

УДК 621.382

На правах рукописи



Федин Иван Владимирович

Мощные быстродействующие диоды на основе
гетероэпитаксиальных структур нитрида галлия

Специальность 01.04.04 - "Физическая электроника"

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск, 2019

Работа выполнена в АО «НПФ «Микран» и ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

**Научный
руководитель:**

Троян Павел Ефимович,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физической электроники ТУСУР.

**Официальные
оппоненты:**

Величко Александр Андреевич,
доктор технических наук, профессор каф. полупроводниковых приборов и микроэлектроники НГТУ, г. Новосибирск.

Малаховский Олег Юрьевич,
кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией отдела полупроводниковых приборов АО НИИПП, г. Томск.

**Ведущая
организация:**

Новосибирский завод полупроводниковых приборов с особым конструкторским бюро, г. Новосибирск.

Защита диссертации состоится 27 декабря 2019 г. в 15 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.268.04 при ФГБОУ ВО "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 203.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу г. Томск, ул. Красноармейская, 146, а также в сети Интернет по ссылке <https://postgraduate.tusur.ru/ru/ob-yavleniya-o-zaschitah-dissertatsiy>

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета, доктор
технических наук, профессор

Ю.П. Акулиничев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Силовая электроника – это показатель уровня экономики любого современного государства. Ее решающая роль в экономике развитых стран вытекает из того, что более 80% вырабатываемой электроэнергии потребляется в преобразованном виде.

В настоящее время перспективным путем развития силовой электроники в мире является переход к элементной базе (ЭКБ) на основе широкозонных полупроводников, таких как нитрид галлия (GaN). Нитрид галлия обладает целым рядом преимуществ над кремнием: большая ширина запрещённой зоны (ΔE_g), высокая электрическая прочность (E_c), высокая подвижность электронов (μ_e), высокая рабочая температура (T_{max}), высокая дрейфовая скорость насыщения электронов ($V_{дрейф}$).

Начиная с 2000 г. GaN диоды Шоттки стали объектом постоянных исследований. Исследования в данном направлении велись в институте Фердинанта Брауна, компании IMEC, Transphorm, Panasonic и множестве лабораторий по всему миру. В настоящее время серийная технология планарных AlGaIn/GaN диодов Шоттки освоена компаниями Transphorm и Panasonic, однако в свободную продажу они не поступают.

В связи с этим, создание AlGaIn/GaN диодов Шоттки, как части GaN ЭКБ, является актуальной и перспективной задачей, которую в настоящий момент решают многие производственные и исследовательские фирмы (EPC, GaN Systems, Navitas, EXAGAN и др.).

Целью работы является разработка технологии создания и исследование характеристик диодов Шоттки на основе гетероструктуры pGaIn/AlGaIn/GaN, выращенной на кремниевой подложке.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработка технологии создания низкотемпературных омических контактов к гетероструктуре AlGaIn/GaN, выращенной на кремниевой подложке;

2) разработка и исследование конструктивно-технологических особенностей изготовления барьера Шоттки на электрические характеристики мощных AlGaN/GaN диодов.

3) разработка технологического маршрута создания мощных диодов Шоттки, на базе гетероструктуры pGaN/AlGaN/GaN, выращенной на кремниевой подложке.

Научная новизна работы состоит в том, что:

1) впервые получены низкотемпературные омические контакты на основе металлизации Ta/Al к гетероструктуре AlGaN/GaN, выращенной на кремниевой подложке;

2) установлено, что для диодов Шоттки, изготовленных на основе pGaN/AlGaN/GaN гетероструктуры, применение анодного рецесса на глубину до 75% от толщины барьерного слоя AlGaN перед формированием барьера Шоттки увеличивает прямой и обратный ток диода;

3) предложен технологический маршрут создания мощных AlGaN/GaN диодов совместимый с технологией создания pGaN/AlGaN/GaN H3 транзисторов.

Практическая значимость заключается в том, что: разработана технология создания AlGaN/GaN диодов Шоттки (ДШ) на базе гетероструктуры pGaN/AlGaN/GaN. Предложенная технология создания диодов Шоттки позволяет объединить в монолитной интегральной схеме (МИС) диоды и H3 транзисторы, что позволяет снизить массо-габаритные показатели и улучшить характеристики высокоэффективных источников вторичного электропитания на основе GaN электронно-компонентной базы (ЭКБ).

Предложенная технология получения омических контактов к AlGaN/GaN защищена патентом, а разработанные в ходе выполнения диссертации технологические режимы и процессы используются на производстве в НПК "Микроэлектроника" АО "НПФ "Микран".

Результаты работы могут быть использованы предприятиями микроэлектронной промышленности для формирования GaN ЭКБ, находящей применение в создании перспективных энергоэффективных источниках вторичного электропитания, AC/DC преобразователях, инверторах.

