

# Мощные СВЧ LDMOS-транзисторы для рабочих частот до 3 ГГц

Р. Алексеев<sup>1</sup>, А. Цоцорин, к. ф. -м. н.<sup>2</sup>, М. Черных, к. т. н.<sup>3</sup>

УДК 621.38 | ВАК 05.27.01

В АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (АО «НИИЭТ») – одном из отечественных лидеров разработчиков и производителей отечественных СВЧ-изделий и интегральных микросхем, проведена модернизация LDMOS-технологии и создано новое поколение мощных СВЧ LDMOS-транзисторов для рабочих частот до 3 ГГц с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

LDMOS-технология (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductors) уже сравнительно давно зарекомендовала себя на рынке мощных СВЧ кремниевых транзисторов, применяемых в базовых станциях сотовой системы радиосвязи, радиопередатчиков P-, L-, S-диапазонов частот, РЛС наземного и воздушного базирования, систем навигации и др. И даже несмотря на рост объемов производства приборов на основе более перспективных полупроводниковых материалов, например нитрида галлия, кремниевые LDMOS-транзисторы продолжают сохранять традиционно сильные позиции в целом ряде областей благодаря отлаженности технологических процессов и высокому соотношению цена-качество. Это подтверждается тем, что ведущие зарубежные производители электронной компонентной базы продолжают развивать LDMOS-технологию, повышают диапазон рабочих частот до 4 ГГц, включая WiMax [1], и предлагают потребителям изделия уже 10-го поколения [2].

Также как и зарубежные лидеры в области микроэлектроники, АО «НИИЭТ» проводит за счет собственных средств инициативные работы по совершенствованию LDMOS-технологии с внедрением новейших конструктивно-технологических решений. Работа проводится на технологической линии кристалльного производства ПАО «Микрон».

Было проведено усовершенствование ключевых конструктивных элементов транзисторной структуры, их описание и микрофотография поперечного сечения готовой транзисторной структуры представлены на рис. 1.

**Увеличение толщины термически выращенного оксида кремния над дрейфовой областью стока.** Слой оксида кремния над LDD дрейфовой областью стока (LDD – Lightly Doped Drain) представляет собой суперпозицию двух слоев: первый слой выращен путем термического

окисления, второй слой получен осаждением из газовой фазы при умеренных температурах. Недостатком осажденного слоя является относительно большая плотность дефектов, которая приводит к возникновению значительной концентрации ловушек на границе двух слоев. Такие ловушки (нестабильный положительный заряд) способны оказывать значительное влияние на стабильность протекающего через LDD-область тока. В новой конструкции толщина термического оксида была увеличена, что позволило отдалить границу раздела диэлектрических слоев от поверхности кремния и снизить влияние межслойных зарядов.

## Внедрение двухуровневого полевого электрода.

Классическая архитектура LDMOS-транзистора предполагает использование полевого электрода (ПЭ) двух типов: близкорасположенного к поверхности кремния с малым перекрытием LDD-области для относительно низковольтных приборов и протяженного высоко расположенного, применяемого в высоковольтных изделиях [3]. Проведенные исследования [4, 5] показали, что при оптимальной конструкции эти два типа ПЭ

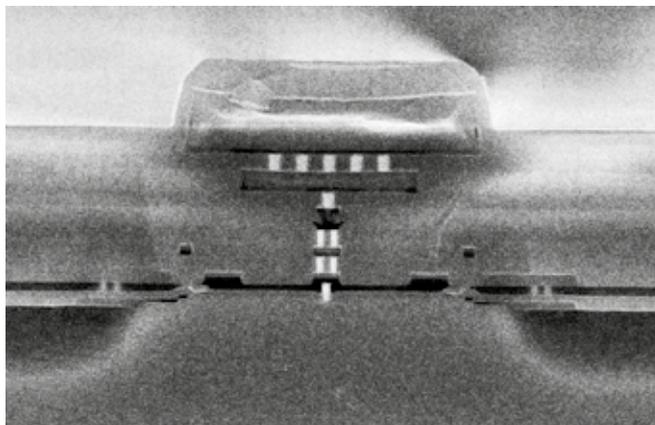
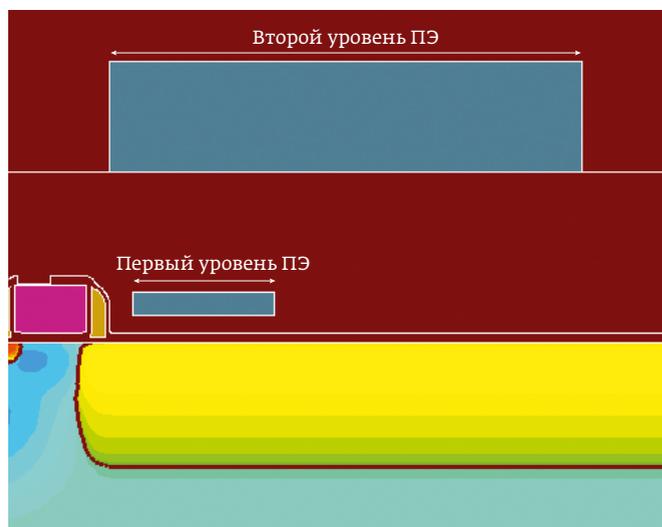


