

На правах рукописи

Шостаченко Станислав Алексеевич

**ФОРМИРОВАНИЕ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К
ГЕТЕРОСТРУКТУРАМ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ**

Специальность: 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»

**Научный
руководитель:**

Каргин Николай Иванович
доктор технических наук, профессор
Проректор НИЯУ «МИФИ», г. Москва

**Официальные
оппоненты:**

Зубков Василий Иванович
доктор физико-математических наук, профессор
Кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ
«ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург

Цацульников Андрей Федорович
доктор физико-математических наук,
Заместитель директора по научной работе НТЦ
микроэлектроники РАН, г. Санкт-Петербург

Поляков Александр Яковлевич
кандидат технических наук
руководитель лаборатории широкозонных
материалов и приборов (НИТУ «МИСиС»),
г. Москва

Защита состоится «22» апреля 2021 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.05.03 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.



Веселов Д.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Полупроводниковые гетероструктуры на основе нитрида галлия с большой запрещенной зоной обладают уникальными физическими свойствами, позволяющими создавать на их основе твердотельные приборы силовой и СВЧ-электроники, не подверженные воздействию высокой температуры и радиации. Благодаря этим качествам приборы на его основе находят применение в самых различных областях промышленности: источниках питания, СВЧ электронных приборах, мощных силовых приводах, радиолокационных станциях, системах спутниковой связи, контроллеры энергетических систем и многое другое.

К примеру, транзисторы на основе гетероструктур AlGa_N/Ga_N применяются в качестве основной составляющей СВЧ монолитных интегральных схем (СВЧ МИС) миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов для систем связи, радиолокации, радиоастрономии, радиометрии, и т.д [1]. Также, эти материалы получили применение в оптоэлектронной промышленности в качестве базы для светодиодных кристаллов.

Тем не менее, в технологии изготовления мощных полевых транзисторов и светодиодов на основе гетероструктуры AlGa_N/Ga_N и InGa_N/Ga_N имеется ряд существенных проблем. В частности, это формирование к полупроводниковой структуре качественных омических контактов с низким удельным сопротивлением, невыпрямляющими свойствами и гладкой морфологией поверхности. Реализация технологических процессов получения таких контактов не имеет явного описания и требует адаптации на каждом отдельно взятом производстве.

Целью диссертационной работы является исследование процесса формирования омического контакта к гетероструктуре на основе AlGa_N/Ga_N для использования в СВЧ транзисторах.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- определение оптимального диапазона температуры отжига с помощью расчетов свободной энергии Гиббса;
- исследование влияния температуры отжига на процесс образования металлических соединений;
- исследование влияния технологических процессов изготовления омического контакта на величину удельного переходного сопротивления;
- исследование влияние подслоя кремния в многослойной структуре омического контакта на удельное переходное сопротивление омических контактов к AlGa_N/Ga_N.
- разработка конструкционных и технологических принципов изготовления СВЧ транзистора на основе гетероструктуры AlGa_N/Ga_N.

Объекты исследований

Объектами исследований диссертационной работы являлись образцы омических контактов на основе пленок Ti, Al, Ni, Au гетероструктурам AlGaN/GaN, легированные кремнием в процессе роста, также сформированные транзисторные структуры и макеты усилителей на их основе.

Научная новизна работы

1. Установлена близкая к оптимальной температура формирования омического контакта к нитриду галлия на основе пленки титана, основанная на анализе фазообразования многокомпонентных соединений путем расчета свободной энергии Гиббса.

2. Определены интерметаллические соединения на основе пленки титана с достаточно низкой работой выхода, образующиеся в результате термической обработки многокомпонентной металлической пленки контакта при оптимальной температуре, приводящие к существенному снижению переходного сопротивления омического контакта.

3. Установлено, что введение подслоя кремния увеличивает концентрацию носителей и, соответственно, уменьшает величину удельного переходного сопротивления омических контактов к гетероструктуре AlGaN/GaN.

Практическая ценность работы

1. Предложен технологический процесс изготовления низкоомного омического контакта к гетероструктуре AlGaN/GaN с низким сопротивлением (менее 0,07 Ом·мм).

2. Предложены режимы термической обработки многослойной контактной системы Ti/Al/Ni/Au для формирования низкоомного невыпрямляющего контакта стока и истока транзистора на гетероструктуре AlGaN/GaN. При температуре 850°C в течении 30 секунд образуется контакт с удельным сопротивлением менее 0,5 Ом·мм.

3. На основе термодинамических расчетов для возможных интерметаллических реакций в приконтактной области выявлено, что наиболее благоприятный диапазон температур для формирования хороших омических контактов 800 – 880 °С. В данном диапазоне вероятность образования соединения TiN выше, чем при более высоких температурах.

4. Предложен технологический процесс формирования транзистора на основе AlGaN, включающий процесс формирования низкоомного омического контакта на основе Ti/Al/Ni/Au с подслоем кремния

Положения, выносимые на защиту

- С помощью расчетов свободной энергии Гиббса определен наиболее оптимальный температурный диапазон формирования фазы нитрида титана в системе Ti-Al-N, составляющий 850-880 С.

- Высота потенциального барьера контакта на основе пленки Ti/Al к GaN имеет минимум, соответствующий оптимальному диапазону температуры термической обработки формирования фазы нитрида титана.

- Экспериментально установлено и на основании анализа высоты потенциального барьера в зависимости от температуры отжига подтверждено, что фаза нитрида титана предпочтительна для формирования низкоомного омического контакта к нитриду галлия.

- Введение слоя кремния в адгезионный слой контактной металлической системы Ti/Al/Ni/Au в качестве легирующей примеси позволяет снизить удельное сопротивление омического контакта.

Реализация результатов работы

Работа соискателя выполнена на кафедре Физики Конденсированных Сред (№67) Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» с использованием оборудования центра коллективного пользования «Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» в рамках программ:

Грантовая программа Фонда поддержки образования и науки имени члена-корреспондента РАН Мокерова В.Г. «Стипендиат Фонда В.Г. Мокерова»

НИОКТР «Разработка конструкции и промышленной технологии изготовления твердотельных компонентов на широкозонном материале GaN» (Договор № 138/2010У от «10» августа 2010 г.);

ОКР Разработка технологии и организация опытного производства гетероэпитаксиальных структур нитрида галлия на кремниевых подложках для изделий силовой микроэлектроники (Государственный контракт от «05» июня 2012 г. № 16.523.12.3010);

ОКР «Разработка опытно-промышленной технологии мощных светодиодных сборок «чип на плате», излучающих в УФ диапазоне, на основе высокоэффективных наногетероструктур нитридных полупроводниковых материалов» (Государственный контракт от «05» мая 2012 г. № 12.527.12.5002);

НИР «Разработка технологий получения эпитаксиальных широкозонных гетероструктур для нового поколения СВЧ- и силовых приборов» (Соглашение № 14.578.21.0062 о предоставлении субсидии от «20» октября 2014 г.).

