

На правах рукописи



Алексеев Роман Павлович

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
НА НАСЫЩЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МОЩНЫХ СВЧ LDMOS-ТРАНЗИСТОРОВ**

Специальность 2.2.2. Электронная компонентная база
микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2024

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Научный руководитель:

Бормонтов Евгений Николаевич
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты:

Филиппов Владимир Владимирович
доктор физико-математических наук,
доцент, Липецкий государственный
педагогический университет имени
П.П. Семенова-Тян-Шанского, профессор
кафедры математики и физики

Винокуров Александр Александрович
кандидат технических наук, Воронежский
государственный технический
университет, доцент кафедры
твердотельной электроники

Ведущая организация:

**АО Научно-производственное
предприятие «Пульсар», г. Москва**

Защита состоится «21» мая 2024 года в 14:00 часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета 24.2.286.01 ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14, ауд. 216

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте www.cchgeu.ru

Автореферат разослан «12» марта 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Стогней Олег Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Первые мощные полевые СВЧ-транзисторы были разработаны и освоены в серийном производстве в 1970-х годах в СССР. И хотя приборам первых серий КП901–КП904 не удалось вытеснить биполярные приборы, они показали перспективность мощных СВЧ MOS-транзисторов. В последующие годы конструкция полевых СВЧ-транзисторов активно совершенствовалась, появились такие технологии, как DMOS (Double-diffused Metal Oxide Semiconductor) и VDMOS (Vertical Double-diffused Metal Oxide Semiconductor). В 1990-х годах, когда DMOS/VDMOS-транзисторы достигли предела своего совершенствования, получила развитие новая LDMOS-технология (Laterally Double-diffused Metal Oxide Semiconductor). Первые серийные образцы LDMOS-транзисторов были созданы фирмами Motorola (ныне M/A-COM) и Ericsson. В настоящее время СВЧ LDMOS-транзисторы производятся более двадцатью компаниями, наиболее известными из которых являются Ampleon (появилась в результате слияния NXP Semiconductors и Freescale Semiconductor), Microsemi, Integra, ST Microelectronics. В России разработкой и производством мощных СВЧ LDMOS-транзисторов занимаются АО «НПП «Пульсар» и АО «НИИЭТ».

Мощные СВЧ LDMOS-транзисторы в настоящее время широко применяются в приемо-передающей радиоаппаратуре различного назначения. Несмотря на распространение в последнее время приборов на основе широкозонных полупроводниковых материалов, таких как нитрид галлия (GaN), кремниевые LDMOS-транзисторы продолжают занимать значительную долю рынка как в России, так и за рубежом, благодаря хорошему соотношению цена-качество и высокой воспроизводимости технологического процесса. Сегодня LDMOS-технология является основной технологией для производства широкой номенклатуры мощных СВЧ-устройств для различных применений, включающих: базовые станции сотовой системы связи, радиопередатчики сигналов P-, L-, S-диапазонов частот, РЛС наземного и воздушного базирования, систем навигации и др. Ведущие зарубежные производители за прошедшее десятилетие смогли расширить рабочий диапазон частот LDMOS-транзисторов, который теперь покрывает частоты от 1 МГц до 6 ГГц, включая WiMax, WCDMA и радарный S-диапазон. Объявлены намерения о разработке LDMOS-транзисторов для применения в базовых станциях пятого поколения сотовой связи (5G). Показано, что СВЧ LDMOS-транзисторы способны работать и на частотах до 12 ГГц. Кроме того, интегральные LDMOS-транзисторы нашли широкое применение в интегральных схемах.

Подобно обычным MOS-транзисторам LDMOS-транзисторы характеризуются эффектом насыщения выходной (сток-истоковой) вольт-амперной характеристики (ВАХ) при высоких напряжениях на стоке. Однако в случае LDMOS-транзистора существует две существенные особенности. Первая – насыщается не только выходная, но и переходная характеристика. Вторая – насыщение выходной ВАХ не является «строгим», ток стока продолжает

возрастать при повышении напряжения на стоке, но существенно медленнее, чем на линейном участке ВАХ. По этой причине в зарубежной литературе данный эффект получил название квазинасыщения (quasi-saturation).

Квазинасыщение ВАХ влечет за собой ряд проблем, способных привести к ухудшению параметров СВЧ-транзисторов и устройств на их основе.

Квазинасыщение переходной ВАХ приводит к сокращению протяженности линейного участка, что накладывает ограничения при работе транзистора в качестве усилительного элемента в усилителях мощности.

Квазинасыщение выходной ВАХ приводит к росту рассеиваемой мощности при работе транзистора и, соответственно, разогреву кристалла. Показано, что снижение эффекта квазинасыщения положительно сказывается на надежности СВЧ-транзисторов благодаря снижению инжекции горячих электронов в подзатворный диэлектрик и на устойчивость транзистора к пробоем через паразитный биполярный транзистор.

До настоящего времени при разработке отечественных LDMOS-транзисторов учету эффекта квазинасыщения ВАХ должного внимания не уделялось, поэтому актуальна задача выявления конструктивно-технологических параметров, позволяющих этот эффект минимизировать.

Цель работы – оптимизация конструкции LDMOS-транзисторной структуры для снижения эффекта квазинасыщения СВЧ LDMOS-транзисторов.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Корректировка численной модели мощного СВЧ LDMOS транзистора разработанной в САПР Sentaurus TCAD для учета эффекта квазинасыщения ВАХ у серийно выпускаемых изделий АО НИИЭТ.

2. Выявление конструктивно-технологических параметров мощных СВЧ LDMOS-транзисторов, оказывающих наибольшее влияние на проявление эффекта насыщения/квазинасыщения ВАХ.

3. Оптимизация конструкции мощных СВЧ LDMOS-транзисторов для минимизации эффекта квазинасыщения ВАХ без ухудшения ключевых электрических параметров.

4. Разработка, изготовление и испытание LDMOS транзисторного кристалла с учетом полученных знаний для их верификации.

Объекты исследования:

- приборно-технологическая модель мощной СВЧ LDMOS-транзисторной структуры, разработанная на основе технологического маршрута изготовления кристаллов мощных СВЧ LDMOS-транзисторов АО «Микрон» и запатентованных топологий №2017630162 и №2017630163, позволяющая моделировать современные конструктивные решения, применяемые в отечественных мощных LDMOS-транзисторах;

- две партии тестовых мощных СВЧ-транзисторов, в одной из которых в качестве компонента использовались кристаллы, изготовленные по усовершенствованной технологии, в другой – кристаллы, изготовленные по текущей технологии;

- две партии мощных СВЧ-транзисторов 2П9120БС, в одной из которых в качестве компонента использовались кристаллы, изготовленные по усовершенствованной технологии, в другой – по текущей технологии.