Рис. 1. Микрофотография поперечного сечения LDMOS транзисторной структуры

<sup>1</sup> АО «НИИЭТ», инженер-технолог 1 категории.

<sup>2</sup> АО «НИИЭТ», начальник отдела.

<sup>3</sup> АО «НИИЭТ», начальник лаборатории.



**Рис. 2.** Конструкция двухуровневого полевого электрода транзисторной структуры

могут быть построены таким образом, чтобы получить положительный синергетический эффект. В новой конструкции ПЭ выполняется двухуровневым. Первый уровень формируется из нитрида титана вблизи затвора транзистора с небольшой протяженностью перекрытия LDD-области, в то время как верхний уровень располагается на поверхности первого межслойного диэлектрика. Данная конструкция позволяет добиться увеличения напряжения пробоя сток-исток ( $U_{\text{проб СИ}}$ ) и уменьшения сопротивления сток-исток в открытом состоянии ( $R_{\text{СИ}}$ ). Конструкция двухуровневого полевого электрода приведена на рис. 2.

**Увеличение толщины верхнего токонесущего слоя металла.** При конструировании мощных приборов критичным фактором является площадь сечения металлизации стока (ширина токоведущих шин при фиксированной толщине), обеспечивающей высокий уровень тока стока, определяемый предельной плотностью тока в металле. В то же время большая площадь металлизации сказывается на уровне паразитных межэлектродных емкостей. Конструктивно-технологические усовершенствования, реализованные на кристалльном производстве в ПАО «Микрон», дали возможность увеличить толщину металлизации, что позволило уменьшить ширину токоведущих шин при сохранении необходимой площади сечения металлизации.

Внедрение описанных усовершенствований позволило добиться следующих улучшений: увеличить удельную мощность на единицу периметра затвора; повысить пробивное напряжение сток-исток при уменьшении сопротивления сток-исток в открытом состоянии; увеличить стойкость транзисторной структуры в части срыва паразитного биполярного транзистора во вторичный пробой;

**Таблица 1.** Статические параметры собранных транзисторов

Прибор	$R_{\text{СИ}}$ , Ом	$S$ , См	$U_{\text{проб}}$ , В	$I_{\text{Снас}}$ , А
Транзистор 1	0,136	6,1	121	40,2
Транзистор 2	0,152	5,8	100	31,7

**Таблица 2.** Энергетические параметры собранных транзисторов

Прибор	$P_{\text{ВХ}}$ , дБм	$P_{\text{ВЫХ}}$ , Вт	$K_{\text{УР}}$ , дБ	КПД, %
Транзистор 1	38	260	16,1	58,4
	40	352	15,5	64,3
	42	412	14,1	64,1
Транзистор 2	38	151	13,8	46,4
	40	198	13,0	51,0
	42	198	11,0	50,4

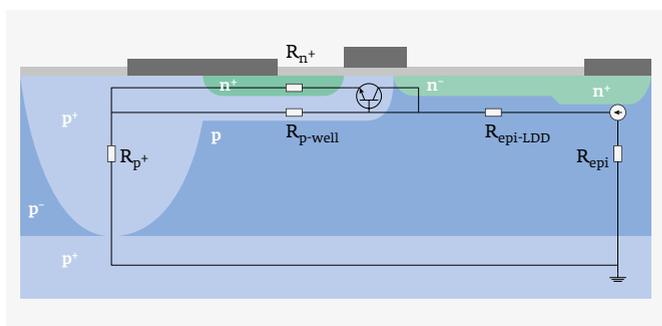
повысить коэффициент полезного действия стока и повысить коэффициент усиления по мощности.