Положения, выносимые на защиту:

1) контакт на основе Ta/Al металлизации к гетероструктуре $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N} / \text{GaN}$ (10 нм / 300 нм) на кремниевой подложке, полученный методом электронно-лучевого напыления в вакууме с применением катодного рецесса глубиной 5 нм, и вождённый при температуре 550 °С методом быстрого фотонного отжига в течение 60 с. обладает удельным контактным сопротивлением $3,2 \cdot 10^{-6}$ Ом·см²;

2) рецесс анодной области гетероструктуры $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N} / \text{GaN}$ (10 нм / 300 нм) на глубину 7,5 нм, сформированный методом плазмохимического травления в $\text{BCl}_3 + \text{O}_2$ индуктивно-связанной плазме перед осаждением Ni барьера Шоттки, приводит к росту токов прямого смещения в 2,6 раз (при напряжении +1,2 В) и росту токов обратного смещения в 32 раза (при напряжении -80 В) за счёт уменьшения высоты потенциального барьера между металлом анода и двумерным электронным газом;

3) технология создания AlGaIn/GaN диодов с Ni барьером Шоттки совместима с технологией создания pGaIn/AlGaIn/GaN H3 транзисторов и позволяет получать диоды с характеристиками в следующих пределах: $I(U=+1,2 \text{ В}) = 25 - 65$ мА/мм, $I_{\text{обр}} = 1,3 - 41$ мкА/мм, $U_{\text{обр}} = 230 - 340$ В, $C_{\text{ВХ}} = 0,5$ пкФ/мм. ($h_{\text{рец}} = 0 - 7,5$ нм, $L_{\text{а-к}} = 7$ мкм).

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены автором на 17 международных и 1 всероссийской конференции:

- IEEE международная сибирская конференция по управлению и связи (SIBCON-2019). Томск, Россия.

- Международная научная студенческая конференция (МНСК-2018, МНСК-2019). Новосибирск, Россия.

- Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных "Научная сессия ТУСУР" (НСТ-2016, НСТ-2017, НСТ-2018, НСТ-2019). Томск, Россия.

- XIV Международная научно-практическая конференция "Электронные средства и системы управления" (ЭСИСУ-2016, ЭСИСУ-2017, ЭСИСУ-2018). Томск, Россия.

- 6-ой Международный конгресс по радиационной физике, силь-

ноточной электронике и модификации материалов "Потоки энергии и радиационные эффекты" (EFRE-2018). Томск, Россия.

- XV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных "Перспективы развития фундаментальных наук" (ПРФН-2018). Томск, Россия.

- IV Международная научная конференция "Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине" (ИТвНУССМ-2017). Томск, Россия.

- V Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы» (ИЭ-2016, ИЭ-2017). Томск, Россия.

- XVII Международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам (EDM-2016). Эрлагол, Россия.

- IV Российская молодежная научная школа-конференция «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи» (ЭЭиЭТГМ-2016). Томск, Россия.

- Международная конференция "Микро- и нанoeлектроника" (ICMNE-2016). Звенигород, Россия.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 22 работах, 5 из них в журналах из перечня ВАК, 10 в сборниках международных и 1 в сборнике всероссийской конференции, 6 проиндексированы в базе данных Scopus. Ссылки на работы, опубликованные в соавторстве, приведены в каждой оригинальной главе диссертации.

Личный вклад автора. Диссертация является итогом исследований, проводившихся автором совместно с сотрудниками АО НПФ «Микран» и НОЦ "Нанотехнологии" ТУСУР. Автором, совместно с научным руководителем, формулировались цели работы, обсуждались пути их достижения, а также анализировались результаты эксперимента. Автором совместно с соавторами был опубликован ряд работ, представленных в списке литературы. Непосредственно автором проводилось создание топологических слоёв пластин, ведение пластин по маршруту, выполнение операций химических обработок пластин, измерения на постоянном токе, оптическая микроскопия. Вклад диссертанта в диссертационную работу явля-

ется определяющим.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Объем работы составляет 147 страниц машинописного текста, включая 74 рисунка, 12 формул, 11 таблиц и список литературы из 154 наименований. В соответствии с поставленными задачами вся диссертационная работа разделена на четыре главы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.577.21.0250 от 26.09.17). Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0250.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель работы и задачи исследований, приведены научная новизна и практическая значимость, сформулированы научные положения, выносимые на защиту

В **первой главе** выполнен обзор литературных данных и представлено состояние разработок по омическим и барьерным контактам к AlGaIn/GaN. По итогам обзора установлено, что для получения низкотемпературных омических контактов к гетероструктуре AlGaIn/GaN, выращенной на SiC подложке, наиболее перспективными являются композиции металлов на основе Ta/Al/Ta. Для Ta/Al/Ta (10/280/20 нм) ОК к гетероструктуре AlGaIn/GaN, выращенной на SiC подложках получены достаточно низкие значения контактного сопротивления (0,28 Ом·мм), что обусловило выбор данного типа металлизации для разработки низкотемпературного омического контакта к гетероструктуре AlGaIn/GaN, выращенной на кремниевой подложке.

Во **второй главе** приведена информация о оборудовании и методах исследования, применяемых в диссертационной работе, технологический маршрут изготовления тестов для исследования ОК а также технологический маршрут изготовления силовых AlGaIn/GaN диодов на базе транзисторной гетероструктуры pGaN/AlGaIn/GaN.

