

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор

АО НПФ «Микран»

Парамонова В.Ю.

«15» декабря 2018 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Акционерного общества «Научно-производственная фирма «Микран»

Диссертация «Исследование омических контактов НЕМТ транзисторов на основе GaN» выполнена в научно-производственном комплексе «Микроэлектроника» АО НПФ «Микран».

В период подготовки диссертации соискатель Сим Павел Евгеньевич работал в акционерном обществе «Научно-производственная фирма «Микран» в должности инженера-технолога.

В 2012 году был принят на работу в НПФ «Микроэлектроника» в лабораторию «GaN МИС». В 2014 году с отличием окончил Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники с присвоением степени магистра техники и технологии по направлению «Электроника и наноэлектроника». В 2018 году получил диплом об окончании аспирантуры.

Научный руководитель – Троян Павел Ефимович, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра физической электроники, доктор технических наук, профессор.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы:

Диссертация Сима Павла Евгеньевича является научно-квалификационной работой, в которой изложены результаты исследования и разработки омических контактов к гетероструктурам типа AlGaIn/GaN и InAlN/GaN.

Результаты, полученные в ходе исследования, имеют существенный практический интерес для предприятий, занимающихся разработкой и производством современных СВЧ монолитных интегральных схем.

Актуальность диссертационной работы обусловлена тем, что развитие техники сверхвысоких частот связано с потребностью в формировании транзисторов с высокой

подвижностью электронов, что, в свою очередь, ведёт к необходимости решения проблемы получения омических контактов к ним. Как правило, омические контакты к гетероструктурам типа AlGaN/GaN и InAlN/GaN, исполняются в сплавном варианте, что подразумевает проведение операции быстрого термического отжига при температурах порядка 800° С, в ходе чего наблюдается активное расплывание края контакта. При изготовлении транзисторов с высокой подвижностью электронов критично как сопротивление омического контакта, так и морфология его поверхности.

Практическая значимость работы

Показаны возможности создания низкоомных омических контактов с низкой шероховатостью поверхности не только для отдельных контактов, но и в случае контактов для гетероструктур InAlN/GaN и AlGaN/GaN, выращенных на пластинах большого диаметра, до 100 мм. Контакты показали высокую устойчивость к длительному высокотемпературному нагреву и пригодность для разработки СВЧ усилителей мощности на базе InAlN/GaN и AlGaN/GaN HEMT транзисторов.

Научная новизна исследований:

1. Разработаны основы технологии формирования омического контакта Ti/Al/Mo/Au с величиной контактного сопротивления 0,3 и 0,25 Ом·мм и среднеквадратичной шероховатостью поверхности контакта 14 и 24 нм для HEMT транзисторов на базе гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN соответственно.

2. Предложен способ точного измерения контактного сопротивления образцов с низкой толщиной металлизации и высоким слоевым сопротивлением на основе совместного измерения сопротивления контакта методом Ван-дер-Пау и методом Кельвина.

3. Разработан способ быстрого термического отжига омических контактов для гетероструктур InAlN/GaN и AlGaN/GaN, выращенных на подложках Al₂O₃, Si и SiC большого диаметра, до 100 мм, обеспечивающий разброс электрических параметров контактов менее 10 %.

Личное участие соискателя в получении результатов

Автором совместно с научным руководителем и научным консультантом формулировались цели работы, обсуждались пути их достижения, а также анализировались полученные результаты. Основные экспериментальные исследования проведены непосредственно диссертантом. Работа была выполнена в рамках ПНИЭР «Исследование и разработка технологии изготовления сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем на основе гетероструктур InAlN/GaN для изделий космического применения». Соглашение №14.578.21.0240 от 26.09.2017 г.

