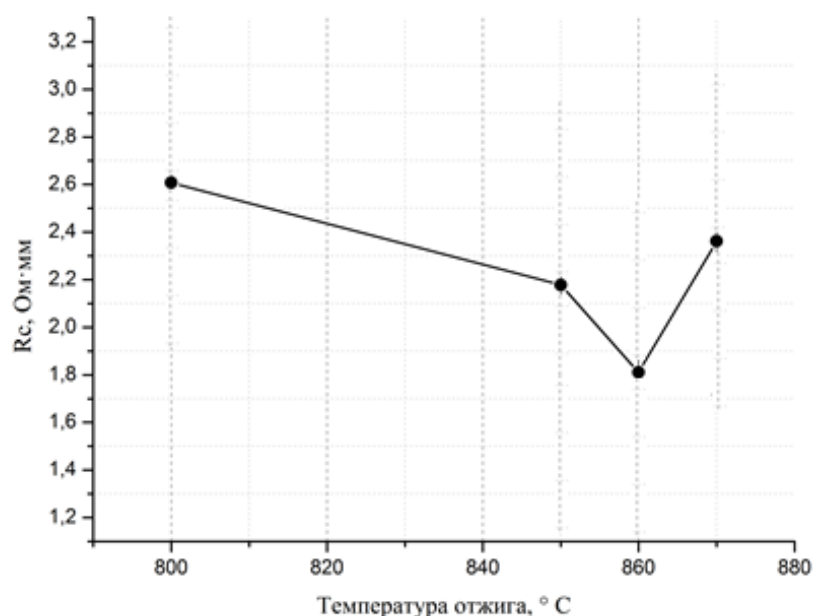


Рисунок 3.9 – Зависимость контактного сопротивления контакта Ti/Al/Ta/Au от температуры отжига

Внешний вид омических контактов остался неизменным на всём диапазоне температур (рисунок 3.8), но, как видно из рисунка 3.9, минимальная величина  $R_c$  выросла в 3 раза по сравнению со схожей по толщинам структурой на основе Ni (таблица 3.3). Причиной значительного ухудшения характеристик омических контактов может являться неспособность слоя Ta эффективно предотвращать попадание Au в Al (что в свою очередь ведёт к образованию т.н. “пурпурной чумы” – высокоомного эвтектического сплава на основе Al и Au).

### 3.2.3 Исследование металлизации Ti/Al/Mo/Au

Целью данной серии экспериментов является оценка свойств молибдена, как диффузионного барьера. Так как в разделах 3.2.1 и 3.2.2 были определены оптимальные соотношения толщин Ti/Al и Ni/Au, на пластине AlGaIn/GaN на подложке 4H-SiC были изготовлены образцы с двумя разными видами металлизации (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Зависимость  $R_c$  металлизации Ti/Al/Mo/Au (30/60/x/y нм) от соотношения толщин Mo/Au и температуры быстрого отжига ( $t_{\text{отжига}} = 30$  с)

Толщины Mo/Au, нм	$T_{\text{БТО}}, ^\circ\text{C}$	$R_c, \text{Ом}\cdot\text{мм}$
40/25	820	0,57
	830	0,51
	840	0,39
	850	0,65
	860	0,55
	870	0,65
50/35	820	0,43
	830	0,39
	840	0,45
	850	0,47

Из данных таблицы 3.5 следует, что минимальному значению  $R_c$  в 0,39 Ом·мм соответствуют две точки: Mo/Au=40/25 нм, отожженные при 840 °С и Mo/Au=50/35 нм, отожженные при 830° С. Микрофотографии поверхности данных образцов представлены на рисунках 3.10 и 3.11.

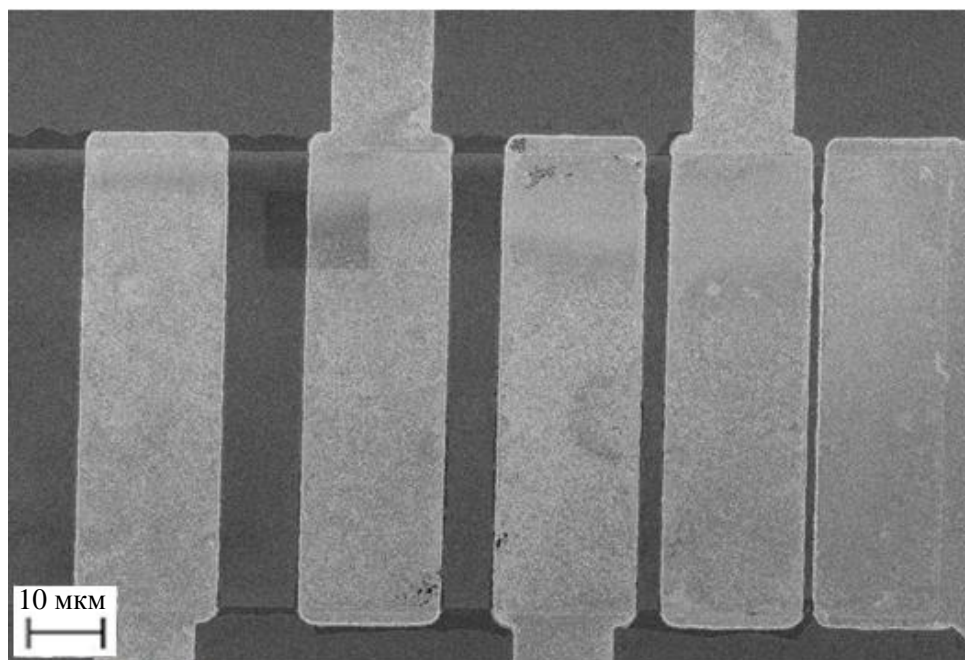


Рисунок 3.10 – Поверхность контакта Ti/Al/Mo/Au (30/60/40/25 нм),  $T_{\text{отжига}}=840$  °С



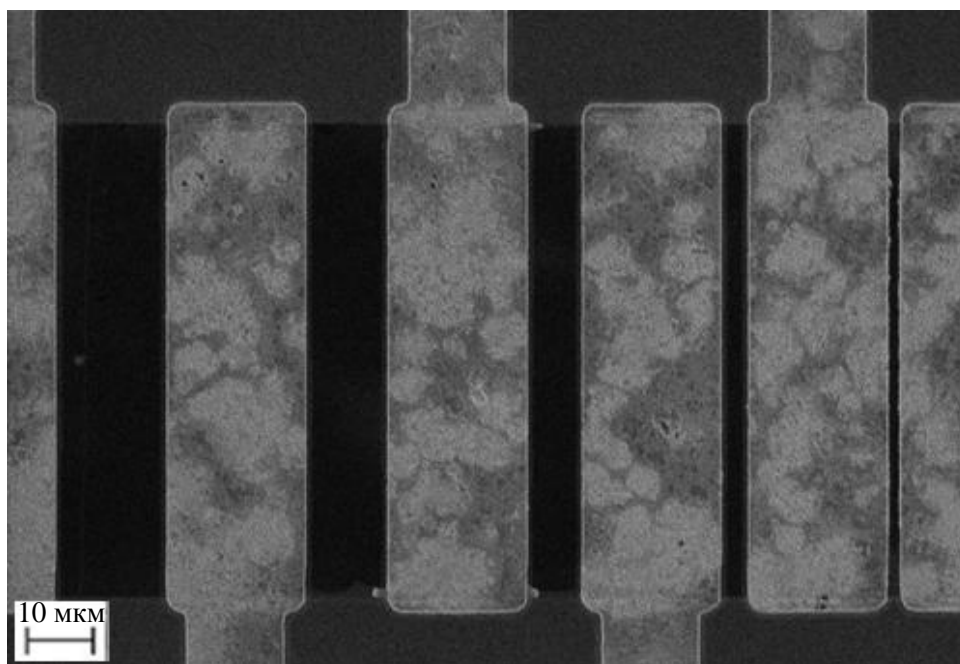


Рисунок 3.11 – Поверхность контакта Ti/Al/Mo/Au (30/60/50/35 нм),  $T_{\text{отжига}}=830\text{ }^{\circ}\text{C}$

Из представленных результатов видно, что влияние, которое температура отжига оказывает на морфологию поверхности, напрямую зависит от толщин Mo и Au. В этом можно убедиться, сравнив микрофотографии, представленные на рисунках 3.10 и 3.11 (края омических контактов образца с большей температурой отжига ровнее). Можно сделать вывод о том, что использование Mo в качестве диффузионного барьера в схеме металлизации Ti/Al/Mo/Au позволяет получать омические контакты, значения  $R_c$  которых ниже чем у контактов на основе Ti/Al/Ni/Au.

На рисунках 3.12 и 3.13 представлены элементные профили Ti/Al/Mo/Au (30/60/40/25 нм) до и после отжига при  $T_{\text{отжига}}=840\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

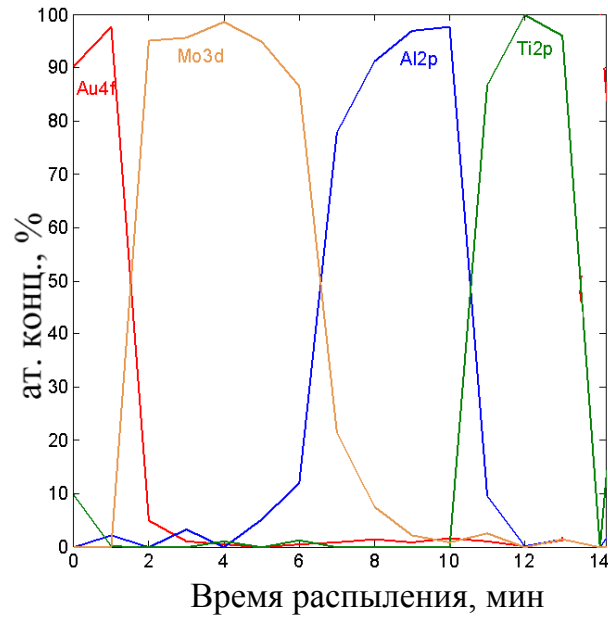


Рисунок 3.12 – Элементный профиль по глубине омических контактов Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм) до отжига

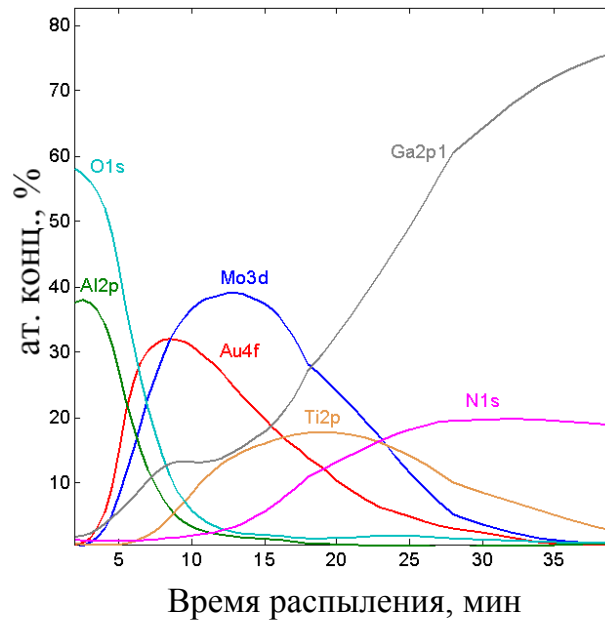


Рисунок 3.13 – Элементный профиль по глубине омических контактов вида Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм)  $T_{\text{отжига}}=790^{\circ}\text{C}$

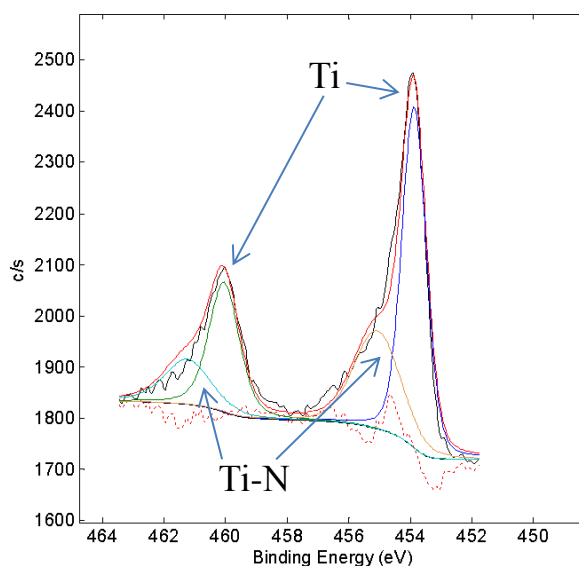


Рисунок 3.14 – Химический состав Ti после отжига при  $T_{\text{отжига}}=790^{\circ}\text{C}$

Элементные профили, представленные на рисунках 3.12-3.14 получены методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Наблюдаются следующие явления:

- а) Al во время отжига активно диффундирует на поверхность омического контакта, где образуется его окисел;
- б) Al, вышедший на поверхность контакта, не образует связи с золотом (не формируется Al-Au);
- в) несмотря на то, что величина  $R_c$  находится в пределах  $0,4\text{ Ом}\cdot\text{мм}$ , Mo не препятствует перемешиванию материалов металлизации (рисунок 3.12);
- г) слой Ti после отжига взаимодействует с GaN, образуя Ti-N (рисунок 3.14);
- д) Au и Mo находятся в металлическом состоянии и не образуют связей между элементами.

Дальнейшие эксперименты необходимо проводить, основываясь на полученных данных. Так, диффузия алюминия к поверхности контакта и образование его окисла, увеличивающего сопротивление контакта, может быть предотвращена с помощью улучшения диффузионных свойств барьера. Однако замена молибдена на другой материал нежелательна, так как в данной конструкции молибден и золото не вступают в реакцию с алюминием [66].

Возможными решениями данной проблемы могут являться использование дополнительного тугоплавкого металла, затрудняющего диффузию алюминия на поверхность; увеличение толщины Au; снижение температуры отжига.

### 3.2.4 Исследование контактов с металлизацией Ti/Al/Mo/W/Au и Si/Ti/Al/Mo/Au

На рисунке 3.15 представлена конструкция, включающая в себя неизменные по толщине слои Ti/Al/Mo/Au и инкапсулирующий слой W (20 нм).

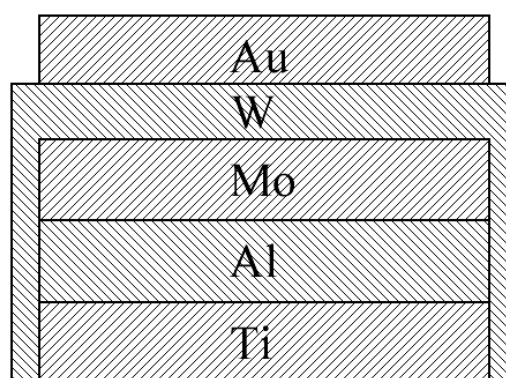


Рисунок 3.15 – Инкапсулирующий слой W для омических контактов Ti/Al/Mo/Au

Предполагалось, что конструкция, изображенная на рисунке 3.15, должна выполнять две функции: предотвращение диффузии Al на поверхность контакта и улучшение ровности краёв контакта (за счёт исключения явления латерального расплывания контактов). Результаты экспериментов по отжигу данной структуры приведены в таблице 3.6, фотографии поверхности и края контакта после отжига представлены на рисунке 3.16, элементный профиль по глубине представлен на рисунке 3.17.