Методы исследований

- исследование эффекта квазинасыщения в модели мощной СВЧ LDMOS-транзисторной структуры осуществлялось при помощи САПР Sentaurus TCAD, представляющей комплекс независимых программ, позволяющих проводить моделирование технологии и конструкции, а также электрических, тепловых, оптических и других параметров полупроводниковых приборов;

- измерение электрических параметров исследуемых мощных СВЧ-транзисторов осуществлялось при помощи тестера контроля статических параметров Agilent B1505;

- измерение энергетических параметров тестовых мощных СВЧ-транзисторов проводилось по методу согласованной нагрузки на измерительной системе на основе автоматизированных тюнеров импеданса источника и нагрузки производства Maury Microwave Corp.;

- измерение энергетических параметров мощных СВЧ-транзисторов 2П9120БС осуществлялось при помощи двух тестовых усилителей мощности, работающих на частоте 500 МГц и 230 МГц.

Научная новизна работы

1. Впервые численная модель мощной СВЧ LDMOS-транзисторной структуры в среде САПР Sentaurus TCAD адаптирована для исследования эффектов насыщения/квазинасыщения ВАХ.

2. Установлена и обоснована закономерность, согласно которой максимально приближенная к предельному насыщению выходная ВАХ LDMOS-транзисторов достигается при максимально равномерном распределении напряжённости электрического поля по длине LDD-области.

3. Установлены зависимости степени выраженности эффекта квазинасыщения ВАХ от длины затвора, глубины p^+ -области истока, концентрации примеси в LDD-области, длины LDD-области (*Lightly Doped Drain*), длины перекрытия LDD-области полевым электродом и других конструктивно-технологических параметров СВЧ LDMOS-транзисторов.

4. Установлено, что повышение концентрации примеси в LDD-области приводит к повышению значения напряжения на затворе, при котором наблюдается минимальное проявление квазинасыщения, а также к существенному подавлению квазинасыщения в области напряжений затвора, характерных для насыщения переходной ВАХ. Внедрение в LDD-область участка, по уровню легирования отличным от основной части LDD-области, приводит к перераспределению напряженности поля вдоль LDD-области, зависящего от концентрации в участке, его положения и протяженности.

5. Установлено, что внедрение полевого электрода приводит к существенному снижению квазинасыщения практически во всем диапазоне напряжений затвора. Эти эффекты выражены тем сильнее, чем ближе полевой электрод расположен к LDD-области и чем больший ее участок он перекрывает.

6. Установлено, что наиболее перспективной конструкцией LDMOS транзисторного кристалла с точки зрения снижения эффекта квазинасыщения является конструкция с двухуровневым полевым электродом и HDD-участком у стокового края LDD-области.

Реализация результатов работы, практическая значимость

1. Адаптированная модель LDMOS транзисторной структуры может быть использована при разработке новых и модернизации существующих типов мощных СВЧ LDMOS-транзисторов.

2. Полученные данные о влиянии конструктивно-технологических параметров мощных СВЧ LDMOS-транзисторов на проявление эффекта квазинасыщения ВАХ использованы при разработке нового мощного СВЧ LDMOS транзисторного кристалла, предназначенного для замены кристалла предыдущего поколения. На топологию разработанных кристаллов получено свидетельство РФ о государственной регистрации №2021630075.

3. Предложенные конструктивно-технологические решения, позволяющие минимизировать эффекты насыщения ВАХ мощных СВЧ LDMOS-транзисторов, внедрены в научно-производственный процесс исследований в рамках НИОКР на АО «НИИЭТ» (г. Воронеж), подтверждены актом о внедрении (использовании) результатов диссертации и могут быть использованы на других предприятиях электронной техники.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Адаптированная численная модель мощной СВЧ LDMOS-транзисторной структуры в среде САПР Sentaurus TCAD для исследования эффектов насыщения/квазинасыщения ВАХ.

2. Максимально приближенная к предельному насыщению выходная ВАХ LDMOS-транзисторов достигается при максимально равномерном распределении напряжённости электрического поля по длине LDD-области. Соответственно, для подавления эффекта квазинасыщения следует стремиться к уменьшению напряжённости поля на участке, где наблюдается его пик, и повышению на участке, где напряжённость поля мала.

3. Среди всех конструктивных элементов LDMOS транзисторного кристалла для снижения степени выраженности эффекта квазинасыщения, ключевыми являются полевой электрод и LDD-область.

4. Повышение концентрации примеси в LDD-области приводит к повышению значения напряжения на затворе, при котором наблюдается минимальное проявление квазинасыщения, а также к существенному подавлению квазинасыщения в области напряжений затвора, характерных для насыщения переходной ВАХ. Внедрение в LDD-область участка, по уровню легирования отличным от основной части LDD-области, приводит к перераспределению напряженности поля вдоль LDD-области, зависящего от концентрации в участке, его положения и протяженности.

5. Внедрение полевого электрода приводит к перераспределению напряженности поля в участке LDD-области, расположенного под ним, и к существенному снижению квазинасыщения практически во всем диапазоне напряжений затвора. Эти эффекты выражены тем сильнее, чем ближе полевой электрод расположен к LDD-области и чем больший ее участок он перекрывает.

6. Наиболее перспективной конструкцией LDMOS транзисторного кристалла с точки зрения снижения эффекта квазинасыщения является конструкция с двухуровневым полевым электродом и HDD-участком у стокового края LDD-области.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается использованием отработанных методик и инструментов моделирования мощных СВЧ LDMOS-транзисторов, верификация которых проводилась сравнением рассчитанных электропараметров с электропараметрами реальных экспериментальных и серийных изделий, изготовленных на АО «Микрон».

Основные выводы, полученные по результатам данного исследования, были подтверждены на практике электропараметрами реальных LDMOS-транзисторов, разработанных при учете полученных знаний.

Основные результаты данной работы были представлены и обсуждены на следующих конференциях: XXII и XXIV международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2016, 2018), 23 Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2016» (Москва, 2016), 23 международная научно-практическая конференция «Наука сегодня. Реальность и перспективы» (Вологда, 2017), XIX Международный семинар «Физико-математическое моделирование систем» (Воронеж, 2017).

Личный вклад автора 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.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, включая 4 статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации диссертационных работ, в том числе одну статью, входящую в базу данных рецензируемой научной литературы Scopus, 3 свидетельства о государственной регистрации топологий интегральных микросхем, 12 работ в других научных изданиях и материалах конференций. Изданы 3 учебно-методические пособия. В перечисленных работах автору лично принадлежат: [2] – обоснование физической природы механизмов квазинасыщения в мощных СВЧ LDMOS-транзисторов; [1, 2, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15] – разработка моделей транзисторных структур в среде САПР Sentaurus TCAD; [2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18] – проведение моделирования конструкции и электропараметров СВЧ-транзисторов в САПР Sentaurus TCAD; [1, 3, 4, 8, 9, 18, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17] – систематизация и обработка полученных данных; [5, 6, 7, 11, 12, 13, 15, 19] – разработка конструкции и технологии мощных СВЧ LDMOS-транзисторов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 120 наименования, включая публикации по теме диссертации. Объем диссертации составляет 131 страниц, включая 61 рисунок и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цель и задачи исследования, 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.