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

1. 7 я научнопрактическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники Мокеровские чтения, Россия
РАЗРАБОТКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ ТОНКИХ

РЕЗИСТИВНЫХ ПЛЕНОК Р.В. Захарченко, С.А. Шостаченко, Р.В. Рыжук, Н.И. Каргин

2. ICMNE-2016, Россия, S. Shostachenko, R. Zakharchenko, R. Ryzhuk, N. Kargin, Low resistance Ti/Si/Ti/Al/Ni/Au ohmic contact for AlGa_N/Ga_N HEMT

3. 6 я научнопрактическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники Мокеровские чтения, Россия
ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА С КАНАЛОМ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА

4. 6 я научнопрактическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники Мокеровские чтения, Россия
ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

5. 7 я научнопрактическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники Мокеровские чтения, Россия, С.А. Шостаченко, А.В. Устюгова, Р.В. Захарченко, Г.И. Зебрев, Н.И. Каргин,
ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА С КАНАЛОМ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА

6. ICMNE-2016, Россия, S. Shostachenko, R. Zakharchenko, G. Zebrev, V. Razumny, N. Kargin, Graphene Field Effect Structure Manufacturing and Characterization

7. Всероссийская конференция Графен: молекула и 2D-кристалл Миннебаев С.В., Захарченко Р.В., Сиглова Н.В., Шостаченко С.А., Маслов М.М., Катин К.П., Зебрев Г.И., Земцов К.С., Каргин Н.И. «ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА С КАНАЛОМ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА»

8. IV Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» Шостаченко С.А., Захарченко Р.В., Миннебаев С.В., Рыжук Р.В. «Влияние температурной обработки на параметры невыпрямляющего контакта к гетероструктуре Ga_N/AlGa_N»

9. 8я научнопрактическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники Мокеровские чтения, Россия, А.В. Аврамчук, С.А. Шостаченко, В.Ю. Фоминский, Р.И. Романов, А.О. Султанов, А.С. Гусев, В.А. Лабунов, И.В. Комиссаров, Н.И. Каргин, ЛОКАЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ОТЖИГ ПЛЕНКИ 3С-SiC, ОСАЖДЕННОЙ МЕТОДОМ ХПО НА КРЕМНИЕВУЮ ПОДЛОЖКУ

10. XVII Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Шостаченко С.А, Захарченко Р.В., Миннебаев С.В, Маслов М.М., Катин К.П., Каргин Н.И

Результаты работы отмечены Премией Правительства Москвы Молодым Ученым 2017.

Личный вклад автора

Автором проведены расчеты свободной энергии Гиббса для соединений Ti-Al-N; проведены эксперименты по термической обработке омических

контактов к AlGaN/GaN методом быстрого термического отжига; проведены измерения параметров омических контактов к AlGaN/GaN, такие как удельное сопротивление, длина переноса, концентрация легирующей примеси; предложено введение подслоя кремния в многослойной структуре омического контакта и показано его положительное влияние на уменьшение удельного переходного сопротивления омических контактов к AlGaN/GaN.

Ценная консультативная помощь оказана Р.В. Рыжуком и А.В. Слепенковым, помощь в проведении экспериментов оказана М.М. Греховым и А.Л. Кузнецовым, которым автор благодарен за сотрудничество.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе, 2 статьи опубликованы в журналах, входящих Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, 6 статей опубликовано в зарубежных изданиях, входящих в базу Scopus.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа изложена на 109 страницах машинописного текста, содержит 53 рисунка, 14 таблиц и состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы и приложения. В приложении представлены документы о внедрении и использовании результатов диссертационной работы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель и задачи диссертации. Сформулирована научная новизна, основные научные положения, выносимые на защиту и практическая ценность полученных в работе результатов.

В первой главе проведен обзор литературных источников по особенностям формирования омических контактов к транзисторным приборам на основе нитрида галлия методом быстрого термического отжига. Приведены основные достижения и перспективы развития нитридгаллиевой электроники. Показано, что одним из перспективных методов формирования омических контактов к нитридгаллиевым приборам для силовой и СВЧ электроники является метод быстрого термического отжига, позволяющий получать контакты с предельно низким сопротивлением.

Отмечается, что, несмотря на большое количество работ, посвященных омическим контактам к нитриду галлия, в литературных источниках практически отсутствуют данные о процессах, происходящих при быстром отжиге и влиянии температурных режимов на свойства и характеристики создаваемых GaN диодных структур. Отсутствуют теоретические модели, позволяющие объяснить и прогнозировать свойства омических контактов, получаемых методом быстрого термического отжига.

Далее рассмотрены требования, предъявляемые к омическим контактам к нитриду галлия, в том числе их сопротивлению. На основании проведенного обзора литературных источников установлено, что Стандартной металлизацией к нитриду галлия является основанная на Ti/Al/Ni/Au, где алюминий – металл образующий контакт, золото – металл, препятствующий окислению, никель – препятствует смешиванию алюминия и золота. Титан в данной металлической системе играет двойную роль. С одной стороны, он является адгезионным подслоем, а с другой стороны формирование при температурах более 800 °С приповерхностной фазы Ti_xN_y , которая обедняет слой азотом, создает вакансии азота, которые в свою очередь являются донорами для GaN. Отмечается, что для оптимизации процесса формирования омических контактов необходимы исследования влияния режимов отжига на величину удельного переходного сопротивления омических контактов (кратковременный и длительный), а также проведение исследований температурной стабильности контактов. Показано, что в качестве омического контакта к n-GaN перспективной с точки зрения высокотемпературных применений является пленка Ti/Al.

На основании проведенного анализа литературных источников сформулирована цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена исследованию процесса фазообразования в контакте Ti/Al/Ni/Au к гетероструктуре AlGaIn/GaN.

В данной главе были поставлены задачи построения тройной фазовой диаграммы Ti/Al/Ni/Au и определение с ее помощью наилучшего

температурного диапазона для формирования омических контактов с наименьшим удельным сопротивлением. Интерес представляло получение соединения TiN, которое приводит к увеличению избытка вакансий азота вблизи границы TiN-GaN, что является причиной низкого контактного сопротивления.

Анализ влияния особенностей процессов твердофазного взаимодействия в контактах Al/Ti/GaN при термообработке на их параметры, представленный в главе 1, показал, что после отжига контакт трансформируется в структуру, которая состоит из фаз, являющихся продуктами твердофазного взаимодействия титана с азотом и/или с алюминием. Наличие среди продуктов взаимодействия нитридов, интерметаллидов и тройных фаз, а также свободного титана и алюминия делает проблему анализа стабильности контактов Al/Ti/GaN сложной, требующей выявления закономерностей протекания твердофазных реакций между контактирующими материалами и изменения фазового состава этих структур в диапазоне температур формирования контактов и их эксплуатации.

