

На правах рукописи

Захарченко Роман Викторович

**ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ НА
ОСНОВЕ GAN**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Автор:



Москва - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**Научный
руководитель:**

Каргин Николай Иванович

доктор технических наук, профессор, проректор НИЯУ МИФИ, г. Москва

**Официальные
оппоненты**

Селезнев Борис Иванович

доктор технических наук, заведующий кафедрой «Физики твердого тела и микроэлектроники» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»

Козырев Евгений Николаевич

доктор технических наук, заведующий кафедрой электронных приборов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

Павлов Александр Юрьевич

кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Исследования и разработки комплексной технологии формирования полупроводниковых микро- и наноструктур, малозумящих и мощных наногетероструктурных СВЧ-транзисторов и «МИС»» федерального государственного автономного научного учреждения Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук

Защита диссертации состоится «22» апреля 2021 г. в 16.00 часов. на заседании диссертационного совета МИФИ.05.03 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, тел. (499) 788-56-99)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ds.mephi.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021

Ученый секретарь

диссертационного совета МИФИ.05.03

кандидат технических наук

Веселов Д.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность работы

За последнее десятилетие интерес к полупроводниковым источникам освещения на основе GaN значительно увеличился. Это обуславливается их высокой эффективностью по сравнению с классическими источниками света (лампы накаливания, люминесцентные лампы и пр.), экологичностью (отсутствие ртути, фосфора и ультрафиолетового излучения) и надежностью (высокая механическая прочность, длительный срок службы — от 30 000 до 100 000 часов). Так, например, доля светоизлучающих диодов на рынке осветительных приборов в 2010 году составляла 7%, а уже к 2019 году превысила половину рынка.

В настоящее время светоизлучающие диоды на основе GaN являются основными полупроводниковыми приборами, излучающими на длине волны 450 - 480 нм. Преимущество твердых растворов InGaN/AlGaN заключается в высокой эффективности излучательной рекомбинации, несмотря на высокую концентрацию проникающих дислокаций, связанных с технологическими особенностями получения эпитаксиальных пленок.

Современные тенденции развития светоизлучающих диодов на основе GaN сводятся к увеличению мощности и эффективности за счет увеличения плотностей тока в активной области кристалла и уменьшению потерь на внутреннее поглощение излучения. Однако проблема снижения последовательного электрического сопротивления, а также увеличения коэффициента пропускания прозрачных проводящих контактов является малоизученной. Эти факторы в значительной мере оказывают влияние на эффективность и надежность светоизлучающих диодов на основе GaN.

Следовательно, одним из важнейших этапов изготовления светоизлучающих диодов на основе GaN является формирование низкоомных омических контактов, а также нанесение прозрачных проводящих контактов с высоким коэффициентом пропускания.

Разработке технологии изготовления омических контактов посвящено несколько работ, в которых показано, что для получения невыпрямляющего контакта могут быть использованы различные системы металлизаций.

Для создания низкоомной системы к n^+ GaN чаще всего используют металлизацию Ti/Al/Ni/Au, так как именно она демонстрирует наиболее низкое значение удельного сопротивления. Однако результаты, полученные в этих работах, имеют существенные различия в значениях сопротивления омических контактов.

Для получения прозрачного проводящего контакта к p^+ области светодиодной структуры обычно выбирают покрытие из оксидов индия и олова (ITO). Данный контакт обладает наибольшей оптической прозрачностью в диапазоне длин волн от 400 до 600 нм, а также имеет довольно низкое удельное сопротивление. В случае с ITO авторы также сообщают о сильном влиянии технологических условий нанесения на электрооптические свойства получаемых пленок.

Исходя из того, что значительное влияние на процесс формирования омического контакта оказывают технологические условия нанесения и последующей обработки контактных систем, можно сделать вывод о необходимости оптимизации факторов, влияющих на величину удельного сопротивления, а также на коэффициент пропускания прозрачных проводящих контактов.

В отечественных работах авторы сообщают о разработке омических контактов к светодиодам синего диапазона спектра с сопротивлением, превышающим значение 0,3-0,4 ом·мм. Коэффициент пропускания прозрачных проводящих контактов в этих работах составляет менее 90% в заданном диапазоне длин волн, тогда как в зарубежной литературе авторам удавалось получить вплавные контакты со значением удельного сопротивления 0,25-0,28 ом·мм и прозрачные проводящие контакты с коэффициентом пропускания 93-95%.

Разработка воспроизводимой технологии получения невыпрямляющих контактов с низким удельным сопротивлением контактной системы, а также прозрачных проводящих контактов с высоким коэффициентом пропускания, является актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность и надежность светоизлучающих диодов на основе GaN.

Цель работы.

Целью настоящей работы является разработка и выбор контактных систем для светоизлучающих диодов на основе GaN с удельным сопротивлением менее 0,3 Ом·мм и коэффициентом пропускания прозрачных проводящих контактов более 90%.

Для реализации цели работы решались следующие задачи:

1. Разработка топологии тестовой структуры для измерения удельного электрического сопротивления омического контакта.
2. Исследование влияния технологических факторов (состав и толщина металлизации, режим термической обработки и пр.) на электрические характеристики, а также морфологию омических контактов.
3. Исследование влияния методов нанесения прозрачных проводящих контактов на их электрооптические характеристики.
4. Оптимизация и разработка технологии получения омических контактов к приборным гетероструктурам на основе GaN с учетом проведенных исследований.