Характеристики омических контактов, такие как контактное сопротивление (R_k) и удельное контактное сопротивление (ρ_k) а также слоевое сопротивление гетероструктуры ($R_{сл}$) измерялись методом линий передач/длинных линий (Transmission Line Methode, TLM). Измерения характеристик мощных AlGaN/GaN диодов проводились четырёхзондовым методом Кельвина.

Образцы для проведения экспериментальных исследований изготавливались на производственной линейке НПК "Микроэлектроника" АО "НПФ "Микран" и в НОЦ "Нанотехнологии" ТУСУР.

В **третьей главе** приведены результаты разработки и исследования низкотемпературных Ta/Al омических контактов к AlGaN/GaN. В первой серии экспериментов было исследовано влияние толщины тонкой плёнки Ta и температуры отжига на контактное сопротивление Ta/Al ОК. Толщина Al была фиксированная и составляла 300 нм. Толщина Ta составляла 5, 10, 15 и 20 нм (рис. 1).

Как видно из рис. 1, увеличение толщины Ta приводит к повышению оптимума температуры вжигания: для 5 нм это 525 °С, для 10 и 15 нм 535 °С, для 20 нм 545 °С или более. Наименьшее контактное сопротивление ($R_k = 0,31$ Ом·мм) было получено для толщины тантала 10 нм при $T_{отж} = 535$ °С. Наименьшим изменением контактного сопротивления в диапазоне рассматриваемых температур ($\Delta R_k = 0,33$ Ом·мм), и, как следствие, наилучшей термостабильностью и воспроизводимостью результатов так же обладает ОК с толщиной Ta 10 нм.

Было проведено исследование морфологии поверхности и края контактной площадки, в результате которого было установлено что при толщине тантала 10 нм поверхность ОК обладает приемлимой шероховатостью и ровным краем. Таким образом оптимальная толщина Ta составила 10 нм.

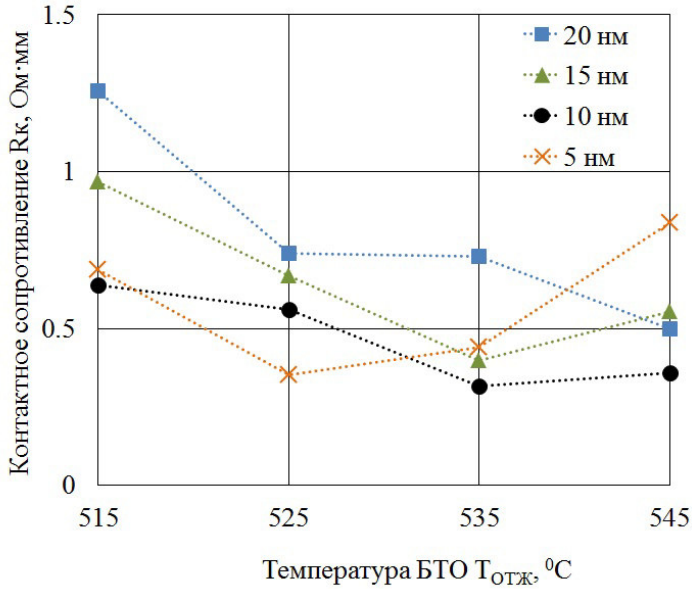


Рисунок 1 – Зависимость контактного сопротивления от температуры БТО для Ta/Al металлизации с толщиной Al 300 нм и толщинами Ta 5, 10, 15, 20 нм. $t_{отж}=1$ мин. $R_{сл} = 550-600$ Ом/ Δ

Во второй серии экспериментом исследовалось влияние толщины тонкой плёнки Al и температуры отжига на контактное сопротивление Ta/Al ОК. Толщина Ta была фиксирована и составляла 10 нм. Толщина Al составляла 50, 100, 200 и 300 нм. Результаты приведены на рис. 2.

Как видно из рис. 2 наименьшее контактное сопротивление составило 0,44, 0,82, 1,59 и 3,09 Ом·мм для 300, 200, 100 и 50 нм алюминия соответственно. Таким образом, увеличение толщины алюминия приводит к снижению минимально достижимого контактного сопротивления.

В результате микроскопии было установлено, что с увеличением толщины Al до 300 нм число дефектов диаметром до 1 мкм растёт а рельеф поверхности выравнивается. При данной толщине

алюминия нет крупных неровностей на поверхности ОК, поэтому дальнейшие работы проводились с толщиной алюминия 300 нм.

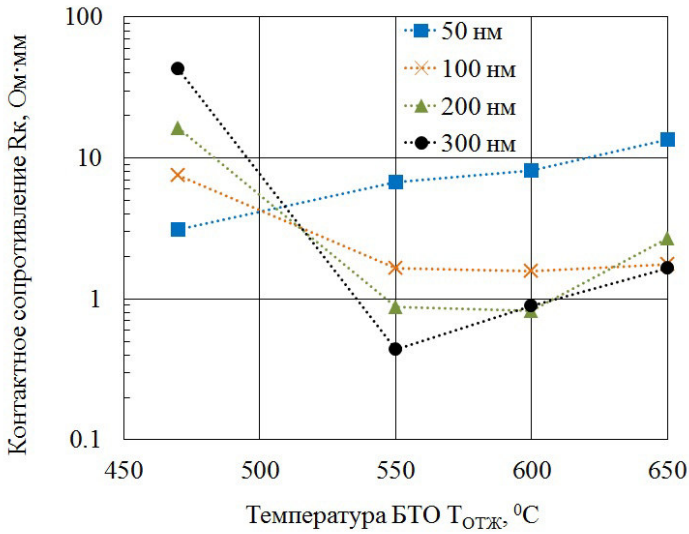


Рисунок 2 – Зависимость контактного сопротивления от температуры БТО для Ta/Al металлизации с толщиной Ta 10 нм и толщинами Al 50, 100, 200, 300 нм. $t_{отж} = 1$ мин.