Апробация, достоверность и обоснованность

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных экспериментальных методик и воспроизводимостью полученных результатов. Полученные результаты согласуются с опубликованными экспериментальными данными в тех областях, где таковые имеются. Результаты исследований изложены в 12 работах: в 3 статьях, входящих в Перечень ВАК РФ, в 4 публикациях в сборниках трудов Международных конференций, в 2 публикациях в сборниках трудов Российских научных конференций, в 2 свидетельствах о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на 6 научных конференциях: 10-я и 11-я всероссийские конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (2015, 2017 г., Санкт-Петербург, Москва); Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2016» (2016 г., Томск), International Siberian Conference on Control and Communications (2017 г., Астана, Казахстан); Тринадцатая международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (2017 г., Томск); 26th International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology» (2018 г., Минск, р. Беларусь).

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Скубо В.В., **Сим П.Е.**, Великовский Л.Э., Поливанова Ю.Н., Цапульников А.Ф. / Исследование свойств несплавных омических контактов к гетероструктуре AlGaIn/GaN // Доклады Томского Государственного Университета Систем Управления и Радиоэлектроники. – 2015. – № 4(38). – С. 76–78.

2. **Sim P.E.** et. al / Field-plate design optimization for high-power GaN high electron mobility transistors // International Siberian Conference on Control and Communications, Astana, Kazakhstan, 2017.

3. **Сим П.Е.** Влияние конструкции полевого электрода на распределение электрического поля в СВЧ GaN НЕМТ / П.Е. Сим, Н.Е. Курбанова, О.И. Демченко, Л.Э. Великовский // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции (29 ноября – 1 декабря 2017 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2017. – С. 119-122.

4. Великовский Л.Э., **Сим П.Е.** / Оптимизация омических контактов к AlGaIn/GaN-транзисторам с высокой подвижностью электронов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Томск, сентябрь 2014 г. – Томск: Изво Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2014.

Ч. 3(33) – с. 66-69.

5. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2018630123. Микросхема для проведения TCV тестов при производстве InAlN/GaN НЕМТ / Великовский Л.Э. (РФ), **Сим П.Е.** (РФ), Демченко О. (РК), Курбанова Н. (РК). - №2018630110; поступл.: 22.06.2018; регистр.: 06.08.2018.

6. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2018630124. Микросхема для проведения РСМ тестов при производстве InAlN/GaN НЕМТ / Великовский Л.Э. (РФ), **Сим П.Е.** (РФ), Демченко О. (РК), Курбанова Н. (РК). - №2018630111; поступл.: 22.06.2018; регистр.: 06.08.2018.

7. **Sim P.E.** et. Al / Ultrathin barrier InAlN/GaN // 26th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”, Minsk, Belarus, 2018., Brudnyi V.N., Vilisova M.D., Velikovskii L.E., Sim P.E., Brudnyi P.A. / Electrophysical and physical-chemical properties of ohmic contacts to III-N compounds // Russian Physics Journal, Vol. 61. - No. 8. - 2018 - p. 1450-1456.

8. Брудный В.Н., Вилисова М.Д., Великовский Л.Э., **Сим П.Е.**, Брудный П.А. / Электрофизические и физико-химические свойства омических контактов для соединений III-N // Известия вузов. Физика, 2018, т. 61, №8, с. 73-78.

9. Brudnyi V.N., Vilisova M.D., Velikovskii L.E., **Sim P.E.**, Brudnyi P.A. / Electrophysical and physical-chemical properties of ohmic contacts to III-N compounds // Russian Physics Journal, Vol. 61. - No. 8. - 2018 - p. 1450-1456.

10. **Сим П.Е.**, Скубо В.В., Великовский Л.Э., Поливанова Ю.Н. / Быстрый термический отжиг омических контактов к AlGaIn/GaN НЕМТ на подложках SiC // Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Научная сессия ТУСУР-2016”, ч. 2, С. 150-152.

11/ Великовский Л.Э., **Сим П.Е.** и др. / Разработка мощных GaN транзисторов L-S-S диапазона // Тезисы докладов 10-й всероссийской конференции “Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы”. – Санкт-Петербург: СПбПУ. – 2015 – С. 131-132.,

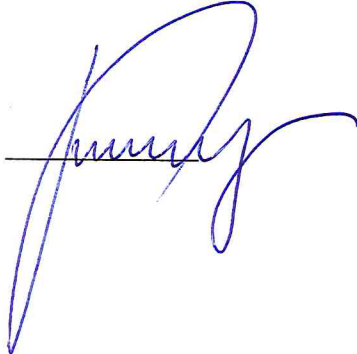
12. Великовский Л.Э., **Сим П.Е.** и др. / Разработка мощных GaN транзисторов L,S и X диапазона // Тезисы докладов 11-й всероссийской конференции ”Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы”. – Москва. – 2017 – С. 114-115.