Первая глава посвящена анализу эффекта квазинасыщения вольт-амперных характеристик (ВАХ) мощных СВЧ LDMOS-транзисторов с субмикронными длинами канала, физическим механизмом его возникновения, а также негативным последствиям.

Отклонение от насыщения вольт-амперных характеристик классических MOS-транзисторов с субмикронными размерами затвора обусловлено рядом короткоканальных эффектов, таких как DIBL-эффект (*Drain Induced Barrier Lowering*), SCL-эффект (*Short-Channel Length*) и других. Отличительным элементом конструкции мощного СВЧ LDMOS-транзистора (рис. 1) является протяженная LDD-область. Эта особенность приводит к тому, что в LDMOS-транзисторах классические короткоканальные эффекты в значительной мере подавляются и не являются определяющими в эффекте квазинасыщения ВАХ.

Обзор литературы, посвященной объяснению физических причин возникновения эффекта квазинасыщения в LDMOS-транзисторах, показывает, что квазинасыщение ВАХ возникает вследствие взаимодействия двух эффектов: эффекта Кирка (*Kirk Effect*) и экранирования поля стока зарядом инжектированных из канала носителей заряда.

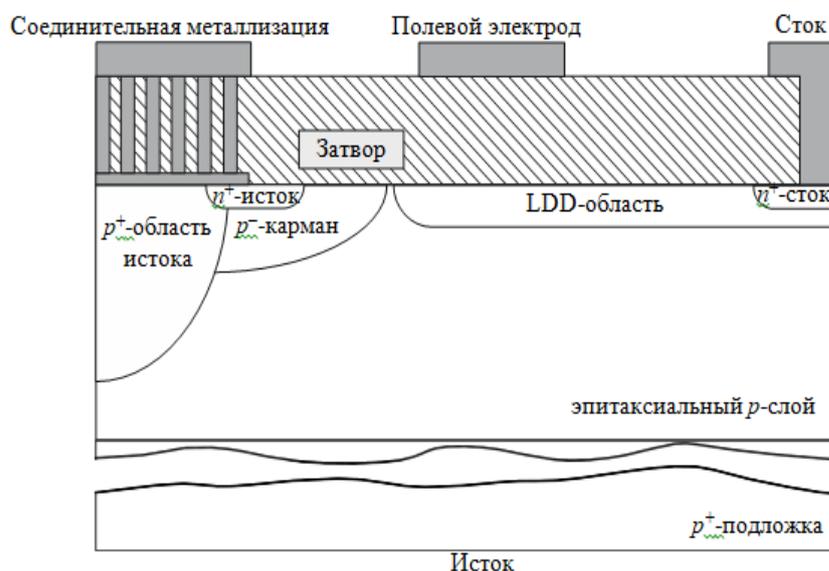


Рис. 1 – Структура СВЧ LDMOS-транзистора

Квазинасыщение ВАХ негативно влияет на электрические параметры СВЧ LDMOS-транзисторов и может сказаться на их надежности. Поэтому необходимо выявить физические процессы и определить конструктивно-технологические параметры LDMOS-транзисторов, которые оказывают наибольшее влияние на проявление квазинасыщения, а также могут быть использованы при оптимизации конструкции данного типа приборов для минимизации проявления квазинасыщения.

Во второй главе описываются компьютерные модели мощных СВЧ LDMOS-транзисторов, на основе которых проводилось исследование эффекта квазинасыщения с целью определения методов ослабления его выраженности. Модели LDMOS-транзисторов были построены на основе САПР Sentaurus TCAD.

В работе для анализа эффекта квазинасыщения ВАХ использовались две модели LDMOS-транзистора: технологическая и структурная. Технологическая модель основывается на последовательном моделировании технологических операций в соответствии с технологическим маршрутом изготовления реальных мощных СВЧ LDMOS-транзисторов. Она характеризуется бóльшим соответствием между рассчитанными и реальными электропараметрами.

В структурной модели геометрические границы материалов, распределения примеси и т.д. задаются непосредственно координатами, а не через параметры технологических операций. Это позволяет абстрагироваться от непосредственных режимов технологических операций. Расчет при структурном моделировании проходит на порядок быстрее, чем при технологическом.

На рисунке 2 приведены технологическая и структурная модели базового варианта LDMOS транзисторной структуры, т.е. без полевого электрода, с равномерно легированной LDD-областью и длиной канала 0,3 мкм.

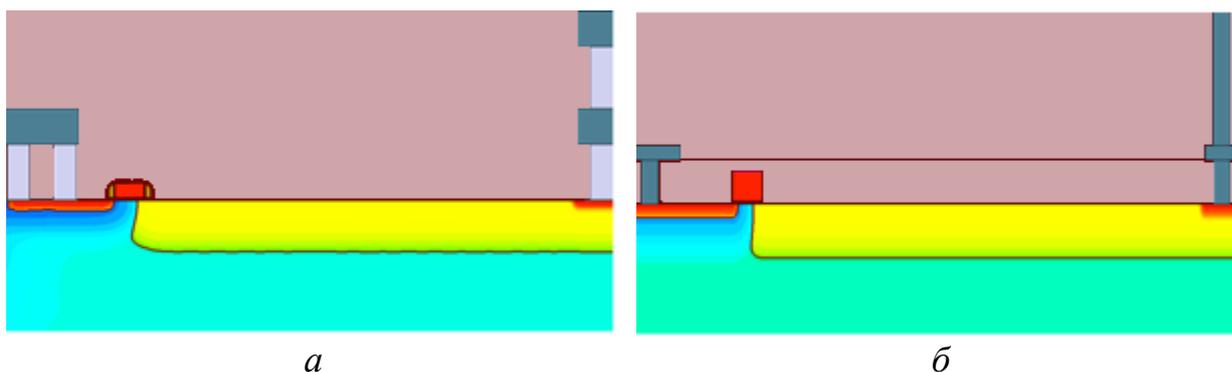


Рис. 2 – Разработанные модели базовой LDMOS транзисторной структуры: *a* – технологическая; *б* – структурная

Проведенные исследования показали, что для корректного моделирования ВАХ LDMOS-транзистора с учетом эффекта квазинасыщения, необходимо использовать следующие модели САПР Sentaurus TCAD.

Для учета сужения запрещенной зоны кремния ΔE_g^0 используется модель Слотбоома (*Slotboom*), согласно которой ΔE_g^0 рассчитывается по формуле:

$$\Delta E_g^0 = E_{ref} \left[\ln \left(\frac{N_{tot}}{N_{ref}} \right) + \sqrt{\left(\ln \left(\frac{N_{tot}}{N_{ref}} \right) \right)^2 + 0.5} \right],$$

где: N_{tot} – суммарная концентрация примеси; N_{ref} , E_{ref} – константы модели.

Для расчета зависимости подвижности μ_{dop} носителей заряда от концентрации примесей используется модель Мазетти (*Masetti*). В этой модели подвижность рассчитывается по формуле:

$$\mu_{dop} = \mu_{\min 1} \cdot \exp\left(-\frac{P_c}{N_A + N_D}\right) + \frac{\mu_{const} - \mu_{\min 2}}{1 + ((N_A + N_D)/C_r)^\alpha} - \frac{\mu_1}{1 + (C_s/(N_A + N_D))^\beta},$$

где N_A и N_D – концентрации примеси акцепторного и донорного типа, соответственно, $\mu_{\min 1}$, $\mu_{\min 2}$, μ_{const} , μ_1 , α , β , P_c , C_r , C_s – константы модели.

