

УДК 621.382

На правах рукописи



Сим Павел Евгеньевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ  
HEMT ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ GaN

Специальность 01.04.04 – «Физическая электроника»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена: в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР), Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» и акционерном обществе «Научно-производственная фирма «Микран» (г. Томск)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Троян Павел Ефимович

Научный консультант:

доктор физ.-мат. наук, профессор Брудный Валентин Натанович

Официальные оппоненты:

Журавлев Константин Сергеевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск), заведующий лабораторией молекулярно-лучевой эпитаксии соединений  $A^3B^5$

Ремнев Геннадий Ефимович, доктор технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования национальный исследовательский Томский политехнический университет (г. Томск), заведующий лабораторией электро-разрядных и пучково-плазменных технологий.

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов», г. Томск

Защита состоится «28» февраля 2019 г. в 15 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.268.04, созданного на базе ФГБОУ ВО ТУСУР по адресу 634050, г. Томск, пр. Ленина 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО ТУСУР, а также на сайте : <https://postgraduate.tusur.ru/urls/2y8bru0x>

Автореферат разослан «    » января 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

доктор технических наук, профессор



Ю.П. Акулиничев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 (ВАХ) 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 типов металлизации, 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, а Au служит защитным слоем от образования окислов на поверхности контакта. 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 размыванию 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 Мо, имеющий высокую температуру плавления (2623 °С) и низкие коэффициенты диффузии для других металлов. Важно также отметить, что Мо 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 полупроводника перед металлизацией, а также режимы отжига контакта (температура, время и атмосфера отжига). При этом, несмотря на значительный объем исследований в этой области, получение воспроизводимых низкоомных омических контактов с малой шероховатостью поверхности контакта и высокой термостабильностью для НЕМТ 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 НЕМТ 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 [A2., A.3] к НЕМТ 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 НЕМТ AlGaN/GaN и InAlN/GaN гетероструктур, отработка режимов быстрого термического отжига контактов, разработка оснастки и конструкции реактора для отжига тестовых НЕМТ 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 MOCVD 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, удастся 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 НЕМТ 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 НЕМТ для транзисторов на основе гетероструктур AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 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 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 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 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>, 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, четырех глав и основных результатов и выводов. Работа содержит 112 страниц машинописного текста, включая 74 рисунка, 10 формул, 17 таблиц и списка литературы из 71 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цели и задачи работы, обоснована актуальность исследований, их новизна, практическая значимость и защищаемые положения.

Первая глава (литературный обзор) посвящена свойствам полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ), изготовленных на базе кубических кристаллов, GaAs, InAs и др., недостатком которых являются малая удельная выходная мощность при высоких предельных частотах. Рассмотрены фундаментальные свойства вюрцитных полупроводниковых соединений группы III-N и особенности параметров СВЧ НЕМТ транзисторов на базе этих полупроводников [6]. Отмечена более высокая, чем для кубических кристаллов, выходная удельная мощность таких транзисторов, их высокие рабочие температуры и толерантность к внешним воздействиям. Представлена типичная гетероструктура НЕМТ транзистора на базе нитридных полупроводников. Рассмотрены требования к материалам подложек на основе Si, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiC, используемых при производстве СВЧ НЕМТ на базе гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN, а также свойства твердых растворов AlGaN и InAlN используемых в качестве широкозонных полупроводников на интерфейсе с GaN [7]. Рассмотрены особенности формирования омических и выпрямляющих (барьер Шоттки) контактов к нитридным полупроводникам [8], требования к омическим контактам, а также альтернативные методы формирования омических контактов [А.1].

**Во второй главе** рассматриваются численное моделирование параметров омических контактов к HEMT транзисторам на базе гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN в программе Silvaco TCAD [А.2, А.3], формирование рабочих и тестовых структур для технологических исследований [А.4], представлены маршруты технологических операций при изготовлении HEMT AlGaN/GaN и InAlN/GaN гетероструктур, режимы быстрого термического отжига контактов, оснастка и конструкция реактора для отжига тестовых структур, выбор газовой среды для проведения процесса отжига, особенности измерения контактного сопротивления структур с высоким слоевым сопротивлением [А.5, А.6]. Представлен дизайн гетероструктур AlGaN/GaN (а) и InAlN/GaN (б), выращенные на подложках 4H-SiC (Рисунок 1).