Научная новизна работы

1. Экспериментально установлены закономерности влияния режимов термической обработки на оптические свойства прозрачных проводящих пленок на основе ИТО, позволяющие получить контактную систему с коэффициентом пропускания свыше 90% в диапазоне длин волн 450-550нм.
2. Установлена закономерность увеличения среднеквадратичной шероховатости поверхности многослойной металлизации Ti/Al/Ni/Au от

режимов термической обработки, связанная с образованием жидкой фазы в сплаве Au-Al за счет взаимного проникновения через барьерный слой никеля.

3. Впервые экспериментально установлено влияние примеси кислорода и азота, присутствующих в камере при проведении процесса быстрой термической обработки исходно непрозрачных пленок ITO к светодиодным гетероструктурам, сформированных методом электронно-лучевого испарения, на изменение их коэффициента пропускания в диапазоне длин волн 450-550нм.

4. Установлена закономерность термической обработки многослойной контактной металлизации Ti/Al/Ni/Au, полученной резистивным испарением в вакууме, на электрические свойства омического контакта к p+ области светодиодной гетероструктуры, позволяющая получить контактную систему с удельным сопротивлением 0,25 Ом·мм.

5. Экспериментально установлено влияние токораспределяющего слоя на поверхности прозрачного проводящего контакта на растекание тока по поверхности кристалла, позволяющего добиться плотности тока через светодиодную гетероструктуру в 13,2 А/см².

Практическая значимость работы

1. Разработан технологический процесс формирования невыпрямляющего прозрачного контакта к p+- области светодиодной структуры на основе InGaN/GaN, излучающий на длине волны 465 нм, включающий операцию термического отжига в кислородосодержащей среде, которая позволяет повысить оптическую прозрачность контакта на основе пленки ITO свыше 90% и последующую обработку в среде азота, которая позволяет понизить поверхностное сопротивление контакта.

2. Разработан технологический процесс формирования омического контакта на основе Ti/Al/Ni/Au к светодиодным гетероструктурам AlGaN/InGaN методом резистивного испарения в вакууме, позволяющий снизить величину удельного сопротивления до значений 0,25 Ом·мм путем термической обработки при температуре 750°С в течении 30 секунд.

3. Разработан тестовый модуль измерения сопротивления омических контактов, позволяющий не учитывать сопротивление измерительной системы в процесс измерения контактных систем.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Методика снижения величины среднеквадратичной шероховатости поверхности менее 50нм за счет увеличения барьерного слоя никеля до 50нм. и снижения слоя золота до 100нм в многослойной системе металлизации Ti/Al/Ni/Au.

2. Методика просветления исходно непрозрачных пленок ITO, полученных методом электронно-лучевого испарения, с коэффициентом пропускания выше 90% в диапазоне длин волн 450-550нм за счет компенсации дефицита кислорода при быстром термическом отжиге.

3. Методика направленного изменения удельного сопротивления пленок ITO, применяемых в качестве омического контакта к p-GaN, за счет отжига в кислородной/азотной среде для согласования поверхностного сопротивления гетероструктуры и прозрачного проводящего контакта.

4. Методика снижения величины удельного сопротивления омических контактов Ti/Al/Ni/Au до значения 0,25 ом·мм за счет выбора оптимального соотношения слоев титана и алюминия (1:3) и режима термической обработки (быстрый термический отжиг в течение 40 секунд и температуре 750°C).

Апробация результатов работы

Результаты диссертационного исследования были представлены на: международной конференции по микро- и нано- электронике – 2016г. (ICMNE-2016, Москва, Звенигород, Россия 2016г.), на научной сессии НИЯУ МИФИ «МИФИ» (Москва, 2013 - 2015 г.), на научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Мокеровские чтения" (Москва, 2013 -2019 г.),

Работа соискателя выполнена на кафедре «Физика конденсированных сред» (№67) Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» с использованием оборудования центра коллективного пользования

«Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» в рамках программ:

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

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

Работа отмечена «Премией правительства Москвы молодым ученым 2017г.».

Опубликованные результаты.

По материалам диссертационного исследования опубликовано 7 научных работ, в том числе 2 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 статей реферируемых международной базой данных Scopus, 11 работ - в сборниках научных трудов и тезисах докладов научно-технических конференций, 1 патент на полезную модель.

Личный вклад автора

Диссертация является итогом исследований автора, проводившихся на кафедре «Физика конденсированных сред» (№67) Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». Автор разработал технологию нанесения омических контактов к слоям n- и p-GaN светоизлучающего диода, исследовал состав и морфологию многослойных металлических систем, занимался измерениями полученной контактной металлизации, проводил анализ результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 118 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка, 17 таблиц и список литературы из 111 наименований, состоит из введения, четырех глав, заключения с выводами и списка литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении обоснована актуальность работы по формированию низкоомных омических контактов, а также прозрачных проводящих контактов с высоким коэффициентом пропускания, сформулированы цель и задачи работы, приведены научная новизна и практическая значимость, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен литературный обзор по теме диссертации, в рамках которого определены основные свойства и параметры омических контактов, а также их влияние на характеристики светоизлучающих приборов на основе GaN.

В отличие от кремния омические контакты к широкозонным полупроводникам получают на основе многослойных композиций, причем состав композиций для полупроводников *n* и *p* типа различен. Для контакта к GaN *n* типа чаще всего используются системы металлизации на основе титана и алюминия, для GaN *p* типа металлизации на основе металлов с большой работой выхода, таких как Ni и Pd. Для прозрачного омического контакта к светодиодным структурам чаще всего используется смесь оксидов индия и олова.