В третьей серии экспериментов было исследовано влияние верхней плёнки металла на контактное сопротивление Ta/Al/X ОК, где X это TaN, TiN, Ta или Ti толщиной 20 нм. Для верхней плёнки на основе TaN и TiN линейную ВАХ ОК получить не удалось, поэтому ниже приведена зависимость R_k от $T_{отж}$ для Ta/Al, Ta/Al/Ta и Ta/Al/Ti ОК.

Как видно из рис. 3 добавление верхней плёнки металла толщиной 20 нм не меняет температурный оптимум БТО: наименьшее контактное сопротивление для Ta/Al, Ta/Al/Ta и Ta/Al/Ti ОК получено при $T_{отж} = 550$ °C и составило 0,4, 0,7 и 0,9 Ом·мм соответственно. Дальнейшее увеличение температуры приводит к росту контактного сопротивления. Измерения контактного сопротив-

ления проводились после операции пассивации поверхности пластины диэлектриком, поэтому возможные нарушения алюминия в результате окисления произошли.

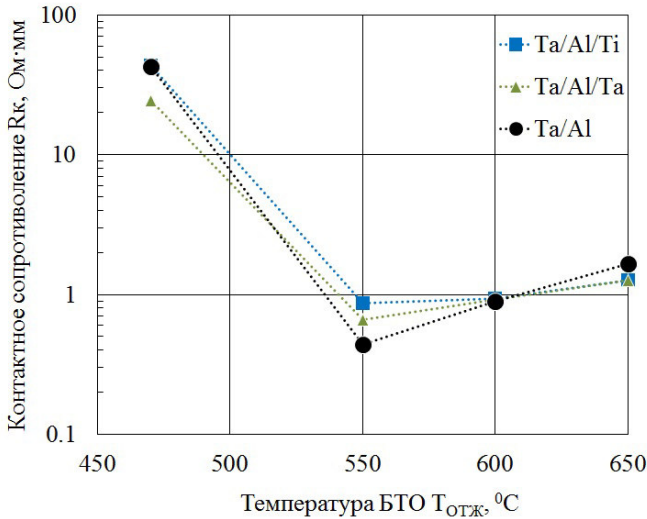


Рисунок 3 – Зависимость контактного сопротивления от температуры БТО для Ta/Al, Ta/Al/Ta и Ta/Al/Ti металлизаций. $t_{отж}=1$ мин.

Результаты микроскопии показали, что использование в качестве верхнего слоя Ti или Ta не приводит к улучшению качества поверхности ОК. Дальнейшие работы проводились с металлизацией ОК Ta/Al (10/300 нм).

В четвёртой серии экспериментов было проведено исследование влияния рецесса на контактное сопротивление Ta/Al (10/300 нм) ОК, результаты приведены на рис. 4.

Как видно из рис. 4 независимо от глубины рецесса при увеличении температуры отжига с 470 до 550 °C контактное сопротивление Ta/Al (10/300 нм) ОК снижается. Дальнейшее увеличение температуры отжига приводит к росту контактного сопротивления ОК. Таким образом оптимальной температурой отжига в данном

случае является 550°C . При $T_{\text{отж}} = 550^{\circ}\text{C}$ увеличение глубины рецесса Ta/Al (10/300 нм) ОК с 0 до 5 нм приводит к снижению контактного сопротивления ОК с 0,8 до 0,4 Ом·мм.

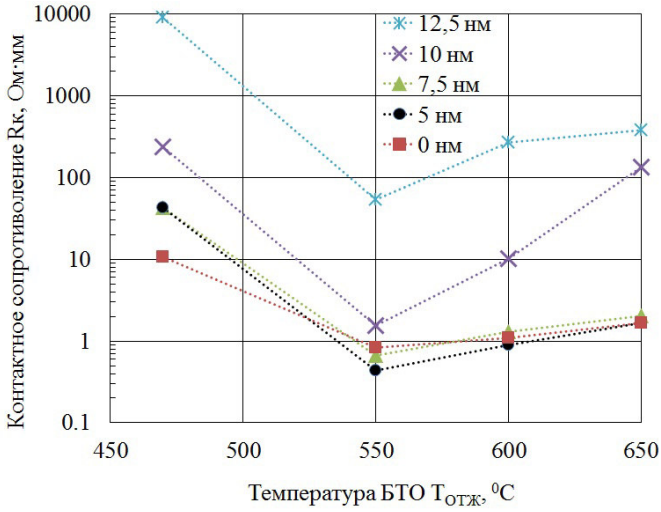


Рисунок 4 – Зависимость контактного сопротивления ОК от температуры вжигания для глубины рецесса 5, 7,5, 10 и 12,5 нм.
 $t_{\text{отж}} = 1$ мин.