Таблица 3.6 – Зависимость  $R_c$  металлизации типа Ti/Al/Mo/W/Au (30/60/50/20/35 нм) от  $T_{\text{БТО}}$

$T_{\text{БТО}}, ^\circ\text{C}$	$R_c, \text{Ом}\cdot\text{мм}$
800	2
810	1,8
820	0,43
830	0,73

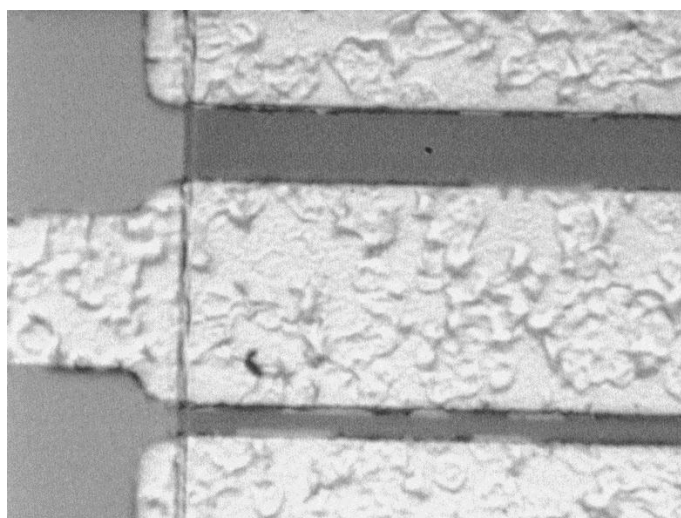


Рисунок 3.16 – Поверхность омических контактов вида Ti/Al/Mo/W/Au

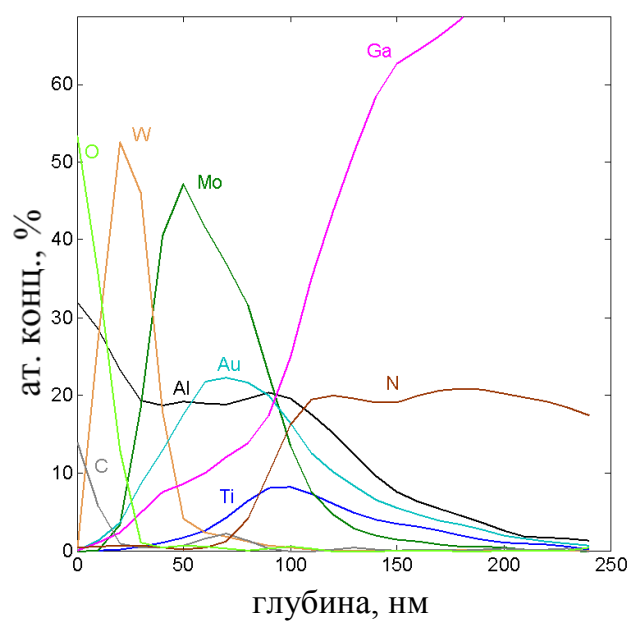


Рисунок 3.17 - Элементный профиль по глубине для Ti/Al/Mo/W/Au омических контактов после отжига

Использование инкапсулирующего слоя  $W$  не позволило снизить  $R_c$ , контакта, что связано с попаданием  $Al$  на поверхность (рисунок 3.17). Как следствие взаимного перемешивания всех материалов, увеличение суммарной толщины металлизации привело к появлению дополнительных неровностей между контактами (рисунок 3.16). Добиться снижения температуры отжига можно, используя кремний для легирования подконтактной области (таблица 3.7)

Таблица 3.7 – Зависимость  $R_c$  контакта  $Si/Ti/Al/Mo/Au$  (20/30/60/50/35 нм) от  $T_{\text{БТО}}$

$T_{\text{БТО}}, ^\circ\text{C}$	$R_c, \text{Ом}\cdot\text{мм}$
800	2
810	1,8
820	2,1
830	1,5

Использование  $Si$  (20 нм) в структуре  $Si/Ti/Al/Mo/Au$  привело к увеличению значения  $R_c$  на всём диапазоне температур отжига, внешний вид поверхности контакта остался неизменным. Это может быть связано с относительно высокой толщиной плёнки (20 нм). Помимо добавления дополнительного материала в схему металлизации и усложнения технологического маршрута возможно использование ещё одного источника кремния – тонкого слоя *in-situ*  $Si_3N_4$  (5 нм, рисунок 3.18), осаждённого в эпитаксиальной ростовой камере.

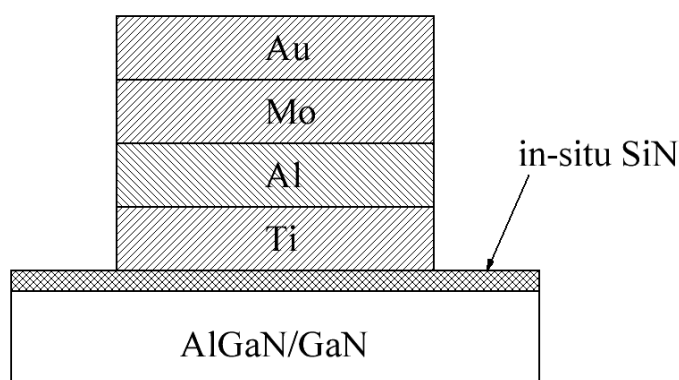


Рисунок 3.18 – Омические контакты  $Ti/Al/Mo/Au$  поверх слоя *in-situ*  $Si_3N_4$

Такой диэлектрик используют для защиты поверхности полупроводника от загрязнений и устранения такого явления, как коллапс тока. В таблице 3.8 представлены результаты отжига Ti/Al/Mo/Au (30/60/50/35 нм) на *in-situ* Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Таблица 3.8 – Зависимость  $R_c$  контакта Ti/Al/Mo/Au на слое *in-situ* Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> от  $T_{\text{БТО}}$

$T_{\text{БТО}}, ^\circ\text{C}$	$R_c, \text{Ом}\cdot\text{мм}$
790	0,55
800	0,43
810	0,4
820	0,51
830	0,7
840	0,65

Как видно из данных, представленных в таблице 3.8, оптимальная температура отжига снизилась с 840 °С до 800-810 °С, но сами минимальные значения  $R_c$  остались неизменными (по сравнению со структурой Ti/Al/Mo/Au), морфология поверхности не изменилась.

### 3.2.5 Оптимизация толщин для Ti/Al/Mo/Au металлизации

Поскольку поиск оптимального соотношения толщин Ti/Al и диффузионный барьер/Au производился для образцов типа Ti/Al/Ni/Au, можно предположить, что соотношение толщин металлов в структуре Ti/Al/Mo/Au не является оптимальным и достигнутые результаты можно улучшить по результатам исследования влияния толщин металлов на параметры омических контактов. Суть экспериментов по подбору толщины заключалась в следующем: на пластине с гетероструктурой AlGa<sub>0,3</sub>N/GaN на подложке 4H-SiC во время роста осаждался слой *in-situ* Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (раздел 3.2.3), формировалась межэлементная изоляция и проводилось напыление структур Ti/Al/Mo/Au с различным отношением толщин к алюминию, в то время как толщина Mo и Au были приняты

равными 40 и 25 нм (как показано в разделе 3.2.1, данное соотношение толщин обладало наименьшей шероховатостью поверхности). После взрыва образцы с различным соотношением Ti/Al подвергались разделению, быстрому термическому отжигу и измерениям контактного сопротивления. Первая серия экспериментов была проведена на структуре Ti/Al/Mo/Au (30/60/40/25 нм), её результаты представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Зависимость  $R_c$  металлизации Ti/Al/Mo/Au (x/y/40/25 нм) от  $T_{БТО}$

$d_{Ti}$ , нм	$d_{Al}$ , нм	$T_{БТО}$ , °C	$R_c$ , Ом·мм
15	90	850	1,28
		865	0,80
		875	0,75
		885	1,00
		900	1,47
		925	1,50
20	35	810	3,30
		830	0,94
		850	2,00
	50	780	0,52
		790	0,30
		800	0,35
		810	0,38
		815	0,38
		820	0,41
		850	0,59
		75	830
	850		0,76
	30	50	850
860			0,82
870			0,78
75		800	0,60
		830	x
		850	0,54
		870	0,85
90		830	2,06
		850	1,15
		870	1,06
150		850	2,56
		875	2,50



Продолжение таблицы 3.9

30	150	900	2,70
		925	2,50
45	75	830	0,91
		850	0,72
		870	0,53

Из результатов, представленных в таблице 3.9 видно, что образцы Ti/Al/Mo/Au с соотношением толщин 20/50/40/25 нм имеют контактное сопротивление порядка 0,3 Ом·мм на диапазоне температур быстрого термического отжига 790-820 °С. Помимо значений  $R_c$ , удовлетворяющих поставленным к омическим контактам требованиям, оптимальным является наличие относительно широкого спектра оптимальных температур. Отсутствие “резкой” зависимости  $R_c$  от температуры напрямую влияет на воспроизводимость получаемых результатов и позволяет скомпенсировать разброс электрических параметров контактов при отжиге пластин, имеющих сферический изгиб. В связи с тем, что получения изначальной морфологии поверхности наиболее предпочтительным вариантом является проведение процесса отжига при наименьшей возможной температуре, для дальнейших экспериментов по оптимизации омических контактов была выбрана в качестве основной температура отжига  $T_{\text{БТО}}=790$  °С.

### 3.2.6 Оптимизация режимов отжига контакта Ti/Al/Mo/Au

Для выбранного состава металлизации и температуры отжига была исследована зависимость контактного сопротивления от времени нагрева и длительности нагрева. Исследование проводилось на графитовом носителе с отжигом в атмосфере азота.

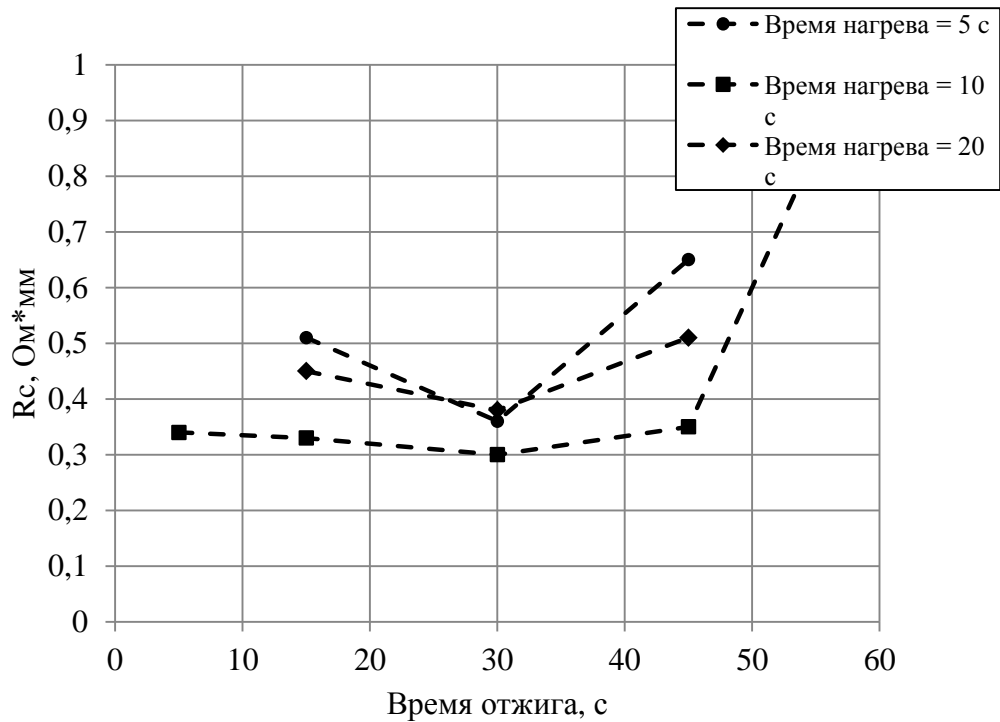


Рисунок 3.19 – Зависимость  $R_c$  контакта Ti/Al/Mo/Au от  $t_{\text{отжига}}$  и  $t_{\text{нагрева}}$

Как видно из рисунка 3.19, процесс с  $t_{\text{отжига}}=30$  с и  $t_{\text{нагрева}}=10$  с позволяет получить  $R_c$  равное 0,3 Ом\*мм. Кроме того,  $R_c$  находится в диапазоне значений 0,3-0,35 Ом\*мм для времени отжига от 5 до 45 с, что позволяет повысить повторяемость результатов за счёт расширения диапазона оптимальных параметров отжига.

### 3.2.7 Исследование структуры и химического состава омического контакта с Ti/Al/Mo/Au металлизацией

На полученных образцах был проведён анализ структуры и элементного состава методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и просвечивающей растровой электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом. Для анализа был выбран участок размером 2x16 мкм вблизи края омического контакта (рисунок 3.20). При подготовке образца на выбранный участок поверхности с помощью газо-инжекционной системы (GIS) с платиносодержащим газообразным реагентом  $(\text{CH}_3)_3\text{Pt}(\text{CpCH}_3)$  наносился слой

платины толщиной от 0,5 до 1 мкм электронным пучком, а после толщиной от 3 до 5 мкм фокусированным ионным пучком (ФИП) для защиты приповерхностного слоя от воздействия ионного пучка высоких энергий при последующем изготовлении фольги. Анализ изготовленного образца позволил выделить под металлизацией омического контакта область с вплавленным вглубь гетероструктуры металлом и проанализировать химический состав областей вблизи области сплавления. Результаты представлены на рисунках 3.21-3.24 и в таблице 3.10.

На рисунках 3.20 в) и 3.21 а) видно, что на краю омического контакта после отжига произошло растекание металла на расстояние примерно 50-70 нм. Толщина металла в этом месте около 25 нм. Такое изменение формы контакта вполне допустимо для большинства задач, т.к. минимальное расстояние от контактов до затвора для такой технологии составляет более 0,5 мкм.

На всей поверхности омического контакта (рисунки 3.21-3.24) присутствует тонкий сплошной слой с преобладанием оксида алюминия толщиной 10-20 нм. Помимо оксида алюминия, внутри контакта обнаруживаются крупные области с преобладанием Mo. Галлий обнаруживается во всех областях металлизации контакта, что подтверждает теорию о его освобождении из GaN с образованием вакансии, обеспечивающей электронную проводимость данной области полупроводника.

В ряде областей под поверхностью металлизации наблюдается сплавление металла вглубь гетероструктуры (рисунки 3.20, в и 3.2.1 а). Анализ состава областей сплавления показывает разрушение целостности слоя AlGaIn и значительное количество Au в ней. В отличие от многих публикаций, в срезе не обнаруживаются признаков значительного количества TiN, с образованием которого также принято связывать качественный контакт к GaN.