Соответствие диссертации научной специальности

Диссертационная работа Сима Павла Евгеньевича «Исследование омических контактов НЕМТ транзисторов на основе GaN» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 «Физическая электроника».

Заключение принято на расширенном заседании научно-технического совета АО НПФ «Микран», с привлечением научных сотрудников Научно-производственного комплекса «Микроэлектроника», департамента СВЧ электроники..

Присутствовало на заседании 20 чел., в том числе докторов наук – 3, кандидатов наук – 5. Результаты голосования: «за» - 17 чел., «против» - 2. чел., «воздержалось» - 1. чел., протокол № 14 от 13 декабря 2018 г.



Кагадей Валерий Алексеевич
доктор физико-математических наук, профессор,
первый заместитель генерального директора
АО НПФ «Микран»

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»
(ТУСУР)



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
инновациям

В. М. Рулевский
В. М. Рулевский
«24» 12 2018 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Присутствовали:

Председатель заседания – заведующий кафедрой «Физическая электроника», д.т.н., профессор Троян П.Е.

Секретарь заседания – ассистент кафедры «Физическая электроника» Жидик Ю.С.

Смирнов С.В., д.т.н., профессор кафедры «Физическая электроника»;

Чистоедова И.А., к.т.н., доцент кафедры «Физическая электроника»;

Битнер Л.Р., к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физическая электроника»;

Давыдов В.Н., д.т.н., профессор кафедры «Электронные приборы»;

Башкиров А.И., к.ф.-м.н., доцент кафедры «Электронные приборы»;

Каранский В.В., ассистент кафедры «Физическая электроника»;

Реунова К.А., инженер кафедры «Физическая электроника».

Всего присутствовало 9 человек, из них по специальности рассматриваемой диссертации докторов наук - 3.

Диссертация «Исследование омических контактов НЕМТ транзисторов на основе GaN» выполнена на кафедре Физической электроники ТУСУР.

В период подготовки диссертации соискатель Сим Павел Евгеньевич работал в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего

образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» в НИИ систем электросвязи в должности инженера.

В 2014 году с отличием окончил Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники с присвоением степени магистра техники и технологии по направлению «Электроника и нанoeлектроника». В 2018 году получил диплом об окончании аспирантуры.

Научный руководитель – Троян Павел Ефимович, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра физической электроники, доктор технических наук, профессор.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы:

Диссертация Сима Павла Евгеньевича является научно-квалификационной работой, в которой изложены результаты исследования и разработки омических контактов к гетероструктурам типа AlGa_N/Ga_N и InAlN/GaN.

Результаты, полученные в ходе исследования, имеют существенный практический интерес для предприятий, занимающихся разработкой и производством современных СВЧ монолитных интегральных схем.

Актуальность диссертационной работы обусловлена тем, что развитие техники сверхвысоких частот связано с потребностью в формировании транзисторов с высокой подвижностью электронов, что, в свою очередь, ведёт к необходимости решения проблемы получения омических контактов к ним. Как правило, омические контакты к гетероструктурам типа AlGa_N/Ga_N и InAlN/GaN, исполняются в сплавном варианте, что подразумевает проведение операции быстрого термического отжига при температурах порядка 800° С, в ходе чего наблюдается активное расплывание края контакта. При изготовлении транзисторов с высокой подвижностью электронов критично как сопротивление омического контакта, так и морфология его поверхности.

Научная новизна исследований:

1. Разработаны основы технологии формирования омического контакта Ti/Al/Mo/Au с величиной контактного сопротивления 0,3 и 0,25 Ом·мм и среднеквадратичной шероховатостью поверхности контакта 14 и 24 нм для НЕМТ транзисторов на базе гетероструктур AlGa_N/Ga_N и InAlN/GaN соответственно.