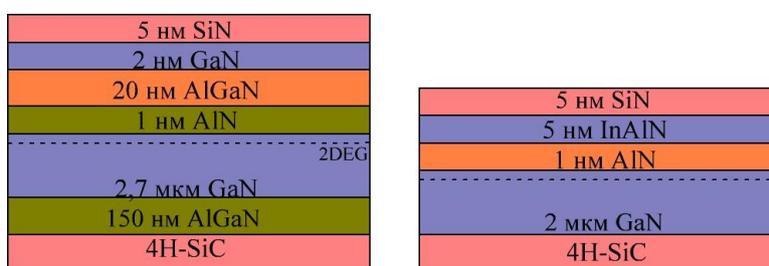


Рисунок 1 – Гетероструктуры AlGaN/GaN (а) и InAlN/GaN (б)

В обеих конструкциях в ходе эпитаксиального роста на поверхности структуры сформирован *in-situ* тонкий (5 нм) слой Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Представлены технологические операции формирования тестовых гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN, выбор режимов быстрого термического отжига, выбор газовой среды, рассмотрены конструкции гетероструктур, метод расчета контактного сопротивления.

В результате выполненных исследований определена конструкция тестовых структур для исследования параметров контактов, разработан реактор для отжига рабочих пластин, обоснован режим быстрого термического отжига омических контактов

**Третья глава** посвящена исследованию влиянию химической и плазмохимической обработки поверхности полупроводника перед металлизацией на величину контактного сопротивления, выбору типа металлизации для изготовления омических контактов для гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN [А.7-А.9], исследованию особенностей металлизаций Ti/Al/Ni/Au, Ta/Ti/Al/Ni/Au и Ti/Al/Ta/Au, Ti/Al/Mo/W/Au, Si/Ti/Al/Mo/Au,

выбору основной металлизации Ti/Al/Mo/Au и обоснованию режимов ее отжига, а также последующему использованию этой металлизации при формировании омических контактов для СВЧ НЕМТ на базе гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN, выращенных на подложках 4H-SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si, исследование профилей элементного состава металлизации Ti/Al/Mo/Au методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии до и после отжига контактов [А.10].

На рисунке 2 представлены элементные профили металлизации Ti/Al/Mo/Au до и после термического отжига, которые показывают значительное перемешивание металлов такого контакта после отжига.

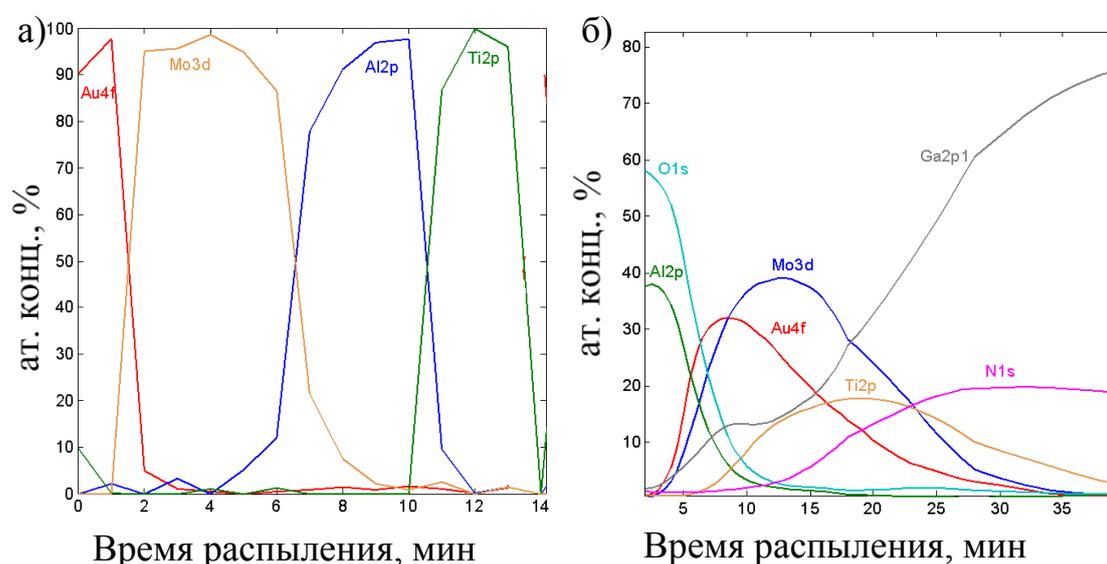


Рисунок 2 – Элементный профиль по глубине омических контактов Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм) до (а) и после (б) отжига при 840°C ( $t_{\text{отж}} = 30$  с)

