

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.268.04 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» МИНОБРНАУКИ РФ ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 28.02.2019 № 155

О присуждении Симу Павлу Евгеньевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Исследование омических контактов НЕМТ транзисторов на основе GaN» по специальности 01.04.04 – физическая электроника принята к защите 26 декабря 2018 г., протокол № 1536, диссертационным советом Д 212.268.04, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) (634050, Томск, пр. Ленина 40, приказ Минобрнауки России о создании совета № 1030/нк от 30.12.2013 г.

Соискатель **Сим Павел Евгеньевич** 1991 года рождения, в 2014 году окончил ТУСУР по специальности 210100 – электроника и наноэлектроника. В 2018 году освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре ТУСУР по направлению 03.06.01 – физика и астрономия.

Работает инженером-технологом в АО «Научно-производственная фирма «Микран» (АО НПФ «Микран»).

Диссертация выполнена на кафедре физической электроники ТУСУР, НОЦ «Материалы и технологии космического применения» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» и научно-производственном комплексе «Микроэлектроника» (АО НПФ «Микран»).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор **Троян Павел Ефимович**, директор департамента образования ТУСУР.

Научный консультант – доктор физико-математических наук, профессор **Брудный Валентин Натанович**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра физики полупроводников/

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук **Журавлёв Константин Сергеевич**, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН» г. Новосибирск), лаборатория молекулярно-лучевой эпитаксии соединений  $A^3B^5$ , заведующий лабораторией:

доктор технических наук, **Ремнёв Геннадий Ефимович**, федеральное государственное автономное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», лаборатория электро-разрядных и пучково-плазменных технологий, заведующий лабораторией  
дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация, **АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»** (АО «НИИПП», г. Томск), в своем **положительном заключении**, подписанном и.о. генерального директора Александром Викторовичем Токаревым, начальником лаборатории АО «НИИПП», доктором технических наук Геннадием Исаковичем Айзенштатом и старшим научным сотрудником АО «НИИПП», кандидатом физико-математических наук Евгением Витальевичем Емельяновым, указала, что диссертация Сима Павла Евгеньевича «Исследование омических контактов НЕМТ транзисторов на основе GaN» представляет завершённую научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для разработки транзисторов с высокой подвижностью электронов на базе гетероструктур AlGaIn/GaN и InAlN/GaN. Работа отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата техни-

ческих наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Соискатель имеет **11** опубликованных работ с соавторами по теме диссертации, из них **3** работы входят в перечень ВАК. Результаты исследования защищены **2** свидетельствами о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

На диссертацию и автореферат поступило **5 отзывов, все положительные:**

1) от кандидата технических наук, профессора **Полякова Александра Яковлевича**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», *без замечаний*;

2) от доктора технических наук, профессора **Конаковой Раисы Васильевны**, институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины, зав. лабораторией физико-технологических проблем твердотельной СВЧ электроники, *замечание*: известно, что транзисторами на широкозонных полупроводниках, в том числе GaN, занимаются ГУП НПП «Пульсар». Об этом вышли в 2011 году в издательстве «Техносфера» 2 монографии А.Г. Васильева, Ю.В. Колковского и Ю.А. Концевого «СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках» и «СВЧ транзисторы на широкозонных полупроводниках». Опыт разработки транзисторов ведущими западными фирмами обобщен в книге Р. Куэй «Электроника на основе нитрида галлия», изданной в 2011 г. в издательстве «Техносфера». Учет содержания этих книг позволил бы избежать некоторых весьма общих положений о контактах;

3) от профессора **Соболева Николая Андреевича**, Университет Авейро, Португалия Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal, *без замечаний*;

4) от кандидата технических наук, ведущего научного сотрудника **Землякова Валерия Евгеньевича**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», *замечания*:

1. Нет упоминания об учёте сопротивления зондов и металлизации контактных площадок.

2. На поверхности омического контакта (рисунок 2 (б)) находится слой алюминия и кислорода с ориентировочной толщиной 20 нм (слой диэлектрика такой толщины имеет пробивное напряжение порядка 10 В). Нет пояснений, каким образом будет работать такой омический контакт;

5) от кандидата физико-математических наук, **Петрова Станислава Игоревича**, ЗАО «Научное и технологическое оборудование», начальник прикладной лаборатории, *замечание:* в представленных в автореферате изображениях поверхности контактов (рисунок 5 а и б) недостаточно обоснованы причины значительного различия между морфологиями поверхностей контактов к гетероструктурам Al-GaN/GaN и InAlN/GaN.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что: д.ф.-м.н. **Журавлёв К.С.** является специалистом в области молекулярно-лучевой эпитаксии нитридных гетероструктур и их исследований; д.т.н. **Ремнев Г.Е.** является специалистом в области пучково-плазменных технологий и покрытий; АО «**Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов**» известен квалифицированными специалистами в области разработок СВЧ структур на базе полупроводников группы III-V. Уровень компетентности официальных оппонентов и ведущей организации достаточен для оценки научной и практической значимости диссертационной работы Сима П.Е.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

