

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.286.01,  
созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический  
университет», Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации,  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 21 мая 2024 года № 378

О присуждении Алексееву Роману Павловичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Влияние конструктивно-технологических факторов на насыщение вольт-амперных характеристик мощных СВЧ LDMOS-транзисторов» по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств принята к защите 05.03.2024 года (протокол заседания № 377) диссертационным советом 24.2.286.01, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, приказ о создании совета № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Алексей Роман Павлович, 27 декабря 1989 года рождения, в 2014 году окончил Воронежский государственный университет с присвоением квалификации «магистр» по направлению «Электроника и нанoeлектроника». В 2019 году окончил аспирантуру Воронежского государственного университета. В настоящее время работает ведущим инженером дизайн-центра проектирования твердотельной СВЧ-электроники, полупроводниковых приборов и РЭА (лаборатория проектирования мощных СВЧ-транзисторов и других полупроводниковых приборов) в акционерном обществе «Научно-исследовательский институт электронной техники», Министерство промышленности и торговли Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре физики полупроводников и микроэлектроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Бормонтов Евгений Николаевич, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет», физический факультет, кафедра физики полупроводников и микроэлектроники, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

1. **Филиппов Владимир Владимирович**, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семенова-Тян-Шанского», кафедра математики и физики, профессор;

2. **Винокуров Александр Александрович**, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», кафедра твердотельной электроники, доцент,

дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация, акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Пульсар» (г. Москва), в своем **положительном отзыве**, подписанном Каевицер Екатериной Владиленовной, кандидатом физико-математических наук, начальником лаборатории перспективных научных исследований и Синкевичем Владимиром Федоровичем, доктором технических наук, профессором, заслуженным деятелем РФ, советником генерального директора, утвержденном Колковским Юрием Владимировичем, доктором технических наук, профессором, заместителем генерального директора, указала, что тема диссертации Алексева Романа Павловича является актуальной, проведенные исследования обладают научной и практической значимостью, а также подтверждены на практике. Отмечены научная новизна, достоверность полученных результатов и обоснованность выводов. В заключении указано, что



диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и полностью соответствует требованиям ВАК РФ (п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней»), предъявляемых к кандидатским диссертациям по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств, что позволяет рекомендовать Алексеева Романа Павловича к присуждению ученой степени кандидата технических наук.

Соискатель имеет 29 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 19 работ, из них 4 работы опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации диссертационных работ, в том числе 1 работа опубликована в издании, входящем в базу данных рецензируемой научной литературы Scopus; получено 3 свидетельства о государственной регистрации топологий интегральных микросхем.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Насыщение передаточной вольт-амперной характеристики мощных СВЧ LDMOS-транзисторов / Р. П. Алексеев, А. Н. Цоцорин, Е. Н. Бормонтов, Г. В. Быкадорова. // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2019. – №4. – С. 6-14.

2. Механизм насыщения выходной вольт-амперной характеристики мощных СВЧ LDMOS-транзисторов / Р. П. Алексеев, А. Н. Цоцорин, Е. Н. Бормонтов, Г. В. Быкадорова. // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2019. – №4. – С. 15-23.

3. Алексеев Р. П. Мощные СВЧ LDMOS-транзисторы для рабочих частот до 3 ГГц / Р. П. Алексеев, А. Н. Цоцорин, М. И. Черных. // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2020. – № 4. – С. 98-101.

4. Подавление эффекта квазинасыщения вольт-амперных характеристик мощных сверхвысокочастотных латеральных транзисторов / Р. П. Алексеев, М. И. Черных, А. Н. Цоцорин, И. В. Семейкин, Г. В. Быкадорова. // Физика и техника полупроводников. – 2021. – Т. 55. – Вып. 8. – С. 689-692.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

На диссертацию и автореферат поступило 3 отзыва, все отзывы положительные. В них отмечена актуальность, научная новизна и практическая

значимость работы. Сделанные замечания носят частный, рекомендательный или уточняющий характер.

1. Тешев Руслан Шахбанович, д.т.н., профессор, и.о. директора института информатики, электроники и робототехники, заведующий кафедрой электроники и цифровых информационных технологий Кабардино-Балкарского государственного университета. Замечание: «Хотелось бы увидеть обоснование выбора зарубежного аналога, при сравнении электрических параметров разработанного и зарубежного транзисторов».

2. Пронин Игорь Александрович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой нано- и микроэлектроники ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет». Замечание: «К недостаткам работы можно отнести стилистические вольности и неточности формулировок, а также некоторые орфографические ошибки».

3. Ткачев Александр Юрьевич, к.т.н., начальник лаборатории разработки дискретных приборов АО «ПКК Миландр». Замечания: «В целом слабо просматривается сравнение параметров с зарубежным аналогом. Также, возможно, не вполне корректно говорить о насыщении вольт-амперных характеристик; представляется более правильным называть наблюдаемый эффект насыщением тока стока».

Выбор официальных оппонентов обосновывается их высокой компетентностью в области микроэлектроники, наличием публикаций в соответствующей сфере исследований, а также их согласием.

Выбор ведущей организации обоснован широкой известностью сотрудников своими достижениями в области разработки СВЧ LDMOS-транзисторов и способностью определить научную и практическую ценность диссертации, а также её согласием.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработаны:**

– LDMOS-транзисторные кристаллы, характеризующиеся существенным снижением проявления эффекта квазинасыщения ВАХ по сравнению с кристаллами предыдущего поколения;



– на основе разработанных кристаллов изготовлены транзисторы, характеризующиеся лучшими электрическими и энергетическими параметрами по сравнению с приборами предыдущего поколения. В частности: меньшим на 20% сопротивлением сток-исток в открытом состоянии; большей на 50% крутизной переходной ВАХ; большим на 25% током стока насыщения; большей в 1,7 раза выходной импульсной мощностью при неизменной входной мощности; большим на 2,3 дБ максимальным значением коэффициента усиления по мощности; большим на 15% максимальным значением коэффициента полезного действия стока;

**предложены** оригинальные конструктивно-технологические решения, позволяющие минимизировать эффекты квазинасыщения ВАХ мощных СВЧ LDMOS-транзисторов;

**доказано, что:**

– повышение концентрации легирующей примеси в LDD-области приводит к повышению значения напряжения на затворе, при котором наблюдается минимальное проявление квазинасыщения, а также к существенному подавлению квазинасыщения выходной ВАХ в области напряжений затвора, характерных для насыщения переходной ВАХ;

– внедрение полевого электрода приводит к существенному снижению квазинасыщения практически во всем диапазоне напряжений затвора, причем тем сильнее, чем ближе полевой электрод расположен к LDD-области и чем больший ее участок он перекрывает;

**введены** критерии выраженности квазинасыщения – абсолютное и относительное приращение тока стока, позволяющие сравнивать вольт-амперные характеристики транзисторов по степени выраженности эффекта квазинасыщения.

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

**доказано, что** наиболее перспективной конструкцией LDMOS-транзисторного кристалла с точки зрения снижения эффекта квазинасыщения является конструкция с двойным полевым электродом и HDD-участком у стокового края LDD-области при снижении концентрации легирующей примеси в самой LDD-области на (5 – 10)% относительно концентрации, обеспечивающей

максимальное напряжение пробоя сток-исток в случае равномерно легированной LDD-области;

**применительно к проблематике диссертации результативно использована** приборно-технологическая модель мощных СВЧ LDMOS-транзисторных структур, построенная в САПР Sentaurus TCAD на основе технологического маршрута изготовления кристаллов мощных СВЧ LDMOS-транзисторов АО «Микрон», адаптированная для исследования эффектов насыщения/квазинасыщения ВАХ;

**изложены** и обоснованы закономерности, согласно которым максимально приближенная к предельному насыщению выходная ВАХ LDMOS-транзисторов достигается при максимально равномерном распределении напряжённости электрического поля по длине LDD-области;

**изучены** зависимости степени выраженности эффекта квазинасыщения ВАХ от длины затвора, глубины  $p^+$ -области истока, концентрации легирующей примеси в LDD-области, длины LDD-области, длины перекрытия LDD-области полевым электродом и других конструктивно-технологических параметров СВЧ LDMOS-транзисторов;

**раскрыто**, что среди всех конструктивных элементов LDMOS транзисторного кристалла для снижения степени выраженности эффекта квазинасыщения, ключевыми являются полевой электрод и LDD-область;

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

Результаты диссертации **внедрены** в производственную деятельность АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (г. Воронеж), а также планируется их использование в будущих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах;

**определено**, что внедрение в LDD-область участка, по уровню легирования отличающегося от основной области, приводит к изменению распределения напряженности поля вдоль LDD-области;

**представлена** адаптированная модель LDMOS транзисторной структуры, которая может быть использована при разработке новых и модернизации существующих типов мощных СВЧ LDMOS-транзисторов.



## **Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**результаты измерений** электрических параметров разработанных транзисторов были получены на современном и поверенном оборудовании, используемом для измерений параметров серийной продукции и характеризующимся высокой воспроизводимостью результатов и малой погрешностью измерений;

**теории**, используемые для объяснения результатов исследований (влияние различных конструктивно-технологических параметров LDMOS-транзисторов на проявление эффекта квазинасыщения), не противоречат физическим явлениям, протекающим в полупроводниковых приборах;

**идея базируется** на анализе явлений и процессов, происходящих при работе СВЧ LDMOS-транзисторов, обобщении современного опыта исследований и моделирования приборов данного типа в САПР Sentaurus TCAD;

**использовано** сравнение результатов, экспериментально полученных автором, и данных, ранее представленных в научной литературе по рассматриваемой тематике;

**установлено** качественное соответствие авторских результатов с результатами, представленными в научной литературе по данной тематике, в тех случаях, когда такое сравнение может быть сделано;

**использованы** современное программное обеспечение, модели СВЧ LDMOS-транзистора, откалиброванные по результатам изготовления пластин с транзисторными кристаллами на АО «Микрон», сопоставление результатов численных расчетов с параметрами реальных приборов;

**Личный вклад соискателя состоит в** постановке и организации экспериментов, обработке и анализе полученных результатов. Постановка цели и задач, согласование и корректировка исследований, составление выводов выполнялись автором совместно с научным руководителем. Основные результаты исследований, изложенные в работе, были получены автором лично или при его непосредственном участии. Обсуждение полученных результатов и подготовка публикаций проводилась совместно с научным руководителем.

В ходе защиты диссертации критические замечания высказаны не были.

Соискатель Алексеев Роман Павлович согласился с замечаниями и сообщил, что учтёт их в своей дальнейшей работе.

На заседании 21 мая 2024 года диссертационный совет принял решение за новые научно-обоснованные технические и технологические решения и разработки в области развития элементной базы СВЧ-электроники, имеющие существенное значение для развития отечественной электронной отрасли, присудить Алексееву Роману Павловичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали «за» - 13, «против» - нет, «недействительных бюллетеней» - нет.

Зам. председателя  
диссертационного совета

Ученый секретарь  
диссертационного совета

21 мая 2024 года.



Белоногов  
Евгений Константинович

Стогней  
Олег Владимирович