Основной характеристикой качества омического контакта является удельное сопротивление, величина которого не должна превышать значение 0,4 Ом·мм с целью для минимизации потерь перехода металл-полупроводник.

Свойства контактов, в том числе величина контактного сопротивления, зависят от технологических особенностей нанесения контактных материалов и их последующей обработки. Для получения необходимых свойств часто применяется термическая обработка. В литературе описано множество различных методов нанесения контактных материалов и режимов их последующей обработки. Причем результаты обработки в одинаковых режимах, описанные в разных источниках, существенно отличаются.

Для количественной оценки контактного сопротивления наиболее удобен метод длинной линии, требующий создания специальной тестовой структуры. Однако измерения на основе этого метода имеют систематические погрешности, обусловленные сопротивлением проводов, контактных зондов и иных паразитных сопротивлений.

На основе литературного обзора сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе описано используемое технологическое оборудование, произведена оптимизация геометрии камеры испарения установок термического и электронно-лучевого напыления, а также рассмотрены геометрические характеристики металлизации многослойных контактных пленок.

Исходя из данных, полученных в литературном обзоре, для формирования низкоомных омических контактов к n-GaN была выбрана система металлизации Ti/Al/Ni/Au. Нанесение металлов производилось на установке термического резистивного напыления Kurt J. Lesker PVD75. Для формирования топологии металлизации была выбрана обратная литография, так как данный метод является оптимальным при формировании многослойных контактных систем.

С целью снижения расхода материалов (титана, алюминия, никеля и золота) при сохранении расхождения толщины металлизации по пластине не более 3% на диаметре 2 дюйма, была проведена работа по оптимизации вакуумной камеры. В результате расчета удалось установить, что оптимальное расстояние подложка-испаритель - 205мм.

Для подтверждения расчета была проведена серия экспериментов для всех четырех металлов. Были использованы кремниевые подложки, на которые поочередно наносились слои титана - 35нм, алюминия-100нм, никеля – 50нм и золота - 135нм. Давление в вакуумной камере поддерживалось на уровне $4 \cdot 10^{-7}$ Торр. Измерение толщины во время напыления производилось

посредством кварцевых датчиков с точностью менее 1 нм. Скорость осаждения поддерживалась в диапазоне 3-4 нм/с.

Далее были проведены измерения толщины полученных пленок, а также их поверхностное сопротивление по пластине. Определена зависимость, при которой значение удельного поверхностного сопротивления возрастает при уменьшении толщины измеряемой пленки. Так, например, среднее отклонение поверхностного сопротивления на расстоянии 20 мм от центра подложки составляет 1,5% а на расстоянии 40 мм уже составляет 13%. Среднее расхождение толщины и удельного поверхностного сопротивления металлов на подложке GaN диаметром 2 дюйма не превышает 3%, что полностью соответствует современным технологическим нормам.

Для проведения измерения удельного сопротивления омических контактов (R_0) был разработан тестовый модуль (рис.1.). В отличие от классического метода «длинной линии», топология данного тестового модуля посчитана таким образом, чтобы учитывать вклад, вносимый сопротивлением измерительной системы, что значительно повышает точность и скорость измерений.

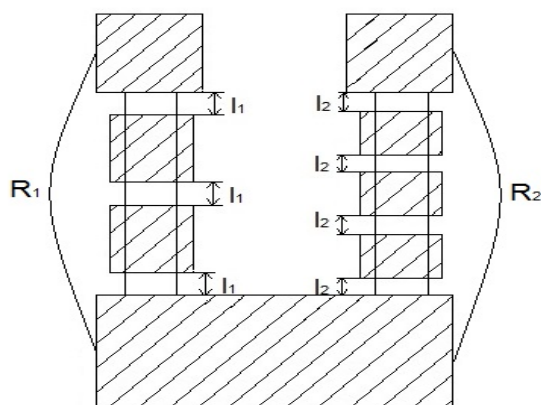


Рис. 1. Тестовый модуль для измерения сопротивления омических контактов.

$$\begin{cases} R_1 = 6R_0 + R_{sh} \frac{3l_1}{W} + R_{изм} \\ R_2 = 8R_0 + R_{sh} \frac{4l_2}{W} + R_{изм} \end{cases}$$

При $3l_1 = 4l_2$ исключается $R_{изм}$

$$R_0 = \frac{R_2 - R_1}{2}$$

В ходе контроля линейных размеров элементов тестовой структуры, были определены реальные размеры элементов и расстояния между ними. Полученные значения сравнивались с кодировочными, заложенными в модель топологии при проектировании.

Установлена величина коррекции размеров полученных топологических элементов, составляющая 0,2 мкм на сторону топологического элемента. Данная поправка учитывается при разработке топологии.

Третья глава посвящена формированию омических контактов к n-GaN светодиодной гетероструктуре. В работе использовалась многослойная металлизация Ti/Al/Ni/Au.

Для выявления причин возникновения глубокой шероховатости на поверхности омического контакта при быстром термическом отжиге было проведено исследование послойных составляющих металлизации Ti/Al/Ni/Au.

Для исследования использовались подложки с отдельно нанесенными слоями Al, Ti/Al, Ti/Al/Ni и Ti/Al/Ni/Au. Каждый из образцов подвергался двухэтапной термической обработке при температуре 400°C в течение 300с и 850°C в течение 30с.

