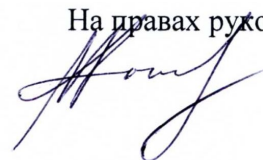


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

На правах рукописи



Кондаков Михаил Николаевич

**ОМИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ
НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ Mo/Al/Mo/Au
К ГЕТЕРОСТРУКТУРАМ AlGaIn/GaN**

Специальность 05.27.06 – технология и оборудование для производства полупроводников,
материалов и приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук,
Диденко Сергей Иванович

Москва, 2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На сегодняшний день материалы и гетероструктуры на основе GaN благодаря их уникальным свойствам, таким как большая ширина запрещенной зоны, высокие пробивные поля, высокая дрейфовая скорость насыщения электронов и хорошая теплопроводность широко используются в оптоэлектронике, силовой и высокоомощной СВЧ электронике. В частности, гетероструктуры AlGaN/GaN из-за наличия двумерного электронного газа (ДЭГ) с высокой слоевой концентрацией электронов, индуцированного на границе раздела широкозонного и узкозонного полупроводников вследствие присутствия спонтанной и пьезоэлектрической поляризации, активно используются для изготовления транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT – high electron mobility transistor). Однако до сих пор существует ряд технологических проблем, ограничивающих характеристики данных приборов, одной из которых является получение термостабильного низкоомного омического контакта с хорошей морфологией.

Изготовление омических контактов к гетероструктурам AlGaN/GaN представляет существенные трудности прежде всего из-за наличия широкозонного барьерного слоя AlGaN. В первую очередь, это связано с тем, что уровень Ферми не закреплен на поверхности AlGaN из-за низкой концентрации поверхностных состояний, а также с низким сродством к электрону AlN (0.6 эВ), что, соответственно, приводит к низким, в сравнении с GaN, значениям сродства к электрону для твердых растворов GaN-AlN [1]. По данным работы [2] сродство к электрону для $n\text{-Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ в направлении (0001) составляет всего 2.5 эВ.

На сегодняшний день, широко используемой и, соответственно, наиболее изученной системой металлизации является Ti/Al/Ni/Au и ее различные вариации. Использование данной системы не удовлетворяет совокупности требований, предъявляемых к омическим контактам, в основном из-за плохой морфологии поверхности и кромки контактов. Эта проблема решается двумя путями: формированием невжигаемых контактов и сплавных контактов с использованием тугоплавких металлов в качестве барьерного слоя. В первом случае, используются технологии доразрабатывания сильнолегированных слоев полупроводника или ионной имплантации Si в подконтактные области для улучшения характеристик омических контактов. Не смотря на некоторые преимущества, например при разработке транзисторов более высокочастотных диапазонов, данный подход приводит к существенному усложнению технологии и увеличению технологических операций при изготовлении приборов. Технология формирования сплавных омических контактов – напыление металлизации с последующим термическим отжигом – существенно проще: возможность формирования контакта в одной операции взрывной фотолиграфии выглядит более выигрышно с технологической точки зрения. Однако, данный подход также имеет ряд трудностей: отработка режимов формирования сводится к оптимизации состава и толщины слоев металлов и режима отжига. Кроме систем на основе Ti/Al/x/Au (где x –

это тугоплавкие металлы Ti, Mo, V и др.) на сегодняшний день исследовано множество систем металлизаций на основе тугоплавких металлов Cr, Hf, V, Ta, Mo и др. [3, 4, 5, 6, 7]. Одной из наиболее интересных из них является система Mo/Al/Mo/Au. В работах [8, 9] показано, что на основе данной системы металлизации возможно получать омические контакты с сопротивлением не хуже, чем у стандартных систем Ti/Al/(Ni, Ti)/Au, относительно гладкую морфологию поверхности, а также высокую термическую стабильность. Её основными преимуществами являются широкий диапазон температур отжига (700–900 °C), тогда как для стандартных омических контактов на основе Ti/Al/x/Au он уже – от 750 до 850 °C, а также возможность получения омического контакта при более низких температурах (500 °C) при использовании предварительной плазмохимической обработки в SiCl₄ [8].

Однако, на сегодняшний день, работы по исследованию особенностей формирования контактов на основе Mo/Al/Mo/Au в периодической литературе практически отсутствуют. Работы, направленные на изучение механизма формирования данного контакта к гетероструктурам AlGa_xN/GaN с нелегированным барьерным слоем не проводились, между тем данные представления необходимы для понимания дальнейших путей оптимизации контакта.

Объектом исследования диссертационной работы являются омические контакты на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGa_xN/GaN.

Целью настоящей работы является разработка технологии создания омических контактов на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам Al_xGa_{1-x}N/GaN, исследование фазовых превращений, происходящих в процессе термического отжига, и механизма токопереноса через контакт для понимания путей дальнейшей оптимизации технологии формирования.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Обзор современного состояния в области создания омических контактов к гетероструктурам Al_xGa_{1-x}N/GaN.

2. Разработка и оптимизация технологии формирования низкоомных омических контактов на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам Al_xGa_{1-x}N/GaN: определение оптимального температурно-временного режима отжига и оптимального соотношения толщин слоев металлов для достижения требуемых электрических параметров и морфологии поверхности контакта.

3. Оптимизация технологии создания омических контактов на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам Al_xGa_{1-x}N/GaN с целью формирования в одной технологической операции с ними знаков совмещения для электронно-лучевой литографии и улучшения их захвата.

4. Исследование морфологии, микроструктуры и особенностей формирования омических контактов на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам Al_xGa_{1-x}N/GaN.

5. Сравнение различных методов определения слоевого сопротивления полупроводника под омическим контактом и выбор оптимального метода для измерения параметров омических контактов к гетероструктурам $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$. Исследование зависимости слоевого сопротивления ДЭГ под омическим контактом от температуры и её сравнение с аналогичной зависимостью для слоевого сопротивления ДЭГ вне контакта.

6. Измерение зависимостей переходного контактного сопротивления в диапазоне температур 300 – 473 К для омических контактов на основе системы металлизации $\text{Mo}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{Au}$ к гетероструктурам $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, сформированных при различных температурах отжига.

7. Исследование механизма токопереноса в омических контактах на основе системы металлизации $\text{Mo}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{Au}$ к гетероструктурам $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, сформированных при различных температурах отжига, в диапазоне температур 300 – 473 К.

Научная новизна работы

1) Найдено оптимальное соотношение толщин слоев системы металлизации $\text{Mo}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{Au}$ (10/50/55/50 нм) и подобран оптимальный температурно-временной режим отжига омических контактов к нелегированным гетероструктурам $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ на основе этой системы, что позволило получать контакты с переходным контактным сопротивлением до $4.7 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ (контактное сопротивление 0.14 Ом·мм), гладкой морфологией поверхности и ровной кромкой контакта.

2) Впервые показано, что при изменении общей толщины металлизации $\text{Mo}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{Au}$ с сохранением соотношения толщин слоев металлов (1х/5х/5.5х/5х) сохраняется величина минимального переходного контактного сопротивления; с увеличением толщин слоев металлов наблюдается уменьшение минимальной температуры отжига, необходимой для получения минимального контактного сопротивления. Наиболее широкий диапазон температур отжига – от 700 до 900 °С – наблюдался для исходной системы $\text{Mo}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{Au}$ (10/50/55/50 нм).

3) Впервые исследована микроструктура омических контактов на основе системы металлизации $\text{Mo}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{Au}$ к гетероструктурам $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, изготовленных при различных температурах отжига. Показано, что наличие слоя Au играет определяющую роль при формировании омического контакта.

4) Впервые установлено, что при использовании в качестве верхнего слоя в системе металлизации $\text{Mo}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{x}$ металлов подгруппы меди (Cu, Ag, Au) с увеличением их атомного номера наблюдается существенное улучшение контактного сопротивления, вместе с тем контакты, изготовленные с использованием металлов соседней подгруппы никеля (Ni, Pd, Pt) демонстрируют сильно нелинейные вольт-амперные (ВАХ) характеристики вне зависимости от атомного номера металла.

5) Впервые проведено сравнение методов измерения слоевого сопротивления ДЭГ под омическим контактом к гетероструктуре $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ и предложен оптимальный подход для решения данной задачи. Показано, что для неплавляемых контактов на основе $\text{Mo}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{Au}$ и $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{Au}$ слоевое сопротивление ДЭГ под контактами незначительно отличается слоевого сопротивления гетероструктуры вне контактных площадок (не более чем на 10%).

6) Впервые исследован механизм токопереноса через омический контакт на основе системы металлизации $\text{Mo}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{Au}$ к гетероструктурам $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ и проведено сравнение полученных результатов с контактом на основе системы $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{Au}$. Экспериментально получены и теоретически объяснены температурные зависимости переходного контактного сопротивления в диапазоне температур 300 – 473 К для контактов, полученных при различных температурах отжига. Полученные результаты позволили сделать вывод о термополевой природе токопереноса.

Практическая значимость

1) Разработана технология формирования омических контактов на основе системы металлизации $\text{Mo}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{Au}$ (10/50/55/50 нм) к нелегированным гетероструктурам $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, позволяющая получать значение контактного сопротивления на уровне 0.14 – 0.20 Ом·мм и приемлемую морфологию поверхности контакта.

2) Отработаны и рекомендованы технологические режимы: обработки поверхности $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, напыления металлических пленок (методами магнетронного, термического и электронно-лучевого испарения), быстрого термического отжига.

3) Морфология омического контакта на основе системы металлизации $\text{Mo}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{Au}$ (10/50/55/50 нм) к гетероструктурам $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ позволила использовать его металлизацию для формирования знаков совмещения при проведении процессов электронной литографии.

Методология и методы исследования

Для контроля контактных сопротивлений образцов использовался метод длинной линии (TLM – transmission line method). Толщины слоев металлов контролировались методом стилусной профилометрии. Исследования микроструктуры и морфологии контакта проводились методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, рентгеновской дифрактометрии, электронной Ожэ-спектроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Основные положения, выносимые на защиту

1) Система металлизации $\text{Mo}/\text{Al}/\text{Mo}/\text{Au}$ (10/50/55/50 нм), отожженная в атмосфере азота в течение 30 с при температуре в диапазоне 700–850 °С, обеспечивает к нелегированным гетероструктурам $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ термостабильный омический контакт, имеющий приемлемую морфологию поверхности и величину контактного сопротивления на уровне 0.14–0.20 Ом·мм.

2) Для омических контактов на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ при увеличении общей толщины металлизации с сохранением соотношения толщин слоев металлов (1x/5x/5.5x/5x) сохраняется значение минимального контактного сопротивления и наблюдается уменьшение минимальной температуры отжига, необходимой для получения минимального контактного сопротивления.

3) Особенности фазовых превращений в омических контактах на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, происходящих во время высокотемпературного отжига при различных температурах, отличающиеся от превращений в системах металлизации Ti/Al/x/Au отсутствием нитридных фаз (MoN, AlN), образованием фаз AlMo_3 , $\text{Al}_{3+x}\text{Mo}_{1-x}$ и GaMo_3 , что согласуется с получением омических характеристик контактов, причем, при отсутствии слоя Au данная картина не наблюдается.

4) При использовании в качестве верхнего слоя в системе металлизации Mo/Al/Mo/x металлов подгруппы меди (Cu, Ag, Au) с увеличением их атомного номера наблюдается существенное улучшение контактного сопротивления, вместе с тем контакты, изготовленные с использованием металлов соседней подгруппы никеля (Ni, Pd, Pt), демонстрируют сильно нелинейные вольт-амперные характеристики вне зависимости от атомного номера металла.

5) Подход к измерению слоевого сопротивления ДЭГ под омическим контактом к гетероструктуре $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, основанный на совмещении измерений слоевого сопротивления металлизации, измерений слоевого сопротивления ДЭГ вне контакта методом TLM и измерений методом, основанном на определении сопротивления протеканию тока через набор полосковых омических контактов в зависимости от длины полосков, а также результаты сравнения данного подхода со стандартными методами, основанными на определении остаточного сопротивления.

6) Значение переходного контактного сопротивления омических контактов на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au (10/50/55/50 нм) к гетероструктурам $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ при повышении температуры от 300 до 473 К уменьшается, а его температурная зависимость описывается механизмом для термополевой эмиссии.

Степень достоверности и апробация работы

Достоверность результатов подтверждается использованием современного технологического, измерительного и исследовательского оборудования, современных методов исследований (XRD, AES, SEM, TEM, EDS); достаточной выборкой экспериментальных образцов и объёмом измерений; непротиворечивостью результатам проводившихся ранее исследований и современным представлениям физики контактов металл-полупроводник.

Основные результаты работы доложены на XIII научно-технической конференции специалистов «Твёрдотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА» (Дубна, 2014 г., 2017 г.), Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и

приборы» (Санкт-Петербург, 2015 г., Москва, 2017 г.), Международной конференции «Микро- и нанoeлектроника – 2016» (ICMNE-2016) (Звенигород, 2016 г.).

Внедрение результатов работы и связь с плановыми научными исследованиями:

1) Результаты проведенной работы внедрены в АО «НПП «Пульсар» и используются при разработке СВЧ транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, монолитных интегральных схем на их основе, СВЧ шумовых и переключательных диодов на основе GaN.

2) Результаты работы частично использованы при выполнении проектов в рамках финансовой поддержки Министерства образования и науки РФ в рамках Государственного задания вузу № 3.2794.2017/4.6 и Соглашения о предоставлении Субсидии № 075-02-2018-210 от 26.11.2018 г. (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57818X0266) при отработке методик измерения параметров омических контактов к структурам ядерных детекторов на основе GaAs, GaN и алмаза.

Личный вклад автора

Автору работы принадлежит основная роль в определении задач, постановке и проведении экспериментов и измерений, анализе и обработке данных. Результаты обсуждались совместно с научным руководителем диссертационной работы и соавторами публикаций, выводы и положения, выносимые на защиту были сформулированы автором.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах, в том числе 5 работ опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК (2 работы входят в Scopus). Получено свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной схемы.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем работы составляет 182 страницы машинописного текста, включая 90 рисунков, 21 таблицу и список литературы из 172 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и задачи исследований, приведены научная новизна и практическая ценность, сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы в области технологии создания омических контактов к GaN и гетероструктурам AlGaIn/GaN. Показано, что основные механизмы, приводящие к формированию омических контактов к GaN следующие: снижение потенциального барьера за счет формирования в процессе отжига на границе металл/полупроводник фаз с низкой работой выхода; образование нитридных фаз, приводящее к формированию в приповерхностном слое полупроводника вакансий N, ведущих себя как доноры, и увеличению туннельной составляющей тока; образование металлических шунтов.