Дальнейшее увеличение глубины рецесса приводит к росту контактного сопротивления до 53 Ом·мм. Таким образом для Ta/Al (10/300 нм) ОК при $T_{\text{отж}} = 550^{\circ}\text{C}$ оптимальной глубиной рецесса AlGaIn, позволяющей получить минимальное контактное сопротивление 0,4 Ом·мм является 5 нм, что составляет 50% от толщины AlGaIn.

В результате проведенных экспериментов были установлены оптимальные толщины металлизации Ta/Al (10/300 нм) а также оптимальная глубина рецесса (5 нм).

В **четвёртой** главе приведены результаты исследования барьерного контакта к AlGaIn. В первой серии экспериментов исследовалось влияние материала барьера Шоттки (БШ) на электрические

характеристики диодов. В качестве металлизации БШ применялась конструкция X/Ti/Al/Ti (30/30/300/30 нм), где X - материал БШ: Ni, Pt, Pd, Mo, Hf, Ti, Ta, WSi. В табл. 1 приведены основные характеристики диодов, определённые по прямой ветви ВАХ: напряжение открывания по уровню тока 1 мА/мм ($U_{откр}$), ток при прямом смещении 1,2 В ($I_{пр}$), напряжение прямого смещения при котором достигается ток 100 мА/мм ($U_{пр}$) и удельное сопротивление в открытом состоянии ($R_{откр\ уд}$, мОм·см²).

Таблица 1 – Характеристики прямой ветви ВАХ диодов

БШ	$U_{откр}$, В	$I_{пр}$, мА/мм	$U_{пр}$, В	$R_{откр\ уд}$, мОм·см ²
WSi	0,6	19	2,55	3,06
Pt	0,55	32	1,75	2,1
Pd	0,5	39	1,7	2,04
Ni	0,45	55	1,55	1,86
Mo	0,33	69	1,45	1,76
Hf	0,33	75	1,45	1,74
Ti	0,3	82	1,35	1,62
Ta	0,25	67	1,45	1,74

Как видно из табл. 1 наибольшим $U_{откр}$ и, как следствие $U_{пр}$ обладают диоды с БШ на основе тугоплавкого бинарного соединения WSi. Данные барьеры представляют интерес благодаря потенциальной термостабильности. Наиболее часто встречаемые в литературе Ni, Pd и Pt БШ обладают близкими значениями $U_{откр}$ (0,45 - 0,55 В) и $U_{пр}$ (1,55-1,8 В). Наибольшим $I_{пр}$ обладает Ni барьер (55 мА/мм). Группа металлов Mo, Hf, Ti и Ta образуют барьеры Шоттки со схожими характеристиками прямой ветви ВАХ. Данные барьеры обладают низким значением напряжения открывания (0,25-0,3 В) и $U_{пр}$ (1,3-1,45 В) и самыми высокими токами прямого смещения (69-87 мА/мм).

В целом полученный результат согласуется с расчётными литературными данными: через БШ на основе металлов с малой работой выхода (Ta, Ti и Mo) и низкой расчётной высотой барьера Шоттки, протекают большие прямые токи, чем через Ni, Pt и Pd БШ с более высокой работой выхода и высотой барьера.

Была рассмотрена обратная ветвь ВАХ исследуемых диодов. В табл. 2 представлены параметры, характеризующие обратную ветвь ВАХ диодов: напряжение пробоя диодов с шириной электродов 10 мм и расстоянием анод-катод 7 мкм $U_{обр}$, ток утечки $I_{обр}$, отношение тока прямого смещения при напряжении 1,2 В к току утечки $\frac{I_{пр}}{I_{обр}}$, комплексный показатель качества КПК, равный отношению квадрата напряжения пробоя к удельному сопротивлению в открытом состоянии ($KPK = U_{обр}^2 / R_{откр}$ уд) и ёмкость С на частоте 1 МГц при обратном смещении 40 В и амплитуде синусоидального сигнала 100 мВ.

Таблица 2 – Характеристики обратной ветви ВАХ диодов

БШ	$U_{обр}, В$	$I_{обр}, мкА/мм$	$\frac{I_{пр}}{I_{обр}}$	С, пкФ/мм	КПК, МВт/см ²
WSi	350	4,9	$4,0 \cdot 10^6$	0,5	40
Pt	315	2,6	$1,2 \cdot 10^7$	0,2	46
Pd	370	0,5	$7,5 \cdot 10^7$	0,1	68
Ni	300	12,7	$4,3 \cdot 10^6$	0,2	50
Mo	240	347	$2,2 \cdot 10^5$	0,3	32
Hf	200	471	$1,5 \cdot 10^5$	0,2	22
Ti	215	294	$2,9 \cdot 10^5$	0,2	28
Ta	220	67	$1,0 \cdot 10^6$	0,1	28

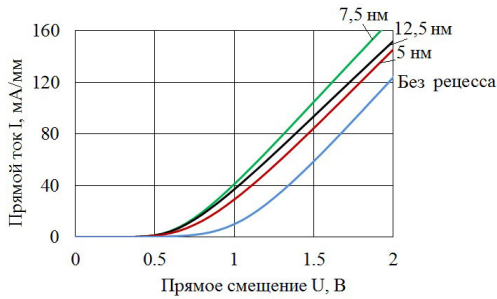
Как видно из табл. 2 диоды с анодами на основе металлов с большой высотой БШ (Pd, Pt, Ni, WSi) обладают большим отношением прямого тока к обратному и, одновременно, большим напряжением пробоя, чем диоды с низким БШ (Ti, Ta, Mo, Hf). Наибольшим

КПК обладают диоды с Pd БШ. Однако, как показала термотренировка, Pd барьер деградирует при относительно низких температурах: 200-250 °С, поэтому дальнейшие работы проводились с Ni БШ, обладающим вторым, по величине КПК (50 МВт/см²) из рассматриваемых БШ.