Исследование проводилось на профилометре Bruker Dektak XT, а также на установке рентгеновской дифрактомерии Rigaku Ultima IV. Метод рентгеновской дифрактомерии позволил установить присутствие тугоплавких соединений TiAl₃, Al₂Ti, AlTi, в составе металлизации, которые способствуют

образованию поликристаллических соединений на поверхности двухслойной системы Ti/Al. При термической обработке свыше 600°C образуются фазы NiTi, Al₃Ti, и Ni₂Al₃ для контактной системы Ti/Al/Ni, за счет интердиффузии металлов. В работе показано, что данные соединения в процессе отжига не образуют жидкой фазы. Для образцов Al, Ti/Al, Ti/Al/Ni в ходе эксперимента шероховатость поверхности не превышала 60нм. Однако при отжиге контактной системы Ti/Al/Ni/Au на ее поверхности формируется значительно более глубокая шероховатость порядка 300нм. Было показано, что данная проблема возникает вследствие возникновения соединения Au-Al, которая формируется вследствие взаимного проникновения металлов через барьерный слой никеля. Более того, в процессе термической обработки образуется жидкая фаза Al₂Au в виде отдельных капель, которые и оказывают значительное влияние на образование шероховатого рельефа поверхности омического контакта. Решение данной проблемы было найдено в уменьшении слоя золота до 100нм либо увеличении барьерного слоя никеля до 60нм в составе многослойной металлизации Ti/Al/Ni/Au.

В результате проведенных исследований для формирования омического контакта к n-GaN светодиодной гетероструктуры была выбрана контактная система Ti/Al/Ni/Au с толщинами 30/90/50/100нм. соответственно.

Для определения минимального значения контактного сопротивления была проведена термическая обработка в диапазоне температур от 400 до 800°C и временем отжига 30с. Значение сопротивления омического контакта равного 0,25 ом·мм являются минимальными, и были достигнуты при температуре отжига 700°C (рис.2.)

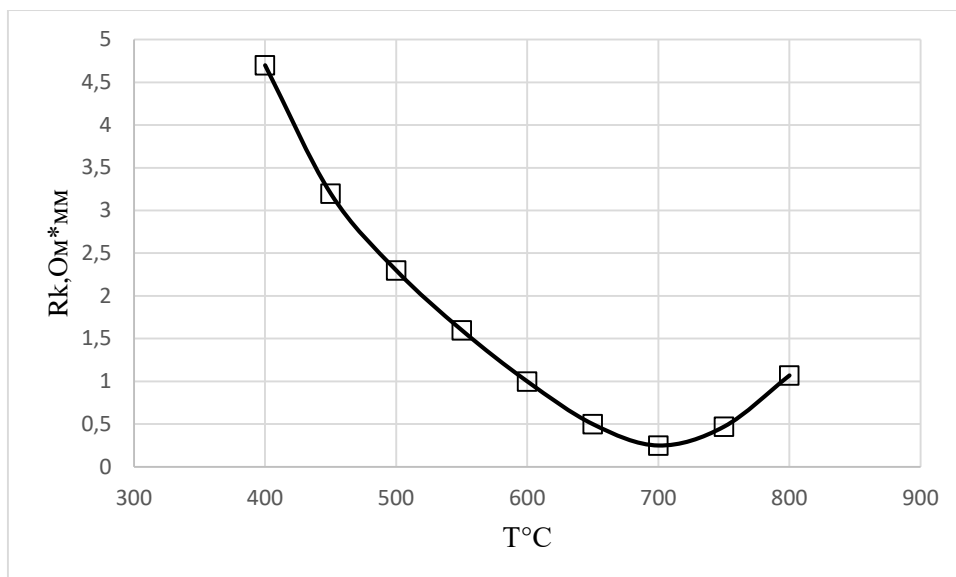


Рисунок 2. Зависимость сопротивления омических контактов к n-GaN светодиодной гетероструктуры от температуры отжига.

Четвертая глава посвящена формированию прозрачного проводящего контакта на основе оксидов индия и олова к p-GaN области светодиодной гетероструктуры.

В качестве контакта к p-GaN светодиодной гетероструктуры была выбрана стехиометрическая смесь оксидов индия и олова (ITO) в соотношении 9:1. Нанесение прозрачного проводящего контакта проводилось методом электронно-лучевого испарения на установке Kurt J. Lesker PVD250. В работе исследовались два режима нанесения:

1. Электронно-лучевое испарение стехиометрического состава ITO при давлении остаточных газов $4 \cdot 10^{-7}$ Торр.

2. Электронно-лучевое испарение в среде кислорода при давлении $5 \cdot 10^{-5}$ Торр и потоком кислорода 50sccm. Полученные пленки оксида индия и олова обладали низким (менее 20%) коэффициентом пропускания, а также имели очень плохую адгезию к поверхности подложки.

Далее была проведена серия экспериментов с быстрым термическим отжигом данных пленок в течение 30 секунд в атмосфере азота и/или кислородосодержащей среде. В ходе эксперимента установлено, что отжиг свыше 450°C позволяет снизить значение поверхностного сопротивления до 9

Ом/□ и повысить оптическое пропускания в заданном диапазоне длин волн до значений свыше 90% (рисунок 3).