Для гетероструктур AlGaIn/GaN наблюдаются те же механизмы, однако, в отличие от GaN, наличие широкозонного барьерного слоя и DEG значительно усложняет технологию создания контактов. Прежде всего, AlGaIn имеет низкую плотность поверхностных состояний и уровень Ферми не закреплен на поверхности полупроводника, при этом высота потенциального барьера на границе металл/полупроводник будет определяться разницей работ выхода электрона из металла и сродства к электрону $Al_xGa_{1-x}N$, которое достаточно низко, в сравнении с GaN, и меняется от 0.6 до 2.5 эВ (для AlN). По этой причине большинство металлов будет проявлять выпрямляющие характеристики в отличие от GaN. Работа выхода образующихся при отжиге фаз также должна быть ниже, чем в случае GaN. Также к образованию омического контакта может приводить образование областей сплавления, уменьшающих толщину широкозонного полупроводника, либо образование шунтов вдоль проникающих дислокаций, приводящих к прямой "закоротке" металлизации и ДЭГ. С другой стороны, при определенной толщине AlGaIn (например при утонении AlGaIn) слоевая концентрация электронов в ДЭГ может сильно уменьшаться, что приводит к увеличению контактного сопротивления. Также сильное влияние оказывает наличие собственных окислов и гидроксидов на поверхности AlGaIn. Стоит отметить значительное влияние на ВАХ контактов GaN сар-слоя, необходимого для защиты AlGaIn от окисления. Вставка AlN, расположенная на интерфейсе AlGaIn/GaN и необходимая для улучшения подвижности в ДЭГ, также может отрицательно влиять на омические характеристики контактов. Дополнительно необходимо учитывать полярную природу GaN, которая приводит к большой разнице в характеристиках при использовании GaN/AlGaIn или AlGaIn/GaN гетероструктур.

Таким образом, формирование контактов к AlGaIn/GaN является сложной задачей, для решения которой необходимо учитывать: последовательность и толщины слоев металлов; температуру, длительность и условия термического отжига; условия и методы напыления металлизации; полярность поверхности полупроводника; наличие собственного окисла и

различных загрязнений на поверхности полупроводника; конструкцию и качество эпитаксиальных структур и др.

Во второй части обзора внимание уделено механизмам токопереноса в омических контактах к гетероструктурам AlGaIn/GaN, которые имеют свои особенности из-за наличия широкозонного барьерного слоя и ДЭГ. Рассмотрены механизмы термоэлектронного переноса, термополевой и полевой эмиссии. Также рассмотрен механизм, характерный для сплавных омических контактов, – протекание тока по металлическим шунтам. Рассмотрено поведение переходного контактного сопротивления ρ_c в зависимости от температуры для перечисленных механизмов. Обсуждаются современные модели и подходы к расчету ρ_c омических контактов к гетероструктурам AlGaIn/GaN. Представлены результаты исследований механизмов токопереноса для различных систем металлизаций, конструкций гетероструктур, режимов обработки полупроводника и режимов вжигания, полученные разными авторами. Показано, что данные представления необходимы для понимания дальнейших путей оптимизации характеристик омических контактов к AlGaIn/GaN.

Значительная часть обзора посвящена механизмам формирования омических контактов на основе различных систем металлизаций, рассмотрена их микроструктура, фазовые превращения и механизмы, приводящие к получению омических характеристик: вплавление металлизации в полупроводник до области двумерного электронного газа; образование в процессе отжига интерметаллических фаз с низкой работой выхода электрона в процессе отжига; подлегирование за счет диффузии Si, либо за счет образования нитридов металлов и соответствующих вакансий N в барьерном слое, приводящее к увеличению вероятности туннелирования электронов через него; образование металлических шунтов. В третьей части рассмотрены особенности формирования омических контактов на основе Ti, Al и на основе системы металлизации Ti/Al, а также на основе системы металлизации типа Ti/Al/x/Au. В четвертой части подробно обсуждаются омические контакты на основе тугоплавких металлов (Cr, Hf, V, Ta, Mo). Показана перспективность использования системы Mo/Al/Mo/Au в качестве омических контактов для AlGaIn/GaN HEMT в первую очередь с точки зрения высокой термической стабильности и возможности получать низкие переходные сопротивления в широком диапазоне температур.

В заключительной части рассмотрены способы улучшения параметров омических контактов, такие как: ионная имплантация кремнием подконтактных областей; напыление дополнительного слоя Si; плазменная обработка подконтактных областей; термическая обработка перед напылением металлизации. Рассмотрена альтернативная технология создания контактов к AlGaIn/GaN гетероструктурам – дорачивание n^+ -слоев в подконтактные области. Показано, что вжигаемые контакты имеют преимущества, прежде всего с точки зрения снижения числа технологических операций, и исследования в области вжигаемых контактов на основе тугоплавких металлов до сих пор являются актуальными.

Во второй главе описаны методики исследования омических контактов, используемые в работе, а также представлен новый подход к измерению слоевого сопротивления ДЭГ под контактом, предложенный автором. В ходе работ использовались эпитаксиальные гетероструктуры (ЭГС) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ двух типов, выращенные МОС-гидридной эпитаксией на подложках сапфира. Конструкции ЭГС и соответствующие параметры ДЭГ представлены на рисунке 1.

$R_{sh} = 295\text{-}325 \text{ Ом/кв.}$ $n_s = (1.10\text{-}1.30) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ $\mu_n = 1700\text{-}1760 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ $x = 28\text{-}34 \%$	$R_{sh} = 405 \text{ Ом/кв.}$ $n_s = 1.30 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ $\mu_n = 1225 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
i-Al _x Ga _{1-x} N, 15-26 нм	i-GaN, 1.5 нм
AlN, 0.6-0.7 нм	i-Al _{0.3} Ga _{0.7} N, 20 нм
i-GaN, 2.5 мкм	i-GaN, 2.3 мкм
Сапфир (0001)	Сапфир (0001)
ЭГС 1-го типа	ЭГС 2-го типа

Рисунок 1 – Конструкции ЭГС с указанием параметров двумерного электронного газа

Изготовление тестовых контактов проводилось с использованием стандартных методов микроэлектроники. Изоляция активной области осуществлялась с помощью создания мезоструктуры реактивным ионно-лучевым травлением в атмосфере CF_4 на глубину 70 нм. Далее с использованием «lift-off» процесса проводилось формирование рисунка контактной металлизации. Перед этим поверхность AlGaN обрабатывалась в $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$ (1:1) в течение 1 мин. Формирование системы металлизации проводилось с использованием магнетронного (Mo) и термического напыления металлов (Au, Al), реализованных на установке УВН-71П-3, при остаточном давлении не хуже $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., либо методом электронно-лучевого распыления на установке Temescal FC2000 (Temescal, США) (остаточное давление не хуже $5.0 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст.) Толщины слоев металлов контролировались стилусным профилометром Р-7 (KLA Tencor, США). Быстрый термический отжиг проводился в печи JetFirst 200C (Jipelec, Франция) в атмосфере азота при давлении 1 атм в диапазоне температур от 500 до 950°C.

Измерение переходного контактного сопротивления r_c и контактного сопротивления R_c проводилось методом длинной линии (TLM – Transmission Line Method). Для определения значения R_c этим методом строится график зависимости общего сопротивления R_T двух одинаковых контактов от расстояния между ними l_i , получаемая линейная зависимость пересекает ось ординат в значении $2R_c$ и ось абсцисс в значении по модулю равном L_x (рис. 2,б):

$$R_T(l_i) = 2 \cdot R_c + \frac{R_{sh} \cdot l_i}{w}, \quad (1)$$

$$L_x = \frac{2R_{sh} \cdot L_T}{R_{sk}}, \quad (2)$$

где R_{sh} – слоевое сопротивление полупроводника вне области омических контактов, R_{sk} – слоевое сопротивление полупроводника под омическими контактами; L_T – характеристическая длина втекания тока под омический контакт. Значение ρ_c определяется как:

$$\rho_c = R_{sk} \cdot L_T^2. \quad (3)$$

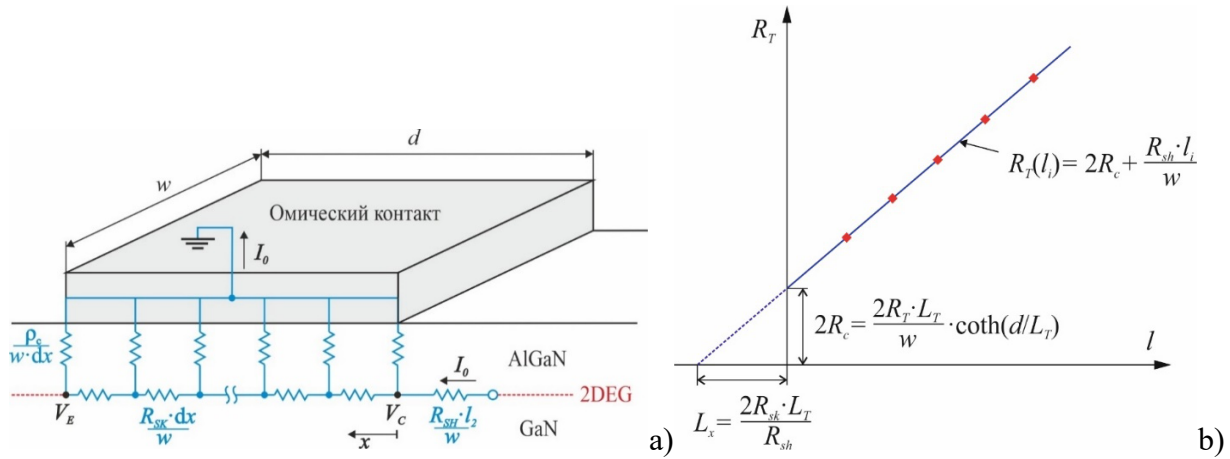


Рисунок 2 – Схематическое изображение втекания тока в омический контакт (a) и график $R_T=f(I_i)$ (b)

В работе использовались TLM-структуры, состоящие из восьми квадратных контактных площадок размером 100×100 мкм, расположенных друг от друга на расстояниях 5, 10, 15, 20, 25, 30 и 35 мкм (рис. 3). Электрические характеристики контактов измерялись методом Кельвина с использованием анализатора характеристик п/п приборов Agilent B1500A. Температурные зависимости ВАХ измерялись с помощью зондовой станции Cascade Microtech PA200.

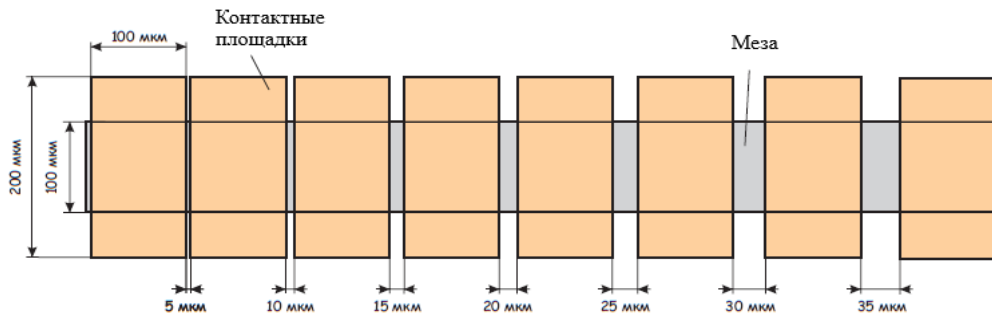


Рисунок 3 – Тестовая TLM-структура

Исходя из формулы (3) для определения ρ_c нужно знать L_T и R_{sk} , значение которого может отличаться от значения R_{sh} . Причиной тому может быть впавление металлизации в полупроводник во время отжига, контакт металл-полупроводник также может снижать концентрацию в ДЭГ под ним. Определение L_T также требует знания R_{sk} , как видно из (3). Во многих работах для упрощения вычислений принимают $R_{sk}=R_{sh}$, что может привести к сильному искажению результатов [10].

Два метода определения R_{sk} были описаны в работе [11] Ривзом и Гаррисоном: метод «separate current and voltage measurement» (SCVM) и метод «extra resistance measurement» (ERM). Суть обоих методов заключается в измерении «остаточного сопротивления» R_E , которое исходя из рисунка 2,a, определяется по следующей формуле:

$$R_E = \frac{V_E}{I_0} = \frac{\sqrt{R_{sk} \cdot \rho_c}}{w} \cdot \frac{1}{\sinh \frac{d}{L_T}} = \frac{\rho_c}{L_T \cdot w} \cdot \frac{1}{\sinh \left(\frac{d}{L_T} \right)}, \quad (4)$$

где V_E – остаточное напряжение, w и d – ширина и длина контактной площадки, соответственно.

Следует отметить, что R_E сильно зависит от соотношения d и L_T . Так, при $d \gg L_T$ величина R_E стремится к нулю, а в случае $d \ll L_T$ значение R_E стремится к R_c , как следует из:

$$\frac{R_c}{R_E} = \cosh \left(\frac{d}{L_T} \right). \quad (5)$$

Таким образом, для определения R_E необходимо изготовление тестов, подобных представленному на рис. 4. Отсюда вытекает основной недостаток методов, основанных на измерении R_E , – сложность изготовления контактных площадок малой длины. Очевидно, что для повышения точности измерений должно соблюдаться условие $d \ll L_T$, и для контактов с низким сопротивлением необходимо будет формирование площадок длиной менее 1 мкм, что сильно усложняет допыление толстой металлизации для уменьшения ее слоевого сопротивления с целью получения эквипотенциального металлического электрода.

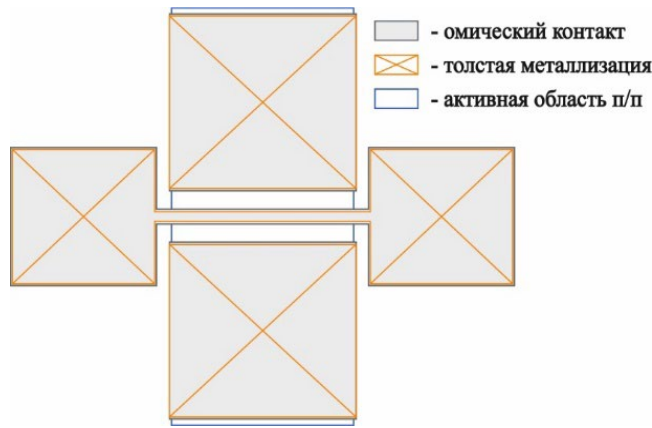


Рисунок 4 – Топология тестовых структур для методов, основанных на измерении R_E

Впервые Sawdai в [12] для вычисления слоевого сопротивления полупроводника под контактом было предложено использовать тест TLM, содержащий между площадками дополнительные контакты, находящиеся под плавающим потенциалом. Автором представлен новый подход определения R_{sk} , дополняющий метод Sawdai и имеющий упрощенную технологию изготовления тестовых структур в сравнении с методами SCVM и ERM. Метод основан на измерении сопротивления R_x протеканию электрического тока через набор нескольких омических контактов, расположенных между двумя крайними, на которые подается разность потенциалов (рис. 5,а). Исходя из схемы, представленной на рис. 5,б, сопротивление R_x в зависимости от длины контакта d определяется по следующей формуле:

$$R_x(d) = R_T(d) - 2 \cdot R_{c0} - R_{sh} \cdot \frac{l_{12} + l_{23}}{w}, \quad (6)$$

где, $R_T(d)$ – общее сопротивление между двумя крайними контактными площадками с длинами $d_0 \gg L_T$, l_{12} и l_{23} – расстояния между соответствующими контактными площадками.