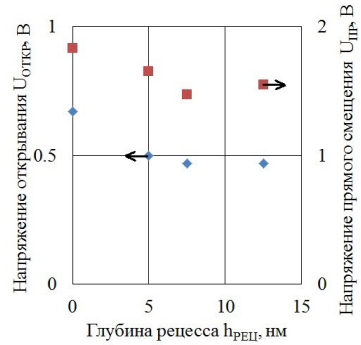
Во второй серии экспериментов была проведена термотренировка исследуемых диодов с Ni БШ, в результате которой ток прямого смещения вырос с 58 мА/мм до 65 мА/мм при $T_{отж} = 200$ °С. Дальнейший рост температуры привёл к снижению $I_{пр}$ до 60 мА/мм при $T_{отж} = 300$ °С. Таким образом общее изменение тока прямого смещения составило 2 мА/мм или +3,5% от начального значения. В то же время в результате термотренировки наблюдалось снижение тока обратного смещения с 9,5 мкА/мм до 0,4 мкА/мм при $T_{отж} = 250$ °С. Увеличение $T_{отж}$ до 300 °С привело к росту $I_{обр}$ до 1,9 мкА/мм. Таким образом общее изменение тока обратного смещения в результате термотренировки составило 7,6 мкА/мм или -80% от начального значения.

В третьей серии экспериментов было рассмотрено влияние рецесса (углубления) анодной области на токи прямого и обратного смещения и напряжения пробоя AlGaN/GaN диодов с Ni БШ и шириной электродов 10 мм. На рис. 5 приведена прямая ветвь ВАХ диодов с Ni БШ и рецессом анода 0-12,5 нм (а) и зависимость напряжения открывания и напряжения прямого смещения от глубины анодного рецесса (б). Расстояние анод-катод 7 мкм.

Из рис. 5 (а) видно, что увеличение глубины анодного рецесса с 0 до 7,5 нм приводит к росту тока прямого смещения с 59 до 104 мА/мм (при $U=1.5$ В), или на 76%. Перетрав барьера AlGaN не приводит к росту тока прямого смещения относительно глубины 7,5 нм. Из рис. 5 (б) видно, что увеличение глубины рецесса до 7,5 нм приводит к снижению напряжения открывания с 0,67 В до 0,47 В, а напряжения прямого смещения с 1,83 В до 1,47 В.



а)



б)

Рисунок 5 – Прямая ветвь ВАХ диодов с Ni BШ и рецессом анода 0-12,5 нм (а). Зависимость напряжения открывания (по основной оси) и напряжения прямого смещения (по вспомогательной оси) от глубины рецесса (б). $L_{a-k} = 7$ мкм.

Перетрав барьерного слоя AlGaN приводит к увеличению напряжения прямого смещения до 1,55 В и не приводит к изменению напряжения открывания. Уменьшение напряжения открывания диодов и, как следствие увеличение токов прямого смещения связано с понижением толщины потенциального барьера между металлизацией анода и двумерным электронным газом, или, другими словами, уменьшением толщины BШ. Это приводит к росту вероятности туннелирования носителей заряда сквозь потенциальный барьер и повышению туннельных токов.

На рис. 6 приведена зависимость тока обратного смещения диодов с Ni BШ и рецессом анода 0-12,5 нм.

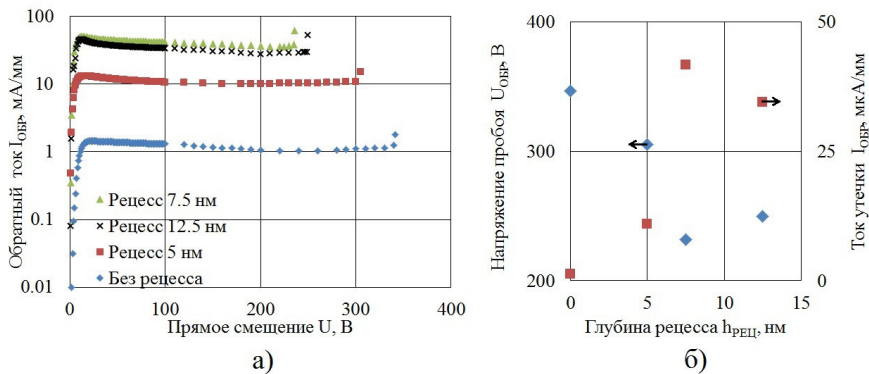


Рисунок 6 – Зависимость тока обратного смещения диодов с Ni БШ и рецессом анода 0-12,5 нм.