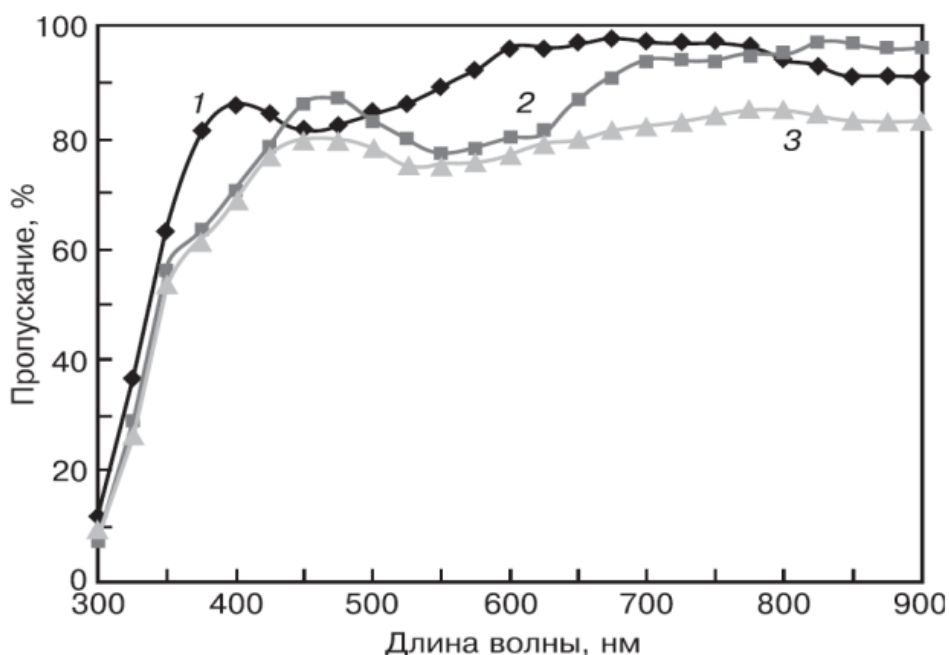


Рисунок 3. Зависимость коэффициента пропускания пленок ITO от длины волны в оптическом диапазоне, полученных в различных режимах нанесения и последующего отжига в воздухе: №1 –без напуска кислорода, после отжига 30 с при 600°C, №2 –с напуском кислорода, после отжига 30 с при 600°C и №3 –без напуска кислорода, после отжига 2 часа при 450°C.

При проведении серии экспериментов обнаружена закономерность и разработана методика направленного изменения поверхностного сопротивления для прозрачных проводящих пленок ITO. Так, например, при отжиге в диапазоне температур 500-600°C в атмосфере азота удается получить сопротивление пленки 15-20 Ом/□. При дальнейшей термической обработке в кислородсодержащей среде можно повысить значение поверхностного сопротивления до 40-50 Ом/□. Так же данный метод работает и в обратном направлении. Результат данного исследования позволяет проводить направленное изменение значения поверхностного сопротивления прозрачного проводящего контакта для согласования с поверхностным сопротивлением p-GaN, что позволит добиться оптимальных условий для

растекания тока по поверхности светодиодной гетероструктуры, а, следовательно, и равномерного свечения всего кристалла.

Сопротивление омического контакта ITO было измерено и составило $5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

ВАХ полученных в данной работе светодиодных структур с контактами из пленки ITO без нанесения на нее металлизации приведены на рисунке 4.

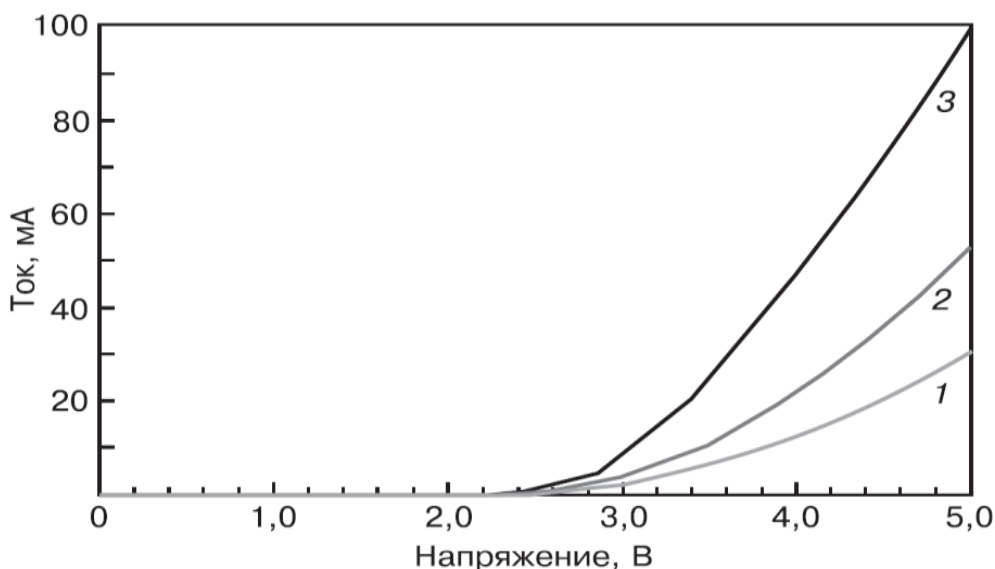


Рисунок 4. Вольт амперная характеристика тестовой светодиодной гетероструктуры при различных режимах термообработки в кислородсодержащей среде плёнок ITO: 550°C (1), 600°C (2), 650°C (3)

По вольтамперным характеристикам, представленным на рисунке 4, видно, что ток растет с ростом напряжения нелинейно. При одинаковом прямом токе через диодную структуру равном 20 мА (плотность тока составляла $13,2 \text{ А/см}^2$) напряжение на диоде было 4,5 В после отжига при 550°C, 3,95 В после 600 °C и 3,4 В после 650 °C.

Далее была проведена оптимизация топологии светодиодного кристалла.

Сравнение проводилось для пяти различных топологий светодиодов, с различной конструкцией токораспределяющего слоя (Рисунок 5).