Как видно из рисунка 5,а, существует два пути протекания тока [13] через область контактных площадок, расположенных посередине, – через ДЭГ и через омический контакт. В случае, когда $d \gg L_T$ ток будет втекать в омический контакт, протекать через металлизацию и снова втекать в ДЭГ с противоположной стороны площадки и значение $R_x(d)$ будет стремиться к:

$$R_x(d) \approx 2 \cdot R_{c0} + R_{sm} \frac{d}{w}, \quad (7)$$

где R_{sm} – слоевое сопротивление металлизации омического контакта, которое измеряется на отдельной тестовой структуре в виде полоски. Для другого крайнего случая, когда $d \ll L_T$, большая часть тока будет протекать через ДЭГ:

$$R_x(d) \approx R_{sk} \cdot \frac{d}{w}. \quad (8)$$

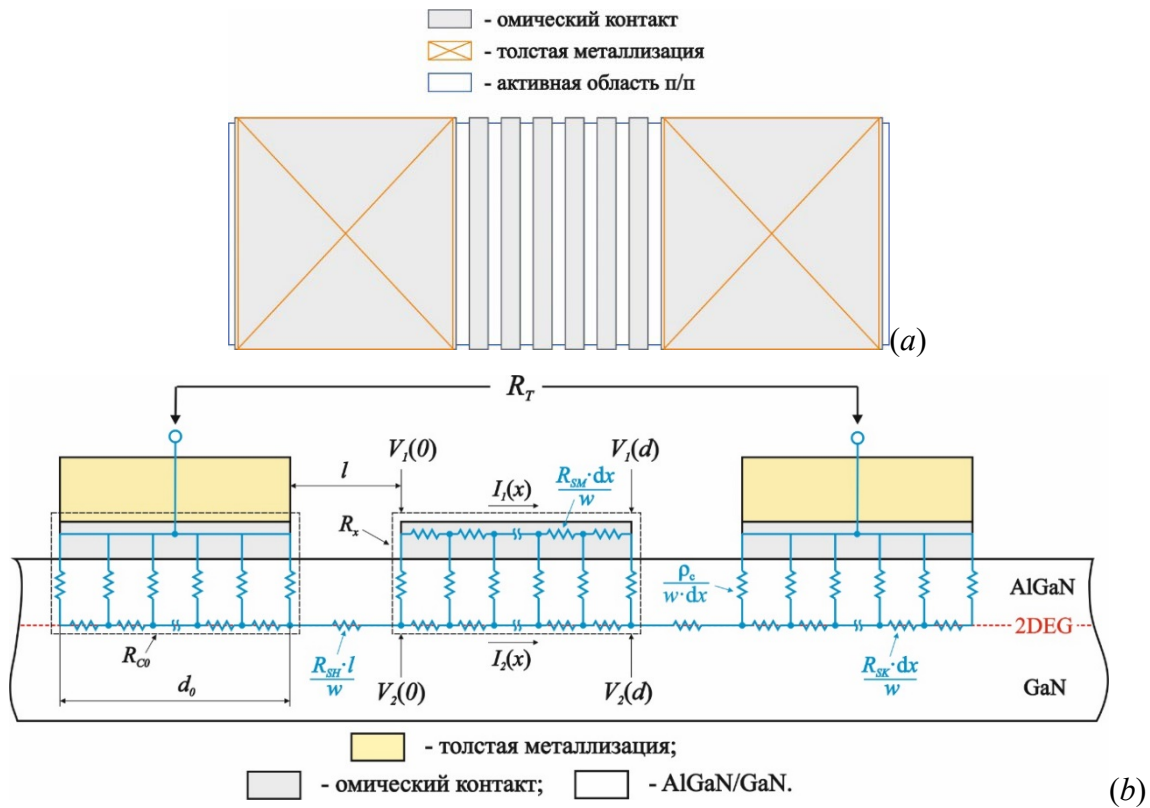


Рисунок 5 – Пример топологии тестовой структуры для измерения модифицированным методом Sawdai (a) и соответствующая схема измерения (b)

Из зависимости $R_x(d)$ вычисляется значение R_{sk} . Для этого численно решается система дифференциальных уравнений Кирхгофа (9) и (10), описывающих эквивалентную схему, представленную на рис. 5,б:

$$\rho_c \frac{\partial^2 I_2(x)}{\partial x^2} - R_{sk} I_2(x) + R_{sm} I_1(x) = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial I_1(x)}{\partial x} + \frac{\partial I_2(x)}{\partial x} = 0. \quad (10)$$

При этом задаются следующие граничные условия:

$$I_1(0) = I_0, I_2(0) = 0, \quad (11)$$

$$I_1(d) = I_0, I_2(d) = 0. \quad (12)$$

Падение напряжения в контакте прямоугольной формы описывается уравнением:

$$V_2(d) = \frac{\rho_c}{w} \frac{dI_2(x)}{dx} \Big|_d + \frac{R_{sm}}{w} \int_0^d I_1(x) dx. \quad (13)$$

Следовательно, зависимость $R_x(d)$ представляется как:

$$R_x(d) = V_2(d)/I_0. \quad (14)$$

Преимуществом предложенного подхода является отсутствие литографии «окно в окно» для коротких контактных площадок. В ходе эксперимента были изготовлены омические контакты на основе систем металлизаций Mo/Al/Mo/Au (10/50/55/5 нм) и Ti/Al/Mo/Au (15/60/55/50 нм) к ЭГС1. Отжиг контактов проводился в течение 30 с при температурах 800 и 850 °С для систем Mo/Al/Mo/Au и Ti/Al/Mo/Au, соответственно. Допыление проводилось с помощью системы Ti/Au (20/1000 нм).

При определении R_{sk} методами SCVM и ERM использовался набор тестовых структур, представленный на рисунке 6,а, который состоит из двух TLM-тестов, тестов для измерения R_{sm} и R_{sh} и серии тестов с различными длинами контактных площадок (1.5 до 100 мкм) для определения R_E . Для определения R_{sk} модифицированным методом Sawdai был использован набор тестовых структур, представленный на рисунке 6,б. В серии тестов для измерения R_x длина контактных площадок, расположенных посередине, варьировалась от 1.5 до 200 мкм. R_{sm} и R_{sh} определялись из дополнительных измерений с использованием тестов для измерения слоевого сопротивления металлизации и тестов TLM, соответственно.

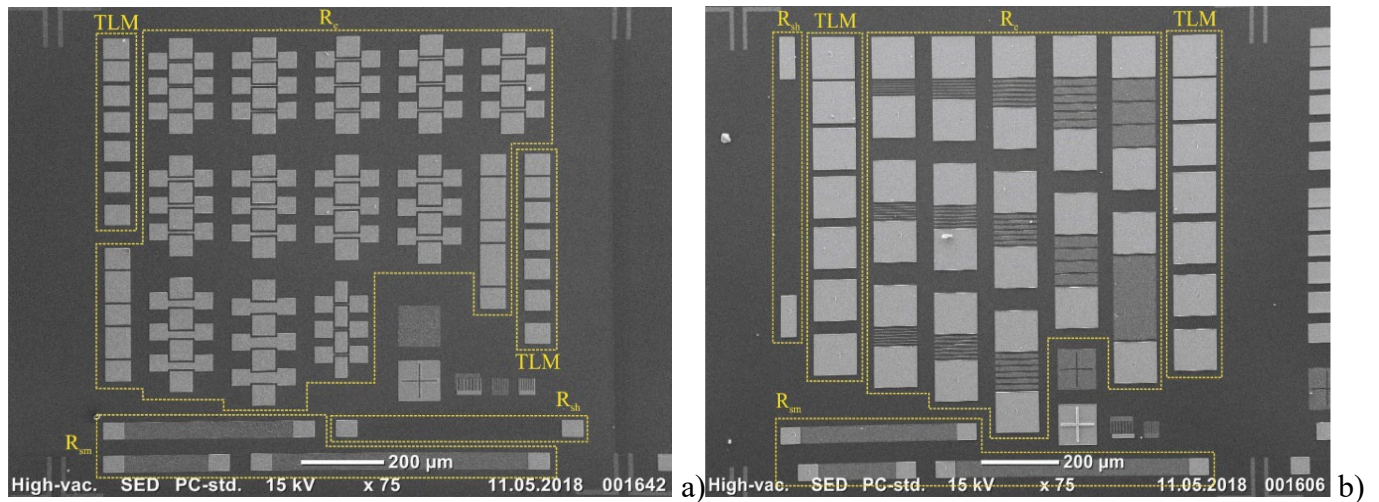


Рисунок 6 – Набор тестовых структур для измерения методами SCVM и ERM (а) и набор тестов для проведения измерений модифицированным методом Sawdai (б)

Экспериментально полученные с помощью методов SCVM и ERM зависимости R_c/R_E от d , аппроксимированные функцией $f(d)=\cosh(d/L_T)$ представлены на рисунке 7. Экспериментальные зависимости R_x от d и их аппроксимация выражениями (13) и (14) представлены на рисунке 8. Значения R_{sh} , R_{sk} , L_T , R_c и ρ_c , измеренные всеми тремя методами для омических контактов Mo/Al/Mo/Au и Ti/Al/Mo/Au к гетероструктуре AlGaIn/GaN приведены в таблице 1.

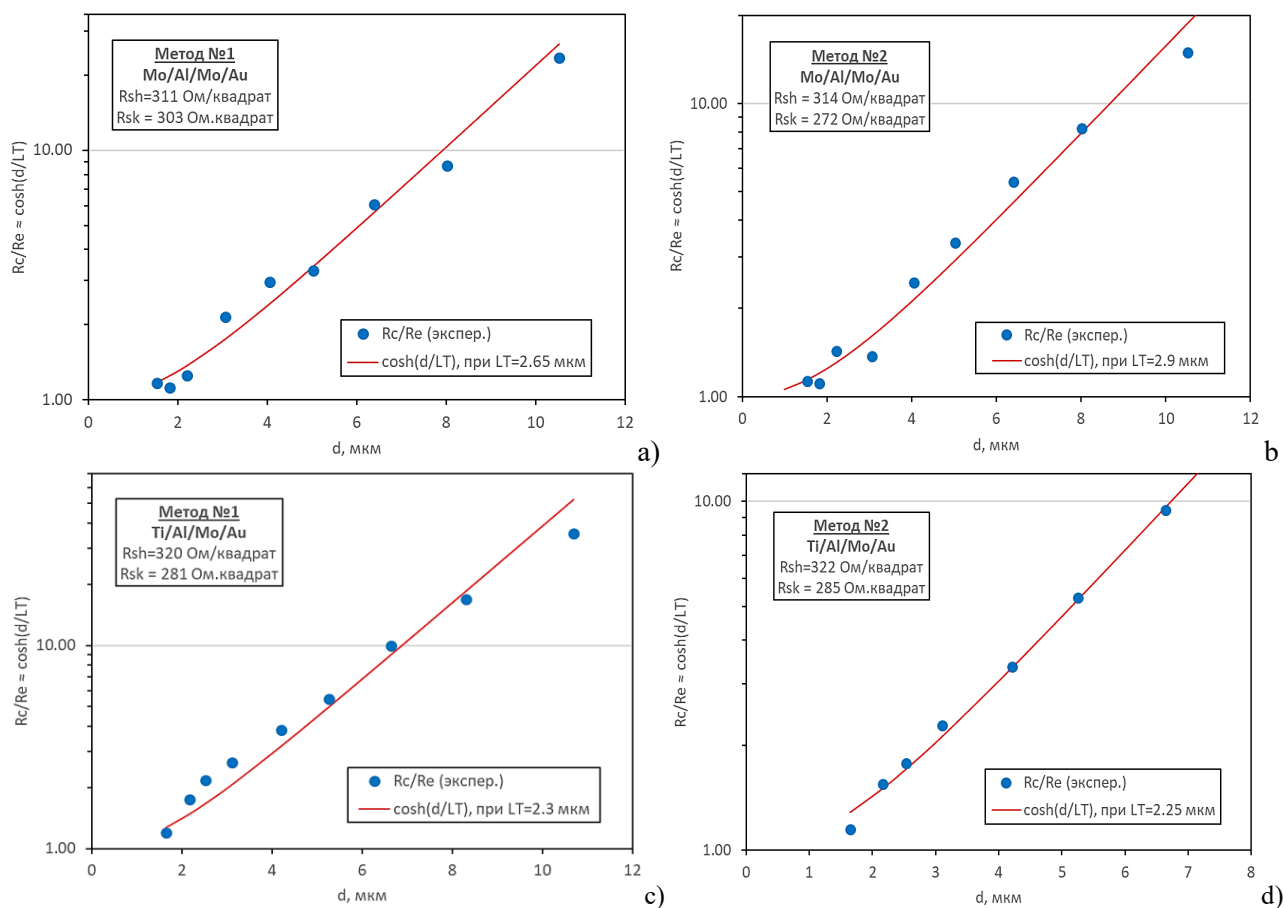


Рисунок 7 – Экспериментально полученные с помощью методов SCVM (№1) и ERM (№2) зависимости R_c/R_e от d , аппроксимированные функцией $f(d)=\cosh(d/L_T)$ для контактов Mo/Al/Mo/Au и Ti/Al/Mo/Au

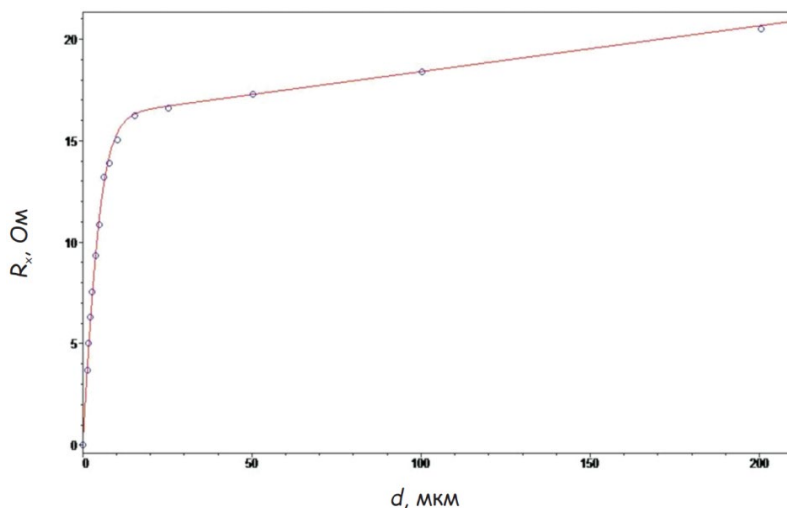


Рисунок 8 – Экспериментально полученные с помощью модифицированного метода Sawdai зависимости R_x от d , аппроксимированные зависимостью (14) с помощью Maple (Mo/Al/Mo/Au)

Таблица 1 – Сравнение методов измерения R_{sk}

Омический контакт	Метод	R_{sh} , Ом/кв.	R_{sk} , Ом/кв.	$(R_{sk}/R_{sh}) \cdot 100\%$	L_T , мкм	R_c , Ом·мм	ρ_c , Ом·см ²	$\rho_c (R_{sk}=R_{sh})$, Ом·см ²
Mo/Al/Mo/Au	SCVM	311	300	96.5	2.7	0.81	$2.13 \cdot 10^{-5}$	$2.08 \cdot 10^{-5}$
	ERM	314	268	85.4	2.9	0.80	$2.28 \cdot 10^{-5}$	$1.97 \cdot 10^{-5}$
	Новый	317	277	87.4	2.9	0.81	$2.33 \cdot 10^{-5}$	$2.28 \cdot 10^{-5}$
Ti/Al/Mo/Au	SCVM	320	322	100.6	2.3	0.65	$1.49 \cdot 10^{-5}$	$1.31 \cdot 10^{-5}$
	ERM	322	284	88.2	2.25	0.64	$1.44 \cdot 10^{-5}$	$1.28 \cdot 10^{-5}$
	Новый	327	300	91.7	2,25	0,65	$1.52 \cdot 10^{-5}$	$1.33 \cdot 10^{-5}$

Как видно из таблицы 1, измерения всеми 3 методами показали близкие результаты. Для обоих омических контактов значение R_{sk} составило $\sim 90\%$ от значения R_{sh} . Разброс значений слоевого сопротивления, измеренного методом SCVM составил 20%, для метода ERM разброс был 11 %, тогда как для модифицированного метода Sawdai он не превышал 3 %. Разброс значений R_{sh} при измерении методом TLM был также не более 3 %. Также следует отметить незначительное различие в значениях ρ_s , полученных при условиях $R_{sk} \neq R_{sh}$ и $R_{sk} = R_{sh}$. Таким образом, для омических контактов к гетероструктурам AlGaIn/GaN, в которых в результате термического отжига металлизация не вплавляется в AlGaIn, при измерении контактного сопротивления методом TLM можно считать значение R_{sk} равным значению R_{sh} .

