

LDMOS: новые разработки АО «НИИЭТ»

Р. Алексеев¹, И. Семейкин, к. т. н.², А. Цоцорин, к. ф.-м. н.³,
П. Куршев⁴

УДК 621.382.323:621.3.029.6 | ВАК 2.2.2

Осенью 2022 года АО «НИИЭТ» – один из лидеров среди отечественных разработчиков и производителей интегральных схем и полупроводниковых приборов – приступило к созданию двух новых транзисторов по кремниевой технологии LDMOS. Основной областью применения новых приборов станут усилители телевизионных сигналов, однако их передовые характеристики позволят улучшить с их помощью параметры аппаратуры и в других областях. В настоящее время предприятие принимает предварительные заявки на приобретение разрабатываемых транзисторов.

МЕСТО LDMOS СРЕДИ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЧ- И СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ

Технология LDMOS (Laterally-Diffused Metal-Oxide Semiconductor – металл-оксид-полупроводник с боковой диффузией) существует уже много лет и хорошо зарекомендовала себя в области мощных ВЧ- и СВЧ-транзисторов. Она позволяет создавать приборы с выходной мощностью до нескольких киловатт на частотах до 1 ГГц и 100 Вт и выше на более высоких частотах [1].

Хотя в настоящее время активно развивается нитрид-галлиевая технология, обеспечивающая электрические характеристики транзисторов, недостижимые не только для кремниевых приборов, но и для арсенид-галлиевых, LDMOS остается доминирующей технологией СВЧ-транзисторов в мобильной связи, а также в ряде других областей, что прежде всего связано со сравнительно низкой ее стоимостью, характерной для кремниевой технологии, при довольно высоких энергетических параметрах [2, 3]. Более того, зарубежные производители планируют расширить область применения СВЧ LDMOS-транзисторов до частот 12 ГГц [4]. Учитывая развитие структур LDMOS, направленное на улучшение параметров транзисторов, основанные на данной технологии приборы будут оставаться популярными еще достаточно долго.

ТЕХНОЛОГИЯ LDMOS В НИИЭТ

В АО «НИИЭТ» технология LDMOS была освоена в 2006 году. За прошедшее время на рынке было представлено более 50 типонаименований ВЧ и СВЧ LDMOS-транзисторов разработки предприятия.

В 2020 году институтом была проведена модернизация технологии и создано новое поколение мощных СВЧ LDMOS-транзисторов для рабочих частот до 3 ГГц с улучшенными эксплуатационными характеристиками [5]. Среди проведенных усовершенствований:

- увеличение толщины термически выращенного оксида кремния над дрейфовой областью стока транзистора, что позволило отдалить границу раздела диэлектрических слоев от поверхности кремния и снизить влияние межслойных зарядов;
- внедрение двухуровневого полевого электрода, обеспечившее увеличение напряжения пробоя сток-исток и уменьшение сопротивления сток-исток в открытом состоянии;
- увеличение толщины верхнего токонесущего слоя металла, что позволило уменьшить ширину токоведущих шин при сохранении необходимой площади сечения металлизации.

На данный момент предприятием предлагаются линейные, импульсные и мощные ВЧ- и СВЧ-транзисторы серий 2П980, 2П998, 2П9103, КП9103, 2П9110, КП9110, 2П9111, КП9111, КП9112, 2П9115, 2П9116, 2П9120, 2П9121, 2П9123, КП9123, 2П9133.

ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ LDMOS-ТРАНЗИСТОРОВ КП9171А И КП9171БС

В настоящее время подходит к концу гарантийный срок эксплуатации передатчиков телевизионного сигнала, произведенных в рамках ФЦП «Развитие телерадиовещания в Российской Федерации на 2009–2018 годы». Нарботка входящих в их состав транзисторов уже достаточно велика. Кроме того, сами передатчики устаревают морально. Таким образом, актуальной задачей становятся разработка и постановка на серийное производство новых усилительных транзисторов с характеристиками, отвечающими требованиям

¹ АО «НИИЭТ», ведущий инженер.

² АО «НИИЭТ», технический директор.

³ АО «НИИЭТ», начальник отдела.

⁴ АО «НИИЭТ», начальник лаборатории.

современных стандартов цифрового телевизионного вещания.

Стандарты DVB-T/DVB-T2 накладывают на применяемые в аппаратуре усилительные транзисторы два ключевых требования. Первое требование заключается в обеспечении высокой линейности при передаче сигнала, что обусловлено сложным характером его модуляции. Вторым требованием является способность сохранять надежность при работе на большой мощности при напряжении питания 50 В, что может приводить к значительному нагреву кристалла. Это означает, что транзисторы должны обладать высоким КПД, а также низким тепловым сопротивлением между кристаллом и корпусом.