Как видно из рис. 6, увеличение глубины анодного рецесса до 7,5 нм приводит к росту тока обратного смещения с 1,3 мкА/мм до 42 мкА/мм и уменьшению напряжения пробоя с 340 В до 230 В. Дальнейшее увеличение глубины рецесса до 12,5 нм приводит к снижению тока обратного смещения до 34 мкА/мм и увеличению напряжения пробоя до 250 В.

На рис. 7 приведена зависимость максимально допустимого напряжения обратного смещения диодов с Ni БШ и рецессом анода 0-12,5 нм от расстояния анод-катод.

Из рис. 7 видно, что увеличение глубины анодного рецесса до 7,5 нм приводит к уменьшению напряжения пробоя во всём диапазоне рассматриваемых расстояний анод-катод. Кроме того, зависимость $U_{обр}$ от $L_{а-к}$ для диодов без рецесса анода обладает характерным насыщением. Таким образом, можно сделать вывод что для применяемой гетероструктуры максимально достижимое напряжение обратного смещения Ni БШ не превышает 370-380 В. Уменьшение напряжения пробоя с ростом глубины рецесса до 7,5 нм может быть связано с уменьшением толщины потенциального барьера и увеличением его проводимости, что приводит к уменьшению напряжения, необходимого для лавинообразного нарастания носителей заряда в канале диода.

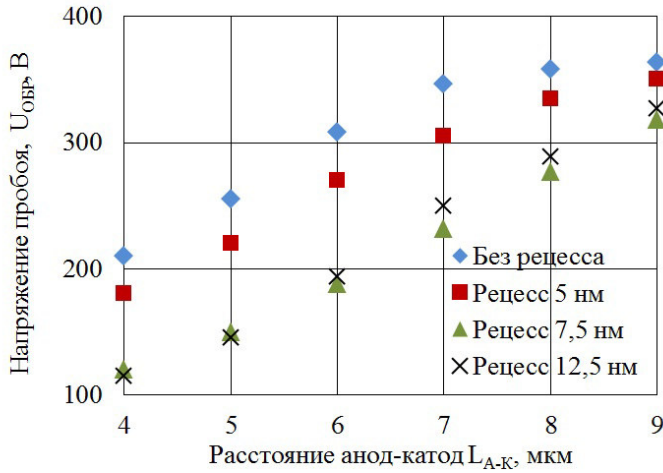


Рисунок 7 – Зависимость максимально допустимого напряжения обратного смещения диодов с Ni БШ и рецессом анода 0-12,5 нм от расстояния анод-катод.

Увеличение глубины рецесса до 12,5 нм приводит к негативному воздействию на барьер, описанному ранее, что снижает токи утечки, тем самым ограничивая лавинообразное нарастание носителей заряда, что несколько увеличивает напряжение пробоя. Наибольшее напряжение пробоя $U_{обр} = 363$ В достигнуто для диодов без рецесса анода при $L_{а-к} = 9$ мкм.

Был разработан технологический маршрут создания AlGaIn/GaN ДБШ, совместимый с технологией создания GaN НЗ транзисторов с затвором на основе pGaIn. Технологический маршрут включал блоки формирования меза-изоляции, омических контактов, барьерных контактов, утолщения металлизации, утонения пластины и корпусирования. Блоки омических и барьерных контактов были разработаны автором работы, остальные блоки были заимствованы из производственной линейки АО "НФ "Микран" и НОЦ "Нанотехнологии" ТУСУР. Фотография корпусированного диода и кристалла приведена на рис. 8

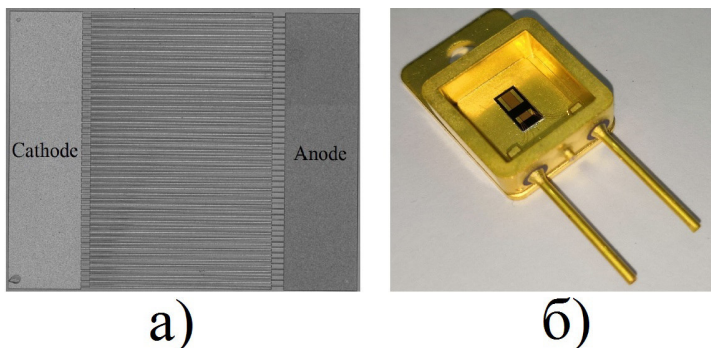


Рисунок 8 – Микрофотография кристалла изготовленного диода с шириной периферии 50 мм (а) и корпусированного диода (б).

В результате выполнения данной работы были изготовлены корпусированные мощные GaN диоды с шириной электродов 50 мм со следующими характеристиками: прямой ток $I_{пр} = 3,5$ А, максимальное обратное напряжение $U_{обр} = 250$ В, входная емкость при обратном смещении 40 В $C = 10$ пкФ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты работы представлены ниже.