Далее перечислены методики, используемые в данной работе для изучения морфологии и микроструктуры контактов:

Морфология контактов контролировалась с помощью микроскопа JSM-6480LV (фирма JEOL, Япония), при ускоряющих напряжениях 5, 10 и 15 кВ.

Измерения методом просвечивающей электронной микроскопии проводились с помощью микроскопа JEM 2100 (JEOL, Япония) с LaB₆ катодом повышенной яркости, при ускоряющем напряжении 200 кВ. Образцы готовились в поперечном сечении с помощью РЭМ, оснащенного сфокусированным ионным пучком.

Картирование распределения элементов по поверхности контактных площадок производилось с использованием энергодисперсионного спектрометра (ЭДС) в составе РЭМ JSM-6480LV (фирма JEOL, Япония), при ускоряющих напряжениях 5, 10 и 15 кВ. Для исследования элементного состава зерен и границы раздела металл-полупроводник использовался энергодисперсионный рентгеновский спектрометр JED-2300 интегрированный в ПЭМ JEM2100.

Измерение параметров шероховатости поверхности контактов проводилось при комнатной температуре с помощью атомно-силового микроскопа марки MFP-3D Stand Alone (фирма Asylum Research, США). Поле сканирования было выбрано равным 20 мкм × 20 мкм.

Измерения методом рентгеновской дифрактометрии проводились на многоцелевом рентгеновском дифрактометре D8 Discover (фирма Bruker-AXS, Германия). Измерения выполнялись в геометрии 2 θ - ω . Дифрактограммы обрабатывались в программе EVA (Bruker-AXS) с базой данных химических соединений ICDD PDF-2 (2004).

Профили концентрации элементов по глубине были получены на установке электронной Оже-спектроскопии PHI-680 (фирма Physical Electronics, США) при следующих условиях: энергия первичного пучка 10 кэВ, ток первичного пучка 10 нА, диаметр первичного пучка 40 нм, глубина анализа 5–50 Å, давление остаточных газов в исследовательской камере $3 \cdot 10^{-9}$ Торр.

В третьей главе описана отработка оптимальной технологии формирования омического контакта на основе системы Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGaIn/GaN. На первом этапе

проводился выбор оптимальной температуры и времени отжига. Исходные толщины слоев системы металлизации Mo/Al/Mo/Au были 10/40/40/40 нм, где толщины первых двух слоев выбирались в соответствии с работой [8]. Сначала образцы отжигались в диапазоне температур от 600 до 950 °C в течение 30 с. На рисунке 9,а представлены полученные зависимости ρ_c от температуры отжига. Как видно, наилучшие электрические параметры контакта наблюдаются при температурах от 750 до 900 °C. В этом диапазоне температур отжига ВАХ контактов демонстрировали омическое поведение, для других температур характеристики были сильно нелинейны. Минимальное значение ρ_c было получено при температуре отжига 800 °C и составило $7 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Далее при выбранной оптимальной температуре отжига был проведен поиск оптимального времени отжига, полученная зависимость ρ_c представлена на рисунке 9,б. При увеличении времени отжига до 140 с наблюдалось постепенное уменьшение значения ρ_c , однако при этом происходило заметное ухудшение морфологии контакта, по этой причине время отжига было оставлено равным 30 с.

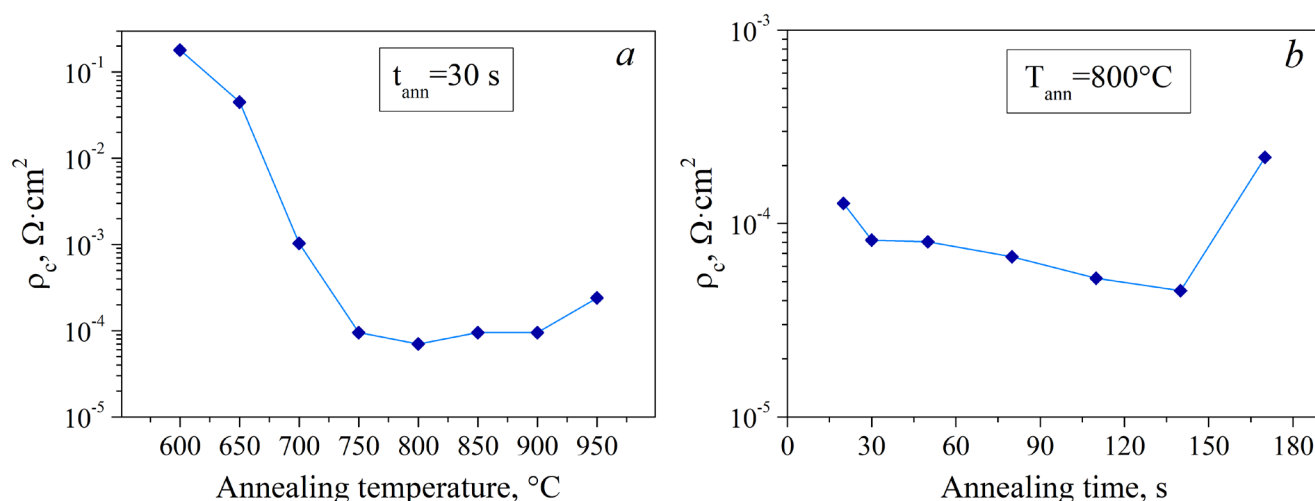


Рисунок 9 – Зависимость ρ_c контакта на основе Mo/Al/Mo/Au: а) от температуры отжига (время отжига 30 с); б) от времени отжига при 800°C

Затем при выбранном оптимальном температурно-временном режиме отжига (800°C, 30 с) было проведено исследование влияния толщин слоев металлизации на параметры контакта. Полученные зависимости представлены на рисунке 10.

Таким образом, были определены оптимальные толщины слоев системы металлизации Mo/Al/Mo/Au (10/60/50/50 нм). Лучшие значения ρ_c и R_c для данной системы на ЭГС1 составили соответственно $8.0 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ и 0.54 Ом·мм. При этом, изготовленный по этой же технологии к ЭГС2 омический контакт показал значительно более низкие значения контактного сопротивления – $4.7 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ и 0.14 Ом·мм, соответственно. Следует отметить, что в последствии при переходе с напылительной установки УВН-71П-3 на электронно-лучевую машину Temescal FC 2000 соотношение слоев металлов было оптимизировано (10/50/55/50 нм) из-за различной плотности слоев Mo, при этом структура и морфология контактов осталась неизменной.

Исследование фазового состава металлизации контактов в зависимости от соотношения толщин слоев металлов было проведено методом рентгеновской дифрактометрии. На рисунке 11 представлены дифрактограммы для контактов на основе Mo/Al/Mo/Au, отожженных при 800 °C в течение 30 с, для различных толщин первого слоя Mo и слоя Al (при соотношении толщин слоев Mo/Al равном 1/4) и для различных соотношений толщин слоев Mo/Al, соответственно. На дифрактограммах присутствуют пики GaN, Al₂O₃, соответствующие материалам подложки, а также пики Al, Mo. Также были зарегистрированы дополнительные пики возможных интерметаллических соединений Al₂Au, GaMo₃, Al_{3+x}Mo_{1-x} и AlMo₃, что говорит о сильном перемешивании металлов в процессе термического отжига. Рассматривая поведение дифрактограмм для различных толщин слоев, и соотнося их с электрическими параметрами контактов, можно выделить некоторые общие особенности: пики Al₂Au, зарегистрированы для образцов с толщинами слоя Al более 60 нм, имеющих неприемлемую морфологию поверхности; пики Al_{3+x}Mo_{1-x}, AlMo₃ и GaMo₃ наблюдаются только для образцов, демонстрирующих омическое поведение вольт-амперных характеристик, а их интенсивность согласуется с величиной контактного сопротивления.

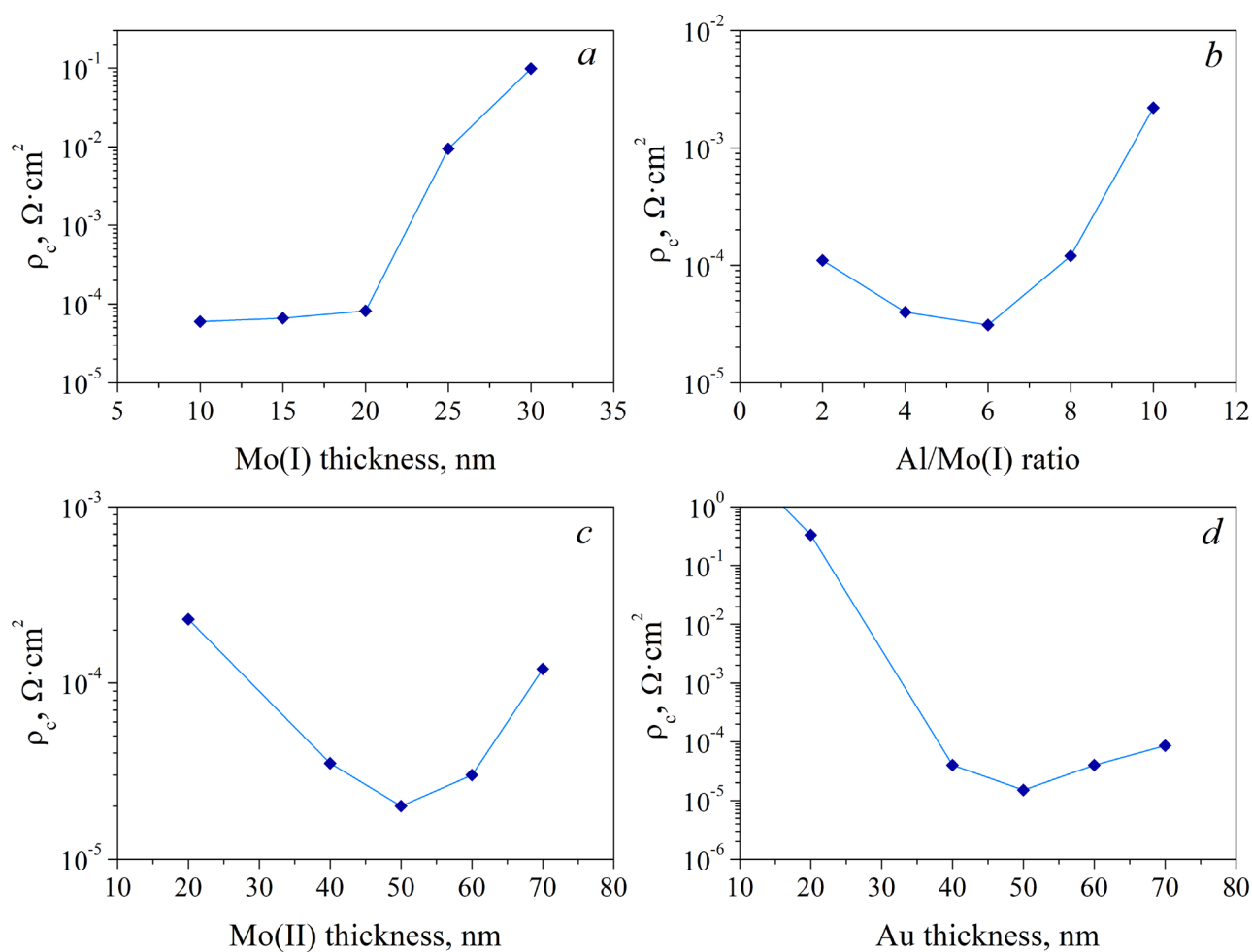


Рисунок 10 – Зависимость ρ_c от толщин слоев: а) от толщины первого слоя Mo при соотношении толщин слоев Mo/Al 1/4; б) от соотношения толщин слоев Mo/Al; в) от толщины второго слоя Mo; д) от толщины слоя Au

толщины контактной металлизации минимальная температура отжига постепенно снижается. Наиболее широкий диапазон температур отжига (от 700 до 900 °C) наблюдается для системы M3.

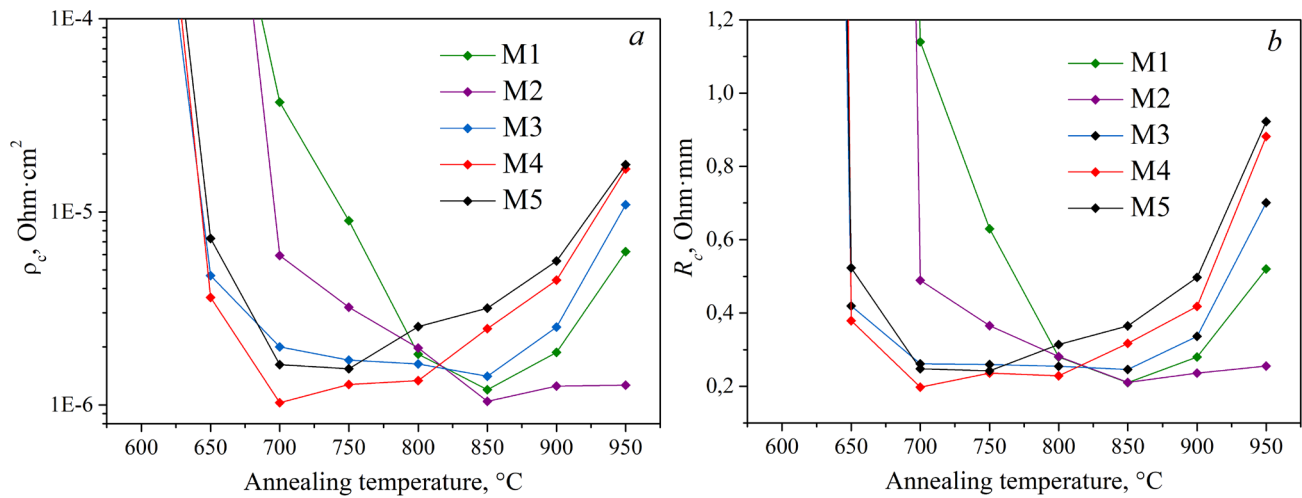


Рисунок 12 – Зависимости ρ_c (a) и R_c (b) от температуры отжига для контактов на основе систем M1–M5

На рис. 13 представлены морфологии поверхности контактов в зависимости от температуры отжига. Во всем диапазоне температур все контакты продемонстрировали ровную кромку. Стоит отметить, что морфологии поверхности контактов на основе тонких систем металлизаций M1 и M2 существенно отличаются от таковых для более толстых систем M3, M4 и M5. Однако для всех систем металлизаций исходя из изменения морфологии поверхности и результатов EDS анализа в исследуемом диапазоне температур отжига можно выделить следующие процессы: до температуры 700 °C происходит взаимная диффузия Al и Au сквозь слой Mo и их собирание в отдельные области; во время отжига при температурах более 700 °C происходит полное нарушение целостности слоев Mo и формирование зерен с преобладающим содержанием Mo и Al, что, возможно, играет важную роль при формировании омического контакта.