Усовершенствование LDMOS-технологии прошло успешное опробование. Для сравнения были взяты транзисторные кристаллы, выполненные по усовершенствованной технологии (Транзистор 1, кристалл 1), и кристаллы предыдущего поколения, но аналогичного форм-фактора с тем же самым периметром затвора (Транзистор 2, кристалл 2). Конструкции транзисторов, изготовленных из кристаллов 1 и 2 были идентичны. Сравнение статических параметров транзисторов приведено в табл. 1, сравнение энергетических параметров транзисторов приведено в табл. 2. Измерения энергетических параметров были проведены по методу согласованной нагрузки в следующем режиме:  $U_{\text{СИ}} = 50$  В,  $f_{\text{тест}} = 860$  МГц,  $Q = 10$ ,  $\tau = 300$  мкс.

Кроме того, на транзисторах 1 и 2 был проведен тест на устойчивость паразитного биполярного транзистора к вторичному пробое. В рамках исследований на сток транзистора подавалось напряжение, превышающее  $U_{\text{проб}}$ , с целью определения уровня тока, при котором происходит вторичный пробой паразитного биполярного транзистора (рис. 3). Срыв во вторичный пробой на транзисторах 1 не наблюдался.

\* \* \*

В АО «НИИЭТ» разработано новое поколение мощных СВЧ LDMOS-транзисторов с улучшенными эксплуатационными характеристиками: пробивное напряжение сток-исток, сопротивление сток-исток в открытом состоянии, ток стока насыщения, удельная выходная мощность,



**Рис. 3.** Схематичное изображение поперечного сечения LDMOS транзисторной структуры с паразитным биполярным транзистором

коэффициент усиления по мощности и коэффициент полезного действия стока. Кроме того, устранение эффекта срыва паразитного биполярного транзистора во вторичный пробой в значительной мере повышает надежность приборов и аппаратуры в целом. Испытание транзисторов с модернизированной конструкцией и доработанной технологией полностью подтвердило расчетные данные, что открывает широкие возможности для дальнейшего развития отечественной СВЧ-электроники.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Theeuwes S. J. C. H., Qureshi J. H.** LDMOS Technology for RF Power Amplifiers // IEEE transactions on microwave theory and techniques. 2012. V. 60. № 6. P. 1755–1763.
2. Сайт фирмы Ampleon [Электронный ресурс]. – <https://www.ampleon.com/> – Дата обращения 24.02.2020.
3. **Ткачев А. Ю.** Влияние конструктивно-технологических факторов на электрические параметры мощных СВЧ LDMOS-транзисторов. Автореферат диссертации кандидата технических наук: 05.13.18. // Воронеж: Воронежский госуниверситет, 2011. 16 с.
4. **Алексеев Р. П., Быкадорова Г. В., Лановой В. К., Ледовская Е. О., Кондрашин М. А.** Влияние полевого электрода на электрофизические характеристики СВЧ LDMOS-транзисторов // Наука сегодня: реальность и перспективы: материалы международной научно-практической конференции. 23 февраля 2017 г. – Вологда, 2017. С. 24–26.
5. **Алексеев Р. П. и др.** Приборно-технологическое проектирование LDMOS-транзисторов с отрицательным градиентом примеси LDD-области // Радиолокация, навигация, связь: 24-я Международная научно-техническая конференция. г. Воронеж. 17–19 апреля 2018 г. – Воронеж. 2018. Т. 5. С. 257–264.

## 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

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.