Показано, что использование металлизации Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм), отожженной в атмосфере гелия при  $T=780\div 790^\circ\text{C}$  и временах отжига  $t_{\text{отж}}=20$  с (для AlGaN/GaN) и  $T=750\div 765^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{отж}}=13\div 15$  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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При этом снижение температуры и времени отжига при формировании контакта в InAlN/GaN позволяет избежать деградации электрофизических параметров двумерного электронного газа в гетероструктуре InAlN/GaN.

Методами просвечивающей электронной микроскопии и просвечивающей растровой электронной микроскопии выполнен анализ

структуры и элементного состава в приконтактных областях, который выявил существенную взаимную диффузию металлов контакта.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований по изготовлению омических контактов на базе металлизации Ti/Al/Mo/Au на пластинах большого диаметра, до 100 мм. Показано, что изгиб таких пластин при нагреве приводит к неоднородности величины получаемого контактного сопротивления по площади пластины и плохой воспроизводимости результатов, сильно зависящих от характера изгиба конкретной пластины. Для решения этих проблем было проведено изменение оснастки реактора для отжига пластин и замена азотной атмосферы реактора на гелиевую с более высокой теплопроводностью, что обеспечило более однородный нагрев пластин [А.10]. Результаты выбора оптимальных температур отжига для атмосферы отжига N<sub>2</sub> и He представлены на рисунке 3.

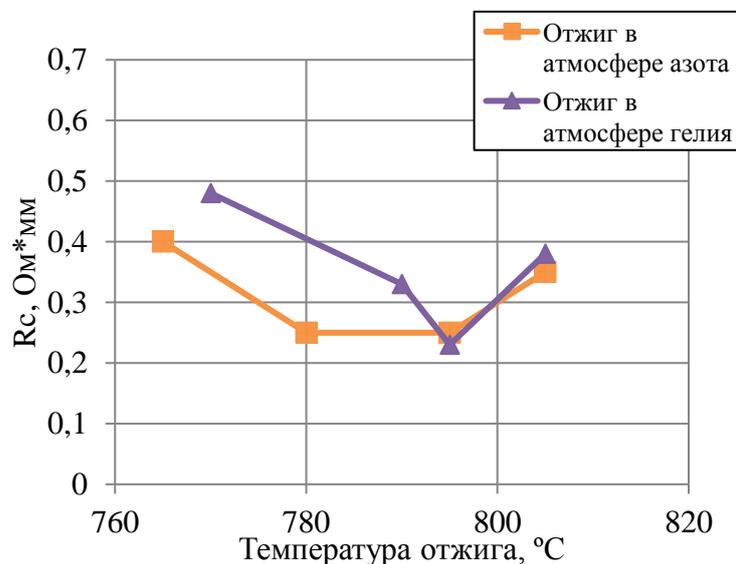


Рисунок 3 – Зависимость контактного сопротивления к гетероструктурам AlGaIn/GaN/4H - SiC 100мм от режимов отжига

Подбор режимов отжига позволил получить низкоомные контакты с достаточно однородным распределением контактного сопротивления по площади пластины диаметром до 100 мм.

На рисунке 4 представлены результаты экспериментальных измерений сопротивления омических контактов на базе металлизации Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм) для гетероструктур AlGaIn/GaN/4H-SiC и InAlN/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Средние значения величины контактных сопротивлений таких гетероструктур составили около 0,3 Ом·мм для AlGaIn/GaN/4H-SiC и 0,25 Ом·мм для InAlN/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