В настоящее время в России нет освоенных в серийном производстве СВЧ-транзисторов, позволяющих удовлетворить специфические требования работы в передатчике сигнала стандартов DVB-T/DVB-T2 в сочетании с высокими значениями коэффициента усиления по мощности и КПД. Транзисторы, которые позволяют получить ранее освоенная в АО «НИИЭТ» технология LDMOS, характеризуются невысокой по современным меркам удельной выходной мощностью и большими значениями удельных межэлектродных емкостей.

В связи с этим, в рамках ОКР «LDMOS-DTV» была поставлена задача доработки LDMOS-технологии и конструкции транзисторных кристаллов и создания усилительных СВЧ-транзисторов на ее основе, удовлетворяющих требованиям стандартов DVB-T/DVB-T2 и не уступающих по своим характеристикам зарубежным аналогам.

Данная работа выполняется с использованием программы субсидирования в соответствии с постановлением Правительства РФ от 24 июля 2021 года № 1252.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ И КОНСТРУКЦИИ КРИСТАЛЛА

В рамках проекта была значительно усовершенствована конструкция СВЧ-кристаллов и доработана технология их изготовления, что позволило воплотить в жизнь ряд принципиально новых конструктивно-технологических решений, направленных на существенное улучшение радиочастотных характеристик, линейности, повышение надежности транзисторов, обеспечение высокой стабильности их энергетических параметров при длительной наработке.

Усовершенствованная LDD-область. LDD-область (Lightly Doped Drain – слаболегированный сток) современных LDMOS-транзисторов представляет собой совокупность трех-четырех диффузионных областей, характеризующихся разными профилями распределения примеси. Оптимизация технологических параметров создания LDD-области, таких как дозы и энергии ионной имплантации, время и продолжительность диффузионной разгонки, позволила снизить значение сопротивления

сток-исток в открытом состоянии и повысить ток насыщения стока при сохранении требуемого уровня напряжения пробоя сток-исток. Также оптимизации подверглись и другие диффузионные области активной структуры LDMOS-транзистора, такие как глубокая p^+ -область, p -карман, области n^+ -стока и истока.

Новая система полевых электродов. Принцип действия полевого электрода (ПЭ), так же как и изолированного затвора, основывается на эффекте поля. Под его воздействием снижается концентрация носителей заряда в приповерхностном слое LDD-области, благодаря чему при том же напряжении сток-исток область пространственного заряда LDMOS-структуры с ПЭ оказывается существенно больше по сравнению со структурой без ПЭ. В рамках ОКР «LDMOS-DTV» была разработана новая система ПЭ, состоящая из трех слоев (рис. 1). Эта конструкция характеризуется значительно более сильным полевым воздействием в сравнении с двух- и тем более однослойным ПЭ [6]. Ее внедрение позволит повысить запас по напряжению пробоя сток-исток, добиться снижения напряженности электрического поля вблизи затвора, снизить инжекцию горячих электронов в окисел, добиться оптимального пути протекания тока при пробое структуры и снизить выходную емкость.

Совершенствование многоуровневой металлизации. Система металлизации современных LDMOS-транзисторов насчитывает пять токоведущих слоев (рис. 2). Внедрение новой системы многоуровневого ПЭ требует переработки всех слоев системы металлизации и межслойных диэлектриков. В первую очередь из-за внедрения многоуровневого ПЭ увеличивается суммарная толщина диэлектрических слоев, разделяющих поверхность полупроводниковой структуры и слой первого металла – до 1,5 мкм. Негативным следствием этого выступает сужение дна контактных окон, так как метод плазмохимического травления характеризуется некоторым углом наклона травления материала и образуемых стенок (рис. 3). Сужение дна контактных окон приводит к повышению контактного сопротивления, что негативно сказывается