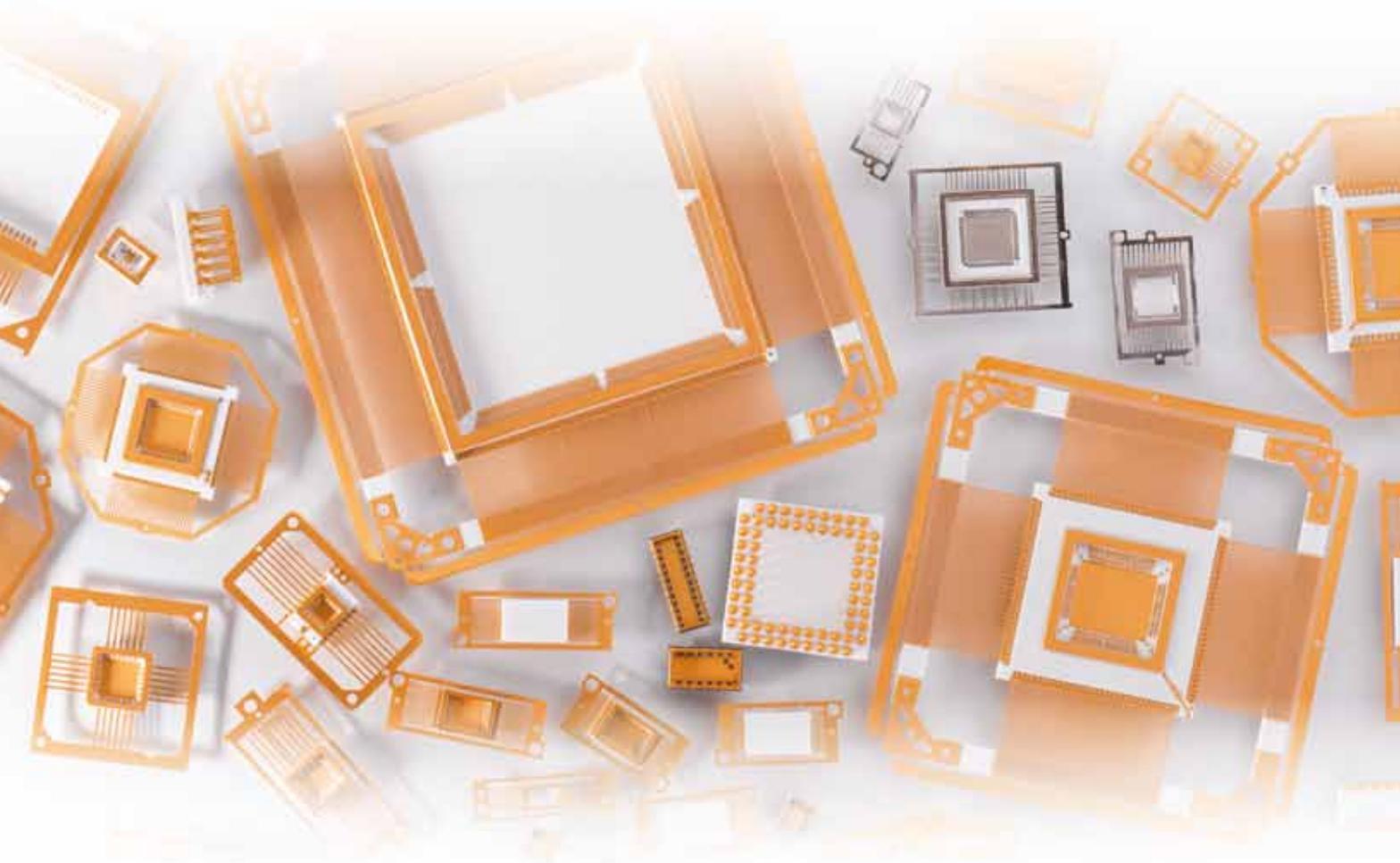
Большое внимание в издании уделено рассмотрению физических основ приборов, фазовых шумов, схем смещения и тепловому проектированию. Также в книге особое внимание уделяется рассмотрению фундаментальных принципов. Издание затрагивает необычайно большое количество областей, связанных с физикой полупроводников 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.

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

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

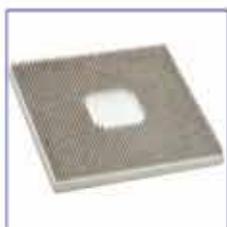
✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)



**Предприятие располагает научно-технической и испытательной базой для проведения исследований, разработки и выпуска новой продукции**



Выводные рамки



Металлокерамические корпуса



Нагревательные элементы



Контактные устройства



Графитовая оснастка



Оптоэлектронные корпуса