Для образцов, отожженных при 800 °C и имеющих минимальные значения контактного сопротивления и приемлемую морфологию, были определены параметры шероховатости поверхности. АСМ-изображения поверхности контактов представлены на рис. 14, а соответствующие значения среднеквадратичной R_q шероховатости, средней R_a шероховатости и корреляционных длин ξ приведены в таблице 2. Для неотожженного контакта на основе системы M3 значение R_q составило 1.4 нм, что сравнимо с таковым для поверхности гетероструктуры AlGaIn/GaN. После термического отжига наибольшую шероховатость поверхности имели контакты на основе тонких систем металлизаций M1 и M2. Наименьшее значение R_q , равное 15.9 нм, было получено для омического контакта на основе исходной системы M3. Также следует отметить, что образцы на основе систем M3, M4 и M5 продемонстрировали относительно низкую шероховатость поверхности по сравнению омическими контактами на основе широко используемой системы металлизации Ti/Al/Ni/Au.

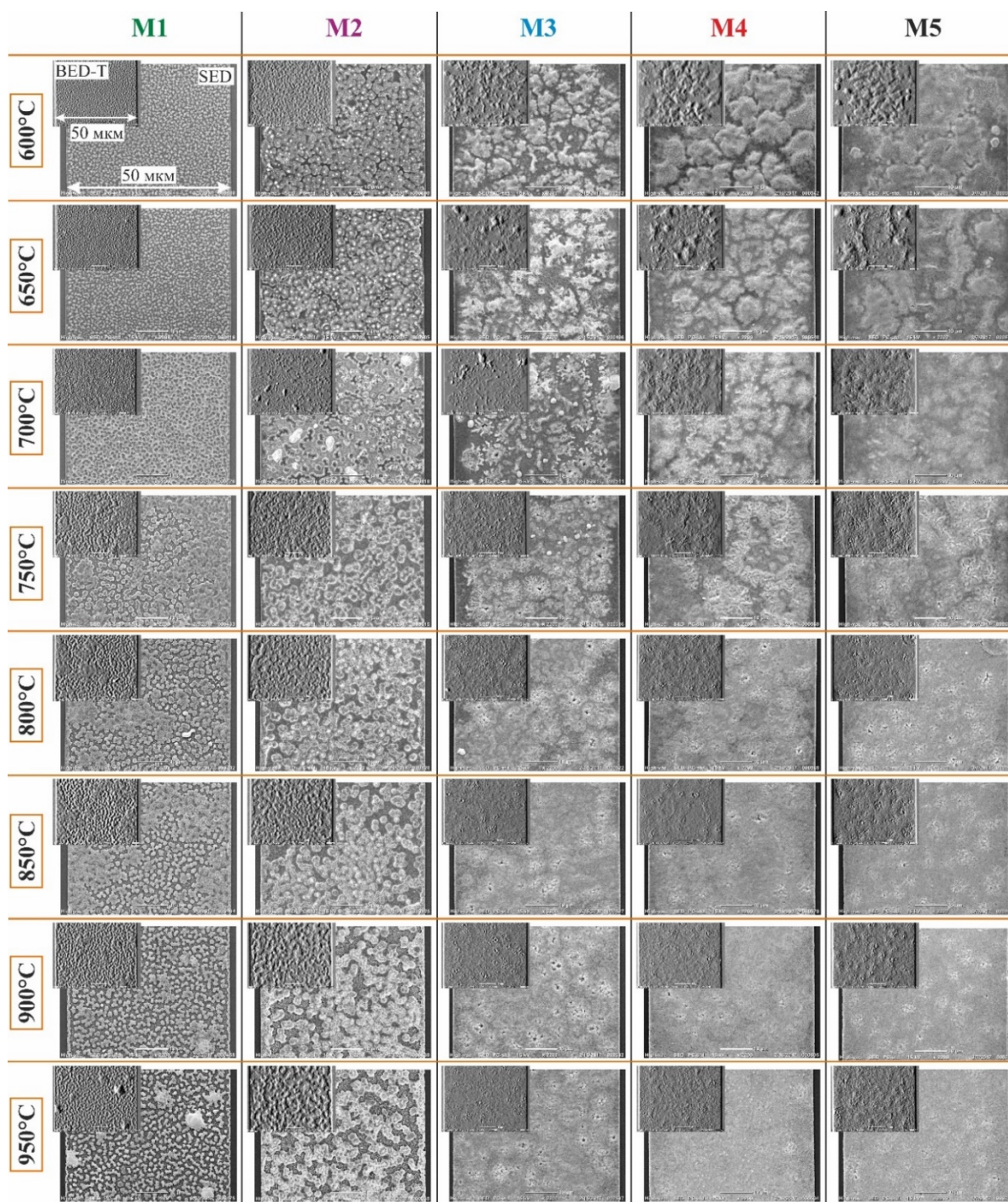


Рисунок 13 – Морфология контактов на основе различных систем металлизаций Mo/Al/Mo/Au, отожженных при температурах от 600 до 950°C

Таблица 2 – Значения R_q , R_a и ξ поверхности образцов.

Образец	R_q , нм	R_a , нм	ξ , нм
Гетероструктура	1.42	0.9	—
Неотожженный контакт	1.4	0.63	—
M1	25.6	20.4	458
M2	35.7	29.0	817
M3	15.7	11.7	574
M4	18.9	14.7	537
M5	20.8	15.7	592

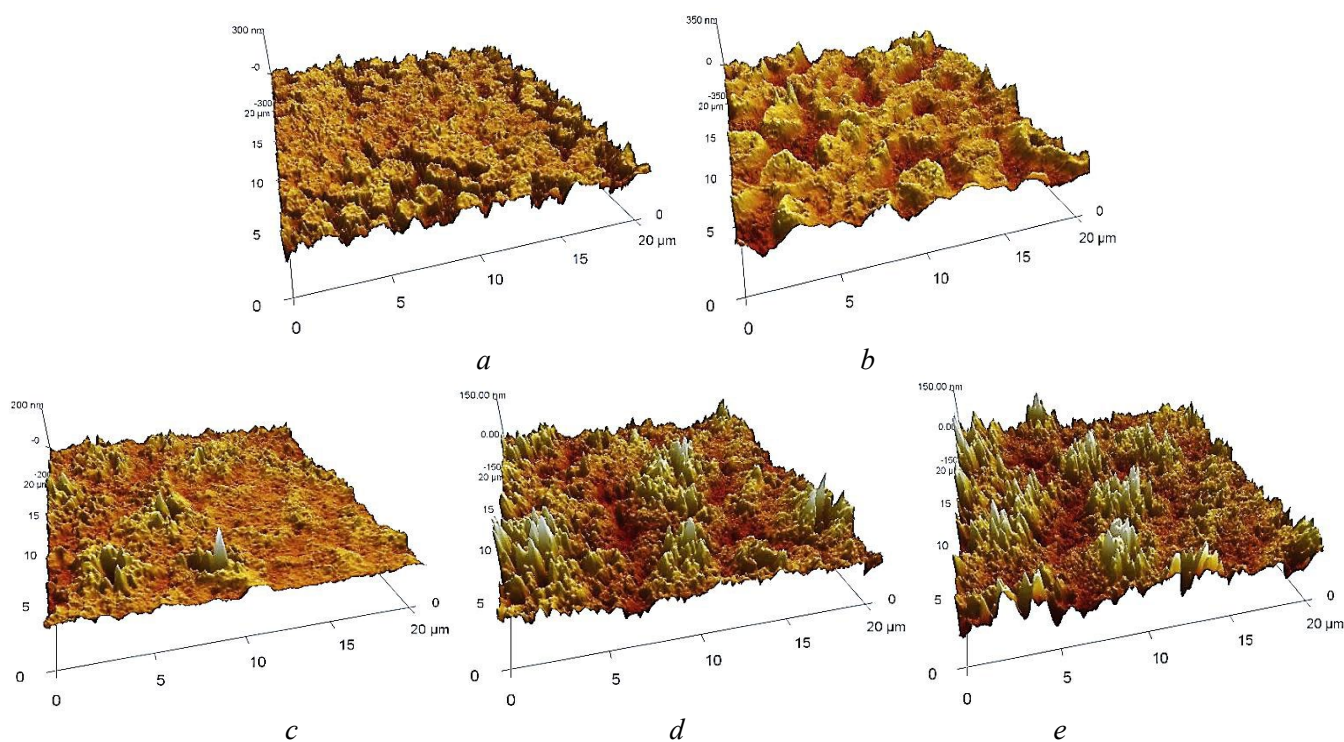


Рисунок 14 – Трехмерные АСМ-изображения поверхностей омических контактов на основе систем металлизаций: *a* – M1; *b* – M2; *c* – M3; *d* – M4; *e* – M5

Дополнительно было проведено исследование фазового состава контактов методом рентгеновской дифрактометрии. Для этого были изготовлены дополнительные образцы на основе двух систем металлизаций с наибольшей разницей в толщинах – M1 и M5. Исходя из зависимостей контактного сопротивления (рис. 12,*a* и 12,*b*) были выбраны температуры отжига 670, 725 и 800 °С. Было обнаружено, что для обеих систем металлизаций поведение дифрактограмм при изменении температуры отжига было схожим: увеличиваются интенсивности пиков, соответствующих фазам $\text{Al}_{3+x}\text{Mo}_{1-x}$, AlMo_3 и GaMo_3 ; уменьшаются интенсивности пиков, соответствующих интерметаллическому соединению Al_2Au .

Таким образом, для системы металлизации Mo/Al/Mo/Au можно утверждать, что при сохранении в контактах соотношения толщин слоев металлов независимо от общей толщины металлизации во время отжига при определенной температуре происходят преимущественно одни и те же фазовые превращения. Различие в поведении температурных зависимостей контактного сопротивления хорошо коррелирует с поведением интенсивностей дифракционных пиков в зависимости от толщины металлизации, и соответственно скорости фазообразования.

На рисунке 15 продемонстрирован захват знаков совмещения с помощью детектора вторичных электронов в процессе проведения электронной литографии, как видно для толстого контакта контраст значительно выше при этом он не уступает по своим электрическим характеристикам и морфологии.

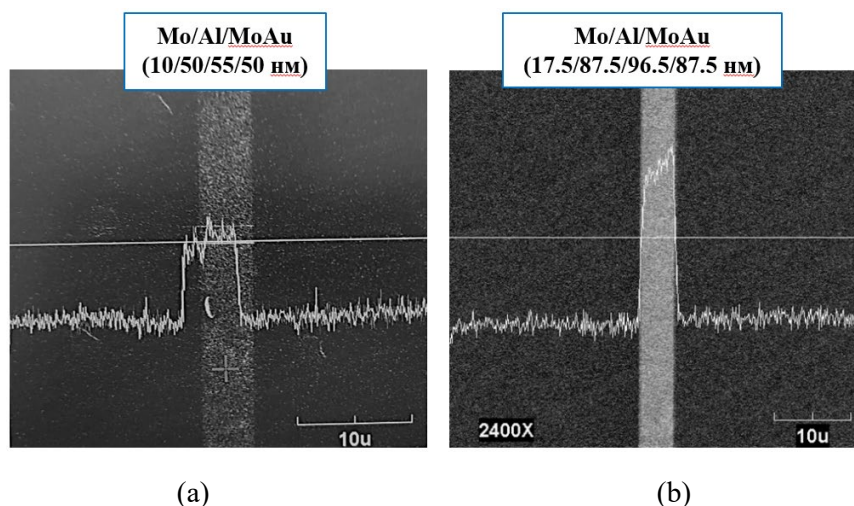


Рисунок 15 – Сигнал датчика системы электронно-лучевой литографии при поиске знака совмещения: а) знак не захватывается; б) знак захвачен

Четвертая глава посвящена исследованию микроструктуры контактов на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au. В эксперименте были использованы гетероструктуры типа ЭГС1. ВАХ и зависимости ρ_c от температуры отжига для контактов на основе Mo/Al/Mo/Au (10/60/50/50 нм) представлены на рисунке 16. Контакты непосредственно после напыления и отожженные при температурах менее 650 °С демонстрировали нелинейные ВАХ, в отличие от контактов, отожженных при температурах более 650 °С. Минимальные значения ρ_c , R_c были получены в диапазоне температур 700–800 °С ($\sim 8 \cdot 10^{-7}$ Ом·см² и ~ 0.2 Ом·мм, соответственно). Контакт без верхнего слоя Au, отожженный при температуре 750°С, демонстрировал сильно нелинейную ВАХ. Для исследования микроструктуры были выбраны: образец после напыления и образцы, отожженные при температурах 650, 750 и 900 °С, а также образец без верхнего слоя Au.

На рисунке 17 приведены профили распределения элементов по глубине контактов, полученные методом электронной Оже-спектроскопии. Как видно для неотожженного образца Mo/Al/Mo/Au (10/60/50/50 нм), между слоями металлов наблюдается наличие кислорода (рис. 17,а). После отжига контактов при температурах 650, 750 и 900 °С происходит сильное перемешивание слоев металлов, и наблюдается окисление Al на поверхности. Во время отжига при 650 °С наблюдается проникновение Au вглубь металлизации, вероятно, вплоть до границы раздела металл-полупроводник (рис.17,б). На поверхности металлизации наблюдается слой с преобладающим содержанием Mo. Во время отжига при 750 °С все металлы распределяются по всей толщине контактной металлизации. Похожая картина наблюдается и для образца, отожженного при 900 °С (рис.17,д). На рисунке 17,е приведены профили распределения элементов для контакта на основе Mo/Al/Mo (10/60/50 нм), отожженного при 750 °С. Форма профилей Mo и Al была похожа на таковую для контакта со слоем Au, отожженного при 650 °С. Наблюдалось наличие приповерхностного слоя с преобладающим содержанием Mo. Под этим слоем также было обнаружено перемешивание слоев Al и Mo.