Учет деградации подвижности носителей заряда у поверхности кремниевой подложки на границе раздела Si–SiO₂ под действием нормального к поверхности электрического поля F_\perp осуществляется по модели Ломбарди (*Lombardi*). В этой модели отдельно учитывается влияние на подвижность носителей заряда рассеяния на акустических фононах μ_{ac} и рассеяние на неровностях поверхности раздела μ_{sr} :

$$\mu_{ac} = \frac{B}{F_\perp} + \frac{C((N_A + N_D + N_2)/N_0)^\lambda}{F_\perp^{1/3}(T/300)^k}; \quad \mu_{sr} = \left(\frac{(F_\perp/F_{ref})^A}{\delta} + \frac{F_\perp^3}{\eta} \right)^{-1},$$

где A , B , C , F_{ref} , λ , k , δ , η , N_0 , N_2 – константы модели.

Итоговая подвижность $\mu_{E\perp}$ рассчитывается в соответствии с правилом Маттиссена (*Matthiessen's rule*):

$$\frac{1}{\mu_{E\perp}} = \frac{1}{\mu_{dop}} + \frac{1}{\mu_{ac}} + \frac{1}{\mu_{sr}}$$

Одной из основных причин квазинасыщения является насыщение скорости носителей, вызываемое деградацией μ в сильном электрическом поле. Для учета деградации подвижности в электрическом поле используется модель Канали (*Canali*), согласно которой:

$$\mu_{E\parallel} = \frac{(\alpha + 1)\mu_{low}}{\alpha + \left[1 + \left(\frac{(\alpha + 1)\mu_{low}F_{hfs}}{v_{sat}} \right)^\beta \right]^{1/\beta}},$$

где: $\beta = \beta_0 \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta_{exp}}$ – коэффициент, зависящий от температуры T ;

$v_{sat} = v_{sat,0} \left(\frac{300}{T} \right)^{\nu_{exp}}$ – скорость насыщения носителей заряд; F_{hfs} – движущая сила,

соответствующая градиенту квазиуровней Ферми: $F_{hfs} = |\nabla\Phi|$; μ_{low} – подвижность носителей при низком значении напряженности электрического поля; α , $v_{sat,0}$, ν , β_0 , β_{exp} – константы модели.

В третьей главе проведен анализ влияния конструктивных особенностей различных элементов СВЧ LDMOS-транзистора на проявление квазинасыщения выходной и переходной ВАХ при помощи моделей, описанных в главе 2. Проводится поиск путей оптимизации LDMOS-структуры с целью минимизации эффекта квазинасыщения ВАХ.

Влияние конструктивно-технологических параметров СВЧ LDMOS-

транзистора на степень выраженности квазинасыщения переходной и выходной ВАХ оценивается по абсолютному ΔI_{D20-40} и относительному $\Delta I_{D20-40}/I_{D20}$ приращению тока стока, измеряемых на выходной ВАХ (рис. 3). Параметры ΔI_{D20-40} и $\Delta I_{D20-40}/I_{D20}$ рассчитываются по формулам:

$$I_{D20-40} = I_D(U_D = 40 \text{ В}) - I_D(U_D = 20 \text{ В});$$

$$I_{D20-40}/I_{D20} = \frac{I_D(U_D = 40 \text{ В}) - I_D(U_D = 20 \text{ В})}{I_D(U_D = 20 \text{ В})}.$$

Данный критерий позволяет оценить отклонение ВАХ от идеального насыщения (полное отсутствие зависимости тока стока от напряжения на стоке). Для транзистора с идеальным насыщением $\Delta I_{D20-40} = 0$ и, соответственно, чем значение ΔI_{D20-40} больше, тем сильнее выражено квазинасыщение. Выбор точки $U_D = 20$ В обусловлен тем, что при данном напряжении ВАХ транзистора без учета эффекта квазинасыщения гарантированно достигает идеального насыщения. Точка $U_D = 40$ В выбрана из соображений удобства. Параметр $\Delta I_{D20-40}/I_{D20}$ позволяет сравнивать выраженность квазинасыщения при разных уровнях тока стока и, соответственно, уровня напряжения на затворе U_G .

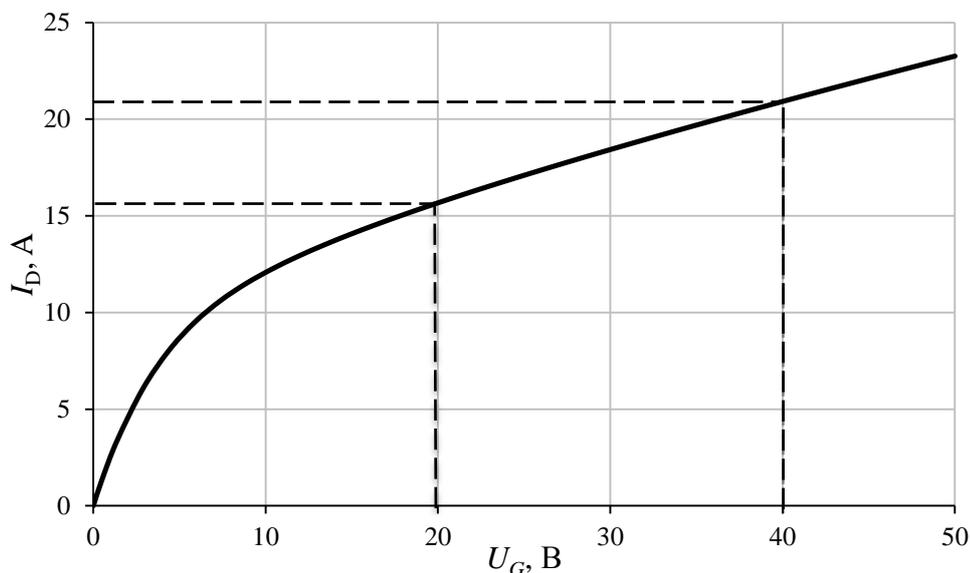


Рис. 3 – Выходная ВАХ мощного СВЧ LDMOS-транзистора

Исходя из анализа зависимости выраженности квазинасыщения выходной и переходной ВАХ от различных конструктивно-технологических параметров, определено, что наибольшее влияние на выраженность квазинасыщения оказывают параметры полевого электрода (ПЭ) и LDD-области. На рисунках 4а и 4б приведены переходные ВАХ при разной поверхностной концентрации примеси в LDD-области и длине ПЭ соответственно. Влияние указанных параметров на квазинасыщение выходной ВАХ можно оценить по зависимостям ΔI_{D20-40} и $\Delta I_{D20-40}/I_{D20}$ от напряжения на затворе, приведенным на рисунках 4в, 4г, 4д, 4е.