В реакциях взаимодействия пленок металлов с подложкой участвуют три компонента (Al, Ti, N), распределенные в различных фазах, при этом фазовый состав системы может быть описан тройной фазовой диаграммой [2]. При фиксированной температуре изотермическое сечение тройной фазовой диаграммы имеет вид треугольника, вершины которого соответствуют однокомпонентным фазам, а точки на сторонах треугольника – двухкомпонентным фазам (соединениям). Согласно правилу фаз Гиббса, для системы, находящейся в равновесии, соотношение между количеством фаз (P), компонентов (C) и числом степеней свободы (F) определяется соотношением [2]:

$$F = C - P + 2 \quad (1)$$

В условиях фиксированных температуры, давления и концентрации компонент, количество внешних переменных и степеней свободы системы, находящейся в равновесии, равны нулю. При этом, согласно правилу фаз Гиббса, в системе из трех компонент (Al, Ti, N), находящейся в равновесии, могут одновременно существовать не более трех фаз, не взаимодействующих друг с другом.

Для выяснения принципиальной возможности твердофазного взаимодействия и термодинамической характеристики сосуществующих фаз равновесных систем необходимо определить изменение свободной энергии Гиббса (изобарно-изотермического потенциала) твердофазных реакций [3, 4]:

$$\Delta G(T) = \Delta H_{298}^0 - T\Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta c_p(T) dT - T \int_{298}^T \left(\frac{\Delta c_p(T)}{T} \right) dT, \quad (2)$$

где $\Delta G(T)$ – изменение энергии Гиббса реакции; ΔH_{298}^0 – изменение энтальпии реакции в стандартных условиях; ΔS_{298}^0 – изменение энтропии реакции в стандартных условиях; $\Delta c_p(T)$ – изменение теплоемкости реакции.

В химической термодинамике критерием, определяющим возможность протекания химической реакции, и ее направление является величина изменения свободной энергии Гиббса. При $\Delta G < 0$ термодинамически вероятной является реакция в прямом направлении, при $\Delta G > 0$ – в обратном. Из двух реакций с отрицательным ΔG термодинамически вероятной является та, у которой ΔG меньше.

В тройной системе Al-Ti-N могут формироваться следующие соединения: нитриды (AlN, TiN), алюминиды (AlTi, Al₃Ti, AlTi₃, Al₃Ti₂, Al₂Ti). Для анализа стабильности двух фаз в тройной системе необходимо записать все возможные химические взаимодействия этих фаз и для каждой реакции посчитать температурную зависимость изменения свободной энергии Гиббса. Фазы не взаимодействуют друг с другом, т.е. являются термодинамически стабильными, если в рассматриваемом температурном диапазоне для всех реакций $\Delta G > 0$, при этом на тройной фазовой диаграмме можно провести соединительную линию между этими фазами.

Согласно фазовой диаграмме при температурах ниже 882°C титан имеет модификацию α -Ti с гексагональной плотноупакованной решеткой, при температурах выше 882°C – β -Ti с кубической объемно-центрированной решеткой. В следствие этого для некоторых соединений необходимо отдельно рассматривать промежутки температур до и после 882°C.

Представляет интерес выяснение возможных путей дальнейшей трансформации фазового состава системы Ti-Al-N при нагреве. Для этого был проведен анализ реакций нитридов титана с алюминием и нитридом алюминия (таблица 1).

Таблица 1 Изменение свободной энергии Гиббса простых реакций системы Ti-Al-N

Реакция	ΔG , кДж/(г·атом)				
	850°C	880°C	885°C	900°C	950°C
1. Ti+N=TiN	-231.442	-228,67	-227,91	-226.46	-221.69
2. Al+Ti=AlTi	306.769	1194,54	-175,63	-64.342	-63.233
3. 3Al+Ti=Al ₃ Ti	301.799	331,43	-208,07	-128.047	-126.248
4. 3Ti+Al=AlTi ₃	-889.278	-397,66	-97,52	-97.982	-97.929
5. 2Ti+3Al=Al ₃ Ti ₂	1861	1912,80	-116,63	-116.628	-116.585
6. Al+N=AlN	-200.142	-196,62	-196,03	-194,273	-188.404
7. Ti+2Al=Al ₂ Ti	140.533	152,49	-41,48	-9.606	-0.761

Из фазовой диаграммы следует, что результатом нагрева до 882°C алюминия, титана и азота является формирование стабильной трехфазной структуры, состоящей из AlTi₃, алюминия и TiN.

При нагреве выше 882°C большая часть титана уходит на формирования соединения Al-Ti, что уменьшает количество титана, идущего на образование TiN. Следовательно, в полупроводнике образуется меньшее количество вакансий азота и удельное сопротивление контакта растет.

Таким образом, можно говорить, что наиболее благоприятными температурными условиями для формирования наилучших омических контактов являются температуры до 882°C, поскольку свободный титан идет на образования большого количества различных алюминидов. Тем самым уменьшается вероятность образования нитридов титана, которые необходимы для получения вакансий азота, благодаря которым происходит уменьшение сопротивления контакта.

Экспериментальное подтверждение расчётов было получено с использованием рентгенодифрактометрии. Для этого были подготовлены образцы гетероструктур AlGa_{0.5}N/GaN с нанесенной металлизацией Ti/Al/Ni/Au. Для них была проведена термообработка при температуре 800-900 С с шагом 50 С, таким образом были охвачены интересующие диапазоны температур – до 882 С и после 882 С.

После отжига при температуре 800 °С было выявлено наличие следующих основных фаз: TiN, AlTi₃ (рис.1), что совпадает с результатами, рассчитанными с помощью термодинамической модели (табл.2). Так же на рентгенограмме виден небольшой пик от оксида титана, образовавшегося при взаимодействии нанесенного титана с остатками оксида галлия.