2. Предложен способ точного измерения контактного сопротивления образцов с низкой толщиной металлизации и высоким слоевым сопротивлением на основе совместного измерения сопротивления контакта методом Ван-дер-Пау и методом Кельвина.

3. Разработан способ быстрого термического отжига омических контактов для гетероструктур InAlN/GaN и AlGa_N/Ga_N, выращенных на подложках Al₂O₃, Si и SiC

большого диаметра, до 100 мм, обеспечивающий разброс электрических параметров контактов менее 10 %.

Практическая значимость работы

Показаны возможности создания низкоомных омических контактов с низкой шероховатостью поверхности не только для отдельных контактов, но и в случае контактов для гетероструктур InAlN/GaN и AlGaIn/GaN, выращенных на пластинах большого диаметра, до 100 мм. Контакты показали высокую устойчивость к длительному высокотемпературному нагреву и пригодность для разработки СВЧ усилителей мощности на базе InAlN/GaN и AlGaIn/GaN HEMT транзисторов.

Личное участие соискателя в получении результатов

Автором совместно с научным руководителем и научным консультантом формулировались цели работы, обсуждались пути их достижения, а также анализировались полученные результаты. Основные экспериментальные исследования проведены непосредственно диссертантом. Работа была выполнена в рамках ПНИЭР «Исследование и разработка технологии изготовления сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем на основе гетероструктур InAlN/GaN для изделий космического применения». Соглашение №14.578.21.0240 от 26.09.2017 г.

Степень достоверности полученных результатов и ценность научных работ соискателя и полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных экспериментальных методик и воспроизводимостью полученных результатов. Полученные результаты согласуются с опубликованными экспериментальными данными в тех областях, где таковые имеются. Результаты исследований изложены в 12 работах: в 3 статьях, входящих в Перечень ВАК РФ, в 4 публикациях в сборниках трудов Международных конференций, в 2 публикациях в сборниках трудов Российских научных конференций, в 2 свидетельствах о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на 6 научных конференциях: 10-я и 11-я всероссийские конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (2015, 2017 г., Санкт-Петербург, Москва); Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2016» (2016 г., Томск), International Siberian Conference on Control and Communications (2017 г., Астана, Казахстан); Тринадцатая международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (2017 г., Томск); 26th International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology» (2018 г., Минск, р. Беларусь).

Перечень публикаций соискателя по теме диссертации:

1. Скубо В.В., Сим П.Е., Великовский Л.Э., Поливанова Ю.Н., Цацульников А.Ф. /

Исследование свойств несплавных омических контактов к гетероструктуре AlGaIn/GaN // Доклады Томского Государственного Университета Систем Управления и Радиоэлектроники. – 2015. – № 4(38). – С. 76–78.

2. **Sim P.E.** et. al / Field-plate design optimization for high-power GaN high electron mobility transistors // International Siberian Conference on Control and Communications, Astana, Kazakhstan, 2017.

3. **Сим П.Е.** Влияние конструкции полевого электрода на распределение электрического поля в СВЧ GaN НЕМТ / П.Е. Сим, Н.Е. Курбанова, О.И. Демченко, Л.Э. Великовский // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции (29 ноября – 1 декабря 2017 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2017. – С. 119-122.

4. Великовский Л.Э., **Сим П.Е.** / Оптимизация омических контактов к AlGaIn/GaN-транзисторам с высокой подвижностью электронов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Томск, сентябрь 2014 г. – Томск: Изво Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2014. Ч. 3(33) – с. 66-69.

5. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2018630123. Микросхема для проведения TCV тестов при производстве InAlN/GaN НЕМТ / Великовский Л.Э. (РФ), **Сим П.Е.** (РФ), Демченко О. (РК), Курбанова Н. (РК). - №2018630110; поступл.: 22.06.2018; регистр.: 06.08.2018.

6. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2018630124. Микросхема для проведения РСМ тестов при производстве InAlN/GaN НЕМТ / Великовский Л.Э. (РФ), **Сим П.Е.** (РФ), Демченко О. (РК), Курбанова Н. (РК). - №2018630111; поступл.: 22.06.2018; регистр.: 06.08.2018.

7. **Sim P.E.** et. Al / Ultrathin barrier InAlN/GaN // 26th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”, Minsk, Belarus, 2018., Brudnyi V.N., Vilisova M.D., Velikovskii L.E., Sim P.E., Brudnyi P.A. / Electrophysical and physical-chemical properties of ohmic contacts to III-N compounds // Russian Physics Journal, Vol. 61. - No. 8. - 2018 - p. 1450-1456.

8. Брудный В.Н., Вилисова М.Д., Великовский Л.Э., **Сим П.Е.**, Брудный П.А. / Электрофизические и физико-химические свойства омических контактов для соединений III-N // Известия вузов. Физика, 2018, т. 61, №8, с. 73-78.

9. Brudnyi V.N., Vilisova M.D., Velikovskii L.E., **Sim P.E.**, Brudnyi P.A. / Electrophysical and physical-chemical properties of ohmic contacts to III-N compounds // Russian Physics Journal, Vol. 61. - No. 8. - 2018 - p. 1450-1456.

10. **Сим П.Е.**, Скубо В.В., Великовский Л.Э., Поливанова Ю.Н. / Быстрый термический отжиг омических контактов к AlGaIn/GaN НЕМТ на подложках SiC //

Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Научная сессия ТУСУР-2016”, ч. 2, С. 150-152.

11/ Великовский Л.Э., Сима П.Е. и др. / Разработка мощных GaN транзисторов L-S-С диапазона // Тезисы докладов 10-й всероссийской конференции “Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы”. – Санкт-Петербург: СПбПУ. – 2015 – С. 131-132.,

12. Великовский Л.Э., Сима П.Е. и др. / Разработка мощных GaN транзисторов L,S и X диапазона // Тезисы докладов 11-й всероссийской конференции ”Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы”. – Москва. – 2017 – С. 114-115.

Соответствие диссертации научной специальности

Тема диссертации соответствует области исследований, посвященных разработке физических, технических и технологических основ приборов твердотельной электроники СВЧ. По своему содержанию выполненная работа соответствует специальности 01.04.04 – «Физическая электроника».

Диссертационная работа Сима Павла Евгеньевича «Исследование омических контактов НЕМТ транзисторов на основе GaN» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 «Физическая электроника».

Заключение принято на расширенном заседании научного семинара кафедры физической электроники, с привлечением сотрудников кафедры электронных приборов ТУСУР.

Присутствовало на заседании 9 чел., в том числе докторов наук – 3, кандидатов наук – 3. Результаты голосования: «за» - 7 чел., «против» - 1. чел., «воздержалось» - 1. чел., протокол № 23 от 24 декабря 2018 г.

Председатель семинара

Зав. каф. ФЭ,
д.т.н., профессор


П.Е. Троян

Секретарь семинара

ассистент каф. ФЭ


Ю.С. Жидик

УТВЕРЖДАЮ

и.о. проректора по НР

Национального исследовательского

Томского государственного университета

Ивонин И.В.
«10» декабря 2018 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
государственный университет»

Диссертация Сима Павла Евгеньевича «Исследование омических контактов НЕМТ транзисторов на основе GaN» выполнялась в НОЦ «Нанoeлектроника» и на кафедре физики полупроводников федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» в рамках выполнения ПНИЭР «Исследование и разработка технологии изготовления сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем на основе гетероструктур InAlN/GaN для изделий космического применения» ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», Соглашение №14.578.21.0240 от 26.09.2017 года.

По итогам обсуждения результатов работы принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация П.Е. Сима является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи по изготовлению низкоомных омических контактов для полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ транзисторов) на базе полупроводникового соединения GaN, имеющей решающее значение для развития сверхвысокочастотной техники гигагерцового диапазона длин волн.