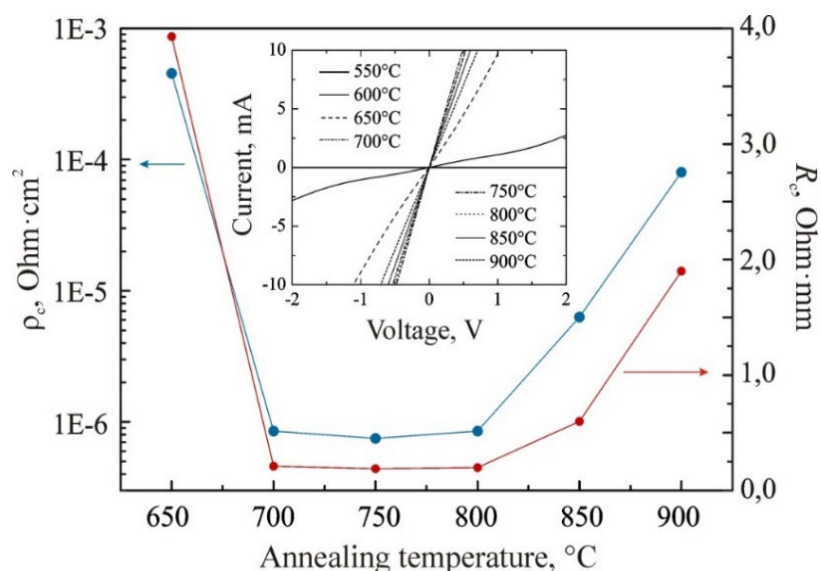


Рисунок 16 – ВАХ и зависимости ρ_s , R_s от температуры отжига (от 550 до 900°C) для контактов на основе Mo/Al/Mo/Au (10/60/50/50 нм)

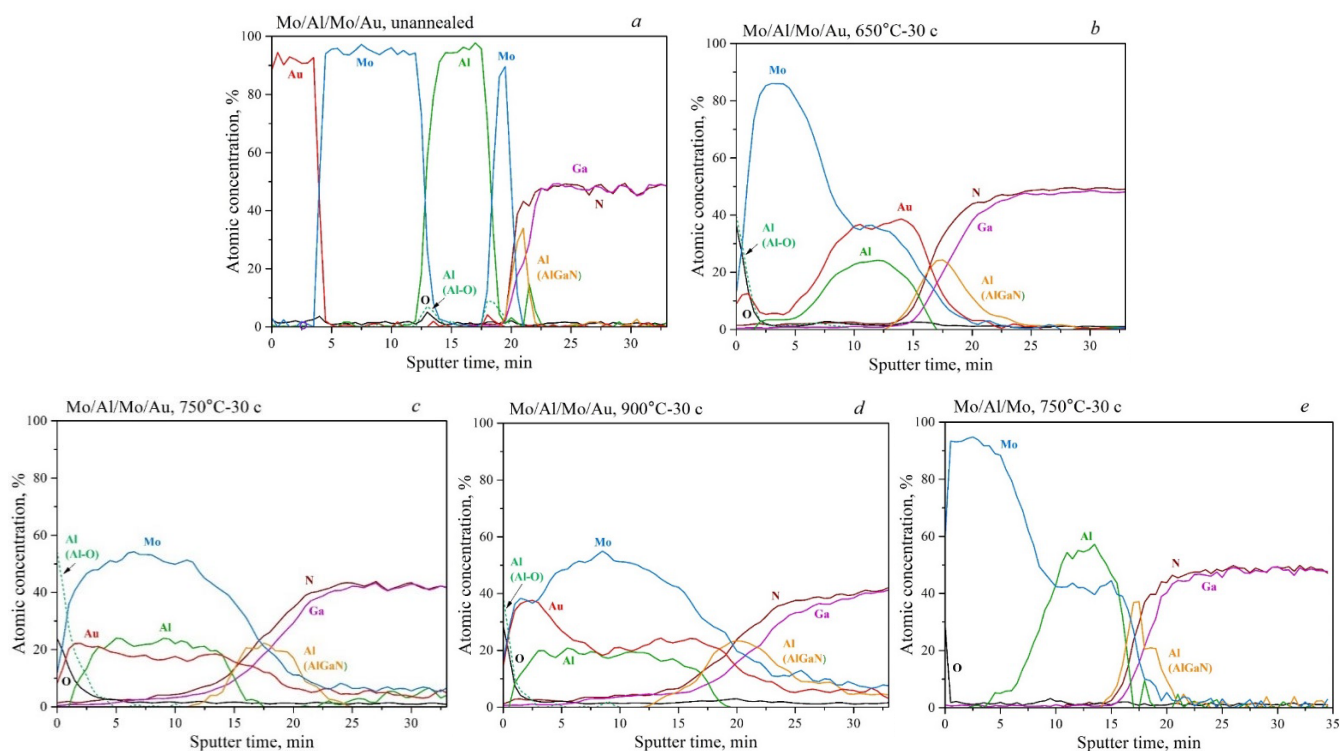


Рисунок 17 – Профили элементного содержания по глубине для контактов на основе Mo/Al/Mo/Au (10/60/50/50 нм) до (a) и после термического отжига при 650°C (b), 750°C (c) и 900°C (d) и для контакта на основе Mo/Al/Mo (10/60/50 нм), отожженного при 750°C (e)

Результаты исследования микроструктуры контакта с помощью ПЭМ представлены на рисунках 18–22. На рисунке 18 приведены ПЭМ-изображения, полученные для неотожженного контакта на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au (10/60/50/50 нм). Видно, что слои металлов имеют резкие границы, а их толщины хорошо согласуются с заданными при напылении. Общая толщина металлизации составляет 165 нм.

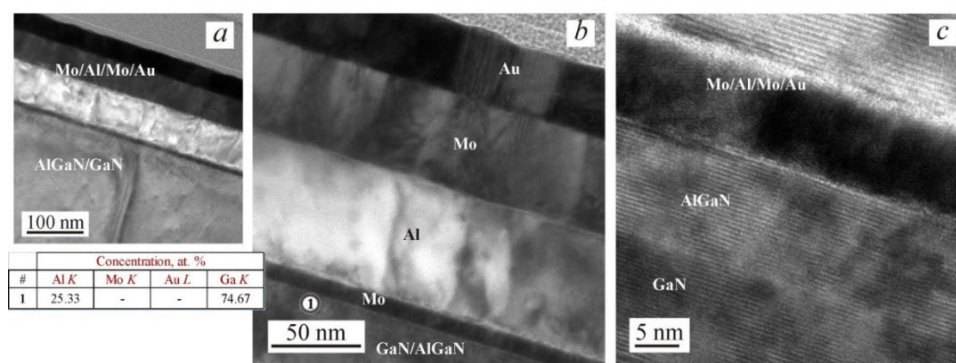


Рисунок 18 – ПЭМ-изображения поперечного сечения контакта на основе Mo/Al/Mo/Au, непосредственно после напыления, в масштабах 100 нм (a), 50 нм (b) и 5 нм (c). Для изображения в масштабе 50 нм для указанной области приведено элементное содержание

ПЭМ-изображения контакта Mo/Al/Mo/Au, отожженного при температуре 650 °C, представлены на рисунке 19. По контрасту в слое металлизации можно различить три слоя. Из результатов ЭДС-анализа видно, что верхний от поверхности металлизации слой толщиной ~55 нм в основном состоит из Mo, второй слой толщиной ~50 нм по большей степени содержит Al (~57 ат.%) и Au (~37 ат.%). Третий неоднородный слой, граничащий с полупроводником, толщиной ~15 нм имеет преобладающее содержание Al (~43 ат.%) и одинаковые концентрации Mo и Au (по ~24 ат.%). Вплавление металлизации в полупроводник не обнаружено.

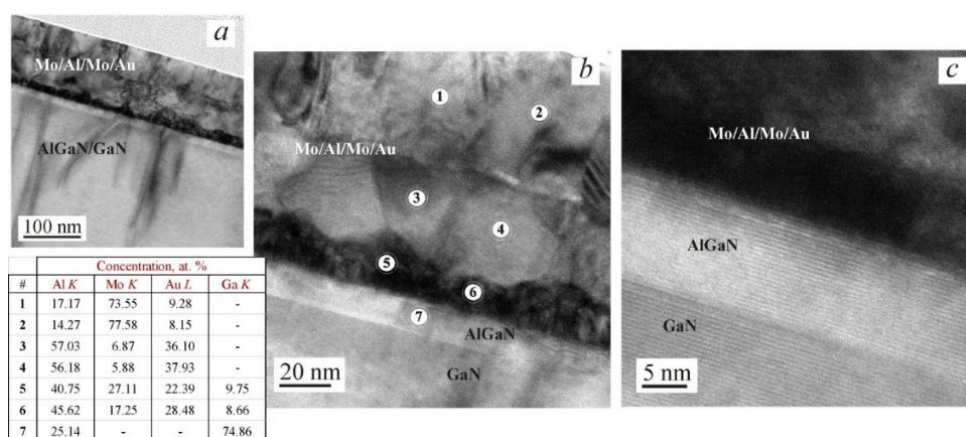


Рисунок 19 – ПЭМ-изображения поперечного сечения контакта на основе Mo/Al/Mo/Au, отожженного при температуре 650 °C, в масштабах 100 нм (a), 20 нм (b) и 5 нм (c)

ПЭМ-изображения контакта, отожженного при температуре 750 °C, представлены на рисунке 20. Видно, что после отжига при этой температуре произошло полное нарушение целостности барьерного слоя на основе Mo, в результате чего образовались столбчатые и равноосные зерна с преобладающим содержанием Mo и Al (в процентном соотношении ~56 и ~44 ат.%, соответственно). Похожий результат наблюдался в работе [14], в которой сообщалось, что после отжига при 700 °C барьерный слой Mo распадался на равноосные зерна, содержащие ~16 ат.% Al. В участках между зернами наблюдалось преобладающее содержание Al и Au. Вплавление металлизации в полупроводник также не обнаружено.

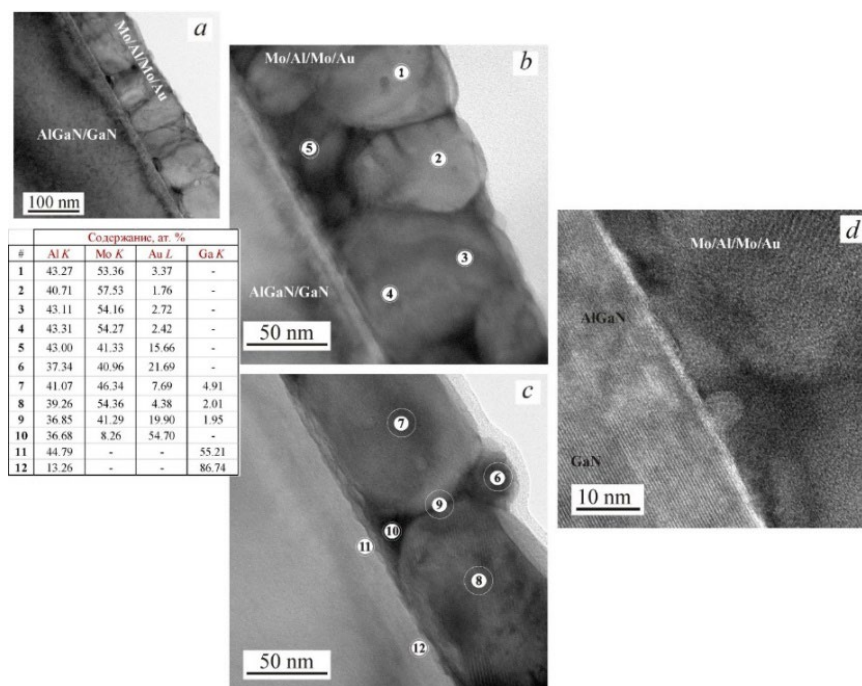


Рисунок 20 – ПЭМ-изображения поперечного сечения контакта на основе Mo/Al/Mo/Au, отожженного при температуре 750 °С, в масштабах 100 нм (a), 50 нм (b, c) и 5 нм (d)

ПЭМ-изображения контакта, отожженного при температуре 900 °С, представлены на рисунке 21. Видно, что, несмотря на высокую температуру отжига, металлизация контакта не вплавляется в полупроводник, а слой металлизации также имеет зернистую структуру со столбчатыми и равноосными зернами. Процентные содержания Mo и Al в них немного отличаются от случая с образцом, отожженным при 750 °С, и составляют ~66 и ~34 ат.%, соответственно. Участки металлизации между этими зернами состоят преимущественно из Al и Au и исходя из соотношения $Al/Au \approx 1$, можно предположить образование фазы AlAu. На границе раздела металлизация-полупроводник был обнаружен тонкий слой толщиной ~5 нм. С помощью ЭДС-анализа в этом слое было обнаружено содержание Al и Au. Таким образом, можно предположить, что образование данного слоя и является причиной ухудшения контактного сопротивления.

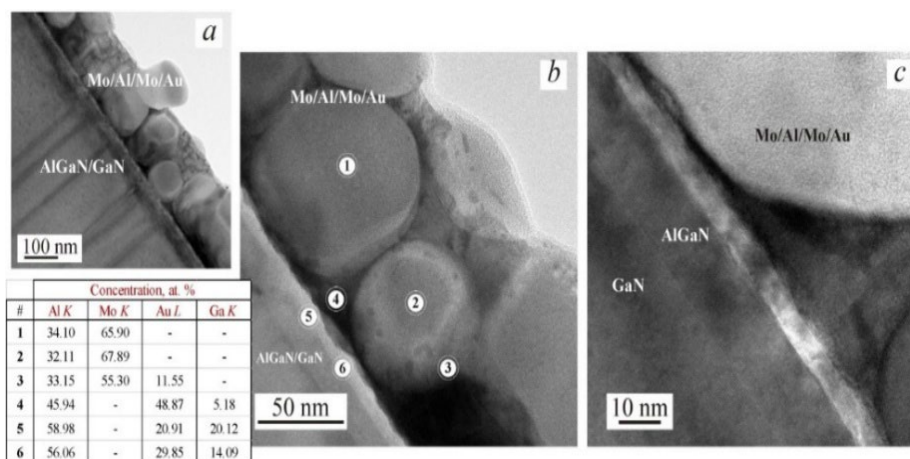


Рисунок 21 – ПЭМ-изображения поперечного сечения контакта на основе Mo/Al/Mo/Au, отожженного при температуре 900 °С, в масштабах 100 нм (a), 50 нм (b) и 10 нм (c)

На рисунке 22 приведено ПЭМ-изображение контакта на основе Mo/Al/Mo, отожженного при 750 °С. Как видно, наблюдаемая картина сходна с образцом, отожженным при температуре 650 °С – слой молибдена преимущественно сохранил свою целостность, наблюдается диффузия по границам зерен Mo; зерна AlMo не образовались.