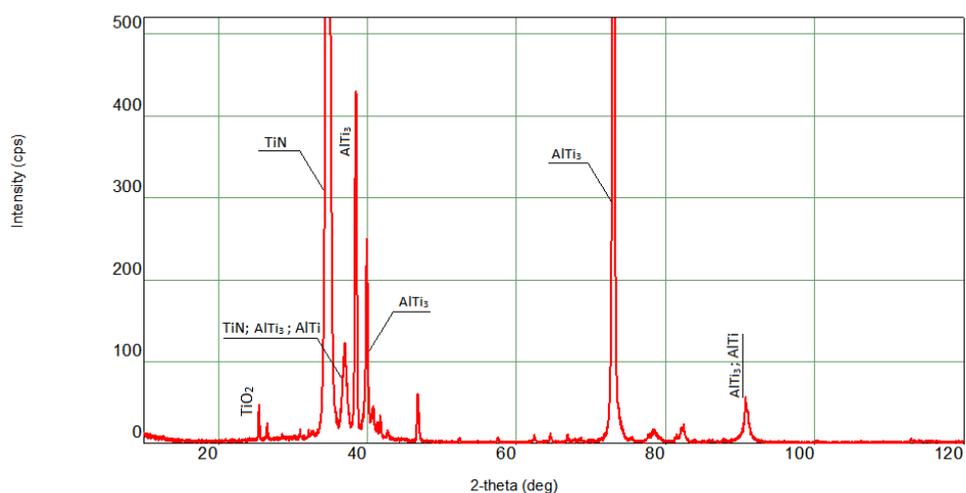


Рисунок 1. Рентгенограмма образца после отжига при 800°C

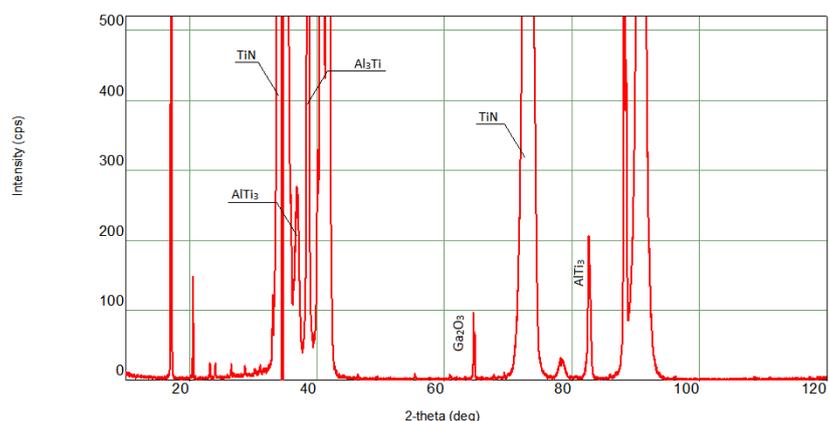


Рисунок 2. Рентгенограмма образца после отжига при 850°C

После отжига при температуре 850°C (рис.2) выявлены те же фазы, что и при 800 °C, однако высота пиков говорит об увеличении содержания в составе TiN. Помимо этого, был обнаружен низкий пик, соответствующий остаткам окислов Ga₂O₃.

После отжига при температуре 900°C выявлено большее число образовавшихся фаз AlN, TiN, AlTi₃, AlTi, Al₂Ti, Al₃Ti (рис.3), то есть дополнительно образовались алюминиды Al₂Ti, AlTi и AlN, что также совпадает с термодинамическими расчетами. Появление нитрида алюминия, являющегося диэлектриком, может увеличивать контактное сопротивление. И вновь было обнаружено наличие пика от оксида титана.

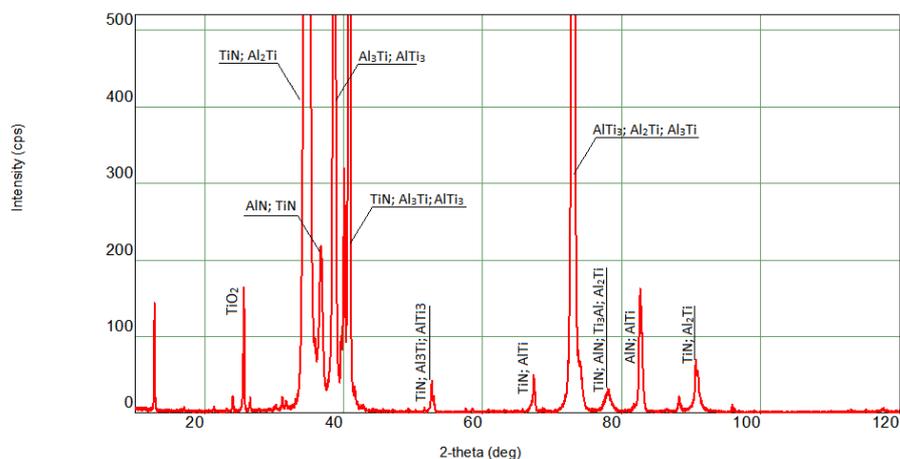


Рисунок 3. Рентгенограмма образца после отжига при 900°C

Таким образом, при температурах 850 °C и ниже, как и предполагалось, образуется меньшее количество алюминидов титана и нитрида алюминия, и за счет этого более вероятно образование соединения TiN и соответствующего ему количества азотных вакансий в полупроводнике. Причем при переходе температуры отжига от 800°C к 850°C увеличиваются пики, отвечающие соединению TiN.

Таким образом, можно ожидать, что наиболее благоприятными температурными условиями для формирования наилучших омических контактов являются температуры от 850 до 900°C, поскольку свободный титан идет на образования меньшего количества различных алюминидов, что следует из данных, представленных в таблице 1. Тем самым увеличивается вероятность образования нитрида титана, что сопровождается образованием вакансий азота в приконтактной области GaN. Эти вакансии создают донорные уровни, благодаря которым происходит увеличение n-типа проводимости в приконтактной области и уменьшение контактного сопротивления.

Третья глава посвящена формированию и исследованию омических контактов к гетероструктуре на основе нитрида галлия.

Был проведен последовательный отжиг в диапазоне температур 800-1000 °C при фиксированном времени (30 с). Данный диапазон был выбран исходя из литературного обзора. Результаты измерений удельного сопротивления для всех образцов при комнатной температуре (25 C) представлены в таблице 2.

Таблица 2. Удельное и удельное переходное сопротивления контактов после отжига.

Номер образца	Температура обработки, °C	Удельное сопротивление, Ом·мм	Удельное переходное сопротивление Ом·см ²
1	800	0,35	$1.34 \cdot 10^{-5}$
2	850	0,32	$3.05 \cdot 10^{-6}$
3	880	0,07	$1.44 \cdot 10^{-6}$
4	885	0,28	$5.60 \cdot 10^{-6}$
5	900	0,67	$1.90 \cdot 10^{-5}$
6	950	0,77	$5.05 \cdot 10^{-5}$
7	1000	1,88	$1.93 \cdot 10^{-5}$

Как видно из таблицы 2, минимальное удельное сопротивление для образцов с металлизацией Ti/Al/Ni/Au достигается при температуре 880 °C и составляет 0,28 Ом·мм.

При последовательном отжиге можно определить этапы формирования омического контакта, но нельзя объяснить механизм формирования контакта и переноса заряда.

Для понимания процессов формирования омического контакта необходимо определить механизма переноса заряда и основные параметры барьера Шоттки.

Основным параметром омических контактов является ширина области объемного заряда, фактически это ширина области потенциального барьера \mathcal{L}_0 :

$$\mathcal{L}_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varphi_B}{qN_D}} \quad (3)$$

Как видно из формулы 3, ширина барьера зависит от двух параметров – высоты барьера φ_B и концентрации носителей заряда N_D , а q – элементарный заряд и $\varepsilon = 8,9 \cdot \varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость нитрида галлия (ε_0 – электрическая постоянная). Таким образом, дальнейшей задачей стало определение этих двух параметров [5].