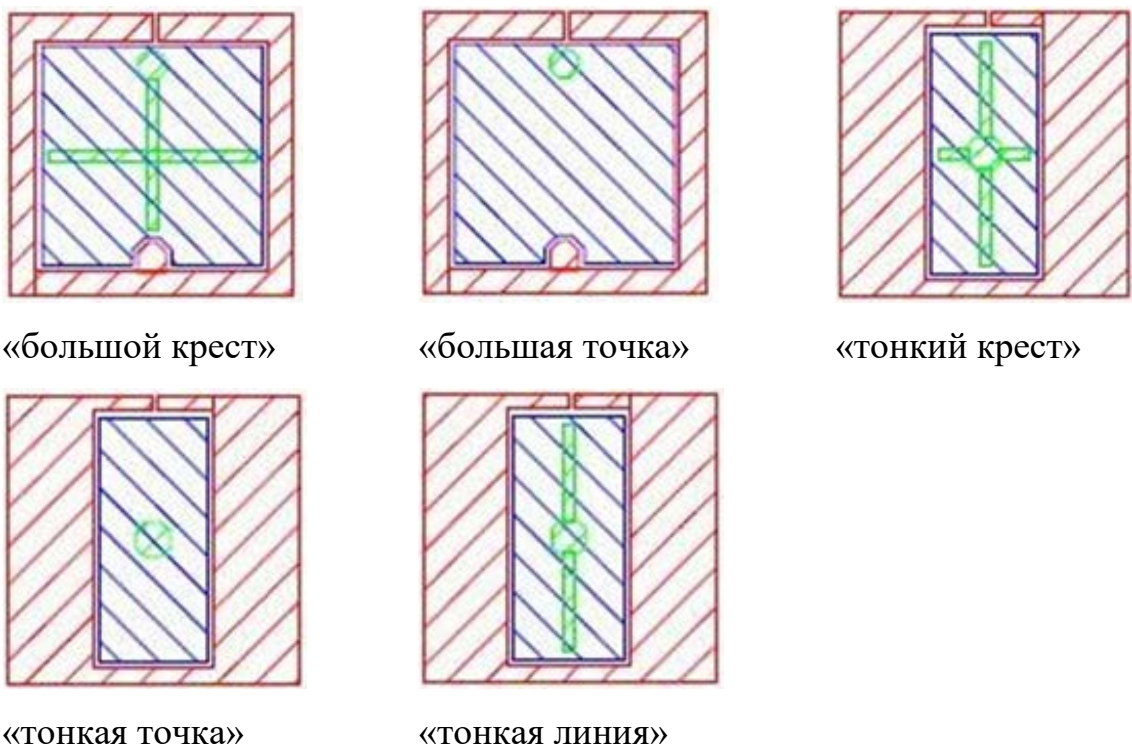


Рисунок 5. Различные варианты топологий.

Критерием оптимизации является ВАХ прямого тока через светодиод, а также равномерность растекания тока по поверхности активной области светодиода.

Для оптимизации поперечного профиля гетероструктуры по величине прямого тока был проведен анализ конструкции в программе SpeCLED с учетом влияния состава и толщин эпитаксиальных пленок, а также топологии контакта на характеристики прибора (Рисунок 6).

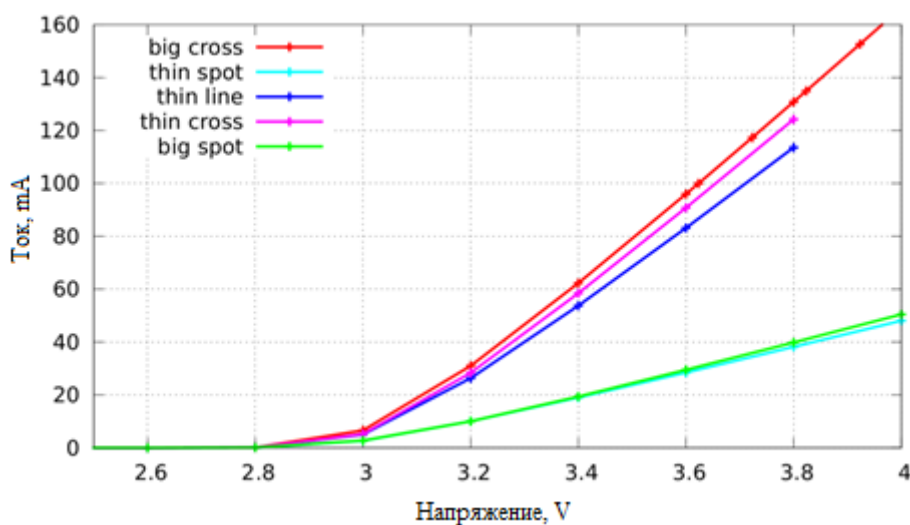


Рисунок 6. Рассчитанные при помощи SpeCLED ВАХ.

Как видно из расчета, оптимальным, с точки зрения величины прямого тока через светодиод, являются топологии с токораспределяющим слоем в форме креста. Это обусловлено тем, что металлизация токораспределяющего слоя имеет меньшее, чем ITO поверхностное сопротивление, и, тем самым, позволяет выровнять приложенный потенциал к большей площади активной области.

Сравнение с экспериментом показало расхождение менее чем в 10% (Рисунок 7).