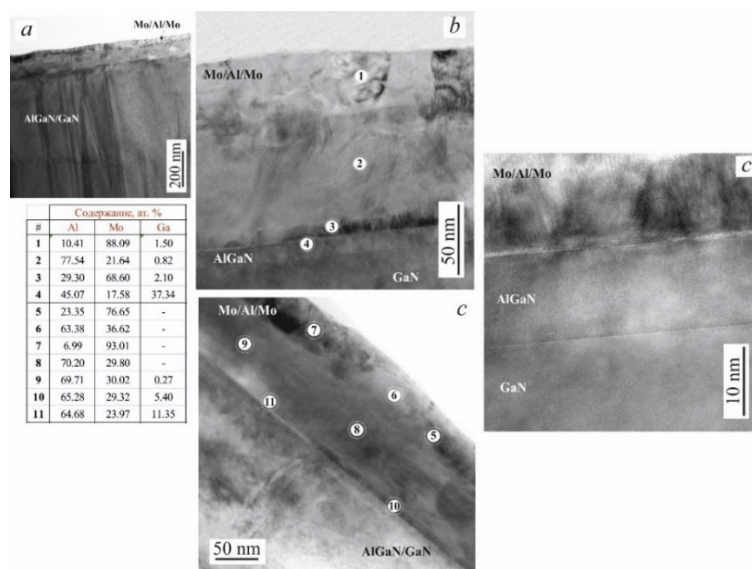


Рисунок 22 – ПЭМ-изображения поперечного сечения контакта на основе Mo/Al/Mo, отожженного при температуре 750 °С, в масштабах 200 нм (a), 50 нм (b) и 10 нм (c)

На рисунке 23 представлены результаты определения фазового состава контактов методом рентгеновской дифрактометрии. На рис. 23,а представлены дифрактограммы для образца непосредственно после напыления, контакта, изготовленного по оптимальной технологии (750 °С), и образца без верхнего слоя золота. Для образца непосредственно после напыления металлизации наблюдаются пики GaN и Al₂O₃, соответствующие материалу подложки, а также пики Al, Au и Mo. После отжига при 750 °С на дифрактограммах кроме пиков GaN и Al₂O₃ были зарегистрированы пики фаз Al₂Au, AlAu, Al_{3+x}Mo_{1-x}, AlMo₃, GaMo₃ и др. Следует отметить отсутствие каких-либо соединений Mo с N, что указывает на различие механизмов формирования омических контактов на основе систем металлизаций Mo/Al/Mo/Au и Ti/Al. На дифрактограмме контакта без верхнего слоя Au, отожженного при 750 °С, были зарегистрированы пики, возможно соответствующие Mo и Al₅Mo. Пики, соответствующие интерметаллическим соединениям Al_{3+x}Mo_{1-x}, AlMo₃, GaMo₃, отсутствовали, что хорошо согласуется с сильно нелинейной ВАХ контакта.

На рисунке 23,б приведено сравнение дифрактограмм контактов на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au, отожженных при 650, 750 и 900 °С. Видно, что после отжига при 650 °С наблюдается выраженный пик Mo, что говорит о наличии еще непрореагировавшего слоя Mo. При более высоких температурах данный пик исчезает, но вместо этого значительно повышаются интенсивности пиков интерметаллических соединений Al_xMo_y (Al_{3+x}Mo_{1-x}, AlMo₃ и

- Au играет важную роль при формировании омического контакта на основе системы Mo/Al/Mo/Au, что связано либо с увеличением смешиваемости слоев металлов во время термического отжига, либо с образованием фаз Al-Mo в присутствии золота.

- Ухудшение электрических параметров контакта после отжига при 900 °C и более может быть обусловлено с образованием фазы Al-Au на границе раздела металл-полупроводник. Известно, что контакты к GaN на основе Au проявляют выпрямляющие свойства [15], что, по всей видимости, связано с большим значением работы выхода электронов из металла.

Для получения дополнительных представлений о роли золота в формировании контакта были исследованы системы Mo/Al/Mo/x, где в качестве последнего слоя использовались элементы подгруппы меди (Cu, Ag, Au) и соседней подгруппы никеля (Ni, Pd, Pt). В эксперименте использовались гетероструктуры типа ЭГС1. Для начала на установке Temescal методом электронно-лучевого распыления напылялась система металлизации Mo/Al/Mo (10/50/55 нм). Затем часть образцов поочередно перемещалась в УВН-71П-3, где методом термического распыления напылялись слои Ag, Cu, Ni и Pd толщиной 50 нм. Слой Au (50 нм) напылялся на Temescal методом электронно-лучевого распыления. Pt (также 50 нм) напылялась методом инно-плазменного распыления на УВН-71П-3. Быстрый термический отжиг проводился при температурах 700, 800 и 900 °C в атмосфере азота в течение 30 с. Было показано, что контакты с верхним слоем на основе металлов подгруппы никеля демонстрируют нелинейные характеристики; контакты с верхним слоем на основе подгруппы меди демонстрируют улучшение омических характеристик с увеличением атомного номера элемента: контакты на основе системы Mo/Al/Mo/Cu, отожженные при температурах от 700 до 900 °C, имеют нелинейную ВАХ; контакты Mo/Al/Mo/Ag демонстрируют линейную ВАХ и их характеристики улучшаются с повышением температуры вплоть до 900 °C, однако значение ρ_c для них на порядок меньше такового для контакта Mo/Al/Mo/Au, отожженного при 800 °C.

В пятой главе приведены результаты исследования механизма токопереноса в контактах на основе Mo/Al/Mo/Au к $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ гетероструктурам. Для этого изготавливались тестовые контакты на основе системы Mo/Al/Mo/Au (10/50/55/50 нм) и контакты на основе системы Ti/Al/Mo/Au (15/60/55/50 нм). Из образцов, изготовленных к ЭГС2, были исследованы 5 контактов на основе Mo/Al/Mo/Au (650, 700, 800, 900 и 950 °C) и 3 контакта на основе Ti/Al/Mo/Au (800, 850 и 950 °C). К ЭГС1 было изготовлено 2 контакта на основе систем металлизаций Mo/Al/Mo/Au и Ti/Al/Mo/Au, которые отжигались при оптимальных температурах 800 и 850 °C, соответственно.

Для проверки соотношения между величинами R_{sk} и R_{sh} для изготовленных контактов были использованы тестовые структуры для определения R_{sk} модифицированным методом Sawdai, представленные во 2 главе. На рисунках 24 и 25 представлены измеренные зависимости R_{sh} и R_{sk} , а также ρ_c (вычисленные при условиях $R_{sh}=R_{sk}$ и $R_{sh}\neq R_{sk}$) от температуры окружающей среды для

двух образцов на основе контактов Mo/Al/Mo/Au (800 °C) и Ti/Al/Mo/Au (850 °C) к ЭГС1 соответственно. Как видно, температурные зависимости R_{sh} и R_{sk} демонстрируют одинаковое поведение. Значения R_{sk} оказались несколько ниже по сравнению с R_{sh} и составили ~90 % от его величины. Нужно отметить, что наличие такого небольшого различия между R_{sh} и R_{sk} практически не влияет на поведение зависимостей ρ_c от T , как видно из рисунков 24,б и 25,б – две зависимости $\rho_c(T)$, измеренные при условиях $R_{sh}=R_{sk}$ и $R_{sh}\neq R_{sk}$ практически совпадают. Для структур ЭГС2 также выборочно для некоторых температур окружающей среды оценивалось соотношение R_{sk}/R_{sh} для образцов контактов Mo/Al/Mo/Au (800 °C) и Ti/Al/Mo/Au (850 °C). Данная оценка осложнялась малыми значениями L_T для полученных контактов, однако она позволила сделать вывод, что отклонение R_{sh} от R_{sk} также не велико. По этой причине в дальнейшем измерения $\rho_c(T)$ проводились методом TLM, а разницей в слоевых сопротивлениях R_{sh} и R_{sk} пренебрегалось.

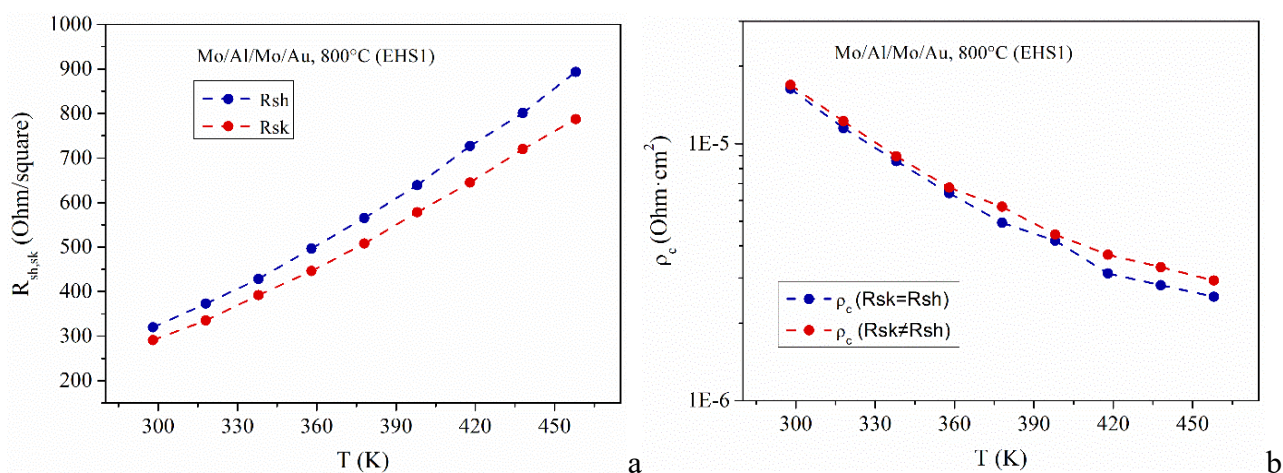


Рисунок 24 – Зависимости R_{sh} , R_{sk} и ρ_c от температуры для контакта Mo/Al/Mo/Au к ЭГС1 (800 °C)

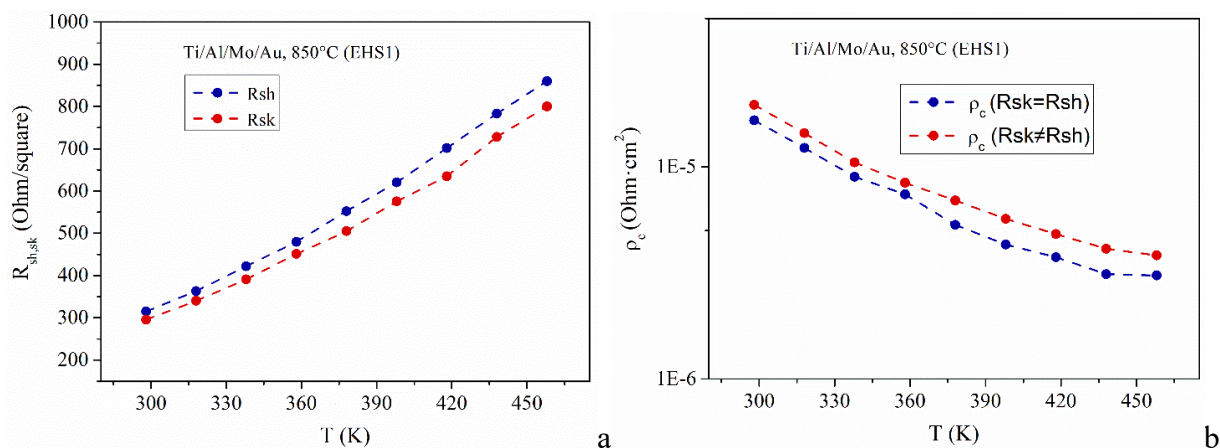


Рисунок 25 – Зависимости R_{sh} , R_{sk} , ρ_c , и L_T от температуры для контакта Ti/Al/Mo/Au к ЭГС1 (850 °C)

На рисунке 26 и 27 представлены измеренные зависимости $\rho_c(T)$ для систем Mo/Al/Mo/Au и Ti/Al/Mo/Au, изготовленных к различным ЭГС. Измеренные зависимости ρ_c от температуры аппроксимировались выражением для $\rho_c(T)$, полученным в приближении термополевой эмиссии [16]:

$$\rho_c = \frac{1}{qA^*} \cdot \frac{k^2}{\sqrt{\pi(\Phi_B + E_n)E_{00}}} \cdot \cosh\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \cdot \sqrt{\coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)} \exp\left(\frac{\Phi_B - E_n}{E_0} - \frac{E_n}{kT}\right), \quad (15)$$

$$E_{00} = \frac{qh}{4\pi} \sqrt{\frac{N_D}{m_n^* \epsilon_s \epsilon_0}}, \quad (16)$$

$$E_0 = E_{00} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right), \quad (17)$$

где A^* – константа Ричардсона; h – постоянная Планка; q – заряд электрона; k – константа Больцмана; Φ_B – высота барьера Шоттки, E_{00} – параметр Стреттона-Падовани, $E_n = E_c - F$ – разница между энергией дна зоны проводимости и уровнем Ферми.

Значения вычисленных параметров аппроксимации представлены в таблице 3.

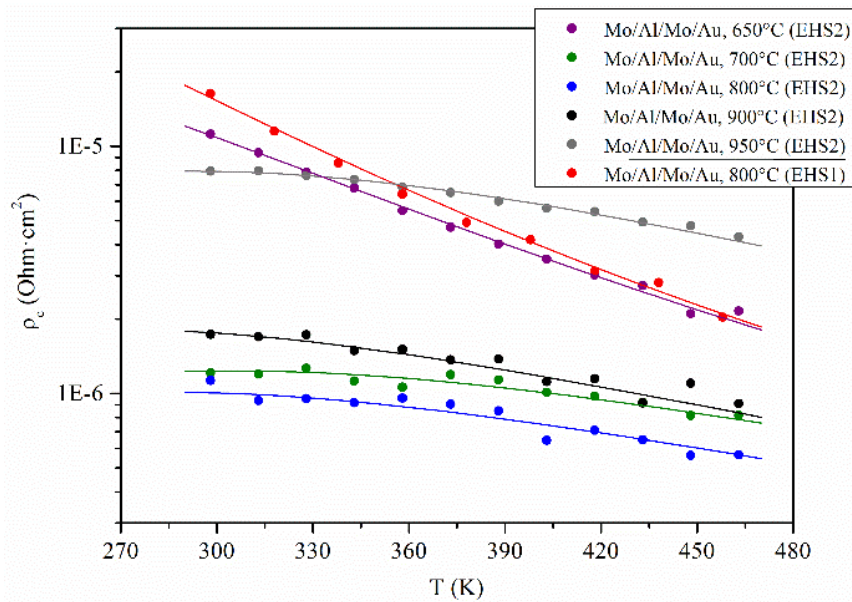


Рисунок 26 – Зависимости $\rho_c(T)$ на основе Mo/Al/Mo/Au от температуры. Линии на рисунке – аппроксимация выражением (15)

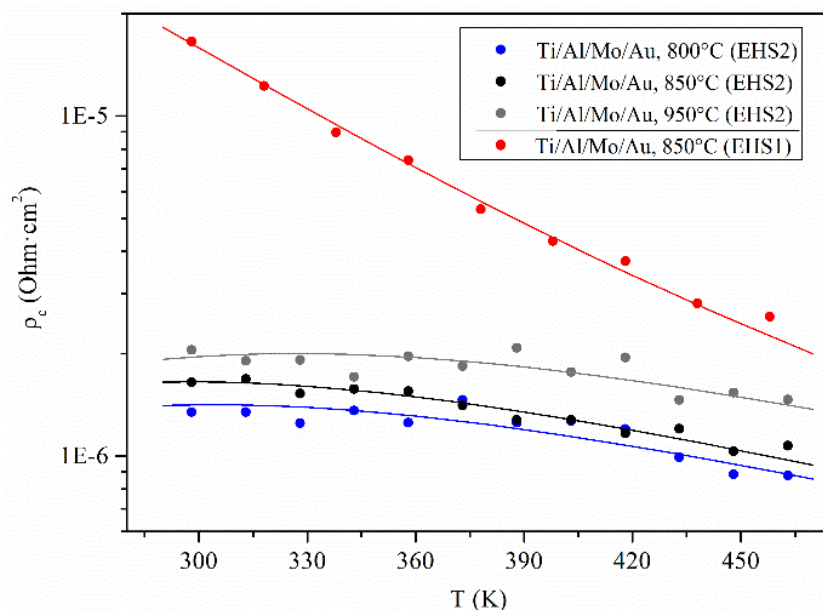


Рисунок 27 – Зависимости $\rho_c(T)$ на основе Ti/Al/Mo/Au от температуры. Линии на рисунке (с) – аппроксимация выражением (15)

Исходя из полученных результатов можно заключить: для контакта Mo/Al/Mo/Au также, как и для референсного образца Ti/Al/Mo/Au наблюдается термополевой механизм токопереноса, таким образом, при увеличении температуры отжига наблюдается увеличение подлегирования барьерного слоя AlGaN, что приводит к уменьшению толщины потенциального барьера и увеличению туннельного тока (соответственно снижению контактного сопротивления), при этом высота барьера практически не зависит от температуры отжига и составляет примерно 0.35–0.39 эВ. Для контакта, отожженного при температуре 950 °С также наблюдается дальнейшее подлегирование, однако при этом резко увеличивается высота барьера до 0.489 эВ, что, возможно, и приводит к ухудшению характеристик контакта. Данный факт хорошо согласуется с результатами, полученными с помощью ПЭМ – образованием слоя с повышенной концентрацией золота и алюминия вблизи границы раздела при температурах отжига более 900 °С.