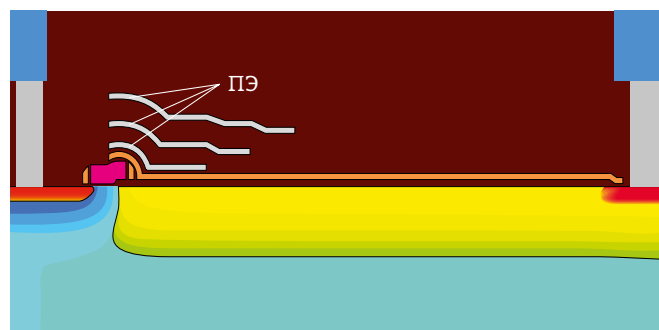


Рис. 1. Модель LDMOS-структуры с трехслойным ПЭ

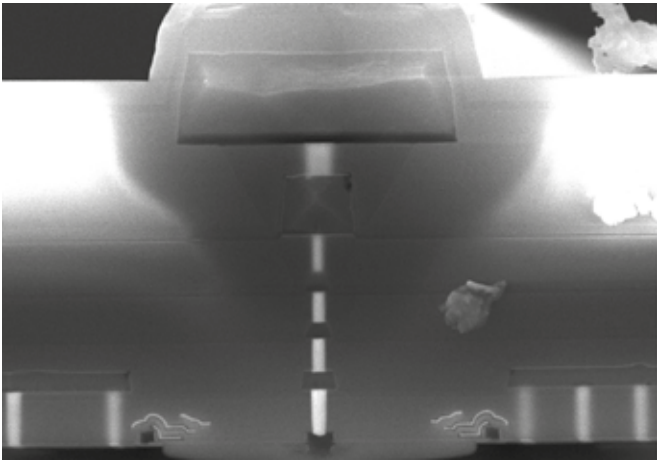


Рис. 2. Типовая система металлизации стокового пальца LDMOS-транзистора

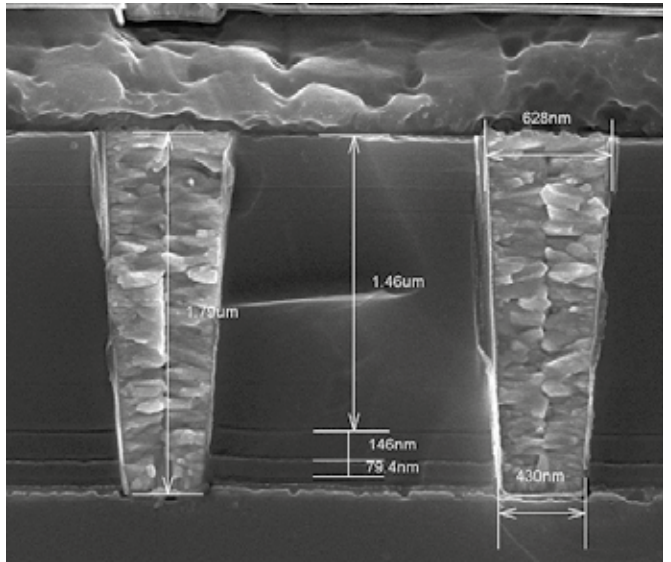


Рис. 3. Контактное окно, вытравленное в диэлектрическом слое толщиной порядка 1,5 мкм. Видно сужение дна окна

на большинстве ключевых электрических параметров транзистора. Для компенсации этого размер контактных окон был увеличен до $0,5 \times 0,5$ мкм. Соответствующим образом была переработана вся система межслойных контактов. Кроме того, для получения минимальных значений межэлектродных емкостей также были переработаны толщины слоев металла и конструкция истоковых шин, экранирующих затворные пальцы от стоковых.

Снижение теплового сопротивления. Как было отмечено выше, одним из ключевых требований к транзистору при работе на сигналах стандартов DVB-T/DVB-T2 является низкое значение теплового сопротивления. Источником тепла является ток, протекающий по транзисторной структуре, и ее электрическое сопротивление. Генерация тепла происходит на поверхности LDMOS-структуры в пальцах транзистора (рис 4). Генерируемое тепло отводится через кремниевую подложку на фланец корпуса, а с него – на радиатор. При этом основной вклад в тепловое сопротивление транзистора вносят именно кремниевая подложка и ее контакт с фланцем. Тепло распространяется вглубь подложки от каждого источника тепла изотропно. Если тепловые потоки от двух источников накладываются, то отведение тепла ухудшается и, следовательно, тепловое сопротивление увеличивается. Для минимизации теплового

сопротивления необходимо увеличивать шаг структуры – расстояние между пальцами.

Данные работы к настоящему времени завершены. Сейчас выполняется изготовление инженерных партий пластин с транзисторными кристаллами и проводится отработка технологических режимов.