*разработана* новая экспериментальная методика изготовления низкоомных и термостабильных омических контактов с малой шероховатостью поверхности и резкой латеральной границей на базе металлизации Ti/Al/Mo/Au (20/50/40/25 нм) для HEMT транзисторов терагерцового диапазона на основе гетероструктур AlGaIn/GaN и InAlN/GaN, выращенных на подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4H-SiC и Si;

*предложены* режимы быстрого термического отжига получения низкоомных и термостабильных омических контактов для НЕМТ транзисторов на основе гетероструктур AlGaN/GaN и InAlN/GaN;

*доказана* возможность выбора режимов быстрого термического отжига, обеспечивающая получение однородных омических контактов на гетероструктурах AlGaN/GaN и InAlN/GaN, выращенных на подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4H-SiC Si в зависимости от их диаметра.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

*применительно к проблематике диссертации результативно* использован комплекс современных информативных физических методов исследований, необходимых для получения данных об элементном и фазовом составе омических контактов;

*изложены* результаты численного моделирования вольт-амперных характеристик контактов в зависимости от уровня легирования полупроводникового материала;

*раскрыт* механизм влияния пленки Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> на фазовый состав омического контакта;

*изучены* элементные профили распределения металлов в омическом контакте Ti/Al/Mo/Au;

*проведена модернизация* существующего метода длинных линий (TLM), обеспечивающая увеличение точности определения контактного сопротивления.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

*разработаны и внедрены* в практику низкоомные омические контакты при выполнении 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, УИР REMEFI 57817X240, 000000007518PQK0002; получены два свидетельства о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы; *определены* оптимальные технологические условия получения низкоомных омических контактов с малой шероховатостью поверхности и резкой латеральной грани-

цей на основе металлизации Ti/Al/Mo/Au для НЕМТ транзисторов на базе гетеро-структур AlGaN/GaN и InAlN/GaN;

*создан* научно-технологический задел для получения низкоомных омических контактов с малой шероховатостью поверхности и резкой латеральной границей для НЕМТ транзисторов терагерцового диапазона;

*представлены* рекомендации по использованию разработанных низкоомных омических контактов на базе металлизации Ti/Al/Mo/Au в производстве НЕМТ транзисторов терагерцового диапазона;

**Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования.**

Полученные результаты могут быть использованы в научно-, образовательных и производственных учреждениях соответствующей тематики: АО НПФ «Микран» (г. Томск), АО «НИИПП» (г. Томск), ФГБУВПО ТУСУР (г. Томск), ИФП СО РАН» (г. Новосибирск), ГУП НПП «Пульсар» (г. Москва), ФГАНУ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН (г. Москва).

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

*для экспериментальных работ* достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных экспериментальных методов, сертифицированного оборудования, воспроизводимостью получаемых результатов и их согласованностью, а также практической реализацией научных положений и выводов при создании низкоомных омических контактов;

*теория* электронных свойств омических контактов и барьера Шоттки построена на использовании известных представлений, включая концепцию уровня зарядовой нейтральности нитрида галлия;

*идея базируется* на основе современных представлений об омических контактах, а также на практических результатах, полученных в АО НПФ «МИКРАН»

*использованы* результаты исследования низкоомных контактов для НЕМТ транзисторов AlGaN/GaN при разработке низкоомных контактов для НЕМТ транзисторов InAlN/GaN;

установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов, с данными, приведенными в независимых источниках в той области исследований, где таковые имеются.

использованы современные технологические, метрологические методики и аналитическое оборудование, обеспечивающие получение достоверных результатов.

**Личный вклад соискателя состоит** в выполнении в экспериментальной части работы, проведении численных расчетов, обработке и интерпретации экспериментальных данных и апробации результатов исследования.

**На заседании 28.02.2019г.** диссертационный совет Д 212.268.04 принял решение присудить Симу Павлу Евгеньевичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве «18» человек, из них 9 докторов наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту – 0 человек, проголосовали: за – 18, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета Д 212.268.04,

доктор физико-математических наук, профессор  С.М. Шандаров

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.268.04,

доктор технических наук, профессор  Ю.П. Акулиничев

28 февраля 2019

