ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.326.07 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МИРЭА – РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (РТУ МИРЭА) МИНОБРНАУКИ РОССИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 16.12.2024 №64

О присуждении Павлову Владимиру Юрьевичу ученой степеникандидата технических наук.

Диссертация «Технология несплавных омических контактов полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов на гетероструктурах AlGaN/GaN», в виде рукописи по специальности 2.2.3 «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники» принята к защите 14 октября 2024 года, протокол № 54 диссертационным советом 24.2.326.07, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования МИРЭА - Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА), Минобрнауки РФ, Москва, 119454, проспект Вернадского, 78. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 22 человек приказом от 26.01.2023 (№ 86/нк).

Соискатель Павлов Владимир Юрьевич, 16.05.1986 года рождения, гражданин Российской Федерации. Окончил Московский государственный институт электроники и математики (технический университет) по специальности «электронное машиностроение» в 2008 г. В 2014 г. с отличием окончил магистратуру Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики, по направлению подготовки «222900 Нанотехнологии и микросистемная техника». Далее соискатель поступил в аспирантуру Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) по научной специальности 11.06.01 –Электроника, радиотехника и системы связи, которую закончил в 2020 г. В настоящее время работает в должности научного сотрудник в лаборатории исследования и разработки комплексной технологии формирования полупроводниковых микро- и наноструктур, малошумящих и мощных наногетероструктурных СВЧ- транзисторов и МИС на их основе ИСВЧПЭ РАН. Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН).

**Научный руководитель** – Главный научный сотрудник ФГБУН ИСВЧПЭ РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Мальцев Петр Павлович.

**Официальные оппоненты**:

1. Лапин Владимир Григорьевич доктор технических наук, эксперт АО «НПП «Исток» им. Шокина».

2. Егоркин Владимир Ильич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГАОУ ВО «НИУ МИЭТ»

**дали положительные отзывы на диссертацию.**

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-производственный комплекс «Технологический центр» **в своем положительном отзыве**, составленном Кицюком Евгением Павловичем, кандидатом технических наук, ученым секретарем Ученого совета НПК «Технологический центр», начальником научно-исследовательской лаборатории перспективных процессов и утвержденном Вячеславом Викторовичем Светухиным, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, директор НПК «Технологический центр», указала, что диссертационная работа была рассмотрена и получила положительную оценку на заседании НТС НПК «Технологический центр», (протокол № 5 от 26.11.2024), результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, имеют определенную практическую значимость для создания современных приборов СВЧ полупроводниковой электроники, позволяя создавать как дискретные транзисторы так и сложные микросхемы на их основе, со значительным улучшением выходных параметров приборов, изготовленных с использованием предложенной технологии; автореферат диссертации полностью отражает её содержание; тема диссертационной работы, ее содержание, цель, постановка задач и методы их решения, а также полученные автором результаты и их анализ соответствуют паспорту специальности 2.2.3 «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники»; диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9-14 Положения о порядке присуждения учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, а её автор заслуживает присвоения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

Соискателем по теме диссертации опубликовано 31 работа, из них 13 статей опубликованы в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук, среди которых 10 публикаций в международных рецензируемых журналах, входящих в базы данных Web of Science, Scopus и Chemical Abstracts, 18 работ — в прочих периодических изданиях и сборниках трудов всероссийских и международных конференций, 3 патента РФ на изобретение.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. С.С. Арутюнян, А.Ю. Павлов, В.Ю Павлов, К.Н. Томош, Ю.В. Федоров. Двухслойная диэлектрическая маска Si3N4/SiO2 для создания низкоомных омических контактов к AlGaN/GaN HEMT // Физика и техника полупроводников 2016. Т. 50 №8, стр. 1138-1142.

2. К.Н. Томош, А.Ю. Павлов, В.Ю. Павлов, Р.А. Хабибуллин, С.С. Арутюнян, П.П. Мальцев. Исследование процессов изготовления HEMT AlGaN/AlN/GaN c пассивацией Si3N4 in situ // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, №10. стр. 1434-1438.

3. А.Ю. Павлов, В.Ю. Павлов, Д.Н. Слаповский. Термическая стабильность несплавных омических контактов к гетероструктурам AlGaN/GaN // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, № 22. стр. 96-103.

4. А.Ю. Павлов, В.Ю. Павлов, Д.Н. Слаповский, С.С. Арутюнян, Ю.В. Федоров, П.П. Мальцев. Несплавные омические контакты для транзисторов с высокой подвижностью электронов на гетероструктурах ALGAN/GAN // Микроэлектроника. 2017. Т. 46, №5. стр. 340–346.

5. Д.Н. Слаповский, А.Ю. Павлов, В.Ю. Павлов, А.В. Клековкин. Сплавные омические контакты на основе Si/Al к нитридным гетеросистемам AlGaN/GaN // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, №4. стр. 461-466.

6. В.Ю. Павлов, А.Ю. Павлов. Технологии формирования сплавных и несплавных омических контактов к гетероструктурам на основе GaN. Обзор // Нано- и микросистемная техника. 2016, Т. 18, №10. С. 635-644.

7. Ю.В. Федоров, А.С. Бугаев, А.Ю. Павлов, Д.Л. Гнатюк, О.С. Матвеенко, В.Ю. Павлов, Д.Н. Слаповский, К.Н. Томош, Е.Н. Енюшкина, Р.Р. Галиев, М.В. Майтама, А.В. Зуев, Д.В. Крапухин, С.А. Гамкрелидзе. Технология изготовления и разработка монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 5. С. 273-293.

8. Ю.В. Федоров, А.С. Бугаев, Д.Л. Гнатюк, А.Ю. Павлов, О.С. Матвеенко, В.Ю. Павлов, Д.Н. Слаповский, К.Н. Томош, Е.Н. Енюшкина, Р.Р. Галиев, М.В. Майтама, А.В. Зуев, Д.В. Крапухин, С.А. Гамкрелидзе, Б.Г. Путинцев, П.П. Мальцев. Макетирование приемно-передающих модулей 5-миллиметрового диапазона длин волн на базе отечественных монолитных интегральных схем на нитриде галлия // Нано- и микросистемная техника. 2019, Том 21, № 12, стр. 702-708.

9. Ю.В. Федоров, А.С. Бугаев, А.Ю. Павлов, Д.Л. Гнатюк, О.С. Матвеенко, В.Ю. Павлов, Д.Н. Слаповский, К.Н. Томош, Е.Н. Енюшкина, Р.Р. Галиев, М.В. Майтама, А.В. Зуев, Д.В. Крапухин, С.А. Гамкрелидзе, П.П. Мальцев // Особенности технологии изготовления и разработки СВЧ МИС на основе нитрида галлия для миллиметрового диапазона. Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. 2020, 1(544), стр. 26-45.

10. А.Ю. Павлов, К.Н. Томош, В.Ю. Павлов, Д.Н. Слаповский, А.В. Клековкин, И.А. Ивченко. Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов на гетероструктуре AlGaN/GaN с подзатворным заглублением в барьерный слой // Нано- и микросистемная техника. 2022, Том 24, № 2, стр. 103-108.

11. Д.Л. Гнатюк, А.С. Бугаев, Р.Р. Галиев, С.А. Гамкрелидзе, Е.Н. Енюшкина, А.В. Зуев, И.А. Ивченко, Д.В. Лаврухин, П.П. Мальцев, О.С. Матвеенко, А.Ю. Павлов, В.Ю. Павлов, К.Н. Томош. Развитие технологий СВЧ электроники в ИСВЧПЭ РАН на современном этапе // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2022. Том. 1, С. 79-83.

12. П.П. Мальцев, А.А. Ганжа, В.Ю. Павлов, А.О. Михалев, А.И. Козлитин, Формирование полимерных нитей с наноразмерными образованиями из алюминия // Нано- и микросистемная техника, 2022, Том. 24, №. 5, стр. 219–222.

13. Мальцев П.П., Ганжа А.А., Павлов В.Ю., Михалев А.О., Козлитин А.И., Сарайкин В.В. Исследование полимерных нитей с наноостровковой топологией наногетероструктур алюминия // Нано- и микросистемная техника. 2023. Том. 25. № 5. С. 203-209.

РИД

14. Патент № 2610346 Российская федерация, МПК H01L21/28575. Способ изготовления омических контактов к нитридным гетероструктурам AlGaN/GaN / Ю.В. Федоров, А.Ю. Палов, В.Ю. Павлов; Заявитель и патентообладатель ИСВЧПЭ РАН. - № 2015154773; заявл. 21.12.2015; опубл. 09.02.2017.

15. Патент № 2619444 Российская федерация, МПК H01L21/28. Способ изготовления омических контактов к нитридным гетероструктурам на основе Si/Al / Ю.В. Федоров, А.Ю. Палов, В.Ю. Павлов, Д.Н. Слаповский; Заявитель и патентообладатель ИСВЧПЭ РАН. - № 2016110786; заявл. 24.03.2016; опубл. 15.05.2017.

16. Патент № 2669339 Российская федерация, МПК H01L21/28. Способ изготовления омических контактов / А.Ю. Палов, В.Ю. Павлов, Д.Н. Слаповский; Заявитель и патентообладатель ИСВЧПЭ РАН. - № 2017123092; заявл. 29.06.2017; опубл. 10.10.2018.

На автореферат диссертации поступило 5 отзывов, **все отзывы положительные**:

1. От Сендерука Юрия Семеновича, кандидата технических наук, ведущего инженера АО «Микроволновые системы». По автореферату имеется следующее замечание: в тексте автореферата не представлены параметры, используемых при изготовлении макетов полевых СВЧ транзисторов эпитаксиальных гетероструктур.

Указанное замечание не снижает общую высокую оценку работы.

2. От Никитова Сергея Аполлоновича, доктора физико-математических наук, профессора, академика РАН, директора Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. В качестве недостатков можно отметить то, что в тексте автореферата не хватает эквивалентной схемы полевого транзистора с высокой подвижностью электронов с паразитными элементами. Так же следует отметить, что на рисунке 9, где представлены выходные ВАХ транзисторов, транзистор со славными омическими контактами имеет ветви при разном напряжении на затворе с шагом -1 В, а транзистор с несплавными омическими контактами шаг -0,5 В, для лучшего визуального восприятия лучше привести к единому шагу.

При этом было отмечено, что результаты в проделанной работе, были получены впервые и используется в рамках выполнения опытно-конструкторских работ по созданию современной ЭКБ СВЧ диапазона на перспективном материале нитриде галлия.

3. От Жуков Александр Олегович, доктора технических наук, профессора, заместителя генерального директора по научной деятельности акционерного общества "Особое конструкторское бюро Московского энергетического института". К недостаткам следует отнести использование в тексте автореферата ряда технических «жаргонных» слов, что, впрочем, никак не влияет на ценность диссертационной работы.

4. От Конов Виталия Ивановича, доктора физико-математических наук, профессора, академика РАН, руководителя Центра естественно-научных исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Замечаний нет.

5. От Паршикова Юрия Григорьевича, доктора технических наук, доцента, директора Межведомственного центра аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме Российской академии наук. Сделаны следующие замечания:

В тексте обозначено основное преимущество несплавных омических контактов перед сплавными, но не представлены для сравнения фотографии морфологий сплавных и несплавных омических контактов AlGaN/AlN/GaN. В тексте нет ссылки на рисунок 1 «Схематическое изображение последовательности технологических операций при формировании несплавных омических контактов к гетероструктуре AlGaN/GaN» (стр.10).

Несмотря на указанные замечания, диссертация Павлова Владимира Юревича представляет собой научно-квалифицированную работу, выполненную на высоком уровне, и имеет важный прикладной характер.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован их высокой профессиональной квалификацией и наличием признанных достижений в областях, соответствующих тематике представляемой работы.

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

Экспериментально **изучены** основные технологические этапы, обеспечивающие возможность формирования несплавных омических контактов к гетероструктурам AlGaN/GaN. Что позволило **разработать** технологический маршрут изготовления несплавных омических контактов к гетероструктуре AlGaN/GaN, который интегрируется в маршрут изготовления полевых транзисторов и схем на их основе на нитридных гетероструктур.

**Продемонстрировано** увеличение частотных характеристик полевых транзисторов на гетероструктуре AlGaN/GaN, изготовленной по несплавной технологии, в сравнении с аналогичными транзисторами, изготовленными по сплавной технологии.

**Показано**, что использование двухслойной диэлектрической маски, используемой для доращивания сильнолегированного нитрида галлия, обеспечивает селективный рост без изменения электрофизических свойств гетероструктуры.

**Показано**, что растрав окон маски под рост сильнолегированного нитрида галлия обеспечивает получения воспроизводимых омических контактов за счет лучшего заращивания ниш заглубления в барьерный слой.

**Исследовано** влияние температурного воздействия на удельное контактное сопротивление омических контактов, изготовленных по несплавной технологии, к двумерному электронному газу. **Изучены** закономерности изменения удельного контактного сопротивления омических контактов от увеличения температуры и длительности температурного воздействия.

Экспериментально **установлено**, что дополнительный высокотемпературный прогрев после снятия диэлектрической маски обеспечивает минимальное сопротивление между сильнолегированным полупроводником и двумерным электронным газом, и позволяет получать воспроизводимые омические контакты к нитриду галлия.

Проведены **исследования** зависимости удельного контактного сопротивления несплавных омических контактов разного состава от температуры нагрева образцов, изготовленных по разработанному технологическому маршруту.

Экспериментально **доказана** необходимость введения барьерного слоя палладия в металлизацию контакта к сильнолегированному полупроводнику, обеспечивающего предотвращение миграции золота в полупроводник при нагреве, связанным с технологическими процессами изготовления полевых транзисторов на нитридных структурах.

Замена сплавной технологии омических контактов на несплавную технологию омических контактов **позволило изготовить** СВЧ транзисторы с длиной затвора 0,18 мкм на гетероструктуре AlGaN/GaN с удельной крутизной 400 мСм/мм и граничной частотой усиления по току более 90 ГГц, при сопротивлении несплавных омических контактов 0,12 Ом·мм. При этом сопротивление на аналогичных макетах, изготовленных по сплавной технологии, составило 0,5 Ом·мм, крутизна 260 мСм/мм и граничная частота усиления по току 66 ГГц.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что** ряд полученных результатов использовались при выполнении опытно-конструкторских работ (ОКР):

- предложенная двухслойная диэлектрическая маска для селективного формирования сильнолегированного GaN под омические контакты без изменения электрофизических свойств гетероструктуры;

- экспериментальные результаты влияния температурного воздействия на свойства формируемых несплавных омических контактов и оценка температурного предела использования полевых транзисторов, изготовленных с использованием несплавной технологии омических контактов;

имеется **акт об использовании результатов диссертационной работы утвержден 29.08.2024 г. ИСВЧПЭ РАН** в ряде НИОКР:

- СЧ ОКР «Разработка радиационно-стойкого квадратурного модулятора для диапазона рабочих частот 30-40 ГГц», шифр «Высотка-13И», договор от 12.07.2012г. NoЦ/П 1148 с ФГУП «НПП «Пульсар», срок выполнения: 12.06.2012г. - 31.07.2014г.

- СЧ ОКР «Разработка, изготовление и исследование кристаллов тестовых СВЧ транзисторов и СВЧ-транзисторов и монолитных интегральных схем диапазона рабочих частот до 90 ГГц на основе нового поколения гетероэпитаксиальных структур AlGaN/GaN на подложке карбида кремния», шифр «Ларец-ПЭ», контракт от 14.04.2014г. No05-14 с ЗАО «Элма-Малахит», срок выполнения: 14.04.2014г. -04.11.2015г.

- ОКР «Разработка комплекта монолитных интегральных схем 5 мм диапазона длин волн», шифр «Многоцветник-22», государственный контракт от 02.04.2013г. No13 411.1400099.11.018 с Минпромторгом России, срок выполнения: 02.04.2013г. - 28.11.2015г.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила, что экспериментальные результаты получены** с использованием высокотехнологичного оборудования, обеспечивающего требуемый уровень изготовления представленных транзисторов. При измерении S-параметров для оценки частотных параметров транзисторов использовались современные и общепризнанные методики и измерительное оборудование. Для оценки контактного сопротивления использовался широко используемый метод длинной линии (LTLM - Linear Transmission Line Method). Полученные в работе результаты и выводы не противоречат ранее известным данным.

**Личный вклад соискателя.** При выполнении работы соискателем был разработан технологический маршрут изготовления несплавных омических контактов на гетероструктурах AlGaN/GaN. Ряд технологических этапов были разработаны впервые, внедрены ключевые технологические операции, такие как формирование маски для роста сильнолегированного полупроводника, высокотемпературный отжиг для улучшения контакта к двумерному электронному газу. При выполнении работы осуществлял планирование по отработке технологических операций формирования несплавных омических контактов и анализ полученных результатов. Проводил все эксперименты для оценки термической стабильности несплавных омических контактов с разной системой металлизацией и измерения их характеристик до и после термической обработки, анализ полученных данных, по результатам которых предложены технические решения. Осуществил внедрения предложенной технологии в технологический маршрут изготовления полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов на гетероструктурах AlGaN/GaN.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

В ходе защиты соискатель В.Ю. Павлов дал аргументированные ответы на заданные вопросы членов диссертационного совета Пятакова А.П., Фетисова Л.Ю., Елизарова А.А., Блантера М.С., Юрасова А.Н., Воротилова К.А., Битюкова В.К., а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 16.12.2024 диссертационный совет пришел к заключению, что диссертация Павлова Владимира Юрьевича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук согласно пп. 9-14 Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г. диссертационный совет принял решение присудить Павлову Владимиру Юрьевичу ученую степень кандидата технических наук по специальности 2.2.3 «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 3 доктора наук по специальности диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение учёной степени –16, против присуждения учёной степени – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Зам. председателя

диссертационного совета А.Н. Юрасов

Учёный секретарь

диссертационного совета Л.Ю. Фетисов

16.12.2024 г.