Для определения высоты барьера, концентрации носителей и механизма переноса был выбран способ, измерения зависимости удельного переходного сопротивления от температуры T , использованный авторами [6]. Для этого была проведена серия измерений удельного переходного сопротивления для каждого образца при различных температурах в диапазоне от 25 до 175 °С. Затем, используя теоретические зависимости для:

- термополевой эмиссии:

$$\rho_k = \left(\frac{kT}{qA}\right) \frac{kT}{\sqrt{\pi(\varphi_B + V_n)E_{00}}} \operatorname{ch}\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \left(\sqrt{\operatorname{cth}\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)}\right) \exp\left(\frac{\varphi_B + V_n}{kT} - \frac{V_n}{kT}\right) \quad (4)$$

$$\text{где } E_0 = E_{00} \operatorname{cth}\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (5)$$

$$E_{00} = \frac{qh}{4\pi} \sqrt{\frac{N_D}{m^* \varepsilon}} \quad (6)$$

h – постоянная Планка, k – постоянная Больцмана, A – постоянная Ричардсона ($A = 27,9 \text{ А/см}^2\text{К}^2$, здесь и далее параметры указаны для нитрида галлия), $m^* = 0,23 \cdot m_e$ – эффективная масса электрона, V_n – разница между нижней границей зоны проводимости и уровнем Ферми, ch и cth – функции гиперболического косинуса и котангенса соответственно [7];

- полевой эмиссии:

$$\rho_k = \left[\frac{AT\pi q}{k \sin(\pi C_1 k T)} \exp\left(\frac{-\varphi_B}{E_{00}}\right) - \frac{AC_1 q}{(C_1 k)^2} \exp\left(\frac{-\varphi_B}{E_{00}} - C_1 V_n\right) \right]^{-1} \quad (7)$$

$$\text{где } C_1 = \frac{1}{2E_{00}} \ln\left(\frac{4\varphi_B}{V_n}\right) \quad (8)$$

Далее на полученные экспериментальные зависимости удельного переходного сопротивления от температуры измерений аппроксимируются теоретическими кривыми. Для каждой экспериментальной кривой строятся все типы теоретических кривых, но так как виды зависимости для различных механизмов переноса заряда отличаются, то полученную в результате эксперимента кривую будет объяснять только одна теоретическая. Из этого можно сделать вывод о механизме переноса заряда и получить свободные параметры в формулах 3.4 – 3.8, такие как высота барьера φ_B и концентрация носителей N_D , то есть основные параметры барьера [6].

Проведя описанные выше измерения и преобразования для всех образцов фигурирующих в исследовании, были получены значения высоты барьера в электрон вольтах. Полученные значения сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Зависимость параметров барьера от температуры отжига.

№	$T_{\text{отжига}}, ^\circ\text{C}$	$\rho_k 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	$N_D, 10^{19} \text{ см}^{-3}$	$\phi_B, \text{ эВ}$	$L_0, \text{ нм}$
1	800	1.34	5,4	1,04	3,3
2	850	0.31	9,5	0,92	2,9
3	880	0.14	11	0,90	3,3
4	885	0.56	8,1	0,95	3,1
5	900	1.91	9,5	1,05	3,5
6	950	5.05	8,5	1,08	3,3
7	1000	1.93	13,2	1,11	3,4

После определения высоты барьера можно вернуться к расчетам модели переноса заряда и достоверно определить концентрацию носителей заряда. Данные исследования были проведены для всех образцов.

Для образца после термообработки при 950°C после наложения теоретической кривой на экспериментальные данные наиболее подходящей оказалась термополевая эмиссия (рисунок 4).

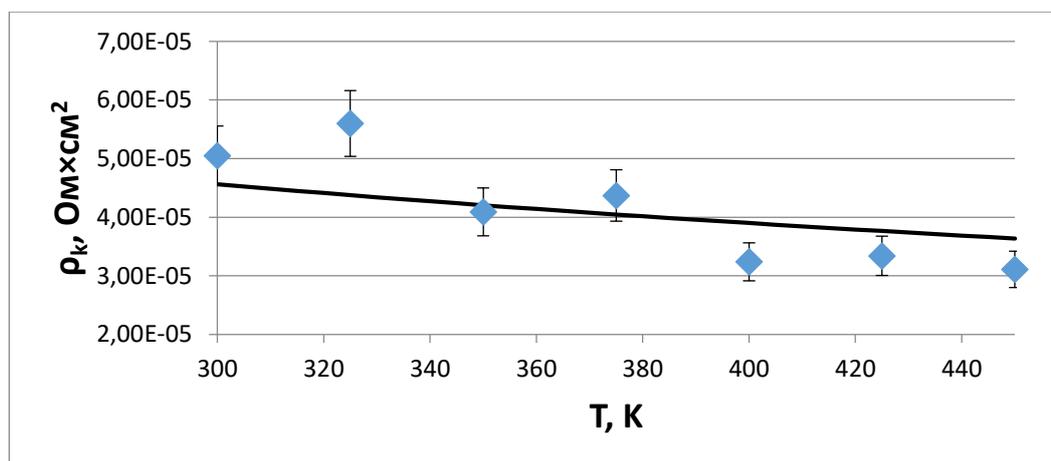


Рисунок 4. Зависимость удельного переходного сопротивления омических контактов от температуры измерений для образца после термообработки при 950°C . Точки – экспериментальный результат, линия – теоретическая зависимость

Для всех остальных образцов после термообработки также характерной оказалась полевая эмиссия.

Исходя из полученных данных, были рассчитаны значения концентрации носителей N_D и ширины барьера Шоттки ϕ_B (см. таблицу 3).

Как и предполагалось, наименьшее удельное сопротивление было достигнуто при минимальном значении высоты барьера (сравнить рисунки 4 и 5), хотя процесс формирования контакта сопровождается постоянным увеличением концентрации носителей (рисунок 6). Не смотря на отличающиеся тенденции изменения этих параметров, ширина барьера, рассчитанная по формуле 3, уменьшается аналогично удельному переходному сопротивлению (рисунок 7).