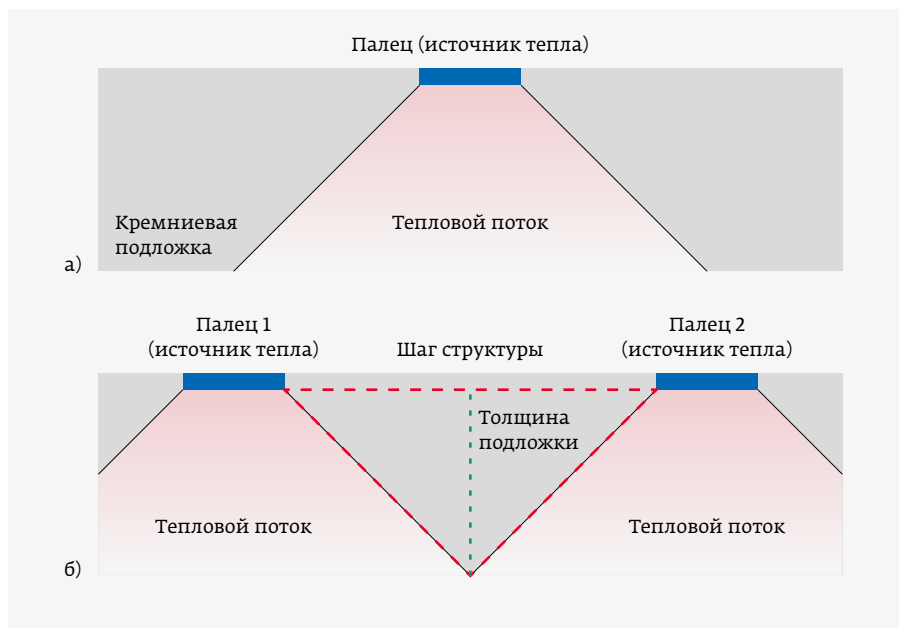


Рис. 4. Распространение тепла вдоль кремниевой подложки: а – от единичного пальца; б – от нескольких разнесенных пальцев

Таблица 1. Значения электрических параметров транзисторов при приемке и поставке

Наименование параметра, единица измерения (режим измерения)	Обозначение параметра	Норма параметра				Температура корпуса (среды), °С
		КП9171А		КП9171БС		
		не менее	не более	не менее	не более	
Выходная мощность в пике огибающей, Вт ($U_{СИ} = 50$ В, $P_{ВХПО} = 1,4$ Вт, $f_1 = 860$ МГц, $f_2 = 860,1$ МГц)	$P_{ВЫХПО}$	140	-	-	-	25 ± 15
Выходная мощность, Вт ($U_{СИ} = 50$ В, $P_{ВХ} = 2,5$ Вт, $f = 550$ МГц) ¹	$P_{ВЫХ}$	-	-	180	-	25 ± 15
Коэффициент усиления по мощности, дБ ($U_{СИ} = 50$ В, $f_1 = 860$ МГц, $f_2 = 860,1$ МГц, $P_{ВЫХПО} = 140$ Вт; $f = 550$ МГц, $P_{ВЫХ} = 180$ Вт) ¹	$K_{УР}$	20	-	18,6	-	25 ± 15
Коэффициент полезного действия стока, % ($U_{СИ} = 50$ В, $f_1 = 860$ МГц, $f_2 = 860,1$ МГц, $P_{ВЫХПО} = 140$ Вт; $f = 550$ МГц, $P_{ВЫХ} = 180$ Вт) ¹	η_c	45	-	50	-	25 ± 15
Коэффициент комбинационных составляющих третьего порядка, дБ ($U_{СИ} = 50$ В, $f_1 = 860$ МГц, $f_2 = 860,1$ МГц, $P_{ВЫХПО} = 140$ Вт)	M_3	-	-30	-	-	25 ± 15
Плечо интермодуляционных искажений, дБ ($U_{СИ} = 50$ В, $f = 550$ МГц, $P_{ВЫХ} = 180$ Вт) ¹	IMDshldr ²	-	-	-	-33	25 ± 15
Начальный ток стока, мА ($U_{СИ} = 100$ В, $U_{ЗИ} = 0$ В)	$I_{СНАЧ}$	-	3	-	10	(25 ± 10)
Ток утечки затвора, мА ($U_{ЗИ} = 15$ В)	$I_{3УТ}$	-	0,05	-	0,15	(25 ± 10)

¹ Входной сигнал DVB-T (8k OFDM) в полосе канала 8 МГц с PAR=9,5 дБ при вероятности 0,01% для CCDF.