На основе этих данных был проведен поиск оптимальной с точки зрения выраженности квазинасыщения конструкции. Сравнение вариантов конструкции СВЧ LDMOS-транзистора по степени выраженности квазинасыщения выходной ВАХ приведено в таблице 1.

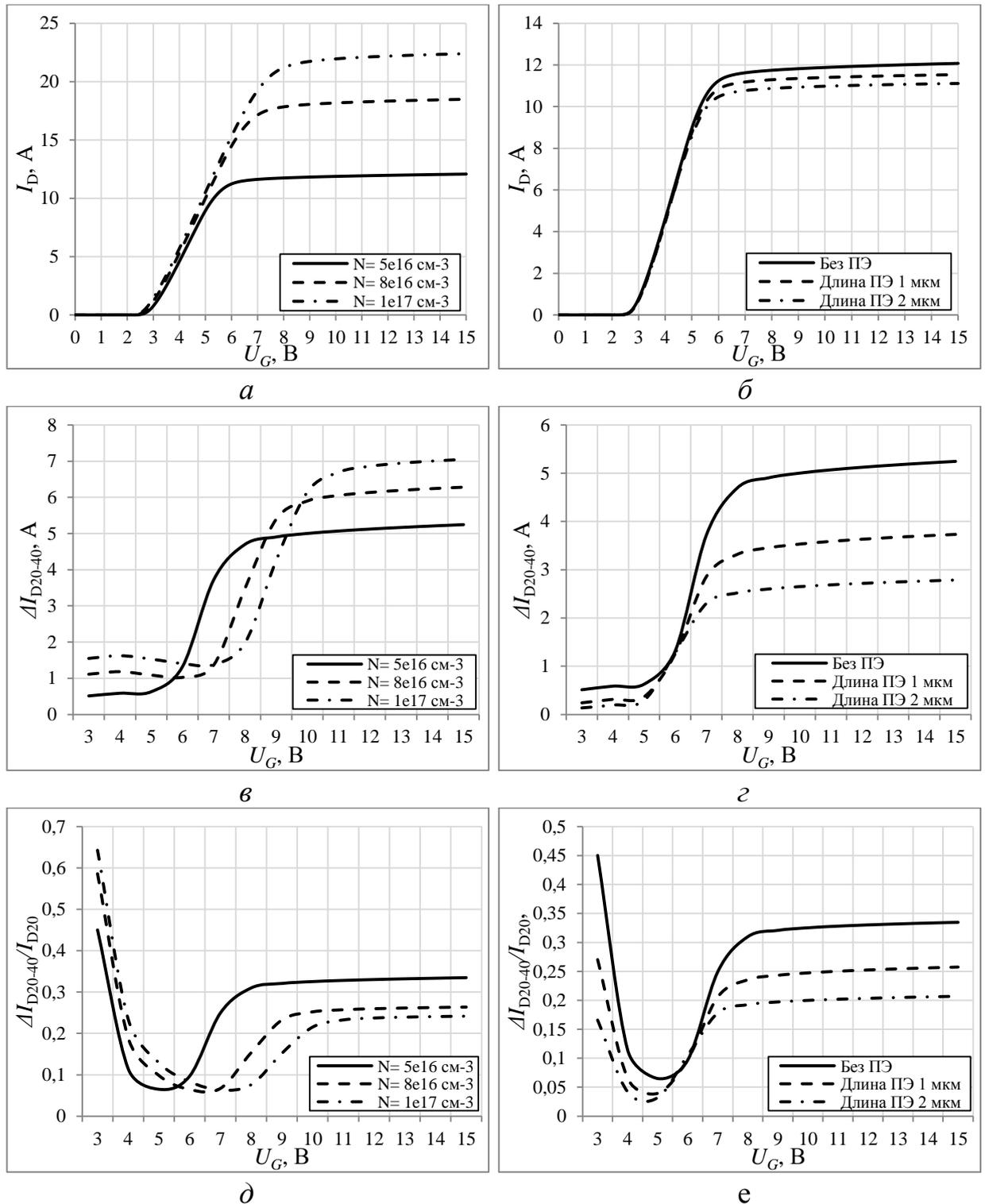
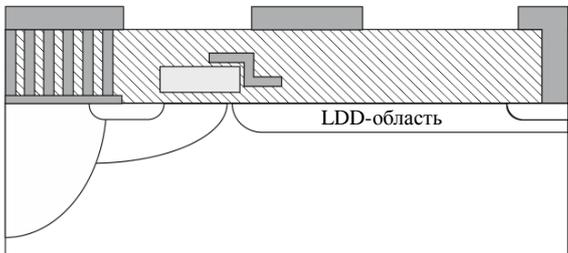
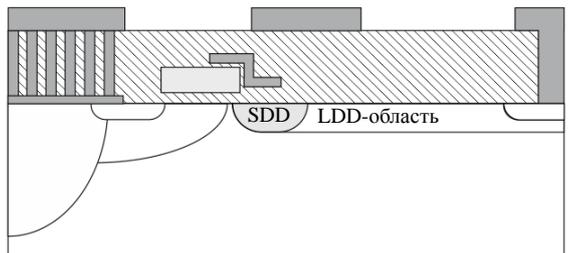
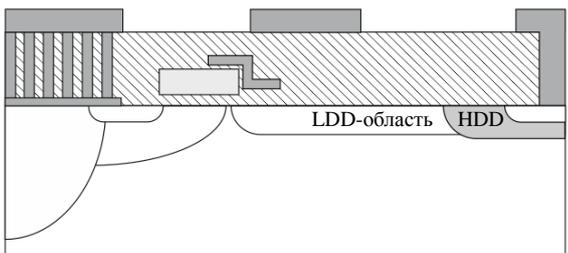
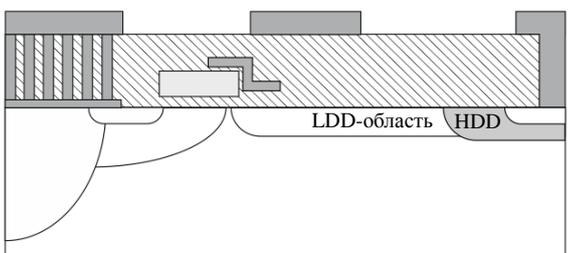
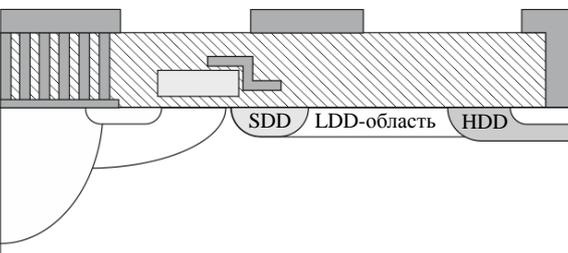