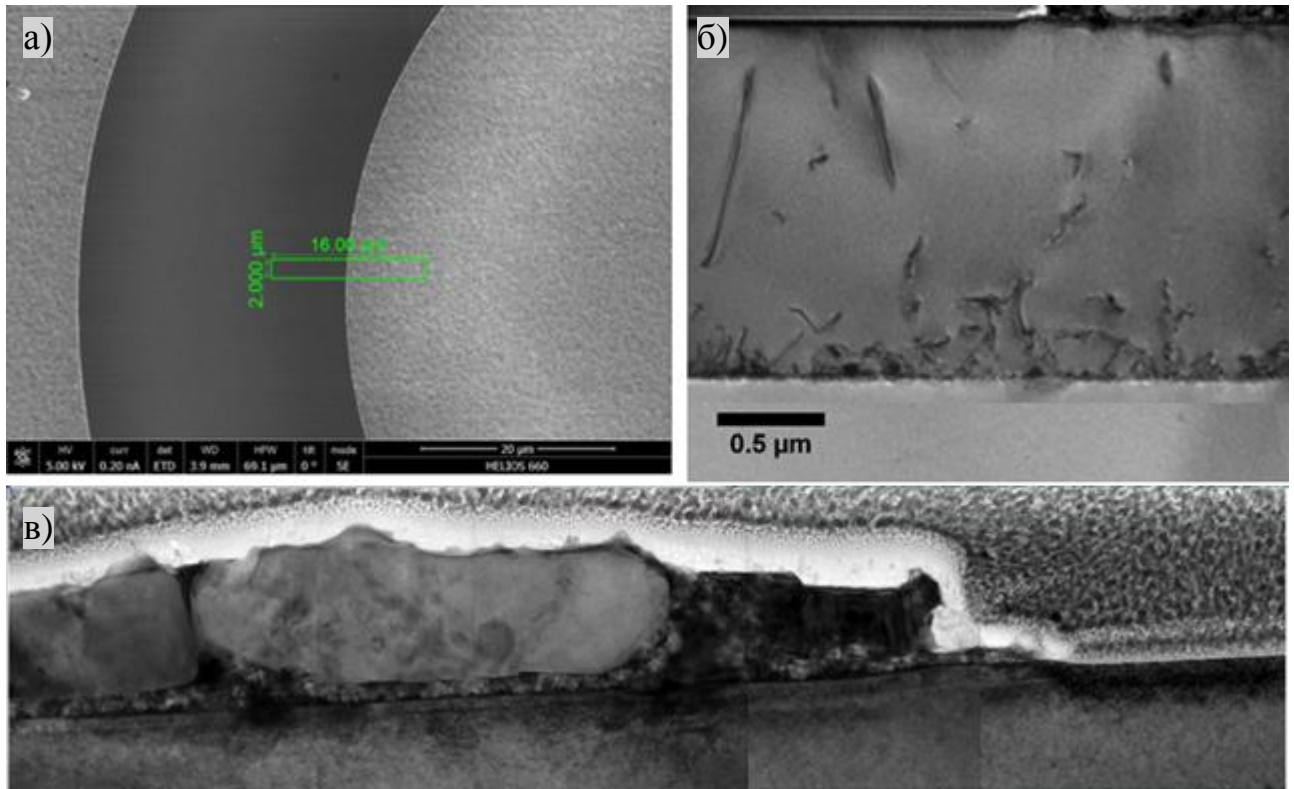


Рисунок 3.20 – Образец с выбранным участком для анализа методом ПЭМ (а) и его изображение в ПЭМ (б, в)

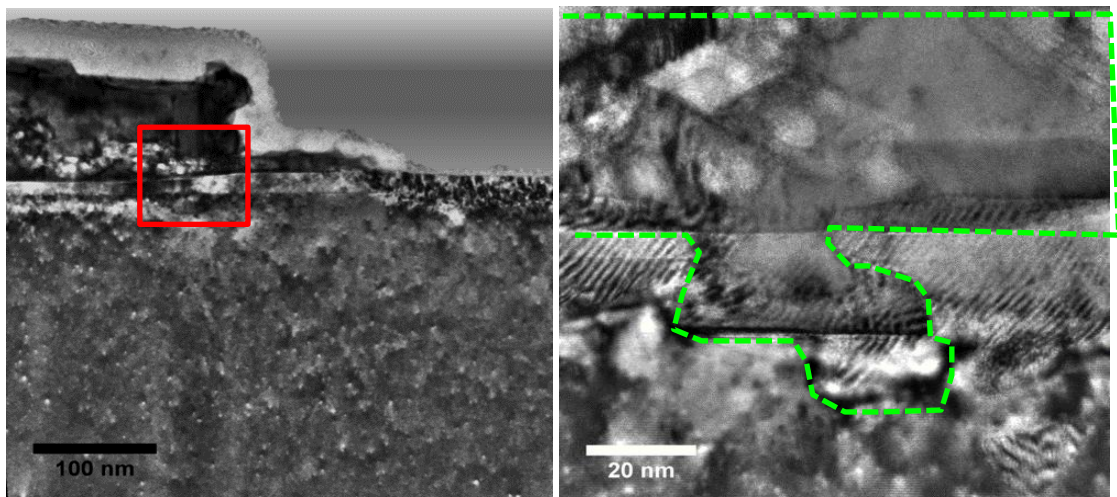


Рисунок 3.21 – Формирование омического контакта между слоем металлизации и слоем *2DEG* гетероструктуры AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>. Область сплавления выделена цветом

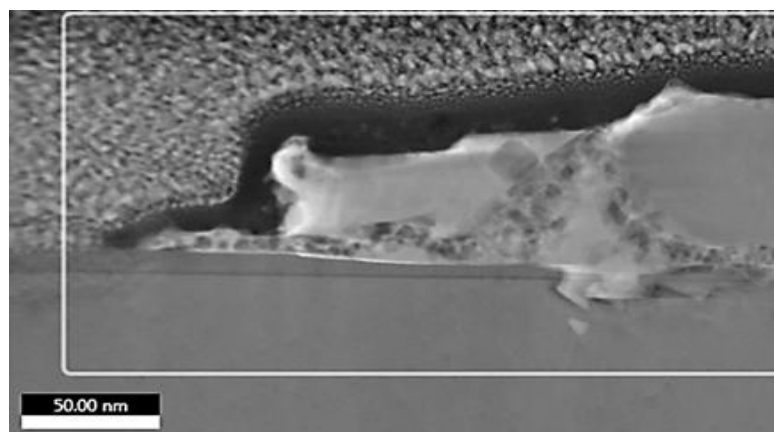


Рисунок 3.22 – ПРЭМ - изображение зоны, выбранной для картирования элементного состава

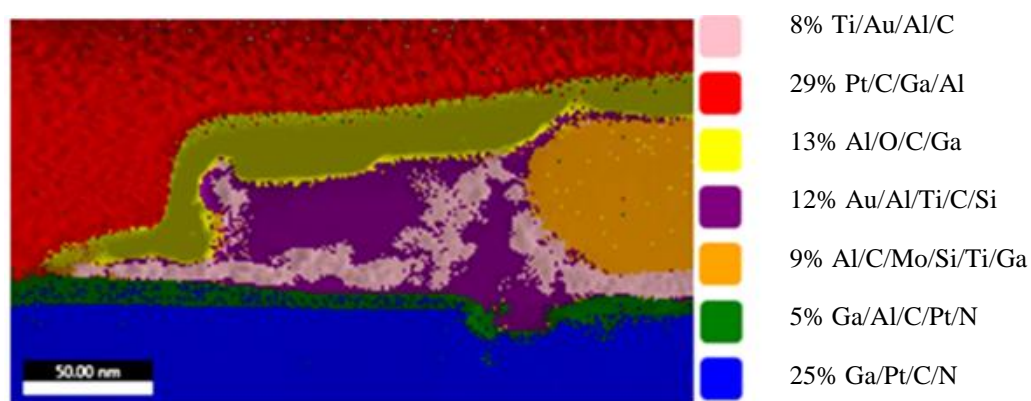


Рисунок 3.23 – Карта распределения фазового состава

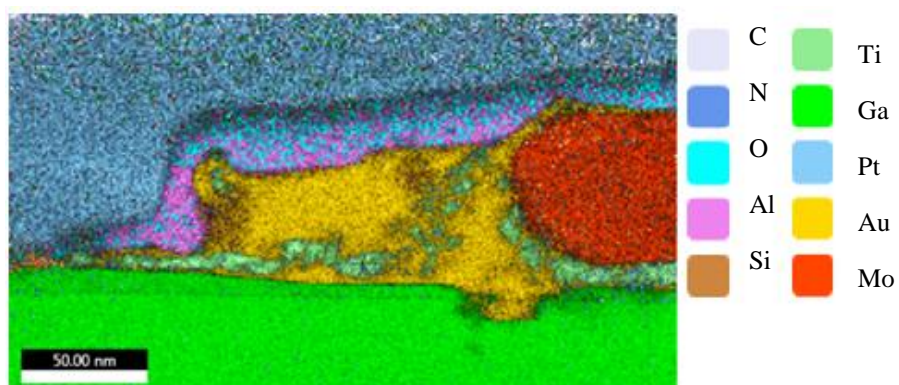


Рисунок 3.24 – Карта распределения химических элементов с цветовой схемой соответствия элементов

Таблица 3.10 – Элементный состав фаз на карте распределения фазового состава

Элемент	C	N	O	Al	Si	Ti	Ga	Pt	Au	Mo
Фаза	Концентрация, вес. %									
Al-O-C-Ga	9,5	0,0	20,6	37,9	0,3	1,6	15,8	7,4	4,5	2,4
Au-Al-Ti-C-Si	3,8	0,6	0,6	8,2	1,1	5,7	16,0	3,7	54,1	6,3
Al-C-Mo-Si- Ti-Ga	5,0	0,5	0,8	9,3	4,1	6,3	15,5	2,6	2,1	53,8
Ti-Au-Al-C	4,0	2,6	0,5	4,8	1,1	33,5	13,2	3,2	31,5	5,8
Ga-Al-C-Pt-N	5,2	4,4	0,8	7,8	0,8	1,2	65,4	7,6	5,4	1,5
Ga-Pt-C-N	3,8	4,3	0,4	0,4	0,5	0,3	83,4	5,8	0,2	1,0

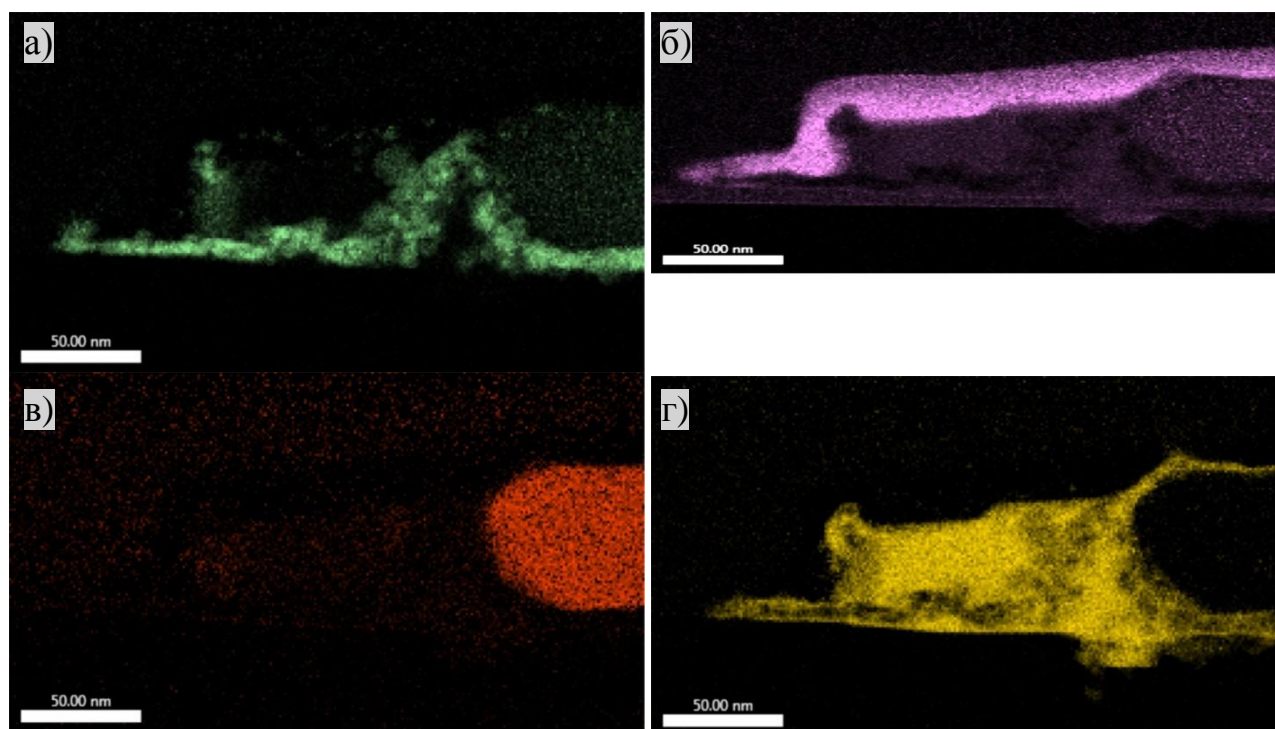


Рисунок 3.25 – Распределение интенсивности спектральных линий Ti (а), Al (б), Mo (в), Au (г) по проанализированному участку, полученное при картировании его элементного состава

Как видно из рисунков 3.20-3.24, после проведения быстрого термического отжига, на структуре Ti/Al/Mo/Au наблюдаются следующие эффекты:



- по всей области омического контакта наблюдается взаимная диффузия его составляющих;
- рядом с поверхностью омического контакта образуется область с высокой концентрацией молибдена, окруженная титаном и золотом (рисунок 3.24);
- в точке формирования контакта (рисунок 3.20, а, б, таблица 3.10 – Au/Al/Ti/C/Si) присутствует титан, азот и кремний;
- большая часть поверхности контакта состоит из Al-O- Ga (таблица 3.10).

### **3.3 Применение Ti/Al/Mo/Au металлизации для формирования омического контакта к InAlN/GaN гетероструктурам**

#### **3.3.1 Выбор режимов отжига омического контакта с Ti/Al/Mo/Au металлизацией к InAlN/GaN гетероструктуре**

Разработанная технология формирования контактов к AlGaN/GaN гетероструктурам на основе металлизации Ti/Al/Mo/Au была применена для создания контактов к новой конструкции гетероструктуры – InAlN/GaN. Данная конструкция позволяет увеличить плотность тока к гетероструктуре в 1,5-2 раза по сравнению с AlGaN/GaN, за счет чего появляется возможность получить транзисторы, успешно работающие на более высоких частотах, в частности в миллиметровом диапазоне длин волн.

Одной из главных особенностей конструкции гетероструктуры InAlN/GaN является более тонкий по сравнению с AlGaN барьерный слой InAlN, его толщина в большинстве исследуемых гетероструктур составляет 5-10 нм. Вплавление контакта к такому слою происходит, так же как и для AlGaN/GaN гетероструктур, через слой осажденного в ростовой камере эпитаксии (*in-situ*) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> толщиной 5нм.

На образцах с InAlN/GaN гетероструктурой были проведены эксперименты по определению оптимальных времени и температуры отжига  $t_{\text{opt}}$ . Состав металлизации контакта не менялся. В ходе экспериментов был обнаружен эффект увеличения значения слоевого сопротивления в гетероструктуре после отжига. Результаты экспериментов приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Результаты экспериментов по определению оптимальных режимов отжига контактов

№	Мольная доля индия в слое InAlN, %	Толщина слоя InAlN, нм	Режим отжига		контактное сопротивление, Ом·мм	слоевое сопротивление, Ом/□	
			температура, °С	время, сек		до отжига	после отжига
1	12	16	800	30	0,34	264	385
2	18,5	19	770	30	0,36	441	489
3	13,7	17	800	40	нелинейная ВАХ	264	888
4	11,3	16	800	20	0,28	296	385
5	9,3	15	800	30	0,2	407	503
6	13	5	765	13	0,29	223	213
7	15	5	765	13	0,28	232	231
8	12	5	750	10	0,3	267	270
9	13	5	755	13	0,25	223	225
10	12	5	730	10	0,35	267	270
11	12	10	750	13	0,4	224	230
12	12	10	765	15	0,28	224	225

Из приведенных в таблице 3.11 данных можно сделать вывод о деградации электрофизических свойств образцов с изначально высокими свойствами двумерного электронного газа от воздействия быстрого высокотемпературного отжига. Образцы с изначально высоким слоевым сопротивлением (что может быть обусловлено более низким качеством эпитаксиальной гетероструктуры или выбранной мольной долей индия в канале) менее подвержены деградации. Снижение температуры отжига и уменьшение времени процесса приводят к



уменьшению деградации электрофизических свойств материала. Для отжига контактов к более тонкому слою InAlN требуется более короткий процесс отжига.