Необходимо отметить, что для образцов омических контактов, сформированных на ЭГС1 расчетный уровень подлегирования оказался несколько ниже при одинаковых условиях формирования контактов с ЭГС2, данное расхождение объясняется присутствием в ЭГС1 слоя AlN, который является дополнительным барьером для электронов, что приводит к занижению концентрации доноров в AlGaN при аппроксимации с использованием выражения для однобарьерной модели (15).

Таблица 3 – Расчетные параметры аппроксимации

	Ti_850	Mo_800	Ti_800	Ti_850	Ti_950	Mo_650	Mo_700	Mo_800	Mo_900	Mo_950
	ЭГС1		ЭГС2							
χ_{Al}	0.28		0.30							
m^*/m_0	0.256		0.260							
$A^*, A/(cm^2K^2)$	30.78		31.26							
N_D, cm^{-2}	5.00E18	4.70E18	1.55E19	1.50E19	1.80E19	6.50E18	1.45E19	1.35E19	1.25E19	1.60E19
$\Phi_B, эВ$	0.315	0.307	0.389	0.389	0.446	0.329	0.381	0.340	0.353	0.489

Необходимо отметить, что механизм наблюдаемого подлегирования до конца не понятен и не может быть объяснен исходя из имеющихся экспериментальных результатов – уровень «созданных» в процессе отжига в AlGaN мелких доноров (менее 0.1 ат %) находится ниже предела обнаружения используемых методов. В работе [17] авторы указывают на наличие для системы Ti/Al/Mo/Au реакции обмена Al из образующейся фазы Al_xMo_y с Ga, диффундирующим из AlGaN на всю толщину металлической пленки, с последующим образованием соединения $GaMo_3$, протекающей параллельно образованию фазы TiN. В результате ухода Ga в полупроводнике образуются вакансии Ga, что нарушает зарядовое равновесие в решетке. Чтобы снять дисбаланс, близлежащие атомы N переходят в свободные позиции в подрешетке Ga, создавая вакансии N. В результате, под контактом образуются сильнолегированные области, приводящие к увеличению

туннельной составляющей тока и соответственно уменьшению контактного сопротивления в сравнении с Ti/Al/Ni/Au. Можно предположить, что данный процесс является основным в случае формирования контакта на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au. Отметим, что проведенный ЭДС анализ состава зерен не позволил оценить содержание Ga в металлизации, из-за наличия фоновой концентрации последнего по причине подготовки образцов с использованием сфокусированного Ga пучка.

Основные результаты и выводы:

Разработана технология формирования омических контактов к гетероструктурам AlGaIn/GaN на основе системы металлизации MoAlMoAu (10/50/55/50 нм) позволяющая получать контакты с переходным контактным сопротивлением до $4.7 \cdot 10^{-7}$ Ом·см² (0.14 Ом·мм), гладкой морфологией и ровной кромкой контакта.

Отработана технология формирования омических контактов на основе системы Mo/Al/Mo/Au, обладающая необходимой контрастностью и морфологией, для использования при создании знаков совмещения для электронно-лучевой литографии на ее основе.

Исследована микроструктура омического контакта на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGaIn/GaN. Показано, что наличие слоя Au играет определяющую роль при формировании омического контакта.

Проведено исследование механизмов токопереноса в омическом контакте на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGaIn/GaN. Экспериментально получена и теоретически объяснена температурная зависимость ρ_c в диапазоне температур 300–473 К. Полученные результаты позволили сделать вывод о термополевой природе токопереноса.

Предложен подход к измерению слоевого сопротивления ДЭГ под металлизацией омического контакта, основанный на измерении сопротивления протеканию тока через набор полосковых контактов в зависимости от ширины полосков. Метод позволяет упростить технологию создания тестовых структур и проводить измерения с использованием двух зондов в отличие от стандартных методов измерения, требующих определения остаточного сопротивления.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Статьи в журналах:

1. **Кондаков М.Н.**, Черных С.В., Гладышева Н.Б., Черных А.В., Дорофеев А.А., Диденко С.И., Щербачев К.Д., Табачкова Н.Ю., Барышников Ф.М. Исследование системы металлизации Mo/Al/Mo/Au в качестве омического контакта к гетероструктурам AlGaIn/GaN //Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. – 2015. – №. 4 (238). – С. 38-48.

2. **Кондаков М.Н.**, Черных С.В., Черных А.В., Гладышева Н.Б., Дорофеев А.А., Диденко С.И., Щербачев К.Д., Табачкова Н.Ю., Капров Д.Б. Омические контакты на основе системы

металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGaIn/GaN //Микроэлектроника. – 2016. – Т. 45. – №. 6. – С. 440-447.

3. Концевой Ю. А., **Кондаков М. Н.**, Петрова И. Г. Алгоритм расчета толщины тонких металлических пленок //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – Т. 82. – №. 12. – С. 41-42.

4. **Кондаков М.Н.**, Черных С.В., Черных А.В., Подгорный Д.А., Гладышева Н.Б., Дорофеев А.А., Диденко С.И., Капров Д.Б., Жукова Т.А. Влияние режимов отжига на электрические параметры, морфологию и микроструктуру омических контактов на основе Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGaIn/GaN //Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. – 2018. – №. 2 (249). – С. 40-47.

5. Sleptsov E.V., Chernykh A.V., Chernykh S.V., Dorofeev A.A., Gladysheva N.B., **Kondakov M.N.**, Sleptsova A.A., Panichkin A.V., Konovalov M.P., Didenko S.I. Investigation of the thermal annealing effect on electrical properties of Ni/Au, Ni/Mo/Au and Mo/Au Schottky barriers on AlGaIn/GaN heterostructures //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 816. – №. 1. – С. 012039.

Тезисы конференций:

1. **М.Н. Кондаков**, Н.Б. Гладышева, А.А. Дорофеев, С.В. Черных, А.В. Черных, С.И. Диденко. Исследование системы металлизации Mo/Al/Mo/Au для омических контактов к гетероструктурам AlGaIn/GaN. Научно-техническая конференция специалистов «Твёрдотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА» (Дубна, 2014 г.)

2. **М.Н. Кондаков**, С.В. Черных, Н.Б. Гладышева, А.В. Черных, А.А. Дорофеев, С.И. Диденко, К.Д. Щербачев. Исследование омических контактов на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к AlGaIn/GaN гетероструктурам. Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы» (Санкт-Петербург, 2015 г.).

3. **М.Н. Кондаков**, С.В. Черных, А.В. Черных, К.Д. Щербачев, Н.Ю. Табачкова, Д.А. Подгорный, Н.Б. Гладышева, А.А. Дорофеев, С.И. Диденко. Исследование механизма формирования омического контакта на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGaIn/GaN. Международная конференция «Микро- и нанoeлектроника – 2016» (ICMNE-2016), включающая расширенную сессию «Квантовая информатика» (QI-2016) (Звенигород, 2016 г.).

4. **М.Н. Кондаков**, С.В. Черных, А.В. Черных, Н.Ю. Табачкова, К.Д. Щербачев, Д.А. Подгорный, С.И. Диденко, Н.Б. Гладышева, А.А. Дорофеев, Д.Б. Капров. Исследование механизма формирования омического контакта на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGaIn/GaN. Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы» (Москва, 2017 г.).

5. **М.Н. Кондаков**, С.В. Черных, А.В. Черных, Н.Ю. Табачкова, К.Д. Щербачев, Д.А. Подгорный, С.И. Диденко, Н.Б. Гладышева, А.А. Дорофеев, Д.Б. Капров, Т.А. Жукова. Исследование механизма формирования омического контакта на основе системы Мо/Al/Мо/Au к гетероструктуре AlGaIn/GaN. Научно-техническая конференция специалистов «Твёрдотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА» (Дубна, 2017 г.)

6. **М.Н. Кондаков**, А.В. Черных, С.В. Черных, К.Д. Щербачев, С.И. Диденко, Н.Б. Гладышева, А.А. Дорофеев, Д.Б. Капров, Т.А. Жукова. Влияние толщины металлизации омических контактов на основе Мо/Al/Мо/Au к гетероструктурам AlGaIn/GaN на их электрические характеристики и морфологию. Научно-техническая конференция специалистов «Твёрдотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА» (Дубна, 2017 г.)

Патенты:

1. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной схемы № 2015630111. Зубков А.М., Гладышева Н.Б., Юдаева Т.Н., Барышников Ф.М., Дорофеев А.А., **Кондаков М.Н.**, Черных С.В., Черных А.В., Ефименков Ю.Р. ИМС усилителя мощности на 5 Вт диапазона 2-6 ГГц K1373UB05H4 // заявка № 2015630078 от 04.09.2015.

Цитируемая литература:

1. Бланк, Т. В. Механизмы протекания тока в омических контактах металл—полупроводник / Т. В. Бланк, Ю. А. Гольдберг // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41. – №. 11. – С. 1281–1308.
2. Grabowski, S. P. Electron affinity of Al_xGa_{1-x}N (0001) surfaces / S. P. Grabowski, M. Schneider, H. Nienhaus, W. Mönch, R. Dimitrov, O. Ambacher, M. Stutzmann // Applied Physics Letters. – 2001. – Т. 78. – №. 17. – P. 2503–2505.
3. Lee, M. L. Nonalloyed Cr/Au-based Ohmic contacts to n-GaN / M. L. Lee, J. K. Sheu, C. C. Hu // Applied Physics Letters, 91(18). – 2007. – V. 91. – №. 18. – P. 182106.
4. Yafune, N. Low-resistivity V/Al/Mo/Au ohmic contacts on AlGaIn/GaN annealed at low temperatures / N. Yafune, M. Nagamori, H. Chikaoka, F. Watanabe, K. Sakuno, M. Kuzuhara // Japanese Journal of Applied Physics. – 2010. – V. 49. – №. 4S. – P. 04DF10.
5. Malmros, A. Electrical properties, microstructure, and thermal stability of Ta-based ohmic contacts annealed at low temperature for GaN HEMTs / A. Malmros, H. Blanck, N. Rorsman // Semiconductor Science and Technology. – 2011. – V. 26. – №. 7. – P. 075006.
6. Liu, Y. Low resistivity Hf/Al/Ni/Au Ohmic Contact Scheme to n-Type GaN / Y. Liu, M. K. Bera, L. M. Kyaw, G. Q. Lo, E. F. Chor // World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. – 2012. – V. 6. – №. 9. – P. 957–960.

7. Lee, J. Low resistance Mo/Al/Mo/Au ohmic contact scheme to InAlN/AlN/GaN heterostructure / J. Lee, M. Yan, B. Ofuonye, J. Jang, X. Gao, S. Guo, I. Adesida // *physica status solidi (a)*. – 2011. – V. 208. – №. 7. – P. 1538–1540.
8. Basu, A. Mo/Al/Mo/Au ohmic contact scheme for $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ high electron mobility transistors annealed at 500°C / A. Basu, F. M. Mohammed, S. Guo, B. Peres, I. Adesida // *J. Vac. Sci. Technol. B*. – 2006. – V. 24. – №. 2. – P. L16–L18.
9. Selvanathan, D. Comparative study of Ti/Al/Mo/Au, Mo/Al/Mo/Au, and V/Al/Mo/Au ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures / D. Selvanathan, F. M. Mohammed, A. Tesfayesus, I. Adesida // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. – 2004. – V. 22. – №. 5. – P. 2409–2416.
10. Spera, M. Modification of the sheet resistance under Ti/Al/Ni/Au Ohmic contacts on AlGaIn/GaN heterostructures / M. Spera, C. Miccoli, R. L. Nigro, C. Bongiorno, D. Corso, S. Di Franco, G. Greco // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2018. – V. 78. – P. 111–117.
11. Reeves G. K. Obtaining the specific contact resistance from transmission line model measurements / G. K. Reeves, H. B. Harrison // *IEEE Electron device letters*. – 1982. – V. 3. – №. 5. – P. 111–113.
12. Sawdai D. Enhanced transmission line model structures for accurate resistance evaluation of small-size contacts and for more reliable fabrication / D. Sawdai, D. Pavlidis, D. Cui // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 1999. – V. 46. – №. 7. – P. 1302–1311.
13. Marlow G. S. The effects of contact size and non-zero metal resistance on the determination of specific contact resistance / G. S. Marlow, M. B. Das // *Solid-State Electronics*. – 1982. – V. 25. – №. 2. – P. 91–94.
14. Wang, L. Formation mechanism of Ohmic contacts on AlGaIn/GaN heterostructure: Electrical and microstructural characterizations / L. Wang, F. M. Mohammed, I. Adesida // *Journal of Applied Physics*. – 2008. – V. 103. – №. 9. – P. 93516–93516.
15. Foresi, J. S. Metal contacts to gallium nitride / J. S. Foresi, T. D. Moustakas // *Applied physics letters*. – 1993. – V. 62. – №. 22. – P. 2859–2861.
16. Liu, Y. Mechanisms of Ohmic Contact Formation and Carrier Transport of Low Temperature Annealed Hf/Al/Ta on $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}/\text{GaN-on-Si}$ / Y. Liu, S. P. Singh, L. M. Kyaw, M. K. Bera, Y. J. Ngoo, H. R. Tan, S. Tripathy, G. Q. Lo, E. F. Chor // *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. – 2015. – V. 4. – №. 2. – P. 30–35.
17. Chaturvedi, N. Mechanism of ohmic contact formation in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors / N. Chaturvedi, U. Zeimer, J. Würfl, G. Tränkle // *Semiconductor Science and technology*. – 2006. – V. 21. – №. 2. – P. 175.