Рис. 4 – Влияние параметров LDMOS-транзистора на квазинасыщение ВАХ:
a – концентрации примеси в LDD-области на переходную ВАХ; *б* – длины ПЭ на переходную ВАХ; *в* – концентрации примеси в LDD-области на ΔI_{D20-40} ;
г – длины ПЭ на ΔI_{D20-40} ; *д* – концентрации примеси в LDD-области на $\Delta I_{D20-40}/I_{D20}$;
е – длины ПЭ на $\Delta I_{D20-40}/I_{D20}$

Таблица 1

Степень выраженности квазинысыщения выходной ВАХ
для разных вариантов конструкции LDMOS-структуры

№	Описание	U_G , В	ΔI_{D20-40} , А	$\Delta I_{D20-40}/I_{D20}$	Вид структуры
1	С двух-уровневым ПЭ	4	0,886	0,1189	
		6	0,743	0,0423	
		8	0,840	0,0304	
		10	2,941	0,0860	
		12	4,625	0,1306	
2	С двух-уровневым ПЭ и SDD-областью	4	0,749	0,1140	
		6	0,652	0,0393	
		8	0,820	0,0309	
		10	2,795	0,0864	
		12	3,892	0,1164	
3	С двух-уровневым ПЭ и HDD-областью	4	0,885	0,1187	
		6	0,739	0,0420	
		8	0,819	0,0296	
		10	2,791	0,0810	
		12	4,499	0,1257	
4	С двух-уровневым ПЭ и HDD-областью (основная доза снижена)	4	0,730	0,1024	
		6	0,616	0,0358	
		8	0,804	0,0297	
		10	3,060	0,0935	
		12	4,187	0,1246	
5	С двух-уровневым ПЭ, SDD- и HDD-областью	4	0,748	0,1138	
		6	0,647	0,0389	
		8	0,793	0,0298	
		10	2,667	0,0817	
		12	3,813	0,1127	

Выраженность квазинысыщения оценивалась при пяти различных уровнях напряжения на затворе: $U_G = 4$ В – начало линейного участка переходной ВАХ, $U_G = 6$ В – середина линейного участка, $U_G = 8$ В – конец линейного участка, $U_G = 10$ В – переход к насыщению переходной ВАХ, $U_G = 12$ В – полное насыщение. Все варианты характеризуются одинаковым уровнем напряжения пробоя сток-исток $U_{проб}$ и близким значением тока насыщения.

Выбор той или иной конструкции LDMOS транзисторного кристалла может зависеть от специфики режима работы транзистора, а также требований к усилителю на его основе. Но в качестве общего решения наиболее эффективной является конструкция варианта 4, включающая в себя двухуровневый полевой электрод и формирование в LDD-области участка с повышенной концентрацией у границы n^+ -стока. Концентрация примеси в LDD-области снижена относительно стандартной. Эта конструкция обеспечивает рекордное ослабление квазинасыщения при низких U_G , ослабление на уровне прочих вариантов на конце линейного участка переходной ВАХ и умеренное ослабление при ее насыщении. Также такая конструкция позволяет обеспечить улучшение прочих электропараметров LDMOS-транзистора на (1–4)%. Недостатком этой конструкции является необходимость более тонкой настройки всех параметров структуры.

Четвертая глава посвящена описанию транзисторного кристалла, разработанного при учете сведений о квазинасыщении переходных и выходных ВАХ, полученных при моделировании. В качестве основы конструкции для нового кристалла послужил вариант 4, описанный в главе 3 данной работы.

Для анализа были изготовлены две партии приборов. В первой использовались транзисторные кристаллы, выполненные по усовершенствованной технологии (в дальнейшем «новая конструкция»), во второй – кристаллы предыдущего поколения (в дальнейшем «базовая конструкция»). Прибор включает в себя только один транзисторный кристалл без цепей согласования, корпуса при изготовлении обеих партий были идентичны. Сравнение переходных ВАХ изготовленных СВЧ LDMOS-транзисторов новой и базовой конструкции приведено на рисунке 5.

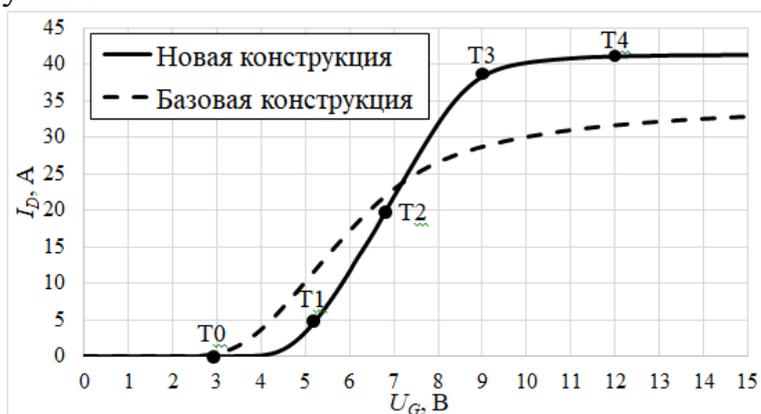


Рис. 5 – Сравнение переходных ВАХ СВЧ LDMOS-транзисторов с кристаллами новой и базовой конструкции

Как видно из рисунка 5, у LDMOS-транзистора, изготовленного с использованием кристалла новой конструкции, насыщение характеристики выражено более резко. Также возросли крутизна на линейном участке и ток насыщения. Таким образом, можно сделать вывод, что квазинасыщение переходной ВАХ в новой конструкции было существенно подавлено.

Семейства выходных ВАХ LDMOS-транзисторов, изготовленных с использованием кристаллов базовой и новой разработок, продемонстрированы на

рисунке 6. Значения напряжения на затворе при построении выходных ВАХ выбирались одинаковыми по положению на переходной ВАХ. Точка Т0 находится на предпороговом участке, Т1 – в начале линейного участка, Т2 лежит на середине линейного участка, Т3 находится на переходе линейного участка в насыщение, Т4 – на участке полного насыщения переходной ВАХ.

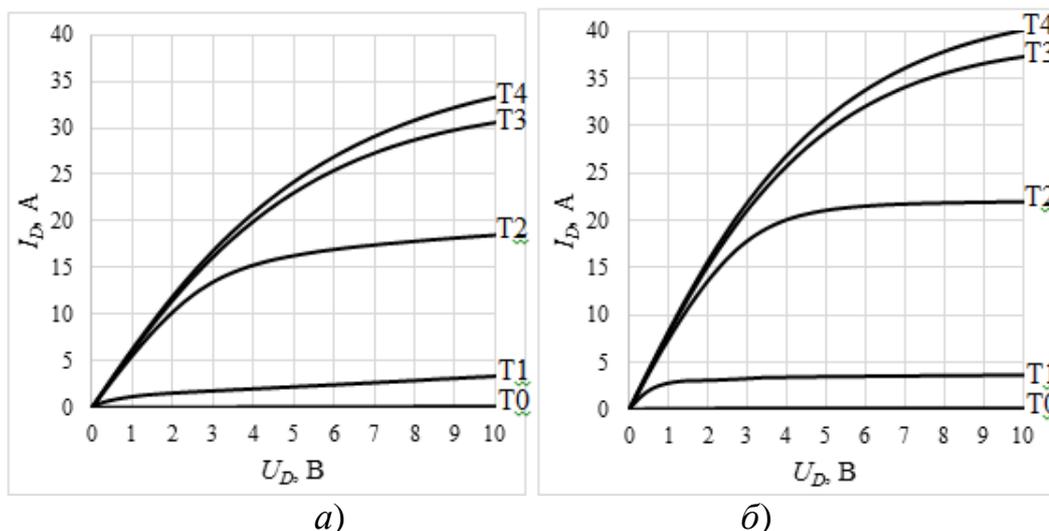


Рис. 6 – Семейства выходных ВАХ СВЧ LDMOS-транзисторов с кристаллом:
 а – базовой конструкции; б – новой конструкции