Полученные результаты показали возможность успешного использования металлизации Ti/Al/Mo/Au для формирования омического контакта к InAlN/GaN гетероструктурам

### 3.3.2 Исследование профиля элементного состава омического контакта с Ti/Al/Mo/Au металлизацией к InAlN/GaN гетероструктуры

Для определения элементного состава металлизации контакта к InAlN/GaN было выполнено глубинное профилирование элементного состава приповерхностных слоев методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Глубинное профилирование образцов, заключалось в регистрации РФЭ спектров в выбранных точках входе последовательного удаления равных слоев материала покрытия с поверхности образца при помощи травления ионами  $Ar^+$ . Для исследования был выбран образец со сформированными омическими контактами к InAlGaN/GaN гетероструктуре.

По полученным данным РФЭС проводились расчеты концентрации всех обнаруженных элементов в составе данного слоя и строились профили распределения. Концентрация химических элементов в поверхности образца в зоне анализа диаметром 200 мкм показана в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Концентрация химических элементов в поверхности образца

Элемент/ РФЭС линия	C1s	N1s	O1s	Al2s	Si2p	Ti2p	Ga2p3	Mo3d	In3d5	Au4f
Концентрация, ат.%	3,7	17,1	45,9	20,5	8,3	-	4,3	-	0,2	-

Методом РФЭС был проведен сравнительный анализ для двух областей образца: покрытых металлизацией омического контакта и без металлизации. На поверхности образца в указанных областях присутствуют диэлектрические слои:

в точке без металлизации (обозначена как  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) – нитрид кремния, а в точке с металлизацией – оксид алюминия (образовавшийся на поверхности в результате отжига омического контакта).

На рисунках 3.27 и 3.28 представлены фотоэлектронные спектры линий основных химических элементов на поверхности (рисунок 3.27) и после удаления слоя толщиной 5-10 нм с поверхности образца в точке  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , соответствующие содержащему индий слою  $\text{InAlN}$  (рисунок 3.28) и в точке  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , соответствующей омическому контакту с  $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{Au}$  металлизацией (рисунок 3.29).

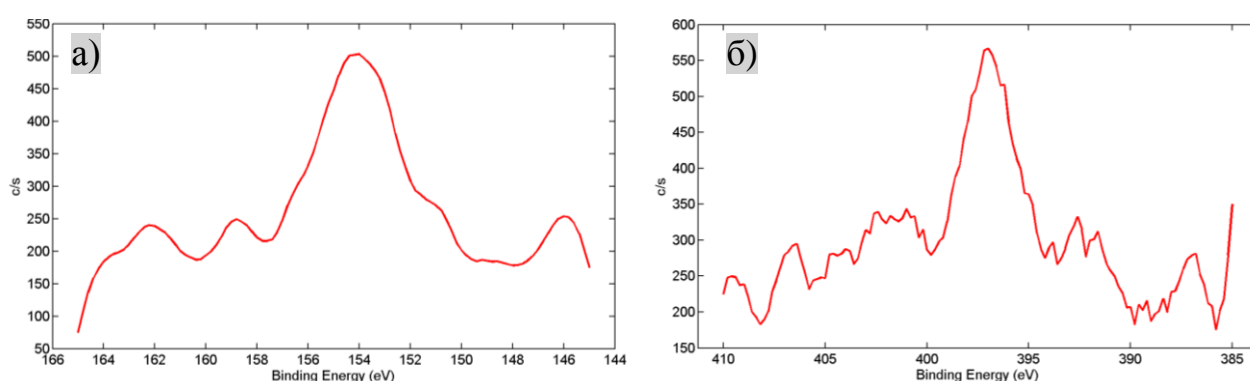


Рисунок 3.26 – Частные фотоэлектронные спектры линий  $\text{Si}2s$  (а) и  $\text{N}1s$  (б), полученные с поверхности образца ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

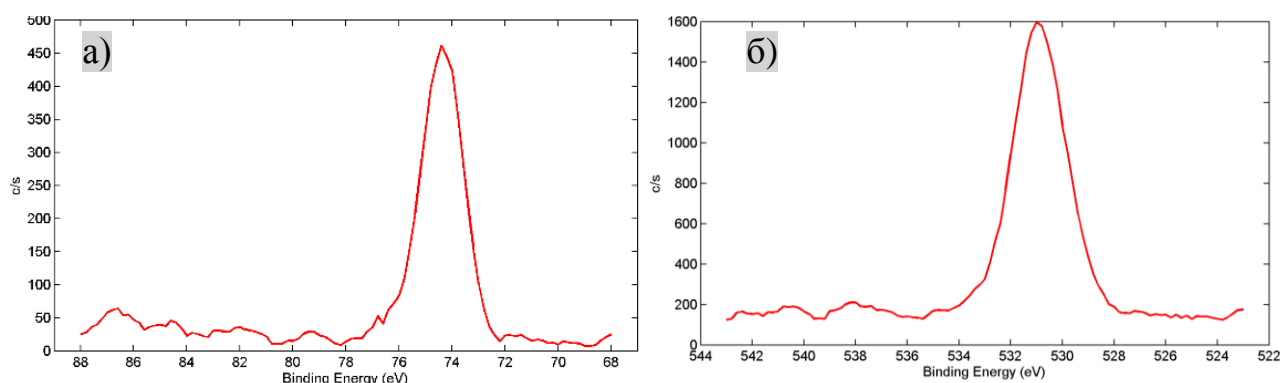


Рисунок 3.27 – Частные фотоэлектронные спектры линий  $\text{Al}2p$  (а) и  $\text{O}1s$  (б), полученные с поверхности образца ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

На рисунке 3.27 приведены частные фотоэлектронные спектры линий основных химических элементов, полученные после удаления слоя 5-10 нм с

поверхности образца в точке  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , соответствующие содержащему In слою InAlN.

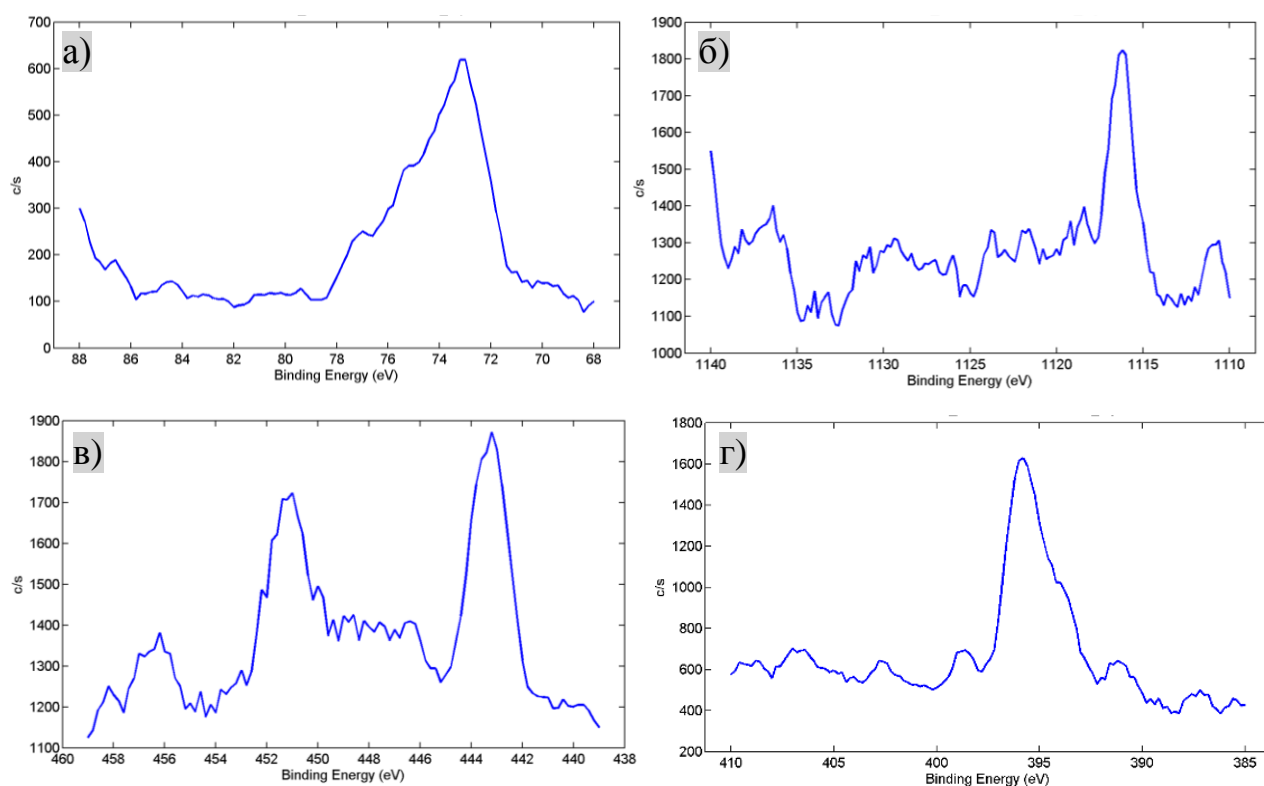


Рисунок 3.28 – Частные фотоэлектронные спектры линий Al 2p (а), Ga 2p3 (б), In 3d (в), N 1s (г)

Частные фотоэлектронные спектры линий основных химических элементов, полученные после удаления слоя толщиной 50-65 нм с поверхности образца в точке  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , отвечающие слою металлизации Ti/Al/Mo/Au приведены на рисунке 3.30.

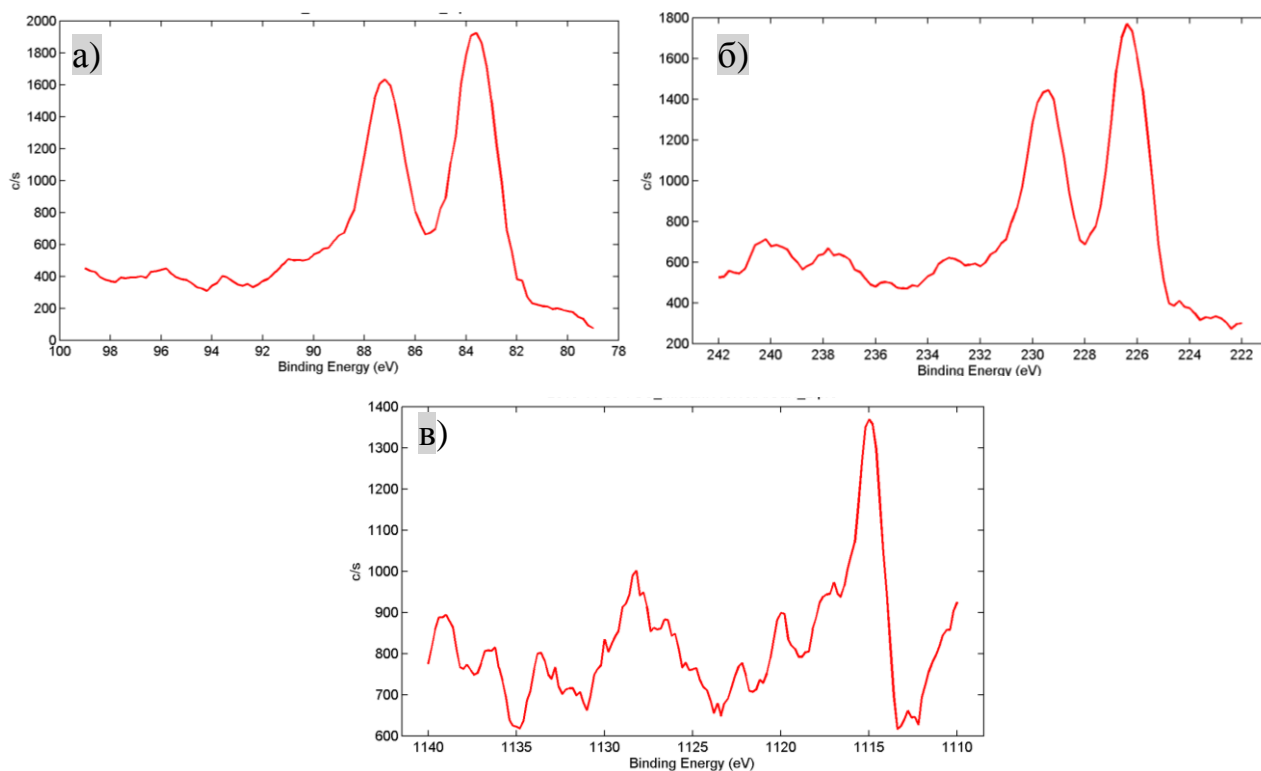


Рисунок 3.29 – Частные фотоэлектронные спектры линий Au4f (а), Mo3d (б) и Ga2p3 (в) в слое Au-Mo-Ga

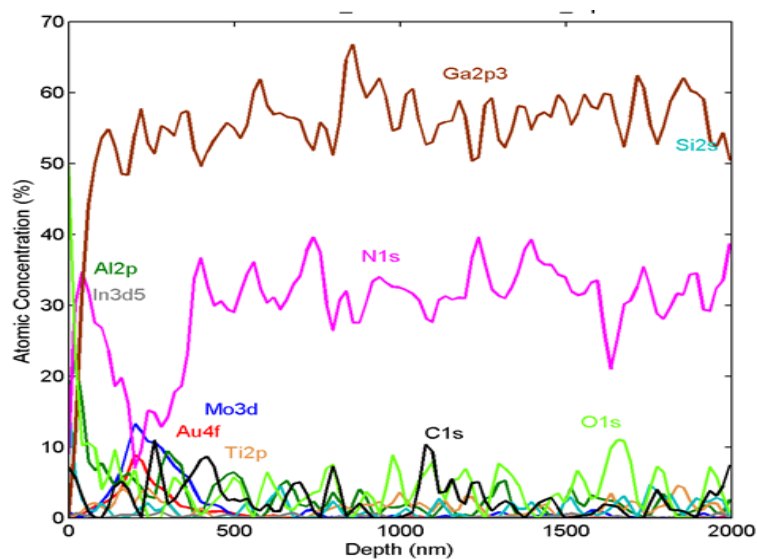


Рисунок 3.30 – Профиль концентрации элементов, полученный при последовательном удалении слоев с поверхности образца в точке  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Как видно из профилей распределения интенсивности химических элементов в слое металлизации (Au4f, Mo3d и Ga2p3), а также профиля

концентрации элементов, полученного при последовательном удалении слоев с поверхности образца (рисунки 3.30 и 3.31 соответственно), галлий активно диффундирует в слой InAlN, и в металлизацию омического контакта (за исключением поверхностного слоя  $Al_2O_3$ , где он отсутствует). Индий в отожженном омическом контакте не был обнаружен, возможной причиной может являться перераспределение его в результате отжига по более толстому слою металлизации и полупроводника, при этом концентрация индия становится значительно ниже начальной (12-13%) и не может быть обнаружена методом РФЭС. В основных закономерностях элементный профиль по глубине для Ti/Al/Mo/Au омических контактов на InAlN/GaN схож с аналогичным профилем контактов для AlGaN/GaN гетероструктур (рисунок 3.13): поверхность покрыта тонким слоем  $Al_2O_3$ , под поверхностью преобладают молибден, золото, титан и галлий. В области под поверхностью контакта наблюдается уменьшение концентрации азота. Есть и ряд отличий от профиля контактов для AlGaN/GaN гетероструктур: на поверхности имеется всплеск концентрации азота и кремния (что свидетельствует о неполном разрушении слоя  $Si_3N_4$ ), а наибольшая концентрация титана располагается ближе к поверхности. Эти отличия, вероятно, связаны с более коротким временем и более низкой температурой отжига контакта к InAlN/GaN.