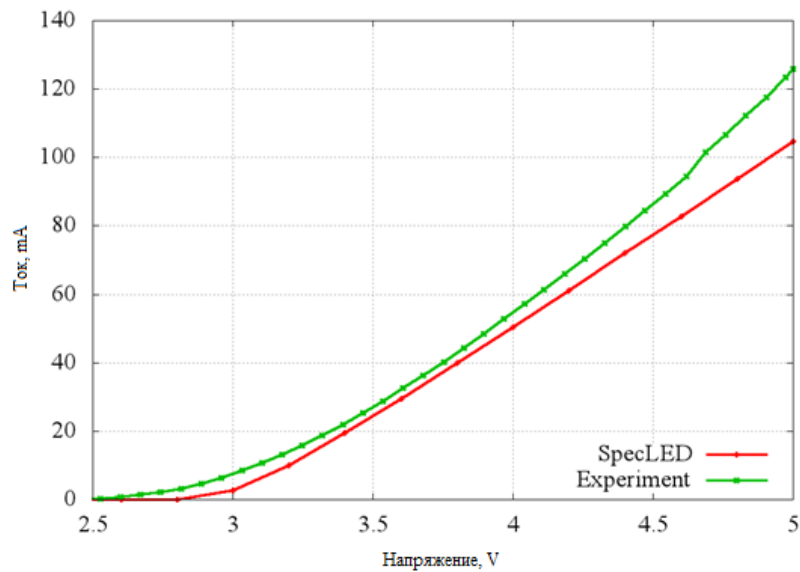


Рисунок 7. Сравнение модельного расчета и экспериментальных результатов зависимости прямого тока через светодиод от приложенного напряжения.

Сравнение растекания тока по активной области, так же показало преимущество топологий с токораспределяющим слоем в форме креста над остальными.

Из рисунка 8 видно, что плотность тока распределена равномерно по всей площади активной области, с увеличением по краям. Это увеличение обусловлено уменьшением объема полупроводника, что приводит к увеличению плотности тока.

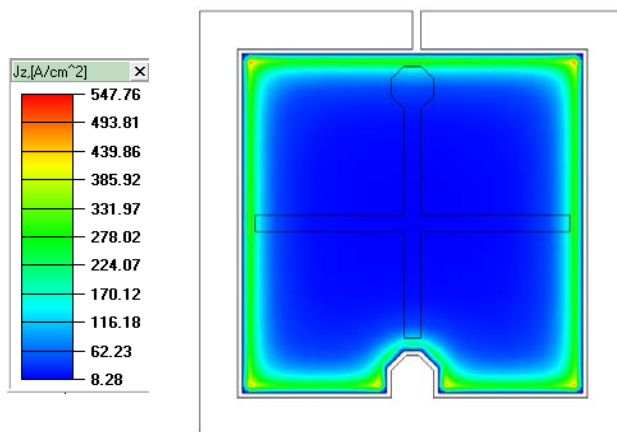


Рисунок 8. Распределение вертикальной компоненты плотности тока в активной области светодиода.

В заключении приведены основные выводы и результаты работы.

Основные результаты диссертационной работы:

В работе проведено исследование технологических процессов формирования высокоэффективных светодиодов на основе гетероструктур AlGaN/InGaN, излучающих на длине волны 465 нм, в том числе:

- разработана топология тестовой структуры для измерения удельного электрического сопротивления омического контакта, устраняющей систематические ошибки измерений, связанные с вкладом паразитных сопротивлений измерительной системы;

- установлена закономерность увеличения среднеквадратичной шероховатости поверхности многослойной металлизации Ti/Al/Ni/Au от режимов термической обработки, связанная с образованием жидкой фазы в сплаве Au-Al за счет взаимного проникновения через барьерный слой никеля;

- разработан технологический процесс формирования омического контакта на основе Ti/Al/Ni/Au к светодиодным гетероструктурам AlGaN/InGaN методом резистивного испарения в вакууме, позволяющий снизить величину удельного сопротивления до значений менее 0,3 Ом·мм путем термической обработки при температуре 750°C в течении 30 секунд;

- выявлено влияние примеси кислорода и азота, присутствующих в камере при проведении процесса быстрой термической обработки исходно

непрозрачных пленок ITO к светодиодным гетероструктурам, сформированных методом электронно-лучевого испарения, на изменение их коэффициента пропускания в диапазоне длин волн 450-550нм;

- разработана методика просветления исходно непрозрачных пленок ITO, полученных методом электронно-лучевого испарения, с достижением коэффициента пропускания >90% в диапазоне длин волн 450-550нм за счет компенсации дефицита кислорода при быстром термическом отжиге

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

1. Zakharchenko, R.V., Vanyukhin K.D., Kargin, N.I., Pashkov, M.V., Seidman, L.A. Processes during annealing of Ti–Al–Ni and Ti–Al–Ni–Au contact metallization systems Russian Microelectronics Volume 44, Issue 8, 1 December 2015, Pages 564-568

2. Zakharchenko, R.V., Vanyukhin K.D., Kargin, N.I., Seidman, L.A. Technological features of the formation of transparent conductive contacts of ITO film for LEDs based on gallium nitride Russian Microelectronics Volume 43, Issue 8, 26 November 2014, Pages 569-574

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

3. Zakharchenko, R.V., Shostachenko, S.A., Ryzhuk, R.V., Leshchev, S.V. Thermal stability of tantalum nitride based thin film resistors. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 498 (2019) 012014

4. Zakharchenko, R.V., Shostachenko, S.A., Porokhonko, Y.A., Belov, A.A., Vasiliev, A.N. Temperature optimization of the Ti/Al/Ni/Au ohmic contact formation to the AlGaIn/GaN heterostructure. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 938(1), 012072

5. Zakharchenko, R.V., Shostachenko, S.A., Zebrev, G.I., Leshchev, S.V., Komissarov, I.V. Technology and characteristics of the transistor with a channel based on graphene. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 151(1), 012015

Статьи, опубликованные в журналах из перечня ВАК РФ

6. Захарченко Р.В., Ванюхин К.Д., Каргин Н.И., Пашков М.А., Сейдман Л.А. Исследование структуры и морфологии поверхности двухслойной контактной металлизации Ti/Al // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2013. № 3. С. 60–65

7. Захарченко Р.В., Ванюхин К.Д., Воронова А.А., Евсеева Е.М., Еремин И.С., Каргин Н.И., Коленцова О.С., Сейдман Л.А. Влияние шероховатости поверхности металлических пленок на точность измерения их толщины с помощью профилометра. Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. 2014. Т. 3. № 5. С. 548.