В таблице 2 приведены данные по абсолютным ΔI_{D8-10} и относительным $\Delta I_{D8-10}/I_{D8}$ приращениям токов стока, рассчитанные по ВАХ, приведенным на рисунке 6. Для сравнения в таблице 2 также приведены значения ΔI_{D8-10} и $\Delta I_{D8-10}/I_{D8}$ для кристалла транзистора BLF188XR производства фирмы Ampleon. Внесенные изменения в базовую конструкцию LDMOS-структуры привели к существенному подавлению эффекта квазинасыщения выходной ВАХ, особенно при напряжениях на затворе, соответствующих линейному участку переходной ВАХ (точки Т1 и Т2 на рисунке 5). Сравнение с зарубежным аналогом показывает, что достигнутые результаты близки к мировому уровню.

Таблица 2

Степень выраженности квазинасыщения исследуемых кристаллов

Участок переходной ВАХ	Базовая конструкция		Новая конструкция		BLF188XR	
	ΔI_{D8-10} , А	$\Delta I_{D8-10}/I_{D8}$	ΔI_{D8-10} , А	$\Delta I_{D8-10}/I_{D8}$	ΔI_{D8-10} , А	$\Delta I_{D8-10}/I_{D8}$
Т1	0,482	0,1650	0,074	0,0205	0,087	0,0347
Т2	0,678	0,0379	0,111	0,0051	0,159	0,0129
Т3	1,749	0,0606	1,649	0,0461	2,410	0,0718
Т4	2,455	0,0795	2,075	0,0545	3,788	0,1098

Сравнение средних значений электрических параметров LDMOS-транзисторов, изготовленных с использованием кристаллов базовой и новой конструкции, приведено в таблице 3. Удалось улучшить все основные электрические параметры, за исключением межэлектродных ёмкостей. Повышение дозы легирования LDD-области позволило снизить $R_{СИ}$ и увеличить

$I_{D\text{нас}}$. В то же время двухуровневый ПЭ дал возможность не только нивелировать влияние повышения дозы легирования на $U_{\text{проб}}$, но и добиться его повышения. Рост крутизны S обусловлен уменьшением толщины подзатворного диэлектрика.

Таблица 3

Электрические параметры испытываемых LDMOS-транзисторов

Кристалл	$R_{СИ}$, Ом	S , См	$U_{\text{проб}}$, В	$I_{D\text{нас}}$, А	$C_{\text{вх}}$, пФ	$C_{\text{прох}}$, пФ	$C_{\text{вых}}$, пФ
Новая конструкция	0,120	9,6	118	42,2	121,1	2,03	68,2
Базовая конструкция	0,152	6,5	100	33,7	101,2	0,60	60,7

Сравнение средних значений энергетических параметров LDMOS-транзисторов, изготовленных с использованием кристаллов базовой и новой конструкций, приведено в таблице 4. Измерения энергетических параметров приборов проводилось по методу согласованной нагрузки при следующем режиме измерения: напряжение питания 50 В, тестовая частота 860 МГц, длительность импульса $\tau_{И} = 300$ мкс, скважность $Q = 10$.

Из приведенных данных можно сделать вывод, что внедрение описанных усовершенствований позволило: повысить показатель отношения максимальной выходной мощности к периметру затвора; повысить отношение напряжения пробоя сток-исток к сопротивлению сток-исток в открытом состоянии; поднять коэффициенты полезного действия η_C и усиления по мощности $K_{УР}$.

Таблица 4

Энергетические параметры испытываемых LDMOS-транзисторов

Кристалл	$P_{ВХИ}$, дБм	$P_{ВЫХИ}$, Вт	$K_{УР}$, дБ	η_C , %
Новая конструкция	38	260	16,1	58,4
	40	352	15,5	64,3
	42	412	14,1	64,1
Базовая конструкция	38	151	13,8	46,4
	40	198	13,0	51,0
	42	198	11,0	50,4

На основе разработанных кристаллов были собраны транзисторы 2П9120БС. Внешний вид незагерметизированного транзистора 2П9120БС приведен на рисунке 7.

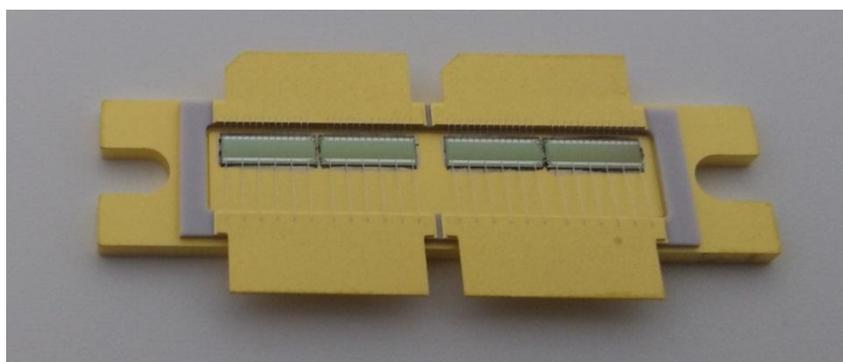


Рис. 7 – Общий вид транзистора, собранного из кристаллов новой конструкции

Энергетические параметры собранных приборов были измерены в тестовых усилителях мощности на частоте 500 МГц и 230 МГц. Показанные на испытаниях параметры полностью удовлетворяют ТУ на 2П9120БС, в связи с чем было принято решение внести в программу повышения качества изделий АО «НИИЭТ» на 2020 год пункт о переводе транзисторов 2П9120БС на кристалл новой конструкции.

Это позволяет говорить о том, что новая конструкция СВЧ LDMOS транзисторных кристаллов существенно превосходит существующую и может быть применена для модернизации всей номенклатуры 50-ти вольтовых LDMOS-транзисторов разработки АО «НИИЭТ».

В **заключении** приведены основные результаты работы.

1. Максимально приближенная к предельному насыщению выходная ВАХ LDMOS-транзисторов достигается при максимально равномерном распределении напряжённости электрического поля по длине LDD-области.

2. Согласно проведенному моделированию LDMOS транзисторной структуры в САПР Sentaurus TCAD, наибольшим влиянием на степень выраженности эффекта квазинасыщения среди всех конструктивно-технологических параметров LDMOS транзисторных кристаллов оказывают конструкция и длина перекрытия полевого электрода, концентрация примеси и профиль ее распределения в LDD-области.