### 3.4 Выводы

Использование металлизации Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм), отожженной в атмосфере гелия при  $T=780\div 790^\circ C$ , при  $t_{отж}=20$  с (для AlGaN/GaN) и  $T=750\div 765^\circ C$ , при  $t_{отж}=13\div 15$  с (для InAlN/GaN), позволяет получить значения контактного сопротивления до 0,3 Ом·мм для гетероструктур AlGaN/GaN и 0,25 Ом·мм для InAlN/GaN, выращенных на подложках 4H-SiC и  $Al_2O_3$ . При этом снижение температуры и времени отжига при формировании контакта в InAlN/GaN по сравнению с AlGaN/GaN позволяет избежать деградации электрофизических параметров двумерного газа в гетероструктуре InAlN/GaN в

результате отжига. Одним из достоинств предложенной схемы металлизации является низкая суммарная толщина контакта, за счет чего после отжига внутри контакта остается мало алюминия, не прореагировавшего с кислородом или не вплавившегося вглубь гетероструктуры. Это снижает риск образования соединений золота и алюминия при протекании тока через контакт. Также низкая толщина контактов упрощает формирование затвора литографическими методами, поскольку на ступеньке контакта не образуются неоднородности толщины резистов. Показано отсутствие деградации электрических параметров контактов Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм) от времени отжига ( $T=200$  °C) в атмосфере.

## ГЛАВА 4. Применение металлизации Ti/Al/Mo/Au для формирования омического контакта на пластинах большого диаметра

### 4.1 Оптимизация режимов отжига контактов с металлизацией Ti/Al/Mo/Au для пластин AlGaN/GaN на подложках 4H-SiC диаметром 100мм

Дальнейшие эксперименты по исследованию зависимости контактного сопротивления от параметров отжига проводились на пластинах диаметром до 100 мм. В ходе предварительных экспериментов было установлено, что:

- из-за большой теплоемкости образца с нагревателем для получения скоростей нагрева и температуры отжига, аналогичных выбранным режимам для образцов маленького размера, необходимо значительно увеличивать мощность нагревательных ламп;
- прогиб пластин большого диаметра приводит к неоднородности получаемого контактного сопротивления по площади пластины;
- поток азота, давление в камере и скорость остывания оказывают влияние как на величину, так и на распределение сопротивления по площади пластины;
- минимальный разброс (менее 10%) контактного сопротивления на пластине AlGaN/GaN на подложках 4H-SiC диаметром 100мм наблюдался при  $f_{N_2}=10$  куб. см/мин,  $P=375$  торр и  $t_{\text{остывания}}=60$  с, однако из-за того, что данный результат сильно зависит от изгиба конкретного образца и стабильности работы вакуумной системы камеры, этот результат плохо воспроизводится на пластинах с различными параметрами изгиба поверхности.

Для решения проблем отжига контактов на пластинах диаметром 100 мм было предложено изменение оснастки камеры, рассмотренное подробно в разделе 2.4.1 [67], а также замена атмосферы, в которой проводится отжиг с азотной на гелиевую (раздел 2.4.2). Изменения в оснастке и газовой среде потребовали корректировки режима отжига. Из-за более высокой скорости нагрева и охлаждения образца время отжига уменьшилось до 20 секунд. В

оптимизированных режимах отжига было проведено несколько процессов на пластинах диаметром 100мм с гетероструктурами AlGaIn/GaN, выращенными на подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiC. Измерения показали, что в результате проведенных исследований удалось решить основные проблемы данной технологии и выбрать режимы процесса и оснастку, позволяющие получить контакты с низким сопротивлением и высокой однородностью по пластине. Сравнение результатов при отжиге образцов в гелиевой и азотной атмосферах показано на рисунке 4.1.

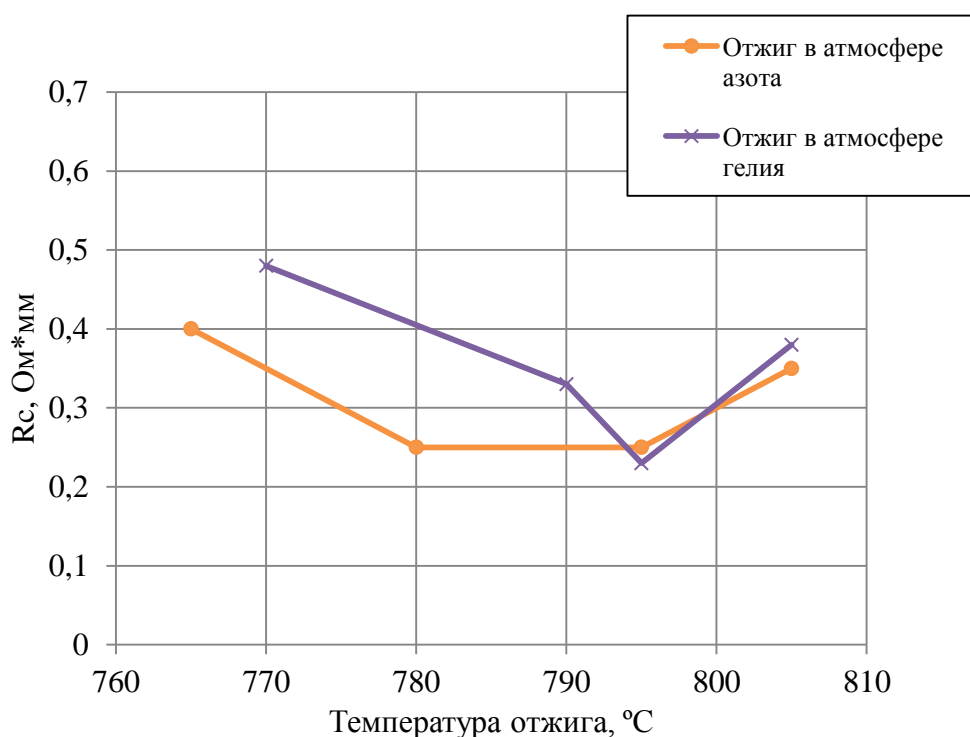


Рисунок 4.1 – Зависимость контактного сопротивления от режимов быстрого отжига



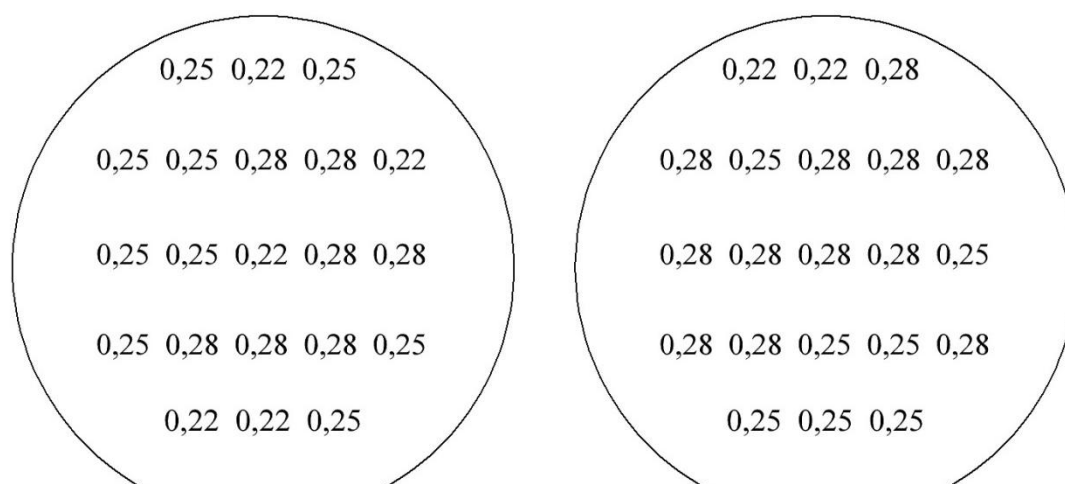


Рисунок 4.2 – Распределение сопротивления контактов по пластине для оптимизированного режима отжига

Таким образом, среднее значение контактного сопротивления для пластины, представленных на рисунке 4.2, составило 0,25 и 0,26 Ом·мм со среднеквадратическим отклонением в 0,02 Ом·мм, что составляет менее 10% от среднего значения.

#### **4.2 Сравнительное исследование контактного сопротивления и рельефа поверхности омических контактов, сформированных к HEMT на InAlN/GaN и AlGaN/GaN**

На основании результатов проведенных исследований можно сравнить два основных параметра омического контакта (контактное сопротивление и рельеф поверхности) для двух материалов – гетероструктур InAlN/GaN и AlGaN/GaN.

Морфология поверхности омического контакта является важным параметром технологии формирования контакта, и во многом определяет границы возможностей данной технологии по уменьшению расстояния между электродами транзистора, что необходимо для повышения рабочей частоты и минимизации паразитных сопротивлений транзистора. Как было указано в разделах 1.5 и 3.2.1, при проведении операции литографии затвора также важную роль играет морфология поверхности омического контакта.

Поверхности образцов с контактами к InAlN/GaN и AlGaIn/GaN гетероструктурам, сформированными с помощью Ti/Al/Mo/Au и Ta/Al металлизаций был исследован методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Металлизация на основе Ta/Al была выбрана для сравнения, поскольку благодаря низкой температуре отжига она может потенциально являться конкурирующей для металлизации Ti/Al/Mo/Au по качеству поверхности [68]. Для исследования выбирались участки омических контактов размером 25x25мкм.

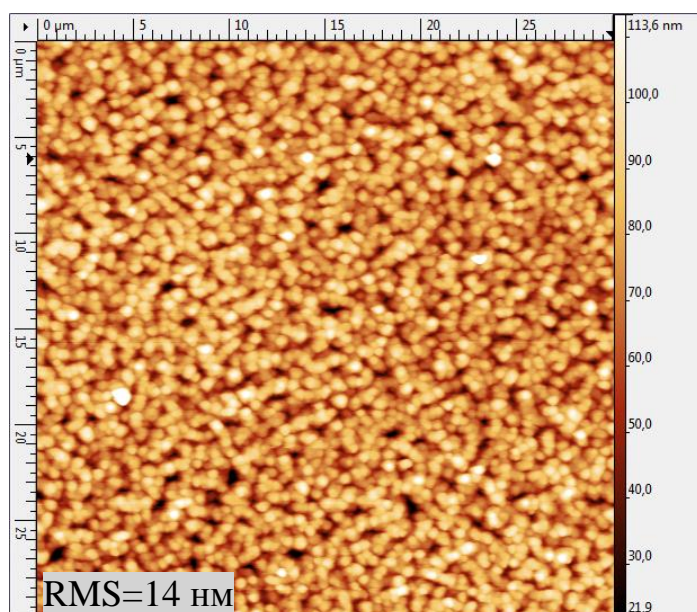


Рисунок 4.3 – Поверхность омических контактов к AlGaIn/GaN HEMT

Из представленного на рисунке 4.3 изображения поверхности омических контактов к AlGaIn/GaN после отжига видно, что величина среднеквадратичной шероховатости поверхности составляет 14 нм, что на 20-40 нм меньше величин, представленных в современных источниках (раздел 1.5).

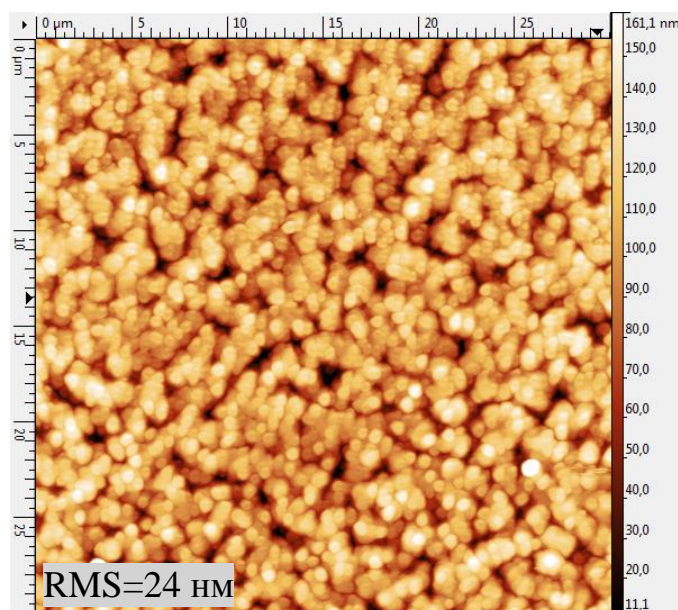


Рисунок 4.4 – Поверхность омических контактов к InAlN/GaN HEMT

Можно заметить, что шероховатость поверхности омических контактов к InAlN/GaN (рисунок 4.4) несколько выше, чем у образцов AlGaN/GaN (RMS составляет 24 нм), что связано с исходным рельефом поверхности InAlN/GaN гетероструктуры (рисунки 3.2-3.4).

На рисунке 4.5 представлены омические контакты Ta/Al к HEMT на гетероструктуре AlGaN/GaN после проведения быстрого термического отжига при пониженных температурах. Несмотря на то, что данные контакты формировались к относительно гладкому AlGaN/GaN, шероховатость их поверхности схожа с образцами InAlN/GaN, отожженными при температурах порядка 750° С.

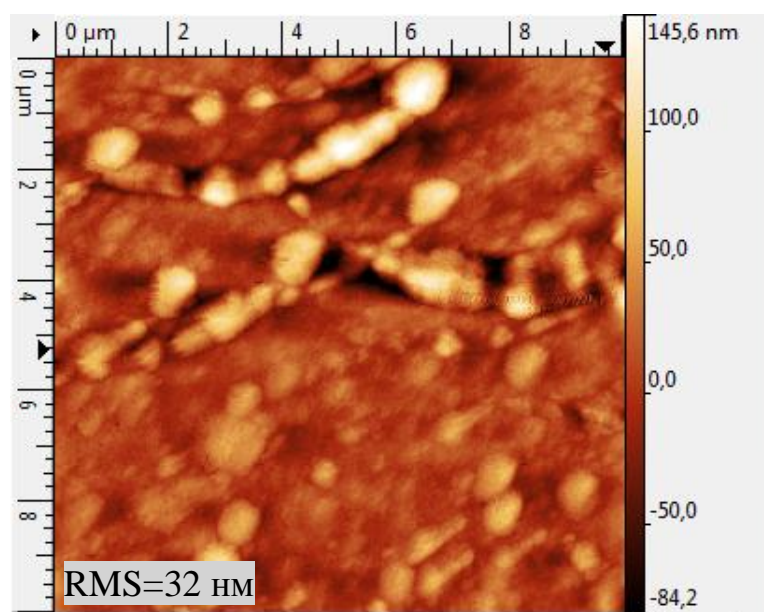


Рисунок 4.5 – Поверхность омических контактов на основе Ta/Al к AlGaIn/GaN HEMT

На рисунке 4.6 представлены результаты изготовления омических контактов на партии пластин AlGaIn/GaN на 4H-SiC и InAlN/GaN на  $Al_2O_3$ .