Актуальность темы и направленность исследований

Полупроводниковые СВЧ полевые транзисторы играют существенную роль

в мобильной телефонии, радиолокации, телекоммуникации, спутниковых системах космической связи. Повышение частотного диапазона и выходной удельной мощности таких транзисторов является одним из важнейших направлений современного развития СВЧ связи. Особый интерес представляют нитридные соединения группы III-N. Большие напряжения поля пробоя и дрейфовых скоростей электронов, значительная ширина запрещенной зоны этих материалов открывают широкие возможности использования нитридных соединений при разработке СВЧ приборов большой удельной выходной мощности, способных работать при высоких температурах. При этом существенной проблемой производства таких транзисторов является получение низкоомных омических контактов, которые в значительной степени определяют характеристики транзистора, его резистивный нагрев и удельную выходную мощность.

Основным направлением диссертационной работы является разработка технологии производства низкоомных омических контактов для СВЧ полевых НЕМТ транзисторов на базе нитридных полупроводниковых соединений. Создание транзисторов с коротким каналом сток-исток является одним из критериев получения высоких частот, что предъявляет высокие требования не только к сопротивлению, но и гладкой поверхности контакта и его высокой термостабильности.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

Автором проводились основные экспериментальные исследования и измерения. Постановка и обсуждение результатов исследований проводилась совместно с научным руководителем и научным консультантом. Экспериментальные результаты, вошедшие в диссертацию, получены лично автором, как в индивидуальных, так и в коллективных исследованиях.

Степень достоверности результатов проведённых исследований

Результаты работы получены с применением современного высокоточного технологического и метрологического оборудования и методов исследований. Результаты исследований докладывались на научных конференциях, в том числе, международных. Полученные результаты находятся в согласии с экспериментальными данными других авторов. Сформулированные выводы являются взаимно согласованными и не содержат противоречий.

Научная новизна работы

Разработана технология быстрого термического отжига при производстве низкоомных омических контактов на основе металлизации Ti/Al/Mo/Au для транзисторных структур InAlN/GaN и AlGaIn/GaN, выращенных на подложках Al₂O₃, Si и SiC большого диаметра, до 100 мм.

; Практическая значимость диссертации и использование полученных результатов

Разработана технология изготовления низкоомных омических контактов с малой шероховатостью поверхности с помощью быстрого термического отжига для гетероструктур InAlN/GaN и AlGaIn/GaN, выращенных на пластинах SiC, Al₂O₃ и Si. Контакты показали высокую термостабильность к длительному высокотемпературному нагреву и пригодность при изготовлении СВЧ усилителей мощности на базе гетероструктур InAlN/GaN и AlGaIn/GaN₃.

Полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах

Результаты исследований опубликованы в 12 работах, в том числе 3 статьях в журналах, включенных в список Web of Science или Scopus. Диссертант является соавтором патентов на топологию интегральной микросхемы: (Пат. №2018630123 (РФ) и (Пат. 2018630123 № (РФ)). В опубликованных работах достаточно полно отражены основные результаты диссертационного исследования.

Соответствие содержания диссертации избранной специальности.

Предмет исследования и материалы диссертационной работы соответствуют специальности 01.04.04 – физическая электроника, технические науки по следующим пунктам, перечисленным в структуре области исследования в паспорте специальности:

- твердотельная электроника, в том числе СВЧ-электроника, полупроводниковая электроника, акустоэлектроника, сверхпроводниковая электроника, спиновая электроника, оптоэлектроника, криоэлектроника.
- физические явления в твердотельных микро- и наноструктурах, молекулярных структурах и кластерах; проводящих, полупроводниковых и тонких диэлектрических пленках и покрытиях.

Диссертация «Исследование омических контактов НЕМТ транзисторов на основе GaN» Сима Павла Евгеньевича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника, технические науки.

Заключение принято на заседании кафедры физики полупроводников Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Присутствовало на заседании - 8 чел. Результаты голосования: «за» - 8 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол № 39 от 12.12.2018 г.



Эрвье Юрий Юрьевич,
доктор физико-математических наук
заведующий кафедрой физики полупроводников
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
государственный университет»