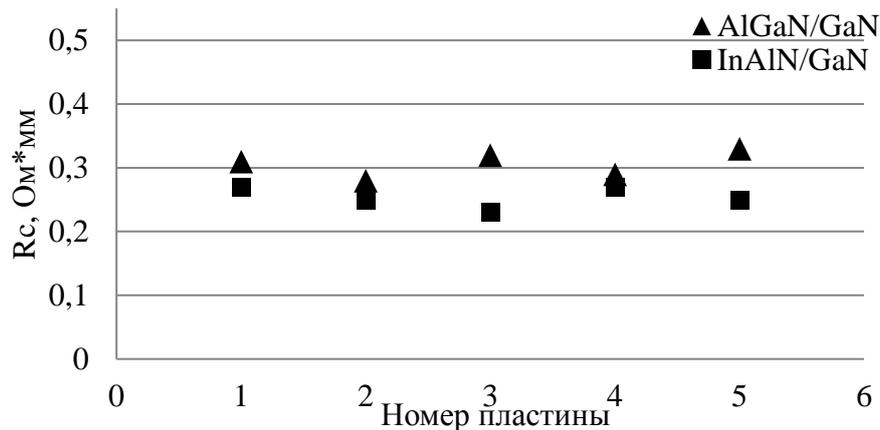


Рисунок 4 – Контактное сопротивление последовательно изготовленных пластин

На рисунке 5 приведена морфология поверхности омических контактов на базе металлизации Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм) к гетероструктурам AlGaIn/GaN (7, а) и InAlN/GaN (7, б) после отжига. Использование атмосферы He вместо N<sub>2</sub> при отжиге контактов позволило уменьшить разброс электрических параметров контактов по площади пластины в пределах до 10%, при шероховатости поверхности контактов до 14 нм и 24 нм для гетероструктур AlGaIn/GaN и InAlN/GaN соответственно. При этом наблюдаемая шероховатость поверхности контактов определяется особенностью морфологии поверхности самих твердых растворов AlGaIn и InAlN.

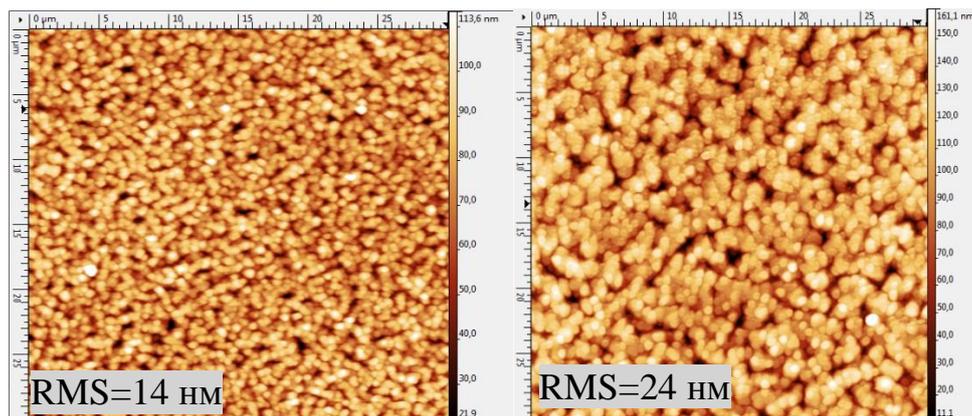


Рисунок 5 – Поверхность омических контактов на основе металлизации Ti/Al/Mo/Au(20/50/40/25 нм) к AlGaIn/GaN (а) и InAlN/GaN (б)

Омические контакты на базе металлизации Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм) были использованы при изготовлении тестовых СВЧ НЕМТ (рисунок б) с

длиной затвора 0,5 мкм и шириной затвора 200 мкм на базе гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN (рисунок 7) [А.11, А.12].

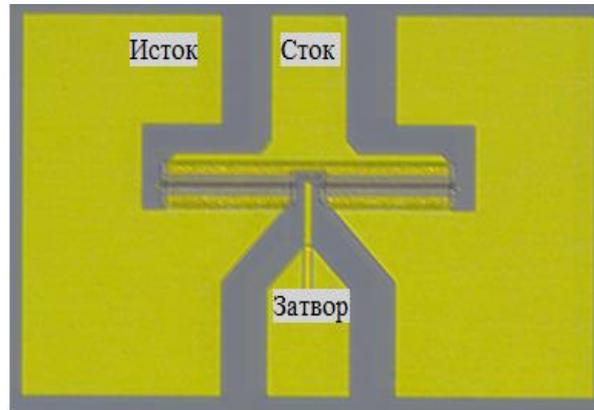


Рисунок 6 – НЕМТ на AlGaN/GaN с шириной затвора 200 мкм

На рисунке 7 представлены импульсные вольт-амперные характеристики СВЧ НЕМТ транзисторов на базе гетероструктур InAlN/GaN (а) и AlGaN/GaN (б) соответственно.

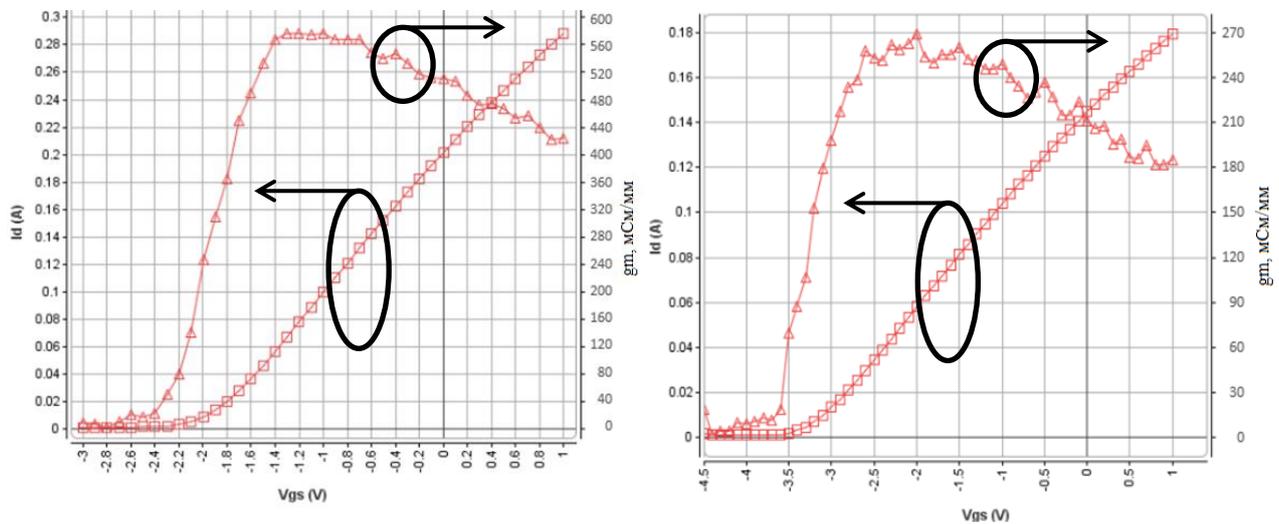


Рисунок 7 – Импульсные вольт-амперные характеристики InAlN/GaN (а) и AlGaN/GaN (б) НЕМТ, зависимость тока стока  $I_d$  и крутизны  $g_m$  от напряжения на затворе  $V_g$  (для напряжения на стоке  $V_{ds}=10V$ )

Использование таких контактов позволило получить величину крутизны передаточной характеристики  $g_m = 250$  мСм/мм при максимальном токе  $I_{dmax} = 0,9$  А/мм для СВЧ НЕМТ на базе AlGaN/GaN и  $565$  мСм/мм при  $I_{dmax} = 1,45$  А/мм для СВЧ НЕМТ InAlN/GaN.

На рисунке 8 приведены зависимости полученные 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  $h_{21}$ .

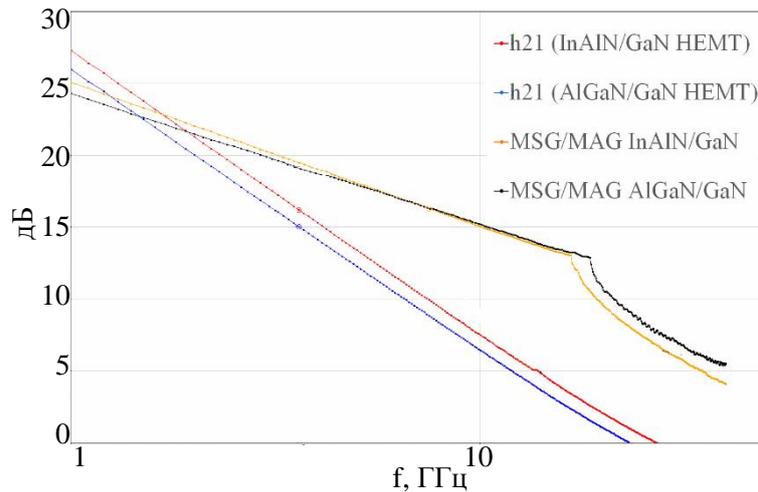


Рисунок 8 – Частотные зависимости коэффициентов усиления HEMT InAlN/GaN и AlGaIn/GaN: максимально достижимого и максимального стабильного (MAG/MSG) коэффициента усиления по мощности и коэффициента усиления по току  $h_{21}$

Проведенные температурные испытания контактов ( $T_{отж}=200\text{ °C}$ , 500 час.) показали их высокую термостойкость при сохранении морфологии поверхности контакта (рисунок 9).

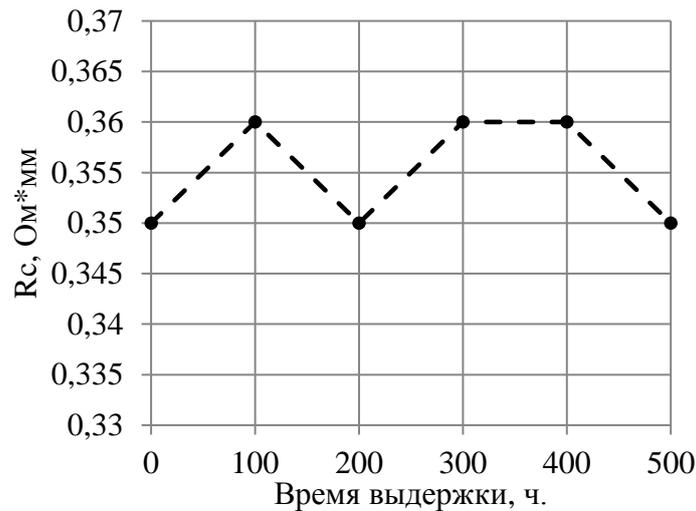


Рисунок 9 – Зависимость  $R_c$  сопротивления контакта от времени выдержки ( $T=200^\circ\text{C}$ ).

### Основные результаты и выводы:

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 контакта 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 AlGaIn/GaN и InAlN/GaN соответственно, выращенных на подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 4H-SiC, что дает возможность сокращения расстояния исток-затвор в СВЧ НЕМТ транзисторе и повышения его предельных частот.
3. определены условия быстрого термического отжига в атмосфере гелия омических контактов на базе металлизации Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм) для гетероструктур AlGaIn/GaN и InAlN/GaN, выращенных на подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 4H-SiC большого диаметра, до 100 мм, позволяющие получать по всей площади пластины однородные значения контактного сопротивления со среднеквадратичным отклонением менее 10%;
4. изготовлены НЕМТ транзисторы на базе гетероструктур AlGaIn/GaN и InAlN/GaN с токами насыщения 1,1 А/мм и 2,4 А/мм при крутизне ВАХ

около 250 мСм/мм и 525 мСм/мм соответственно, пригодные для производства СВЧ усилителей мощности на частотах до 20 ГГц. Испытания показали отсутствие деградации электрических параметров таких транзисторов при их выдержке в течение 500 часов при  $T=200$  °С.

### **Список публикаций по результатам работы:**

А1. Сим П.Е. Быстрый термический отжиг омических контактов к AlGaIn/GaN 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.

А2. 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>.

А3. 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.

А4. 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.

А5. 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.

А6. 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.

A7. 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.

A8. 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.

Переводная версия: 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.

A9. Скубо В.В. Исследование свойств несплавных омических контактов к гетероструктуре AlGaIn/GaN / 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.

A10. Великовский Л.Э. Разработка мощных GaN 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.

A11. Великовский Л.Э. Разработка мощных GaN 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.

### **Список цитируемой литературы:**

1. 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.

2. 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.

3. Mohammed F.M. Ohmic contact formation mechanism of Ta/Al/Mo/Au and Ti/Al/Mo/Au metallizations on AlGaIn/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.

4. Selvanathan D. Comparative study of Ti/Al/Mo/Au, Mo/Al/Mo/Au, and V/Al/Mo/Au ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures / Selvanathan D., Mohammed F.M., Tesfayesus A., Adesida I. // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2004. – V. 22, №5. – P. 2409-2417.

5. 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.

6. 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.

7. Брудный В.Н. Физические свойства твердых растворов  $In_xAl_{1-x}N$  / Брудный В.Н., Вилюсова М.Д., Великовский Л.Э. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – Т.61, №6. – С. 142-147.

8. 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.