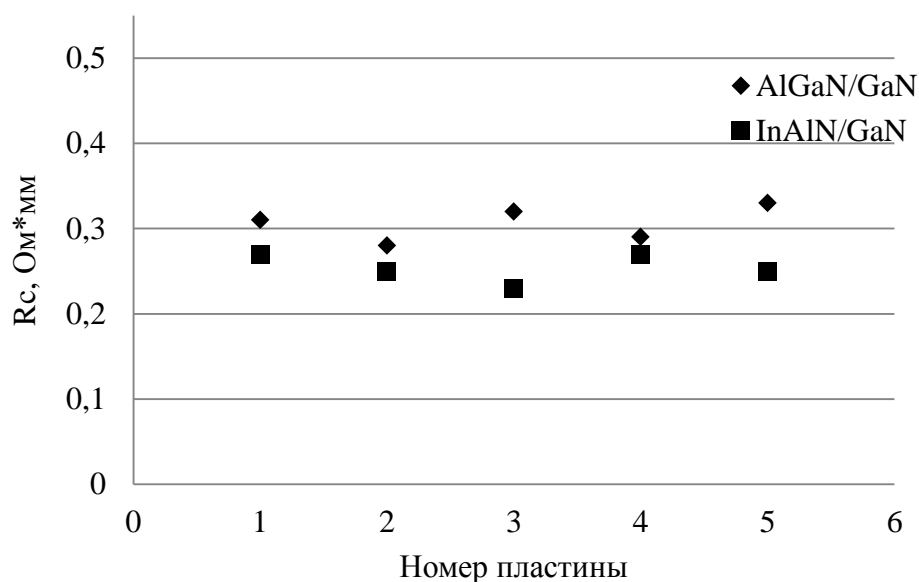


Рисунок 4.6 – Контактное сопротивление последовательно изготовленных пластин

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о воспроизводимости получаемых результатов. Небольшие отклонения в  $R_c$  с легкостью устраняются и,

вероятно, связаны с загрязнениями в напыляемых материалах или в реакторе установки быстрого термического отжига. Для обоих вариантов конструкции гетероструктуры (AlGaN/GaN и InAlN/GaN) получены омические контакты с низким контактным сопротивлением и рельефом на уровне 10-15% от толщины металлизации контакта, позволит использовать их при создании гетероструктурных СВЧ транзисторов.

### 4.3 Транзисторы с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN

Полученные в разделе 3.3 контакты были использованы для изготовления на AlGaN/GaN и InAlN/GaN гетероструктурах тестовых HEMT структур с длиной затвора 0,5 мкм и шириной затвора 200 мкм (рисунок 4.7).

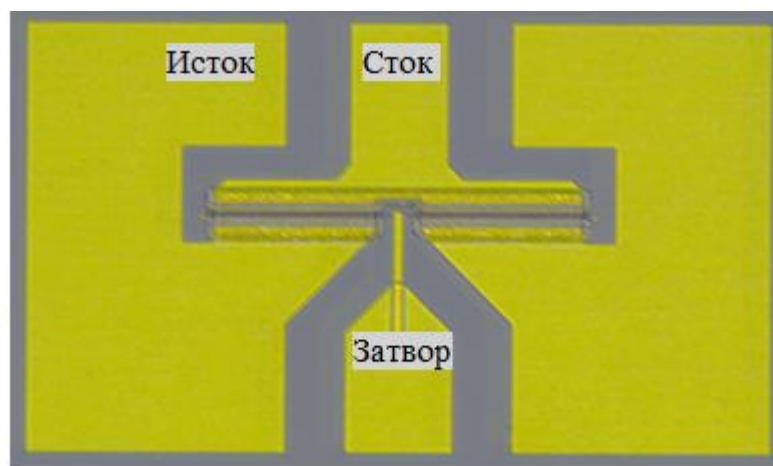


Рисунок 4.7 – HEMT с шириной затвора 200 мкм

ВАХ транзисторов без затвора после формирования омического контакта (рисунок 4.8) имела линейный характер с насыщением, плотность тока составила для AlGaN/GaN 1,13 А/мм, для InAlN/GaN 2,4 А/мм.



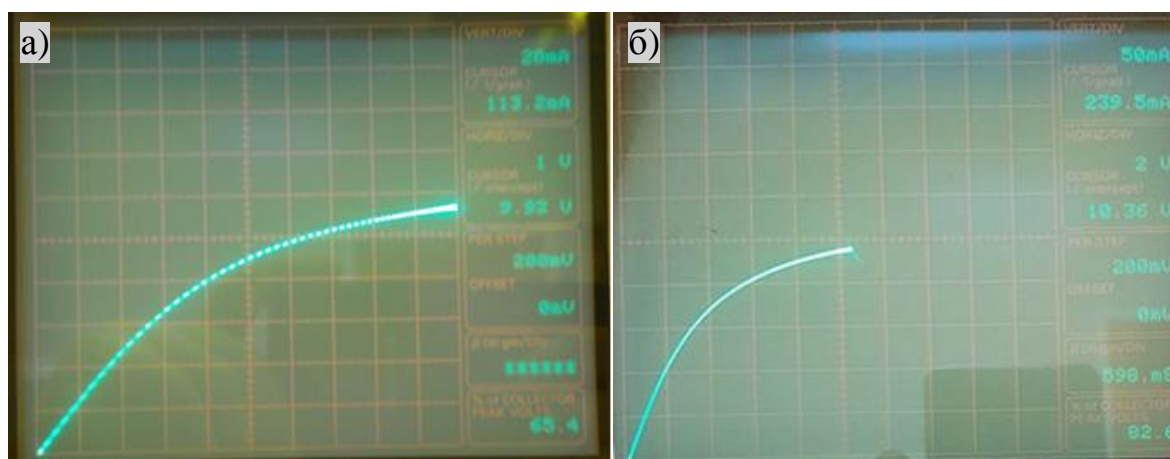


Рисунок 4.8 – Вольт-амперная характеристика AlGaIn/GaN (а) и InAlN/GaN (б) НЕМТ шириной 100 мкм

После операции отжига на тестовых транзисторах плазменным травлением была сформирована щель в диэлектрике (рисунок 4.9), поверх которой была нанесена затворная металлизация Ni/Pt/Au.

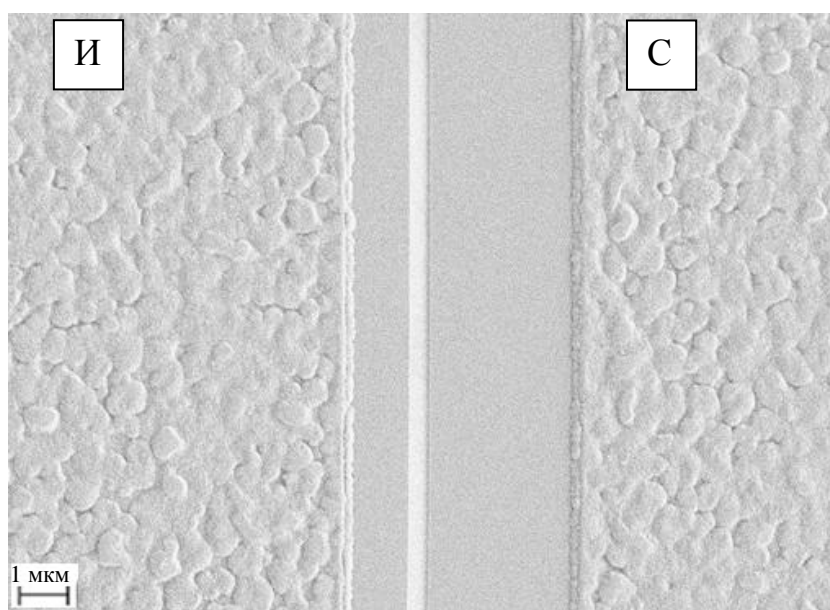


Рисунок 4.9 – Щель в диэлектрике между истоком и стоком AlGaIn/GaN НЕМТ

Импульсные вольт-амперные характеристики для омических контактов, сформированных данным методом к транзисторам шириной 200 мкм, представлены на рисунки 4.10 - 4.13.

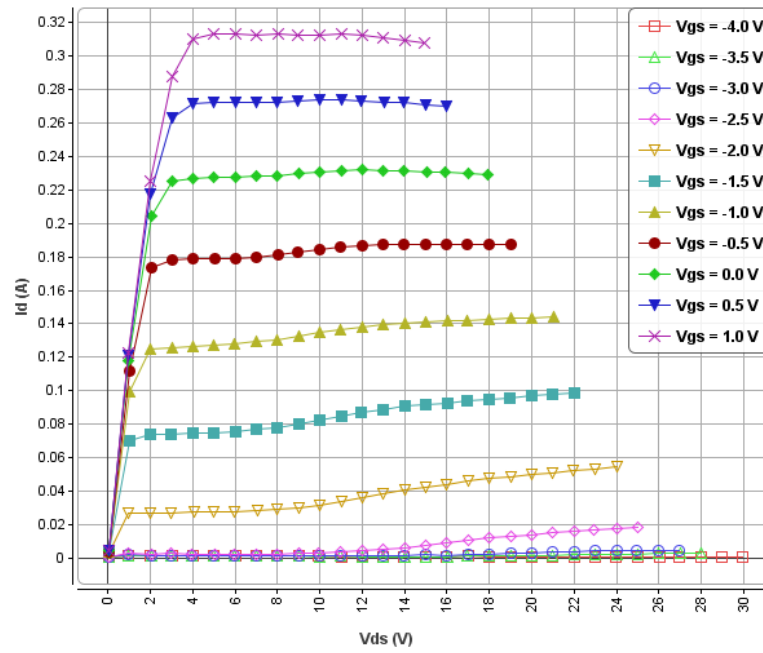


Рисунок 4.10 – Импульсные вольт-амперные характеристики InAlN/GaN НЕМТ, зависимость тока стока  $I_d$  от напряжения на стоке  $V_{ds}$

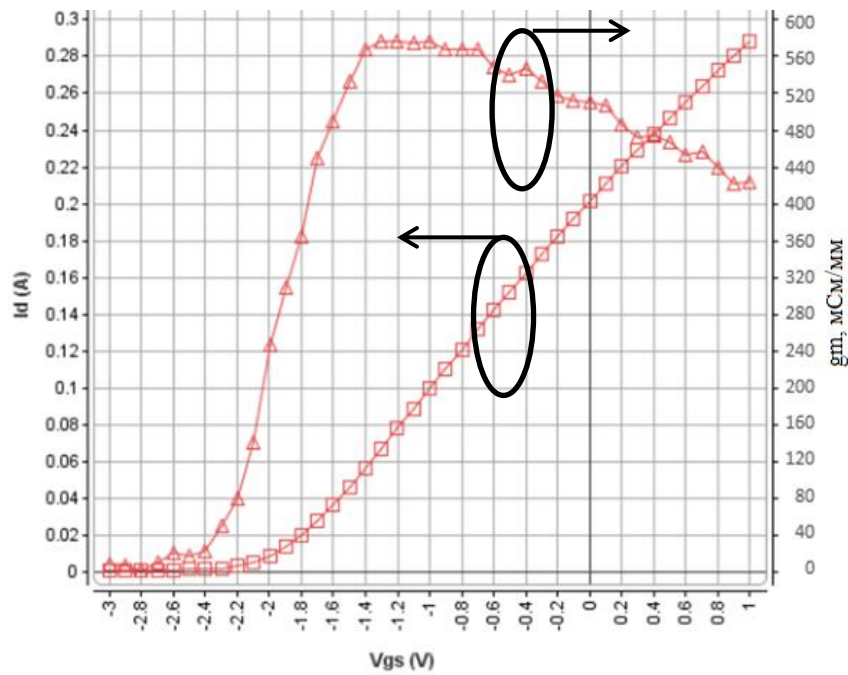


Рисунок 4.11 – Импульсные вольт-амперные характеристики InAlN/GaN НЕМТ, зависимость тока стока  $I_d$  и крутизны  $g_m$  от напряжения на затворе  $V_g$  (для напряжения на стоке  $V_{ds}=10V$ )

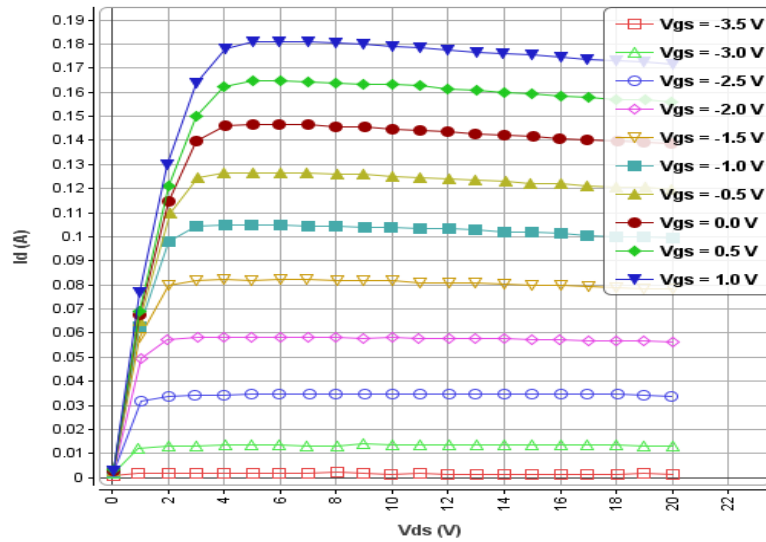


Рисунок 4.12 – Импульсные вольт-амперные характеристики AlGaIn/GaN НЕМТ, зависимость тока стока  $I_d$  от напряжения на стоке  $V_{ds}$

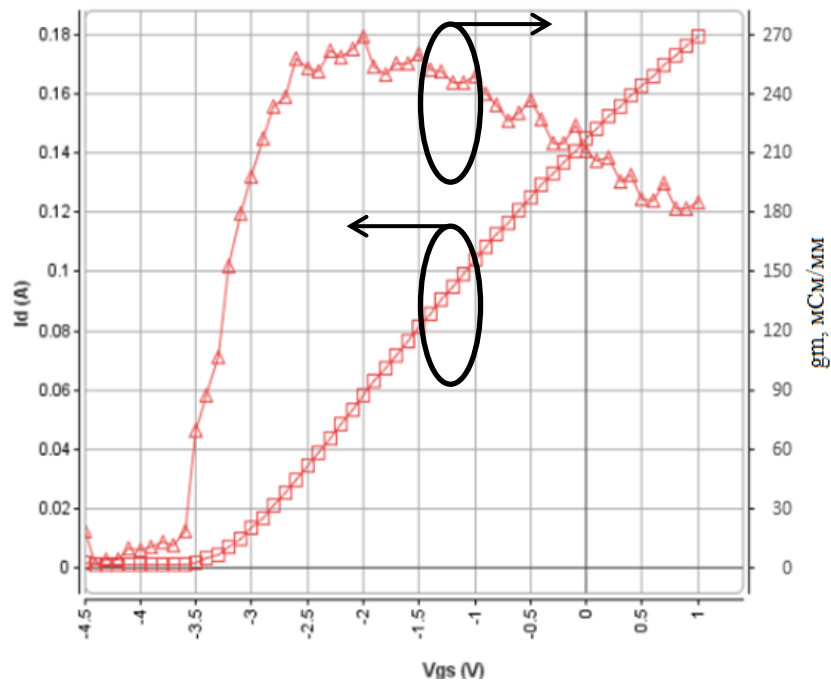


Рисунок 4.13 – Импульсные вольт-амперные характеристики AlGaIn/GaN НЕМТ, зависимость тока стока  $I_d$  и крутизны  $g_m$  (мСм/мм) от напряжения на затворе  $V_g$  (для напряжения на стоке  $V_{ds}=10$ В)

Благодаря низким контактным сопротивлениям в данных образцах транзисторов получены высокие значения максимального тока  $I_{dmax}$  в транзисторах и крутизны передаточной характеристики  $g_m$ . Так, крутизна



составила 250 мСм/мм для AlGaN/GaN и 525 мСм/мм для транзисторов при максимальном токе  $I_{dmax}$  0,9 А/мм для AlGaN/GaN и 1,45 А/мм для InAlN/GaN транзисторов. Эти значения позволяют получить высокие значения основных СВЧ параметров мощных транзисторов – коэффициента усиления и максимальной мощности [69-71].