- 1) Исследовано влияние конструктивно-технологических особенностей низкотемпературных Ta/Al ОК к гетероструктуре AlGaN/GaN, выраженной на кремниевой подложке.
- 2) Установлено, что увеличение толщины Ta приводит к повышению оптимума температуры вжигания. Оптимальная толщина Ta составила 10 нм.
- 3) Выявлено, что увеличение толщины алюминия приводит к снижению минимально достижимого контактного сопротивления и росту температуры, необходимой для вжигания ОК. Оптимальная толщина Al составила 300 нм.
- 4) Установлено, что добавление тонкой плёнки верхнего (защитного) металла приводит к росту контактного сопротивления ОК.

5) Показано, что рецесс барьерного слоя AlGa_N на 5 нм позволяет снизить контактное сопротивление ОК с 0,8 Ом·мм (без рецесса) до 0,4 Ом·мм. Увеличение глубины рецесса свыше 5 нм приводит к росту контактного сопротивления вплоть до 53 Ом·мм при глубине рецесса 12,5 нм.

6) Исследовано влияние материала барьера Шоттки на электрические характеристики диодов.

7) Установлено, что оптимальным материалом БШ с КПК=50 МВт/см² является Ni.

8) Выявлено, что увеличение глубины анодного рецесса вплоть до полного удаления AlGa_N приводит к росту токов прямого и обратного смещения а также снижению напряжения пробоя.

9) Показано что увеличение длины анодного полевого электрода приводит к росту ёмкости диода и снижению напряжения пробоя.

10) Разработан технологический маршрут создания AlGa_N/Ga_N диодов, совместимый с технологией создания pGa_N/AlGa_N/Ga_N НЗ транзисторов, позволяющий реализовать диоды и транзисторы на одной интегральной схеме.

11) Изготовлены корпусированные мощные Ga_N диоды с шириной электродов 50 мм со следующими характеристиками: прямой ток I_{пр} = 3,5 А, максимальное обратное напряжение U_{обр} = 250 В, входная емкость при обратном смещении 40 В C = 10 пкФ, которые могут быть использованы для создания источников вторичного электропитания высокой эффективности.

Список опубликованных работ. Содержание диссертации отражено в 22 работах, в числе которых следующие основные:

Статьи, опубликованные в журналах из перечня ВАК:

1) Федин И.В. AlGa_N/Ga_N диоды с барьерами Шоттки на основе Ta, Ni, WSi и TiN / И.В. Федин, Е.В. Ерофеев, В.В. Федина // Вестник СибГУТИ - 2018. - №3. С. 62-68.

2) Ерофеев Е.В. Низкотемпературные омические контакты на основе Ta/Al к гетерозипитаксиальным структурам AlGa_N/Ga_N на кремниевых подложках / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, В.В. Федина, А.П. Фазлеев // ФТП - 2018 - Т. 53, №2. - С. 249 - 252.

3) Ерофеев Е.В. Мощные GaN транзисторы с подзатворной областью на основе МДП-структур / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, А.В. Юрьева, В.В. Федина, М.В. Степаненко // ФТП - 2017 - Т. 51, №9. - С. 1278 - 1281.

4) Ерофеев Е.В. Увеличение порогового напряжения отпира-ния силовых GaN транзисторов при использовании низкотемпера-турной обработки в потоке атомарного водорода / Е.В. Ерофеев, И.В. Федин, Ю.Н. Юрьев, И.В. Кутков // ФТП - 2017 - Т. 51, №2. - С. 253 - 257.

5) Ерофеев Е.В. Силовые коммутационные транзисторы на осно-ве эпитаксиальных гетероструктур нитрида галлия / Е.В. Ерофе-ев, И.В. Федин, Ю.Н. Юрьев. // Микроэлектроника - 2017 - Т. 46, №3. - С. 224 - 230.

Статьи, проиндексированные в базе данных Scopus:

6) Fedin I.V. AlGaIn/GaN Diodes with Ni Schottky Barrier and Recessed Anodes / I.V. Fedin, E.V. Erofeev, V.V. Fedina // SibCon - 2019 - P. 1 - 4.

7) Erofeev E.V. High thermal stability ohmic contacts to nitride semiconductors with refractory metal sidewall diffusion barrier deposited by magnetron sputtering / E.V. Erofeev, I.V. Fedin, V.V. Fedina // IOP Conf. Series - 2018 - V. 11115 №032068. - P. 1 - 6.

8) Erofeev E.V. Power Switching Transistors Based on Gallium Nitride Epitaxial Heterostructures / E.V. Erofeev, I.V. Fedin, Yu. N. Yuryev // Russian Microelectronics - 2017 - V. 46, №3. P. 206 - 211.

9) Erofeev E.V. High-Voltage MIS-Gated GaN Transistors / E.V. Erofeev, I.V. Fedin, V.V. Fedina, M.V. Stepanenko, A.V. Yuryeva // Semiconductors - 2017 - V. 51, №9. - P.1229 - 1232.

10) Erofeev E.V. Increase the Threshold Voltage of High Voltage GaN Transistors by Low Temperature Atomic Hydrogen Treatment / E.V. Erofeev, I.V. Fedin, I.V. Kutkov, Yu. N. Yuryev // Semiconductors - 2017 - V. 51, №2. - P. 253 - 257.

11) Fedin I.V. Fast Switching GaN Schottky Barrier Diodes / I.V. Fedin, E.V. Erofeev // EDM - 2016 - P. 44-47.