Материалы конференций

1. Р.В. Захарченко, К.Д. Ванюхин, Ю.А. Концевой, В.А. Курмачев, Л.А. Сейдман. Исследование однородности поверхностного сопротивления металлических пленок, полученных термическим испарением // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2013. Аннотации докладов. -2013. -Т.2, - С.186.

2. Р.В. Захарченко, К.Д. Ванюхин, Н.И. Каргин, Л.А. Сейдман. Технологические особенности формирования прозрачных проводящих контактов из пленки ITO для светодиодов на основе GaN //4-я Научно-практическая конференция по физике и Технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Мокеровские чтения". Тезисы докладов. – 2013. С.36.

3. Р.В. Захарченко, К.Д. Ванюхин, Л.А. Сейдман, А.А. Воронова, П.А. Блинов, Е.М. Евсеева, С.В. Миннебаев. Исследование методов получения прозрачных пленок на основе ITO и их влияние на вольтамперные характеристики полупроводниковых приборов на GaN //4-я Научно-практическая конференция по физике и Технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Мокеровские чтения". Тезисы докладов. – 2013. С.36.

4. Р.В. Захарченко, К.Д. Ванюхин, Л.А. Сейдман, С.А. Стеблин, А.А. Воронова, П.И. Блинов, Е.М. Евсеева, С.В. Миннебаев. Разработка технологии формирования омических контактов к гетероструктуре AlGaIn/InGaIn // Научная сессия НИЯУ МИФИ - 2014. Аннотации докладов. - 2014. - Т.2 - С.87.

5. Р.В. Захарченко, К.Д. Ванюхин, Л.А. Сейдман, С.А. Стеблин, М.П. Пашков, А.А. Воронова, П.И. Блинов, Е.М. Евсеева, С.В. Миннебаев. Исследование структуры и морфологии двухслойной металлизации Ti/Al //Научная сессия НИЯУ МИФИ - 2014. Аннотации докладов. - 2014. - Т.2 - С.85.
6. Р.В. Захарченко, К.Д. Ванюхин, А.А. Воронова, Е.М. Евсеева, Л.А. Сейдман. Оптимизация параметров поверхностного сопротивления светопроводящего электрода из оксида индия-олова //5-я Научно-практическая конференция по физике и Технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Мокеровские чтения". Тезисы докладов. – 2014. С.31.
7. Р.В. Захарченко, К.Д. Ванюхин, Л.А. Сейдман, С.А. Стеблин, А.А. Воронова, П.И. Блинов, Е.М. Евсеева, С.В. Миннебаев Технологические особенности формирования контактной металлизации к LED структуре на основе GaN //5-я Научно-практическая конференция по физике и Технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Мокеровские чтения". Тезисы докладов. – 2014. С.33.
8. Захарченко Р.В., Ванюхин К.Д., Рыжук Р.В., Шостаченко С.А. Исследование процесса формирования омических контактов к гетероструктуре AlGaIn/GaN //Научная сессия НИЯУ МИФИ - 2015. Аннотации докладов. - 2015. - Т.2.
9. Ванюхин К.Д., Сейдман Л.А., Шостаченко С.А., Захарченко Р.В., Миннебаев С.В., Пашков М.В. Исследование структуры и морфологии поверхности контактной металлизации Ti/Al/Ni/Au //6-я Научно-практическая конференция по физике и Технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Мокеровские чтения". Тезисы докладов. – 2015. С.42.
10. Бурдыкин М.С, Захарченко Р.В., Шостаченко С.А., Порохонько Ю.А. Исследование оптических и электрофизических свойств прозрачных проводящих пленок на основе оксида индия-олова //9-я Научно-практическая конференция по физике и Технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Мокеровские чтения". Тезисы докладов. – 2018. С.106.

11. Захарченко Р.В., Шостаченко. С.А., Бурдыкин М.С, Порохонько Ю.А., Рыжук Р.В., Каргин Н.И. Физико-технологические особенности формирования омических контактов для полупроводниковых приборов на основе GaN //10-я Научно-практическая конференция по физике и Технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Мокеровские чтения". Тезисы докладов. – 2019. С.41.

Патент на изобретение

Патент РФ №171464 «ТЕСТОВАЯ СТРУКТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ» от 19 декабря 2016г. С.А. Шостаченко, Р.В. Рыжук, Н.И. Каргин, Р.В. Захарченко.

Подписано в печать: 01.02.2021
Заказ №18179. Тираж - 75 экз.
Бумага офсетная. Формат 60х90/16.
Типография «11-й ФОРМАТ»
ИНН 7726330900
115230, Москва, Варшавское ш., 36
(977) 518-13-77 (499) 788-78-56
www.avtoreferat.ru riso@mail.ru