3. 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 примеси в самой LDD-области на (5 – 10)% относительно концентрации, обеспечивающей максимальное напряжение пробоя сток-исток в случае равномерно легированной LDD-области.

4. Полученные данные о механизме квазинасыщения ВАХ и способах ослабления его проявления были учтены при разработке транзисторного кристалла нового поколения. Итогом стало резкое снижение степени выраженности квазинасыщения по сравнению с кристаллами прошлого поколения и кристаллом зарубежного производства. Можно констатировать, что достигнутые результаты по минимизации квазинасыщения соответствуют мировому уровню.

5. СВЧ-транзистор на основе разработанных кристаллов характеризуется 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.

6. Новая технология создания СВЧ LDMOS транзисторных кристаллов существенно превосходит существующую и может быть применена для модернизации

ции всей номенклатуры 50 вольтовых LDMOS-транзисторов разработки АО «НИИЭТ».

Автор выражает благодарность сотрудникам АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» за оказание помощи в проведении экспериментов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

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.

Свидетельства РФ

5. Цоцорин А. Н. Топология 50-ваттной СВЧ линейной LDMOS транзисторной структуры L-диапазона с пятиуровневой системой металлизации и напряжением питания 50 В (2П9133В): свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2017630162 / А. Н. Цоцорин, М. И. Черных, **Р. П. Алексеев**, В. И. Дикарев; Правообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. – Москва, 2017. – (заявка № 2017630099, дата поступления 25.09.2017 г., дата регистрации 20.11.2017 г.).
6. Цоцорин А. Н. Топология 13-ваттной СВЧ линейной LDMOS транзисторной структуры L-диапазона с пятиуровневой системой металлизации и напряжением питания 50 В (2П9133А): свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2017630163 / А. Н. Цоцорин, М. И. Черных, **Р. П. Алексеев**, В. И. Дикарев; Правообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. – Москва, 2017. – (заявка № 2017630100, дата поступления 25.09.2017 г., дата регистрации 20.11.2017 г.).

7. Черных М. И. Сверхвысококачественная LDMOS транзисторная структура с выходной мощностью 300 Вт при напряжении питания 50 В, предназначенная для работы в диапазоне частот от 0,1 ГГц до 2 ГГц в импульсном режиме: свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2021630075 / М. И. Черных, А. Н. Цоцорин, **Р. П. Алексеев**; Правообладатель Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электронной техники» (АО «НИИЭТ»). – Москва, 2021. – (заявка № 20211630069, дата поступления 25.05.2021 г., дата регистрации 31.05.2021 г.).

Статьи и материалы конференций

8. Влияние на электрофизические характеристики СВЧ LDMOS транзисторов конструктивно-технологических параметров стоковых LDD областей / **Р. П. Алексеев**, Е. Н. Бормонтов, В. И. Дикарев, В. А. Кожевников, А. Н. Цоцорин. // Радиолокация, навигация, связь: 22-я Международная научно-техническая конференция. – Воронеж, 2016. – С. 409-417.
9. Влияние полевого электрода на электрофизические характеристики СВЧ LDMOS-транзисторов / **Р. П. Алексеев**, Г. В. Быкадорова, В. К. Лановой, Е. О. Ледовская, М. А. Кондрашин. // Наука сегодня: реальность и перспективы: материалы международной научно-практической конференции. – Вологда, 2017. – С. 24-26.
10. Приборно-технологическое моделирование LDMOS-структур с r-карманом в призатворном участке N-LDD-области стока / **Р. П. Алексеев**, Г. В. Быкадорова, В. К. Лановой, Е. О. Ледовская. // Твердотельная электроника, микроэлектроника и нанoeлектроника: межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж, 2018. – Вып. 17. – С. 31-35.
11. Приборно-технологическое моделирование LDMOS-транзисторов с нелинейным распределением примеси LDD-области / **Р. П. Алексеев**, Е. Н. Бормонтов, Г. В. Быкадорова, А. Н. Цоцорин. // Радиолокация, навигация, связь: 24-я Международная научно-техническая конференция. – Воронеж, 2018. – С. 257-264.
12. Приборно-технологическое проектирование LDMOS-транзисторов с отрицательным градиентом примеси LDD-области / **Р. П. Алексеев**, Е. Н. Бормонтов, Г. В. Быкадорова, А. Н. Цоцорин. // Физико-математическое моделирование систем : межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж, 2018. – Вып. – С. 3-8.
13. **Алексеев Р. П.** Моделирование технологии СВЧ LDMOS-транзисторов с нелинейным распределением примеси в стоковой LDD-области / **Р. П. Алексеев**, Г. В. Быкадорова, Е. Н. Бормонтов. // Энергия-XXI век. – 2016. – № 1. – С. 68-83.
14. **Алексеев Р. П.** Моделирование влияния режимов ионной имплантации и диффузионной разгонки канальной области на пороговое напряжение мощных СВЧ LDMOS транзисторов в среде приборно-технологической САПР TCAD /

- Р. П. Алексеев**, Г. В. Быкадорова, В. А. Кожевников. // Энергия-XXI век. – 2015. – №1. – С. 79-89.
15. **Алексеев Р. П.** Физико-технологическое проектирование LDMOS-структур с отрицательным градиентом примеси LDD-области / **Р. П. Алексеев**, Г. В. Быкадорова, А. М. Гаврилова. // Математика. Компьютер. Образование : тезисы 25-й международной конференции: симпозиум с международным участием. – Москва-Ижевск, 2018. – Вып. 25. – С. 243.
16. **Алексеев Р. П.** Моделирование в среде приборно-технологической САПР TCAD влияния на выходные параметры мощных LDMOS структур режимов создания канальной области / **Р. П. Алексеев**, Г. В. Быкадорова, В. А. Кожевников. // Математика. Компьютер. Образование: тезисы международной школы-конференции "Биофизика сложных систем: анализ экспериментальных данных и моделирование процессов". – Москва-Ижевск, 2015. – Вып. 22. – С. 210.
17. **Алексеев Р. П.** Моделирование влияния технологии формирования канальной области на выходные вольтамперные характеристики мощных СВЧ LDMOS транзисторов / **Р. П. Алексеев**, Г. В. Быкадорова, А. Ю. Ткачев. // Энергия-XXI век. – 2015. – №3 (91). – С. 102-107.
18. Моделирование влияния на выходные параметры мощных LDMOS структур режимов создания LDD области / **Р. П. Алексеев**, Г. В. Быкадорова, К. Г. Пономарев, В. В. Фадеев. // Математика. Компьютер. Образование: тезисы 23-й Международной конференции. – Москва-Дубна, 2016. – Вып. 23. – С. 188.
19. **Алексеев Р. П.** Исследование в среде приборно-технологической САПР зависимости порогового напряжения от режимов создания канальной области мощных СВЧ LDMOS транзисторов / **Р. П. Алексеев**, А. В. Калашников. // Микроэлектроника и информатика – 2015: тезисы 22-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Москва, 2015. – С. 68.

Подписано в печать 05.03.2024 г.
Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ № _____

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14