На рисунке 4.14 приведены зависимости полученных из малосигнальных измерений S параметров полученных транзисторов коэффициентов усиления транзисторов от частоты: максимально достижимого и максимального стабильного коэффициентов усиления по мощности (MSG/MAG) и коэффициента усиления транзисторов по току h21.

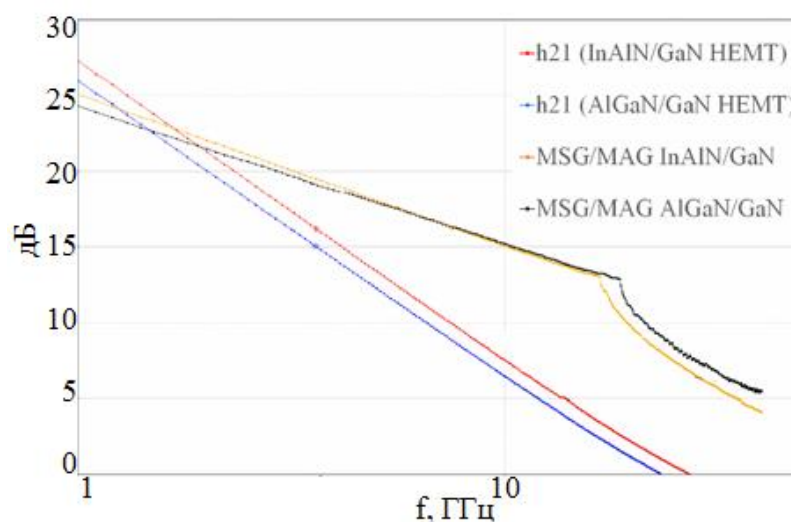


Рисунок 4.14 – Частотные зависимости коэффициентов усиления InAlN/GaN и AlGaN/GaN транзисторов: максимально достижимого и максимального стабильного (MAG/MSG, чёрная и жёлтая линии) коэффициента усиления по мощности и коэффициента усиления транзисторов по току h21 (синяя и красная линии)

Транзисторы, характеристики которых приведены на рисунке 4.14, имеют ширину и длину затвора 200 мкм и 0,3 мкм соответственно. Измерения проводились при  $V_{ds}=20В$  при постоянном токе 15 мА. Из приведенных зависимостей можно сделать вывод о применимости таких транзисторов для СВЧ

усилителей мощности на частотах до 20 ГГц. Для дальнейшего увеличения рабочей частоты транзисторов необходимо использовать меньшую длину затвора.

#### 4.4 Испытания омических контактов на воздействие повышенной температуры

НЕМТ с омическими контактами Ti/Al/Mo/Au были подвергнуты испытанию на воздействие повышенной температуры. В ходе испытаний образцы с контактами к AlGaN/GaN гетероструктуре после отжига помещались в печь с температурой 200° С и выдерживались в течение 500 ч. Каждые 100 ч. проводился контроль контактного сопротивления и визуальный контроль морфология поверхности контакта.

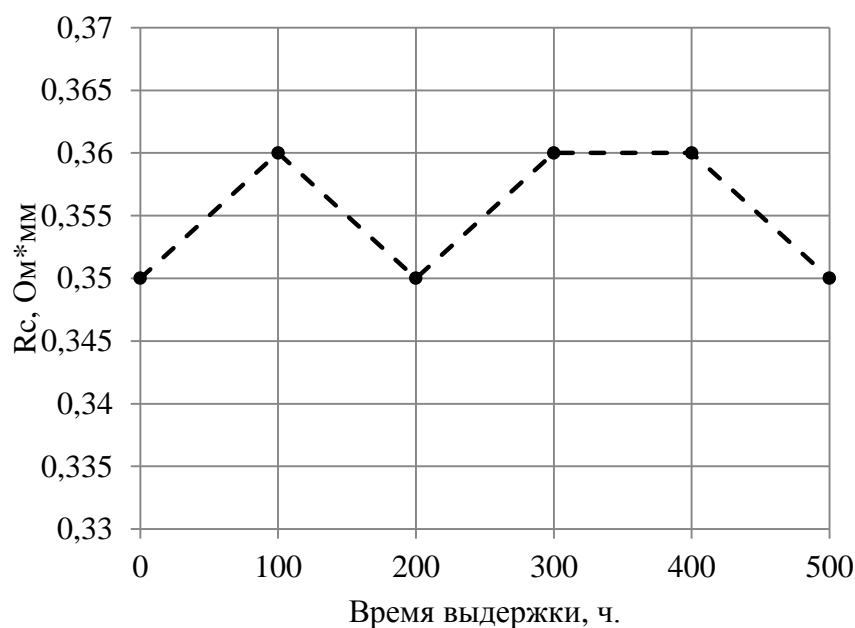


Рисунок 4.15 – Зависимость  $R_c$  сопротивления от времени выдержки при 200° С

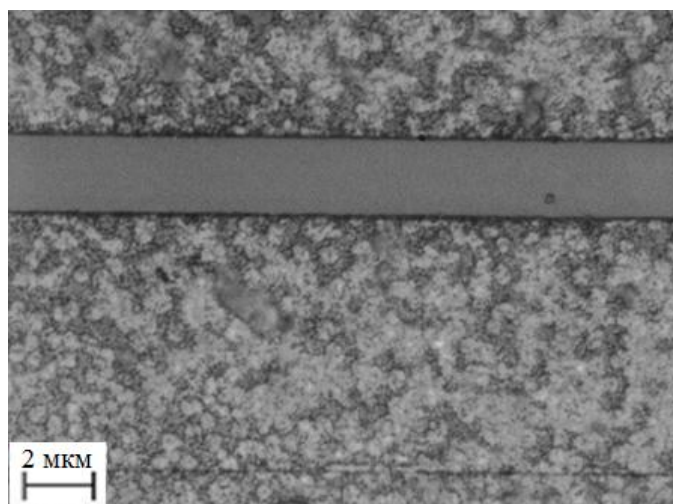


Рисунок 4.16 - Поверхность омического контакта после 500 часов выдержки при температуре 200° С

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что морфология поверхности контакта и значения  $R_c$  оставались неизменными, и все образцы успешно прошли испытание.

#### 4.5 Выводы

Использование атмосферы гелия при отжиге контактов Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм) к AlGaIn/GaN и AlGaIn/GaN гетероструктурам, выращенных на подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiC диаметром от 2 дюймов до 100 мм, позволяет получить разброс электрических параметров контактов по площади пластины в пределах 10÷15%, при шероховатости поверхности контактов к HEMT AlGaIn/GaN до 14 нм, и для InAlN/GaN – до 24 нм, что дает возможность сокращения расстояния исток-затвор и успешного формирования щели в диэлектрике для напыления металла затвора.

Сформированные таким образом HEMT транзисторы имеют значения тока насыщения до 1,1 А/мм для AlGaIn/GaN и до 2,4 А/мм для InAlN/GaN при крутизне характеристик транзисторов около 250 мСм/мм и 525 мСм/мм соответственно. Проведенные испытания подтвердили отсутствие деградации электрических параметров контактов при их выдержке при  $T=200$  °С в течение

500 часов. Полученные зависимости коэффициентов усиления для InAlN/GaN и AlGaN/GaN HEMT транзисторов позволяют сделать вывод о их применимости для СВЧ усилителей мощности на частотах до 20 ГГц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что для определения точного значения контактного сопротивления образцов с высоким слоевым сопротивлением при измерении необходимо совместное использование метода Ван дер Пау для определения слоевого сопротивления образца и метода Кельвина, что позволяет обойтись без формирования TLM структур.

2. Использование металлизации Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм) в качестве омического позволяет получить величину контактного сопротивления около 0,3 и 0,25 Ом·мм с шероховатостью поверхности контакта менее 14 нм и 24 нм для СВЧ НЕМТ транзисторов на базе гетероструктур AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> и InAlN/GaN соответственно, выращенных на подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiC, что даёт возможность сокращения расстояния исток-затвор в СВЧ НЕМТ транзисторе.

3. Показано, что деформация краев омического контакта и увеличение его геометрических размеров в ходе отжига могут быть уменьшены при увеличении скорости нагрева и остывания образца.

4. определены условия отжига в атмосфере гелия омических контактов на базе металлизации Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм) для гетероструктур AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> и InAlN/GaN, выращенных на подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiC большого диаметра, до 100 мм, позволяющие получать по всей площади пластины однородные значения контактного сопротивления со среднеквадратичным отклонением менее 10%;

5. г) изготовлены НЕМТ транзисторы AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> и InAlN/GaN с токами насыщения 1,1 А/мм и 2,4 А/мм при крутизне характеристик 250 мСм/мм и 565 мСм/мм соответственно пригодные к использованию для СВЧ усилителей мощности на частотах до 20 ГГц. Испытания показали отсутствие деградации электрических параметров транзисторов при их выдержке при T=200 °С в течение 500 часов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Bardolaza H.R. Temperature dependence of THz emission and junction electric field of GaAs–AlGaAs modulation-doped heterostructures with different i-AlGaAs spacer layer thicknesses / Bardolaza H.R., Vasquez J.D.E., Bacaoco M.Y., De los Reyes A.E., Lopez L.P. Jr., Somintac A.S., Salvador A.A., Estacio E.S., Sarmago R.V. // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2018. – V.29, №10. – P. 8760-8766.
2. Арендоренко А.А. Тенденции развития эпитаксиальной технологии нитридных соединений / Арендоренко А.А., Орешкин В.А., Свешников Ю.Н., Цыпленков И.Н. // *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. – 2015. – Т.18, №1. – С. 5-15.
3. Данилин В. Транзистор на GaN пока самый "крепкий орешек" / Данилин В., Жукова Т., Кузнецов Ю., Тараканов С., Уваров Н. // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. – 2005. – №4. – С. 20-29.
4. Mimura T. The Early History of the High Electron Mobility Transistor (HEMT) / Mimura T. // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2005. – V.50, №3. – P. 780-782.
5. Schwierz F. *Modern Microwave Transistors: Theory, Design, and Performance* / Schwierz F., Liou J.J. – New Jersey: Willey-Interscience, 2003. – 486 p.
6. Александров Р. Монолитные интегральные схемы СВЧ: Взгляд изнутри / Александров Р. // *Компоненты и технологии*. – 2005. – №9. – С. 174-182.
7. Selvanathan D. Comparative study of Ti/Al/Mo/Au, Mo/Al/Mo/Au, and V/Al/Mo/Au ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures / Selvanathan D., Mohammed F.M., Tesfayesus A., Adesida I. // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. – 2004. – V. 22, №5. – P. 2409-2417.
8. Chung J.W. Advanced gate technologies for state-of-the-art fT in AlGaN/GaN HEMTs / Chung J.W., Kim T, Palacios T. // *Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting*. – 2010. – P. 30.2.1-30.2.4.

9. Shinohara K. / 220 GHz  $f_T$  and 400 GHz  $f_{max}$  in 40-nm GaN DH-HEMTs with re-grown ohmic / Shinohara K., Corrion A., Regan D., Milosavljevic I., Brown D., Burnham S., Willadsen P.J., Butler C., Schmitz A., Wheeler D., Fung A., Micovic M. // Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting. – 2010. – P. 30.1.1-30.1.4.
10. Brudnyi V.N. Neutron irradiation-induced modification of electrical and structural properties of GaN epilayers grown on  $Al_2O_3$  (0001) substrate / Brudnyi V.N., Boiko V.M., Kolin N.G., Kosobutsky A.V., Korulin A.V., Brudnyi P.A., Ermakov V.S. Semiconductor Science and Technology. – 2018. – V.33, №9. – P. 095011.
11. Брудный В.Н. Физические свойства твердых растворов  $In_xAl_{1-x}N$  / Брудный В.Н., Вилисова М.Д., Великовский Л.Э. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – Т.61, №6. – С. 142-147.
12. Брудный В.Н. Нитрид галлия: уровень зарядовой нейтральности и границы раздела / Брудный В.Н. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т.58, №11. – С. 121-126.
13. Lee M.L. Schottky barrier heights of metal contacts to n-type gallium nitride with low-temperature-grown cap layer / Lee M.L., Sheu J.K., Lin S.W. // Applied Physics Letters – 2006. – V.88, №3. – P. 032103.
14. Brudnyi V.N. Electrophysical and Physical-Chemical Properties of Ohmic Contacts to III-N Compounds / Brudnyi V.N., Vilisova M.D., Velikovskii L.E., Sim P.E., Brudnyi P.A. // Russian Physics Journal. – 2018. – V.61, №8. – P. 1450-1456.
15. Brudnyi V.N. The charge neutrality level in  $w-Al_xGa_{1-x}N$  solid solutions / Brudnyi V.N., Grinyaev S.N., Kolin N.G. // Russian Physics Journal. – 2006. – V.49, №8. – P. 874-877.
16. Veliadis V. Fabrication of a robust high-performance floating guard ring edge termination for power Silicon Carbide Vertical Junction Field Effect Transistors / Veliadis V., McCoy M., McNutt T., Hearne H., Chen L., DeSalvo G., Clarke C., Geil B., Katsis D., Scozzie S. / GaN & SiC Power Devices // CS MANTECH Conference, – 2007. – P. 217-220.

17. Ефименков Ю.Р. Исследования по созданию мощного СВЧ транзистора с барьером Шоттки, на GaN, с затвором, сформированным с помощью электронной литографии / Ефименков Ю.Р., Ткаченко В.О., Данилин В.Н. // Материалы V Международной научно-технической школы-конференции «Молодые ученые». – 2008. – Ч.1. – С. 148-151.

18. Mishra U.K. // AlGaIn/GaN HEMTs: An overview of device operation and applications / Mishra U.K., Parikh P., Wu Y.F. // Proceedings of IEEE. – 2002. – V.90, №6. – P. 1022-1031.

19. Lu W. DC, RF, and Microwave Noise Performance of AlGaIn-GaN Field Effect Transistors Dependence of Aluminum Concentration / Lu W., Kumar V., Piner E.L., Adesid I. // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2003. – V.50, №4. – P. 1069-1074.