² Параметр измеряется по методу дельта-маркера с отстройкой на 4,3 МГц от центральной частоты.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРОВ КП9171А И КП9171БС

Ожидаемые параметры транзисторных кристаллов позволят обеспечить эксплуатационные показатели транзисторов на уровне лучших зарубежных аналогов. Транзистор КП9171А станет аналогом прибора BLF881 и будет производиться в корпусе КТ-55С-1. Транзистор КП9171БС – аналог прибора BLF989Е в балансном корпусе КТ-103А-2. В его составе предусмотрена согласующая цепь по входу.

Планируемые технические характеристики разрабатываемых транзисторов приведены в табл. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные работы по совершенствованию технологии LDMOS для создания современных усилительных

транзисторов для передатчиков телевизионных сигналов стандартов DVB-T/DVB-T2 на предприятии завершены. После отработки технологии и запуска изделий в серию новые транзисторы будут доступны для заказчиков.

Основной областью применения новых приборов станут усилители телевизионных сигналов, однако их передовые характеристики, в частности большая выходная мощность в сравнении с транзисторами предыдущего поколения, повышенный КПД и высокая линейность, позволят улучшить с их помощью параметры аппаратуры и в других областях, таких как, например, системы радиолокации и навигации.

С тем чтобы учесть потребности рынка на ранней стадии и более эффективно спланировать производство, АО «НИИЭТ» предлагает заинтересованным предприятиям оставить предварительную заявку на приобретение

новых приборов на странице обратной связи сайта института (<https://niiet.ru/contacts/>).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Combs A.** Application Note AN-007: A Comparative Review of GaN, LDMOS, and GaAs for RF and Microwave Applications // NuWaves Engineering // <https://nuwaves.com/wp-content/uploads/2020/08/AN-007-A-Comparative-Review-of-GaN-LDMOS-and-GaAs-for-RF-and-Microwave-Applications.pdf>
2. **Joosting J.-P.** Why LDMOS is the best technology for RF energy // eeNews Wireless. Technology News. 2018. June 21. // <https://www.eenewseurope.com/en/why-lmos-is-the-best-technology-for-rf-energy/>
3. **Dhanyal H. R. et al.** Miniaturized High-Efficiency Pulsed-Power Amplifier for Surveillance and Tracking Radar // 2020 5th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). – IEEE, 2020. PP. 840–843.
4. **Theeuwens S. et al.** LDMOS technology for power amplifiers up to 12 GHz // 2018 13th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). – IEEE, 2018. PP. 162–165.
5. **Алексеев Р., Цоцорин А., Черных М.** Мощные СВЧ LDMOS-транзисторы для рабочих частот до 3 ГГц // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 4. С. 98–100.
6. **Алексеев Р., Куршев П., Цоцорин А.** Влияние многослойного полевого электрода на степень выраженности эффекта квазинасыщения вольт-амперных характеристик мощных сверхвысокочастотных латеральных транзисторов // Физика и техника полупроводников. 2022. Т. 56. № 11. С. 1088–1092.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 975 руб.

МОЩНЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СВЧ-УСИЛИТЕЛИ

Сечи Ф., Буджатти М.

При поддержке АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Перевод с англ. под ред. д. т. н. А. А. Борисова

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 416 с., ISBN 978-5-94836-415-5

В книге рассмотрены все традиционные вопросы, связанные с разработкой усилителей мощности, начиная от получения моделей приборов на большом сигнале и заканчивая обсуждением сумматоров мощности и методов проектирования.

Большое внимание в издании уделено рассмотрению физических основ приборов, фазовых шумов, схем смещения и тепловому проектированию. В книге особое внимание уделяется рассмотрению фундаментальных принципов. Это единственный способ борьбы с быстрым устареванием знаний в отрасли, которая находится в состоянии постоянного развития. Рассматривая логику и принципы, которые стоят за различными методами проектирования, стараемся подтолкнуть читателя к их использованию в будущих проектах. Издание затрагивает необычайно большое количество областей, связанных с физикой полупроводников и активных устройств.

Книга представляет интерес для специалистов, которые занимаются разработкой усилителей мощности для базовых станций сотовой связи. В особенности это относится к рассмотрению моделей на больших сигналах, проблем, связанных с фазовыми шумами, методов проектирования усилителей мощности, специальных конструкций усилителей мощности и теплового проектирования. Также данная книга может послужить в качестве справочного пособия при углубленном изучении СВЧ-устройств.

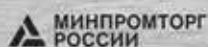
КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphaera.ru, sales@technosphaera.ru



МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВОЕННО-МОРСКОЙ САЛОН-2023

Организатор



Выставочный
оператор



МКВ

При поддержке



21–25 июня

Кронштадт
Конгрессно-выставочный центр
Музея военно-морской славы

FLEET-EXPO.RU