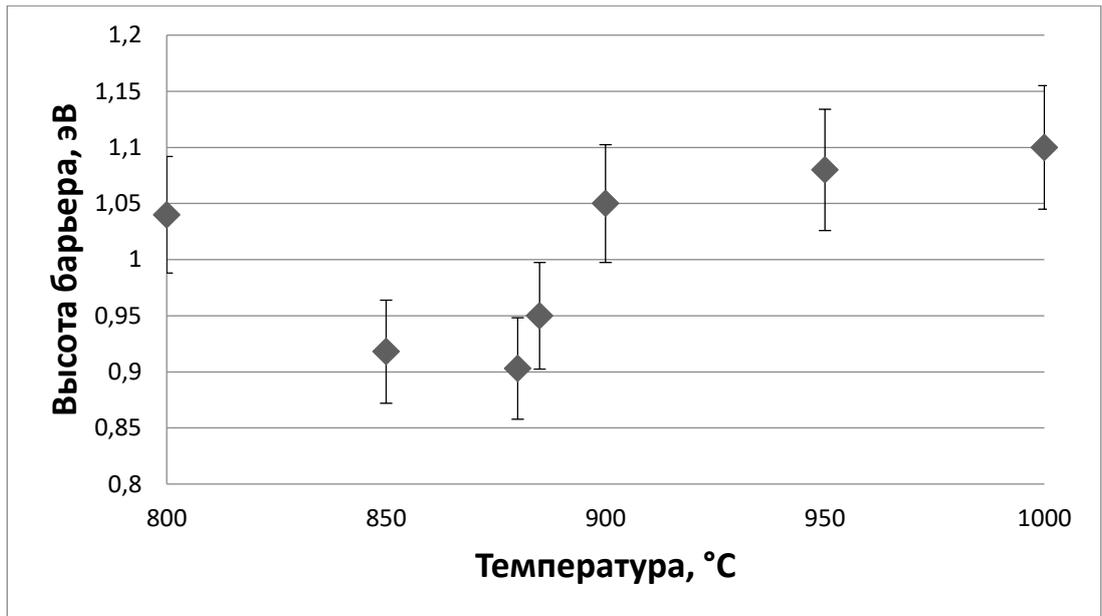


Рисунок 5. Зависимость высоты барьера Шоттки от температуры отжига

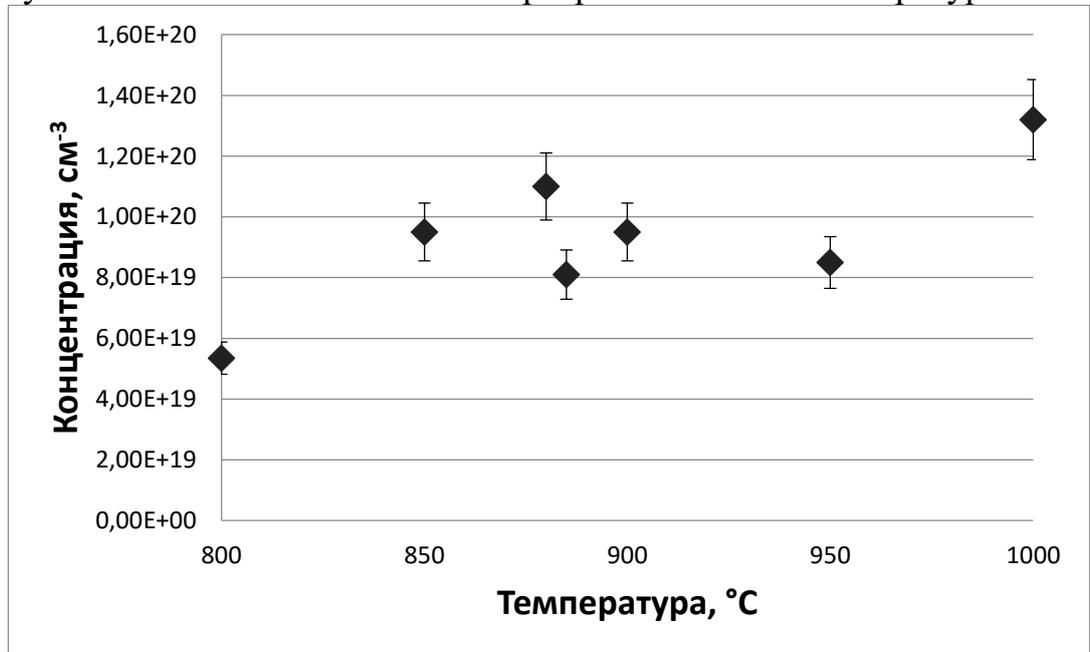


Рисунок 6. Зависимость концентрации носителей от температуры отжига.

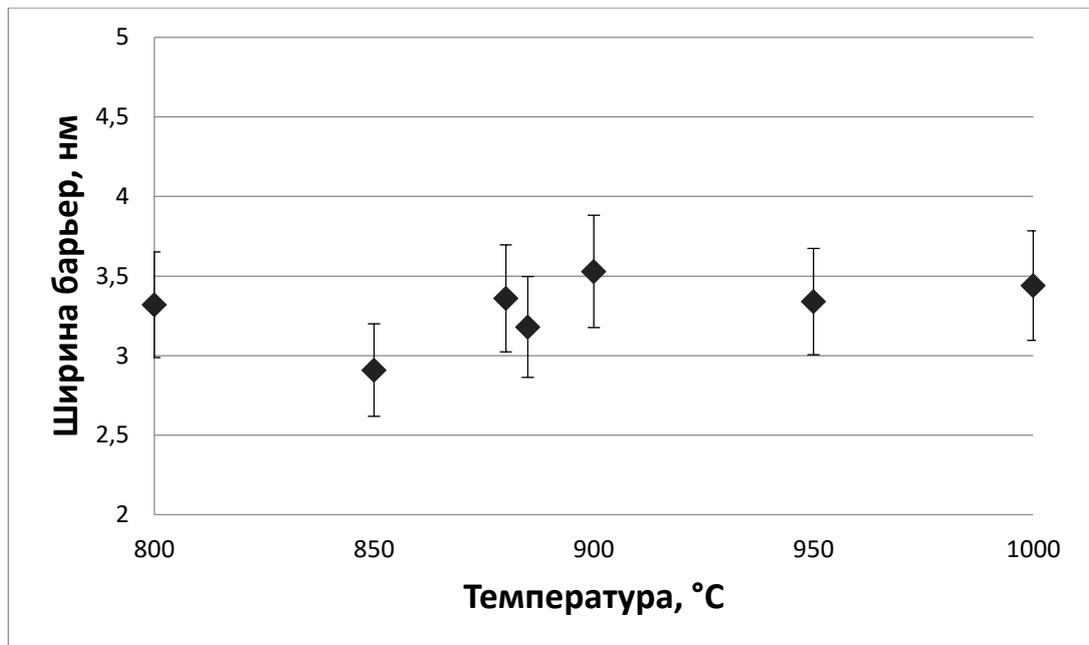


Рисунок 7. Зависимость ширины барьера Шоттки от температуры отжига

Для изменения высоты барьера Шоттки требуется изменить контактообразующий материал, проведя при этом трудоёмкие исследования фаз интерметаллидов, образующихся при термообработке. Другим подходом может служить увеличение концентрации носителей, которое поможет дать сформированный омический контакт при более низких температурах отжига и уменьшить ширину барьера, что также повлияет на удельное переходное сопротивление в сторону его уменьшения.

При выращивании полупроводниковой гетероструктуры в приконтактный слой добавляют легирующую примесь (в нашем случае был использован кремний с концентрацией $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Для повышения концентрации данной области необходимо использовать известный, но трудоёмкий метод ионной имплантации. Но есть и другой способ решить проблему – ввести легирующую примесь под систему слоёв металлизации (то есть, между гетероструктурой и металлизацией). Данный способ имеет смысл, так как после отжига происходит перемешивание слоёв и кремний все равно окажется в нужной контактной области и только. Также этот способ хорош тем, что выполняется на том же технологическом участке, что и нанесение слоев металлизации, то есть нет необходимости вносить лишнюю технологическую операцию.

Новая система слоев металлизации имела вид Ti/Si/Ti/Al/Ni/Au (5/6/30/135/50/100 нм), подслой титана в 5 нм необходим для обеспечения большей адгезии к поверхности полупроводника, так как нанесение слоев происходило на подложки без нагрева.

Для образца была выбрана контактная система Ti/Si/Ti/Al/Ni/Au (5/6/30/135/50/100 нм). Образец был обработан при температуре 850 °C. Введение кремния позволило уменьшить ширину барьера на 0,8 нм, что

уменьшило удельное переходное сопротивление до $8,58 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ (удельное сопротивление $0,07 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$) (рисунок 8). В данном образце оказалось, что при барьере в $0,99 \text{ эВ}$ концентрация составила $4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, то есть введение кремния увеличило концентрацию носителей в два раза по сравнению с наилучшим образцом без кремния. То есть при увеличении концентрации носителей не требуется понижение барьера Шоттки, что подчеркивает независимый и равнозначный вклад этих параметров в значение удельного сопротивления.

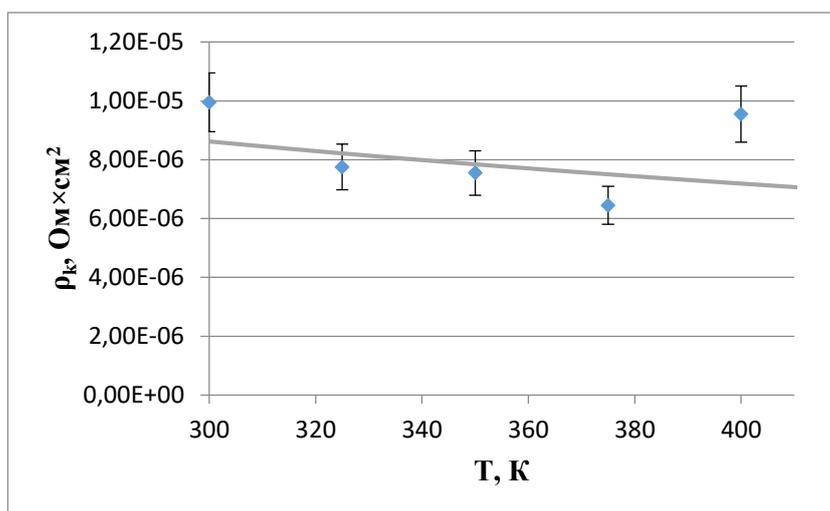


Рисунок 8. Зависимость удельного переходного сопротивления омических контактов от температуры для образца с системой металлизации Ti/Si/Ti/Al/Ni/Au после термообработки при $850 \text{ }^\circ\text{C}$. Точки – экспериментальный результат, линия – теоретическая зависимость.

Четвертая глава посвящена исследованию транзисторных структур на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN с использованием полученных омических контактов.

СВЧ-транзистор представляет собой несколько десятков соединенных в параллель базовых транзисторов. Топологический рисунок мощного транзистора на гетероструктуре AlGaIn/GaN, для которого проводилась разработка тестового модуля, представлен на рисунке 9.

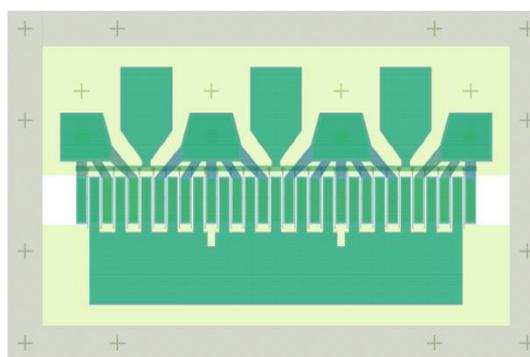
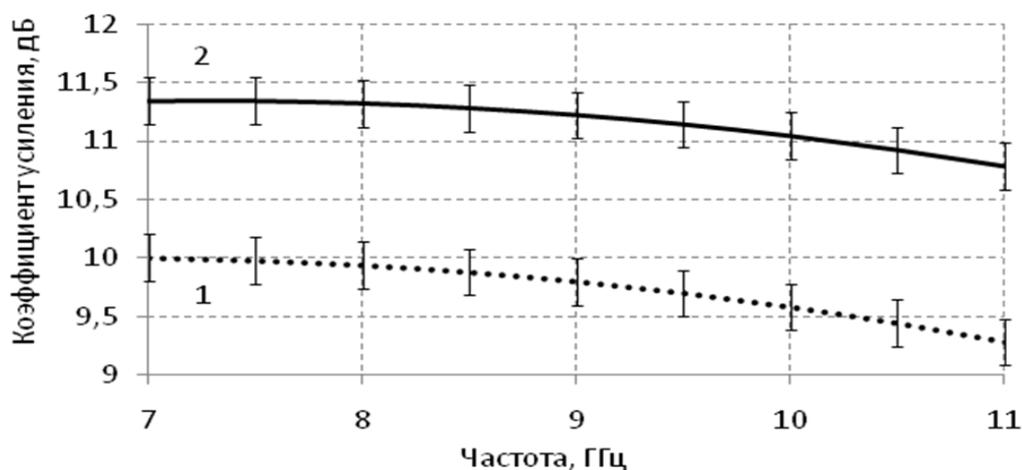


Рисунок 9 – Топологический рисунок СВЧ-транзистора на гетероструктуре AlGaIn/GaN

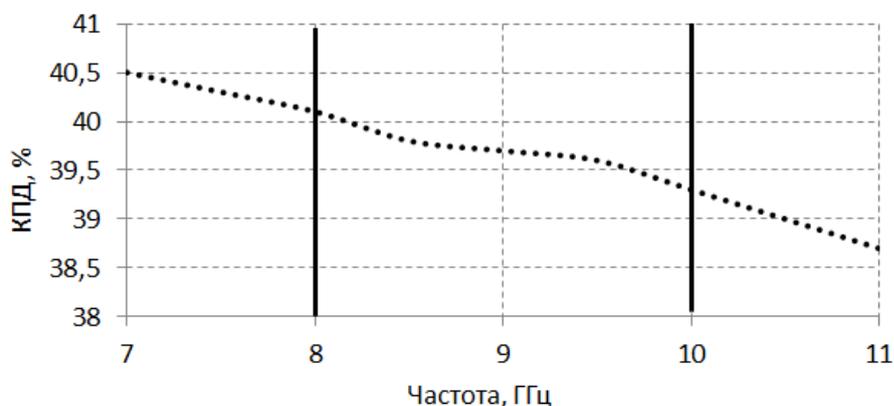
Исследования статических ВАХ и вольт-фарадных характеристик транзисторов были проведены на анализаторе полупроводниковых приборов Agilent B1500A, подключенный к манипулятору установки зондового контроля полупроводниковых пластин – зондовой станции EP8.

Agilent B1500A – анализатор модульной конструкции, позволяющий измерять емкости, слабые токи с разрешением до 0,1 фемтоампер и напряжения - до 0,5 микровольт. Так же анализатор обладает автоматическим определением длины кабеля и его емкости и автоматической компенсацией емкости кабеля в измерениях.

На рисунке 10 представлены типичные зависимости коэффициента усиления по мощности в заданном диапазоне частот и КПД СВЧ транзисторов.