20. Tasker P. Importance of source and drain resistance to the maximum fT of millimeter-wave MODFETs / Tasker P., Hughes B. // IEEE Electron Device Letters. – 1989. – V.10, №7. – P. 291-293.

21. Chung J. AlGaIn/GaN HEMT with 300 GHz fmax / Chung J., Hoke W., Chumbes E., Palacios T. // IEEE Electron Device Letters. – 2010. – V.31, №3. – P. 195-197.

22. Papanicolaou N.A. Reliable Ti/Al and Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts to n-type GaN formed by vacuum annealing / Papanicolaou N.A., Rao M.V., Mittereder J., Anderson W.T. // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2001. – V. 19, №1. – P. 261–268.

23. Roccaforte F. Microstructure and current transport in Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts to n-type AlGaIn epilayers grown on Si(111) // Roccaforte F., Iucolano F., Alberti A., Giannazzo F., Puglisi V., Bongiorno C., Di Franco S., Raineri V. // Superlattices and Microstructures. – 2006. – V.40, №4-6. – P.373-379.

24. Xin H.P. Optimization of AlGaIn/GaN HEMT Ohmic Contacts for Improved Surface Morphology with Low Contact Resistance / Xin H.P., Poust S., Sutton W., Li D., Lam D., Smorchkova I., Sandhu R., Heying B., Uyeda J., Barsky M., Wojtowicz M., Lai R. // CS MANTECH Conference. – 2010. – P. 149-152.



25. Bright A.N. Correlation of contact resistance with microstructure for Au/Ni/Al/Ti/AlGaN/GaN ohmic contacts using transmission electron microscopy / Bright A.N., Thomas P.J., Weyland M., Tricker D.M., Humphreys C.J., Davies R. // *Journal of Applied Physics*. – 2001. – V. 89, №6. – P. 3143-3151.
26. Kim K.H. Investigation of Ta/Ti/Al/Ni/Au ohmic contact to AlGaN/GaN heterostructure field-effect transistor / Kim K.H., Jeon C.M., Oh S.H., Lee J., Park C.G., Lee J.H., Lee K.S., Koo Y.M. // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. – 2005. – V. 23, №1. – P. 322-327.
27. Mohammed F.M. Ohmic contact formation mechanism of Ta/Al/Mo/Au and Ti/Al/Mo/Au metallizations on AlGaN/GaN HEMTs / Mohammed F.M., Wang L., Selvanathan D., Hu H., Adesida I. // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. – 2005. – V. 23, №6. – P. 2330-2336.
28. Wei Y. Analysis of the ohmic contacts of Ti/Al/Ni/Au to AlGaN/GaN HEMTs by the multi-step annealing process / Wei Y., Renping Z., Yandong D., Weihua H., Fuhua Y. // *Journal of Semiconductors*. – 2012. – V. 33, №6. – P.064005.
29. Lin M. Low resistance ohmic contacts on wide band-gap GaN / Lin M., Ma Z., Huang F., Fan Z., Allen L., Morkoc H. // *Applied Physics Letters*. – 1994. – V.64, №8. – P.1003-1005.
30. Fan Z. Ohmic contacts and Schottky barriers to n-GaN / Fan Z., Mohammad S., Kim W., Aktas O., Botchkarev A., Suzue L., Morkoc H., Duxstad K., Haller E. // *Journal of Electronic Materials*. – 1996. – V.25, №11. – P.1703-1714.
31. Ruvimov S. Microstructure of Ti/Al and Ti/Al/Ni/Au Ohmic contacts for n-GaN / Ruvimov S., Liliental-Weber Z., Washburn J., Duxstad K., Haller E., Fan Z., Mohammad S., Kim W., Botchkarev A., Morkoc H. // *Applied Physics Letters*. – 1996. – V.69, №11. – P. 1556-1558.
32. Luther B. Investigation of the mechanism for Ohmic contact formation in Al and Ti/Al contacts to n-type GaN / Luther B., Mohny S., Jackson T., Asif Khan M., Chen Q., Yang J. // *Applied Physics Letters*. – 1997. – V.70, №1. – P.57-59.

33. Luther B. Analysis of a thin AlN interfacial layer in Ti/Al and Pd/Al ohmic contacts to n-type GaN / Luther B., Delucca J., Mohny S., Karlicek Jr R. // *Applied Physics Letters*. – 1997. – V.71, №26. – P.3859-3861.
34. Sheu J. Investigation of the mechanism for Ti/Al ohmic contact on etched n-GaN surfaces / Sheu J., Su Y., Chi G., Jou M., Liu C., Chang C., Hung W., Bow J., Yu Y. // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. – 2000. – V. 18, №2. – P.729-732.
35. Pearton S.J. GaN: Processing, defects, and devices / Pearton S.J., Zolper J.C., Shul R.J., Ren F. // *Journal of Applied Physics*. – 1999. – V. 86, №1. – P. 1-78.
36. Chabak K. Processing methods for low ohmic contacts resistance in AlN/GaN MOSHEMTs / Chabak K., Crespo A., Tomich D., Langley D., Miller V., Trejo M., Gillespie J.K., Via G.D., Dabiran A.M., Wowchak A.M., Cui B., Chow P.P. // *CS MANTECH Conference*. – 2009 – P. 6.1.
37. Mohammed F.M. Si-induced enhancement of ohmic performance of Ti/Al/Mo/Au metallization for AlGaIn-GaN HEMTs / Mohammed F.M., Wang L., Koo H.I., Adesida I. // *Electronics Letters*. – 2005. – V. 41, №17 – P. 984-985.
38. Wong M.H. Low nonalloyed ohmic contact resistance to nitride high electron mobility transistors using N-face growth / Wong M.H., Pei Y., Palacios T., Shen L., Chakraborty A., McCarthy L.S., Keller S., DenBaars S.P., Speck J.S., Mishra U.K. // *Applied Physics Letters*. – 2007. – V.91, №23 – P. 232103.
39. Schweitz K.O. V/Al/Pt/Au Ohmic contact to n-AlGaIn/GaN heterostructures / Schweitz K.O., Wang P.K., Mohny S.E. // *Applied Physics Letters*. – 2002. – V.80, №11. – P. 1954-1956.
40. Liu Z. AlGaIn/AlN/GaN High-Electron-Mobility Transistors Fabricated with Au-Free Technology / Liu Z., Sun M., Lee H.S., Heuken M., Palacios T. // *Applied Physics Express*. – 2013. – V.6, №9 – P. 096502.
41. Lee H.C. Thermally stable Ti/Al/W/Au Multilayer ohmic contacts / Lee H.C., Bae J.W., Yeom G.Y. // *Journal of the Korean Physical Society*. – 2007. – V.51, №3. – P.1046-1049.

42. Kurbanova N.E. Field-plate design optimization for high-power GaN high electron mobility transistors [Электронный ресурс] / Kurbanova N.E., Demchenko O.I., Velikovskiy L.E., Sim P.E. // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, Kazakhstan. – 2017 – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7998520>.

43. Сим П.Е. Влияние конструкции полевого электрода на распределение электрического поля в СВЧ GaN НЕМТ / П.Е. Сим, Н.Е. Курбанова, О.И. Демченко, Л.Э. Великовский // Материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», 29 ноября – 1 декабря 2017 г. в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр. – 2017. – С. 119-122.

44. Weiwei K. TCAD Simulation and Modeling of AlGaIn/GaN HFETs : Doctoral thesis / Weiwei Kuang. – Raleigh, USA, 2008. – 135 p.

45. Bahat-Treidel E. GaN-Based HEMTs for High Voltage Operation Design, Technology and Characterization : Doctoral thesis / Bahat-Treidel Eldad – Berlin, Germany, 2012. – 207 p.

46. Vitanov S. Physics-Based Modeling of GaN HEMTs / Vitanov S., Palankovski V., Maroldt S., Quay R., Murad S., Rodle T., Selberherr S. // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2012. – V.59, №3 – P. 685-693.

47. Ayyagari S.R. Modeling and electrical characterization of ohmic contacts on n-type GaN : Master thesis / Ayyagari Sai Rama Usha – Blacksburg, USA, 2018 – 124 p.

48. Faria F. Ultra-low resistance ohmic contacts to GaN with high Si doping concentration grown by molecular beam epitaxy / Faria F., Guo J., Zhao P., Li G., Kandaswamy P.K., Wistey M., Xing H., Jena D. // Applied Physics Letters. – 2012. – V.101, №3 – P. 032109.

49. Roozeboom F. Rapid thermal processing systems: A review with emphasis on temperature control / Roozeboom F., Parekh N. // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 1990. – V.8, №6 – P. 1249-1259.

50. Method for heat treatment of workpieces : US Patent / Mammel W.K.; Current Assignee : Nokia of America Corp., Original Assignee : Western Electric Co Inc. – US3627590A ; Priority date 02.12.1968 ; Publication date 14.12.1971.

51. Nguyenphu B. Wafer temperature measurement in a rapid thermal processor with modulated lamp power / Nguyenphu B., Fiory A.T. // Journal of Electronic Materials. – 1999. – V.53, №12. – P. 1376-1384.

52. Feng Q. The improvement of ohmic contact of Ti/Al/Ni/Au to AlGaIn/GaN HEMT by multi-step annealing method / Feng Q., Li L.M., Hao Y., Ni J.Y., Zhang J.C. // Solid-State Electronics. – 2009. – V.53, №9. – P. 955-958.

53. Бабичев А.П. Физические величины. Справочник / Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др.; Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

54. Савельев И.В. Курс общей физики, т.1. Механика. Молекулярная физика: Учебное пособие. / Савельев И.В. – 2-е изд., М.: Наука. 1982. – 413 с.

55. van Massakkers M.J.C.P. Characterization of ohmic contacts on n-InP and p-InGaAs based materials : Master thesis / van Massakkers M.J.C.P. – Eindhoven, the Netherlands, 2003. – 62 p.

56. Kenney C. Exploitation non-linear Arrhenius dependence of diode IV curves to determine Schottky barrier band diagrams : Doctoral thesis / Kenney Crystal – Stanford, USA, 2012 – 169 p.

57. Baca A.G. Fabrication of GaAs devices / Baca A.G., Ashby C.I.H. – London: The Institution of Electrical Engineers. 2005. – 350 p.

58. Loh W.M. Analysis and scaling of Kelvin resistors for extraction of specific contact resistivity / Loh W.M., Saraswat K., Dutton R.W. // IEEE Electron Device Letters. – 1985. – V.6, №3. – P. 105-108.

59. Schroder D.K. Semiconductor Material and Device Characterization / Schroder D.K. – 3d edition, New Jersey: John Wiley & Sons Inc. – 2006. – 790 p.

60. van der Pauw, L.J. A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape / van der Pauw, L.J. // Philips Research Reports. – 1958. – V. 13. – P. 1-9.

61. Микросхема для проведения TCV тестов при производстве InAlN/GaN НЕМТ : свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2018630123. / Великовский Л.Э. (РФ), Сим П.Е. (РФ), Демченко О. (РК), Курбанова Н. (РК). – №2018630110 ; поступл. : 22.06.2018 ; регистр. : 06.08.2018.

62. Микросхема для проведения РСМ тестов при производстве InAlN/GaN НЕМТ : свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2018630124. / Великовский Л.Э. (РФ), Сим П.Е. (РФ), Демченко О. (РК), Курбанова Н. (РК). – №2018630111 ; поступл. : 22.06.2018 ; регистр. : 06.08.2018.

63. Скубо В.В. Технология формирования омических контактов к гетероструктурам AlGaIn/GaN с локально-зарощенными сильнолегированными областями: дис. магистра техники и технологии : Магистерская диссертация / Скубо Валерия Васильевна – Томск, 2016. – 93 с.

64. Брудный В.Н. Электрофизические и физико-химические свойства омических контактов для соединений III-N / Брудный В.Н., Вилисова М.Д., Великовский Л.Э., Сим П.Е., Брудный П.А. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – Т.61, №8. – С. 73-78.

65. Sakharov A.V. Ultrathin barrier InAlN/GaN / Sakharov A.V., Lundin W.V., Zavarin E.E., Zakheim D.A., Usov S.O., Tsatsulnikov A.F., Yagovkina M.A., Sim P.E., Demchenko O.I., Kurbanova N.Y., Velikovskiy L.E. // Тезисы докладов конференции 26th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”, 18-22 June 2018. – Minsk, Belarus.

66. Brudnyi V.N. Electrophysical and physical-chemical properties of ohmic contacts to III-N compounds / Brudnyi V.N., Vilisova M.D., Velikovskii L.E., Sim P.E., Brudnyi P.A. // Russian Physics Journal. – 2018. – V.61, №8. – P. 1450-1456.

67. Великовский Л.Э. Оптимизация омических контактов к AlGaIn/GaN-транзисторам с высокой подвижностью электронов / Великовский Л.Э., Сим П.Е. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2014 – Т.33, №3 – С. 66-69.

68. Сим П.Е. Быстрый термический отжиг омических контактов к AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> НЕМТ на подложках SiC / Сим П.Е., Скубо В.В., Великовский Л.Э., Поливанова Ю.Н. // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2016», 25-25 мая 2016 г. в 6 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр. – 2016. – С. 150-152.

69. Скубо В.В. Исследование свойств несплавных омических контактов к гетероструктуре AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> / Скубо В.В., Сим П.Е., Великовский Л.Э., Поливанова Ю.Н., Цацульников А.Ф. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2015 – Т.38, №4 – С. 76-78.

70. Великовский Л.Э. Разработка мощных Ga<sub>N</sub> транзисторов L-S-C диапазона / Великовский Л.Э., Сим П.Е., Поливанова Ю.Н., Шишкин Д.А., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Цацульников А.Ф. // Тезисы докладов 10-й всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», 23-25 марта 2015 г. – Санкт-Петербург: СПбПУ. – 2015 – С. 131-132.

71. Великовский Л.Э. Разработка мощных Ga<sub>N</sub> транзисторов L, S и X диапазона / Великовский Л.Э., Сим П.Е., Демченко О.И., Курбанова Н.Е., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Цацульников А.Ф. // Тезисы докладов 11-й всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», 1-3 февраля 2017 г. – Москва. – 2017 – С. 114-115.

## Приложения: свидетельства о государственной регистрации топологии ИМС

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации  
топологии интегральной микросхемы  
**№ 2018630123**

**Микросхема для проведения TCV тестов при производстве  
InAlN/GaN HEMT**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский государственный  
университет» (RU)*

Авторы: *Великовский Леонид Эдуардович (RU), Сим Павел  
Евгеньевич (RU), Демченко Ольга (KZ), Курбанова Наталья (KZ)*

Заявка № **2018630110**  
Дата поступления **22 июня 2018 г.**  
Дата государственной регистрации в Реестре топологий  
интегральных микросхем **06 августа 2018 г.**  
Дата окончания срока действия исключительного права  
**06 августа 2028 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*  
 **Г.П. Ильин**





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации  
топологии интегральной микросхемы

№ 2018630124

Микросхема для проведения РСМ тестов при производстве  
InAlN/GaN HEMT

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский государственный  
университет» (RU)*

Авторы: *Великовский Леонид Эдуардович (RU), Сим Павел  
Евгеньевич (RU), Демченко Ольга (KZ), Курбанова Наталья (KZ)*

Заявка № 2018630111

Дата поступления 22 июня 2018 г.

Дата государственной регистрации в Реестре топологий  
интегральных микросхем 06 августа 2018 г.Дата окончания срока действия исключительного права  
06 августа 2028 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев