



АО «НПП «ПУЛЬСАР»

105187, Москва, Окружной проезд, д. 27
Тел.: (495) 365-12-30; Факс: (495) 366-55-83
E-mail: administrator@pulsarnpp.ru
<http://pulsarnpp.ru>

На № _____ от _____
_____ № _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
АО «НПП «Пульсар»,
технических наук, профессор

Владимирович Колковский

«17» апреля 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

акционерного общества

«Научно-производственное предприятие «Пульсар» (г. Москва)
на диссертационную работу Алексеева Романа Павловича на тему
«Влияние конструктивно-технологических факторов на насыщение вольт-амперных характеристик мощных СВЧ LDMOS-транзисторов»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

1. Актуальность проведенных исследований

Диссертация посвящена исследованию особенностей насыщения вольт-амперных характеристик дискретных СВЧ LDMOS-транзисторов.

LDMOS-транзисторы в настоящий момент являются наиболее востребованными кремниевыми приборами на рынке мощных СВЧ транзисторов и, согласно динамике рынка за последние годы, такое положение будет сохраняться и в ближайшем будущем. Область применения LDMOS-транзисторов включает в себя наземные и авиационные радиолокационные станции, радиопередатчики, базовые станции сотовой связи, передатчики телевизионных сигналов. Таким образом, LDMOS-транзисторы востребованы на рынках и военной, и гражданской продукции. Развитие LDMOS-транзисторов не утрачивает своей актуальности, несмотря на появление в широком доступе и продолжающееся совершенствование мощных СВЧ

транзисторов, основанных на новых полупроводниковых материалах, таких как нитрид галлия и карбид кремния, так как LDMOS-технология остается востребованной и конкурентоспособной в сравнении с приборами на основе данных материалов. Это оказывается возможным главным образом благодаря сравнительно низкой стоимости изготовления LDMOS-транзисторов, характерной для кремниевой технологии, при том что современный уровень развития этих приборов позволяет обеспечивать уровень эксплуатационных параметров, сопоставимый с аналогичными показателями для транзисторов на основе полупроводниковых материалов группы A_3B_5 .

В диссертации рассматривается проблема квазинасыщения вольт-амперных характеристик LDMOS-транзисторов – негативного эффекта, способного вызвать ухудшение основных характеристик прибора. Данная проблематика широко освещена в зарубежной литературе, однако в отечественной науке ей практически не уделялось внимания. В своей диссертации Алексеев Р.П. рассматривает эффект квазинасыщения не только с научной точки зрения, но и с точки зрения практической, ставя задачу нахождения способа подавления данного эффекта средствами, доступными в отечественной промышленности и учитывающими реальную конструкцию мощных СВЧ LDMOS-транзисторов.

Таким образом, можно заключить, что тема диссертации Алексеева Р.П. является **актуальной**.

2. Характеристика содержания работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, приложений и списка литературы. Полный объем диссертационной работы составляет 131 страница машинописного текста, которые включают 61 рисунок, 11 таблиц, и список литературы из 120 наименований и приложения.

Во введении обоснована актуальность работы. Сформулированы цель и задачи, решаемые в диссертационной работе, показана научная новизна

полученных результатов и их практическая значимость, приведены сведения о публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора в совместных работах, структуре и объеме диссертации.

В первой главе показаны и обоснованы отличия насыщения ВАХ мощных СВЧ LDMOS-транзисторов от насыщения ВАХ традиционных MOS-транзисторов. Проведен литературный обзор по тематике диссертации, показано развитие представлений о механизме квазинасыщения ВАХ LDMOS-транзисторов и делается окончательный вывод о первопричинах возникновения квазинасыщения ВАХ. Показаны негативные последствия квазинасыщения ВАХ LDMOS-транзисторов.

Во второй главе описывается основной инструмент, используемый автором для исследования эффекта квазинасыщения ВАХ LDMOS-транзисторов – САПР Sentaurus TCAD. Описываются две модели мощного СВЧ LDMOS-транзистора, построенные на основе данного САПР, описываются методы построения и преимущества каждой из моделей. Приводится подробное описание процесса моделирования. Перечисляются физические эффекты, учитываемые при моделировании работы СВЧ LDMOS-транзистора, описываются используемые для этих эффектов модели.

В третьей главе проводится поиск возможностей доработки конструкции LDMOS-транзистора с целью подавления эффекта квазинасыщения ВАХ.

В качестве критериев подавления эффекта квазинасыщения ВАХ автор вводит параметры, называемые «абсолютным приращением тока стока» и «относительным приращением тока стока и, руководствуясь этими критериями, рассматривает влияние различных конструктивных и технологических параметров СВЧ LDMOS-транзисторов на подавление квазинасыщения ВАХ. Проводится анализ зависимости выраженности квазинасыщения ВАХ от различных конструктивно-технологических параметров. В качестве конструктивно-технологических параметров LDMOS-транзистора, имеющих наибольшее влияние на квазинасыщение ВАХ называются параметры полевого электрода и LDD-области. Под параметрами LDD-области подразумеваются

концентрация легирующей примеси в LDD-области, протяженность SDD-участка, концентрация легирующей примеси в SDD-участке, протяженность HDD-участка, концентрация легирующей примеси в HDD-участке. Конкретные параметры полевого электрода автор не дает, ссылаясь лишь на необходимость добиться «максимального полевого воздействия».

Далее проводится описание пяти различных вариантов конструкций СВЧ LDMOS-транзистора, отвечающих поставленной задаче – подавлению эффекта квазинасыщения ВАХ. Подавление квазинасыщения ВАХ оценивается при пяти различных уровнях напряжения на затворе, соответствующих: началу линейного участка переходной ВАХ, середине линейного участка переходной ВАХ, концу линейного участка переходной ВАХ, переходу от линейного участка к насыщению переходной ВАХ, полному насыщению.

В результате делается вывод, что задаче подавления квазинасыщения ВАХ наиболее полно отвечает конструкция, включающая в себя двухуровневый полевой электрод, снижение концентрации примеси в LDD-области относительно оптимальной, формирование HDD-участка на границе n^+ -стока и LDD-области.

В четвертой главе приводится описание разработанного транзисторного кристалла, при разработке которого были учтены результаты проведенных исследований. Приводятся электрические характеристики транзисторов, изготовленных с применением нового транзисторного кристалла, и их сравнение с транзисторами предыдущего поколения. Делается вывод, что новая конструкция обеспечивает подавление эффекта квазинасыщения ВАХ, а также позволяет улучшить ключевые электрические параметры СВЧ LDMOS-транзисторов.

В заключении подводятся итоги проведенных исследований и делаются выводы.

Каждая глава заканчивается выводами, подтверждающими проведенные исследования.

3. Степень новизны результатов

Диссертация посвящена актуальной, но мало освещенной в отечественной науке и литературе теме. В диссертации проведено исследование эффекта квазинасыщения ВАХ и особенностей его протекания в мощных СВЧ LDMOS-транзисторах. Новизна проведенных исследований заключается в следующем:

- в САПР Sentaurus TCAD созданы две модели СВЧ LDMOS-транзистора, позволяющие проводить исследования эффекта квазинасыщения ВАХ;

- установлено, что квазинасыщение выходной ВАХ LDMOS-транзисторов проявляется в наименьшей степени при равномерном распределении напряженности электрического поля вдоль длины LDD-области;

- методом численного моделирования установлено влияние конструктивных и технологических параметров, таких как: длина затвора, толщина диэлектрического слоя под затвором, глубин и концентраций примеси в диффузионных областях, протяженности LDD-области, длины полевого электрода и др. – на эффект квазинасыщения ВАХ;

- показано и обосновано, что параметры LDD-области и полевого электрода оказывают наибольшее влияние на эффект квазинасыщения ВАХ среди конструктивных и технологических параметров СВЧ LDMOS-транзисторов, и, соответственно, могут быть использованы для оптимизации конструкции транзисторных кристаллов данного типа для подавления эффекта квазинасыщения;

- разработана конструкция транзисторного кристалла, позволяющая в значительной степени подавить эффект квазинасыщения ВАХ и улучшить другие электрические параметры СВЧ LDMOS-транзисторов.

4. Достоверность результатов и обоснование выводов

Достоверность результатов обеспечивается использованием для расчетов отработанных методик и инструментов моделирования мощных СВЧ LDMOS-транзисторов, верифицированных путем сопоставления значений

электрических параметров, полученных расчетным путем, с значениями электрических параметров серийно изготавливаемых приборов.

Полученные по результатам исследования выводы, подтверждены на практике, путем измерения электрических параметров реальных LDMOS-транзисторов. Измерение электрических параметров проводилось на верифицированном и поверенном оборудовании.

5. Практическая значимость результатов для науки, производства и рекомендации по практическому использованию

Диссертация посвящена конкретной практической задаче, востребованной в микроэлектронной промышленности – подавлению эффекта квазинасыщения вольт-амперных характеристик мощных СВЧ LDMOS-транзисторов средствами, доступными в отечественной промышленности и учитывающими реальную конструкцию приборов данного типа. Значимость диссертации заключается в:

- установлении влияния на эффект квазинасыщения ВАХ различных конструктивных параметров СВЧ LDMOS-транзисторов: длины затвора, глубины p^+ -области истока, концентрации примеси в LDD-области, длины LDD-области, длины перекрытия LDD-области полевым электродом, положения HDD-участка в LDD-области и др.;

- определении наиболее значимых с точки зрения подавления эффекта квазинасыщения ВАХ конструктивных параметров LDMOS-транзисторов;

- определении конструкции LDMOS-транзистора, позволяющей подавить эффект квазинасыщения и добиться улучшения основных электрических параметров LDMOS-транзистора;

- разработке нового СВЧ LDMOS транзисторного кристалла. На топологию разработанного транзисторного кристалла получено свидетельство РФ о государственной регистрации №2021630075.

Результаты диссертации в настоящий момент используются предприятием АО «НИИЭТ» при производстве СВЧ LDMOS-транзисторов, что

подтверждено актом о внедрении результатов диссертации и свидетельством о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2021630075. Также результаты диссертации могут быть использованы на других предприятиях электронной промышленности в планируемых будущих проектах научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

6. Аprobация диссертационной работы

Автором представлены достаточно обширные результаты экспериментальных исследований, охватывающие проверку адекватности разработанных методов и научно-технических решений. Полученные данные подтверждают достоверность разработанных методов и научно-технических решений, что свидетельствует о реальности решения цели диссертационной работы.

Приоритет автора в выдвинутых научных положениях подтверждается публикацией большого числа работ, среди которых статьи, патенты, тезисы конференций различного уровня.

7. Замечания по работе

1. В работе указываются и подробно описываются модели физических эффектов, учитываемых при расчете поведения СВЧ LDMOS-транзистора, в том числе и проявления квазинасыщения ВАХ, однако недостаточно обоснован выбор указанных моделей. Например, учет деградации подвижности носителей заряда на поверхности раздела под действием нормального к поверхности электрического поля в САПР Sentaurus TCAD может быть учтен пятью различными моделями.

2. В работе рассмотрено большое количество конструктивных и технологических параметров LDMOS-транзисторов с точки зрения их влияние на эффект квазинасыщения ВАХ. Однако из рассмотрения упущены такие параметры как энергия ионной имплантации при легировании LDD-области и время диффузионной разгонки LDD-области, вместо этого рассматривается абстрактное понятие концентрации примеси. Как справедливо замечает сам

автор, параметры LDD-области оказывают ключевое влияние на квазинасыщения ВАХ. Включение в исследование указанных параметров положительно сказалось бы на его полноте.

3. В четвертой главе проводится сравнение электрических характеристик транзисторов, изготовленных с использованием разработанных транзисторных кристаллов и транзисторных кристаллов предыдущего поколения, а также зарубежного аналога. Однако сравнение с аналогом проводится только по критериям выраженности квазинасыщения. Для полноты приведенных данных было бы целесообразно провести сравнение и по остальным электрическим параметрам.

8. Выводы

Содержание диссертационной работы и автореферата изложены с соблюдением общепринятой терминологии и полностью раскрывают сущность, новизну и практическую ценность проведенных исследований. Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации.

Несмотря на ряд замечаний, проведенные исследования являются актуальными, обладают научной и практической значимостью, а также были подтверждены на практике.

Приведенные в диссертации результаты, выводы и выдвигаемые на защиту положения соответствуют научной специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Диссертационная работа Алексева Романа Павловича «Влияние конструктивно-технологических факторов на насыщение вольт-амперных характеристик мощных СВЧ LDMOS-транзисторов», выполнена на высоком научном уровне, она полностью соответствует требованиям ВАК РФ (п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней»), предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств, что позволяет

рекомендовать Алексева Романа Павловича к присуждению ученой степени кандидата технических наук.

Диссертационная работа и отзыв на диссертационную работу обсужден и одобрен научно-техническим советом АО «НПП «Пульсар» (№ 3/557-24 от 17 апреля 2024 г).

Отзыв составили:

Начальник лаборатории перспективных научных исследований АО «НПП «Пульсар»,
к.ф.-м.н.

Екатерина Владиленовна Каевицер

17.04.2024г.

Электронный адрес: kaevitser_ev@pulsarnpp.ru Тел.: +7 (495) 366-54-01

Советник генерального директора
АО «НПП «Пульсар»,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель РФ

Владимир Федорович Синкевич

17.04.2024г.

Электронный адрес: sinkevich@pulsarnpp.ru Тел.: +7 (495) 366-54-01

Подпись Е.В. Каевицер и В.Ф. Си

веряю:

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Пульсар»

Почтовый адрес: 105187, г. Москва, Окружной проезд, д. 27

Тел.: +7 (495)-365-12-30 Факс: +7 (495) 366-55-83

Электронный адрес: administrator@pulsarnpp.ru