(а)



(б)

Рисунок 10 – Результаты исследований основных параметров СВЧ транзисторов на основе наногетероструктур нитридов галлия и алюминия: (а) – зависимость коэффициента усиления по мощности (1 – для приборов на подложке кремния, 2 – на подложке карбида кремния), (б) – зависимость КПД транзистора

Анализируя данные рисунка 4.18, можно заключить, что в заданном техническом задании диапазоне рабочих частот 8 – 10 ГГц коэффициент усиления по мощности составил $9,8 \pm 0,5$ дБ для приборов на подложке кремния и $11,3 \pm 0,5$ дБ для приборов на подложке карбида кремния. Максимальный КПД превысил 40% и практически не отличался для СВЧ транзисторов на

подложке кремния и карбида кремния.

В заключении приведены основные выводы и результаты работы.

В приложении – документы о внедрении и использовании результатов диссертационной работы.

Список использованной литературы

1. D. Streit, A. Oki, R. Lai, A. Gutierrez-Aitken, et. al. «How Cost-Efficient Phosphide Changes the Telecommunication Industry's Competitive Landscape» Compound Semiconductor Magazine, Issue 6, no. 3, pp. 234 – 235, 2000.
2. Mahieu S., Ghekiere P., Depla D., De Gryse R. Biaxial alignment in sputter deposited thin films // Thin Solid Films. 2006. v. 515. pp. 1229–1249
3. Ляхов И.Г., Кузьмин А.А., Ильин А.С., Ермакова М.А., Булах К.В. Исследование режимов магнетронного напыления тонких пленок титана для криогенных детекторов // Труды МФТИ. 2013. Т. 5. № 1. с. 60–67.
4. Г. Трапашко. Контроль микроразмеров при производстве ИС. Задачи и особенности. // Электроника НТБ, №3, с. 96 – 103, 2011.
5. К.Д. Ванюхин, А.А. Воронова, Е.М. Евсеева, Р.В. Захарченко, Л.А. Сейдман. Оптимизация параметров поверхностного сопротивления светопроводящего электрода из оксида индия-олова // 5-я Научно-практическая конференция по физике и Технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Мокеровские чтения". Тезисы докладов. – М., 2014, с.31
6. K.D. Vanyukhin, A.A. Voronova, E.M. Evseeva, R.V. Zakharchenko, L.A. Seidman. Sheet resistance parameter optimization of light transmitting welding electrodes made of indium tin oxide // Joint 12th Russia/CIS/Baltic/Japan symposium on ferroelectricity and 9th International conference functional materials and nanotechnologies "RCBJSF – 2014 – FM&NT" Book of abstract – 2014. – p. 324
7. Абрамов В. С., Никифоров С. Г., Соболев П. А., Сушков В. П. Свойства зеленых и синих InGaN-светодиодов // Светодиоды и лазеры. 2002. № 1–2
8. Юнович А. Светодиоды на основе гетероструктур из нитрида галлия и его твердых растворов. Светотехника // Светотехника. — 1996. — № 5/6. — С. 2–7.

Основные результаты работы

В соответствии с целью работы и поставленными задачами получены следующие результаты:

- Металлизация на основе Ti уменьшает контактное сопротивление путем формирования интерметаллических соединений с низкой работой выхода на поверхности GaN. Формирование слоя TiN приводит к увеличению избытка вакансий азота вблизи границы TiN-GaN, что является причиной низкого контактного сопротивления.

- На основе термодинамических расчетов для возможных интерметаллических реакций в приконтактной области выявлено, что наиболее благоприятный диапазон температур для формирования хороших

омических контактов 800 – 880 °С. В данном диапазоне вероятность образования соединения TiN выше, чем при более высоких температурах.

- Исследован процесс формирования омических контактов к n-GaN путем отжига многослойной металлизации Ti/Al/Ni/Au. Оптимальная температура и время отжига для металлизации Ti/Al/Ni/Au, обеспечивающие минимальное удельное сопротивление контакта, равное 0,2 Ом·мм, составляют соответственно 880 С и 30 секунд.

- Определены механизмы переноса заряда и влияние параметров барьера Шоттки на контактное сопротивление. Оказалось, что для омического контакта характерна полевая эмиссия. Высота барьера оказывает наибольшее влияние на сопротивление омического контакта.

- Введение примеси кремния в контактную металлизацию позволяет снизить величину удельного сопротивления до 0,07 Ом·мм.

- Разработан технологический маршрут изготовления транзистора и исследованы вольтамперные характеристики полученных образцов.

- Практические результаты проведенных исследований используются в опытном производстве Института функциональной ядерной электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», на производстве АО «ОКБ «Планета», что подтверждается Актами о внедрении.

Статьи, опубликованные в журналах из перечня Scopus и Web of Science

1. **Shostachenko S A**, Pischulina, A., Katin, K.P., CLUSTVIS1: A new software package for visualization of atomic clusters and molecules // Scientific Visualization 7 (1), 2015, pp. 30-37

2. **Shostachenko S A**, Maslov, M.M., Prudkovskii, V.S., Katin, K.P. Thermal stability of hexaprismane C₁₂H₁₂ and octaprismane C₁₆H₁₆ // Physics of the Solid State 57 (5), 2015, pp. 1023-1027

Материалы докладов международных конференций, опубликованные в журналах из перечня Scopus и Web of Science

3. **Shostachenko S A**, Vanukhin, K.D., Ryzhuk, A.A., Kargin, N.I Schottky-to-ohmic behavior in annealed Ti/Si/Ti/Al/Ni/Au on AlGa_N/Ga_N // Physics Procedia 72, 2015, pp. 419-424

4. **Shostachenko S A**, R V Zakharchenko, R V Ryzhuk, N I Kargin Low resistance Ti/Si/Ti/Al/Ni/Au ohmic contact for AlGa_N/Ga_N HEMT // Proc. SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, 1022403

5. **Shostachenko S A**, Y A Porokhonko, R V Zakharchenko, Temperature influence on process of Ti/Al/Ni/Au contact formation to heterostructure AlGa_N/Ga_N // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 498, Number 1, 2019

6. **Shostachenko S A**, Y A Porokhonko, R V Zakharchenko, Study of Ti/Si/Ti/Al/Ni/Au ohmic contact for AlGa_N/Ga_N HEMT // Journal of Physics: Conference Series, Volume 938, Issue 1, 2018, 012073

Статьи, опубликованные в журналах из перечня ВАК РФ

7. **Шостаченко, С.А.**, Сейдман Л.А., Чашкин Н.А. Формирование омических контактов в транзисторе с высокой подвижностью электронов с метаморфным гетеропереходом на основе арсенида галлия // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы 1 (232), 2014 с. 75 - 84

8. **Шостаченко, С.А.**, Р.В. Захарченко, С.В. Миннебаев, Р.В. Рыжук, Влияние подзатворного диэлектрика на вольтамперные характеристики транзистора с каналом на основе графеносодержащей пленки // Известия ЮФУ. Технические науки 09, 2015, 94 – 101.

Патенты РФ на изобретение

9. **Шостаченко, С.А.**, Захарченко Р.В., Миннебаев С.В., Рыжук Р.В. Низкоомный омический контакт к гетероэпитаксиальной структуре на основе нитрида галлия // Патент РФ №155419, опубликовано 10.10.2015, бюл. № 28.