

# МОЩНЫЕ СВЧ LDMOS-ТРАНЗИСТОРЫ ОАО «НИИЭТ» ДЛЯ СРЕДСТВ РАДИОСВЯЗИ И РАДИОЛОКАЦИИ

**ВЛАДИМИР КОЖЕВНИКОВ**, начальник отдела, к.т.н.; **ВЛАДИМИР ДИКАРЕВ**, зам. начальника отдела;  
**ВЛАДИМИР ГОРОХОВ**, ведущий специалист, к.т.н.; **АНДРЕЙ ЦОЦОРИН**, начальник лаборатории к.ф.-м.н., ОАО «НИИЭТ»

*В статье представлены конструктивно-технологические особенности и основные технические характеристики нескольких отечественных линеек мощных СВЧ LDMOS кремниевых транзисторов, созданных в ОАО «НИИЭТ». Транзисторы предназначены для работы в радиопередающей аппаратуре в P- и L-диапазонах частот и обеспечивают уровень выходной мощности 10...300 и 10...400 Вт в непрерывном и импульсном режимах.*

Дискретные мощные ВЧ- и СВЧ-транзисторы, пришедшие на смену громоздким и недолговечным электровакуумным лампам в аппаратуре различных средств радиосвязи, являются важной составляющей рынка активных электронных компонентов. Они применяются в усилительных трактах связных и телевизионных радиопередатчиков, авиационной бортовой и наземной электронике, импульсных передатчиках радиолокационных систем, средствах РЭБ, радарх различного назначения, дальномерной аппаратуре и системах предотвращения столкновения самолетов TCAS.

При изготовлении кремниевых мощных ВЧ- и СВЧ-транзисторов используются различные технологии. Основные из них:

- биполярная;
- DMOS (Double-diffused Metal Oxide Semiconductor), т.е. МОП-технология с двойной диффузией. Ее разновидностью является также технология VDMOS (Vertical Diffusion Metal Oxide Semiconductor) с использованием вертикальной МОП-структуры;
- LDMOS (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor) технология или кремниевая МОП-технология с боковой диффузией.

При разработках и в производстве мощных СВЧ-транзисторов используются все три базовые технологии. Однако в настоящее время на первое место в силу своих преимуществ выходит LDMOS-технология. Возможность реализации более высоких по сравнению с биполярными транзисторами входных сопротивлений делает полевые транзисторы более универсальными при работе в широкой полосе частот и упрощает схемотехнические задачи

сложения динамической мощности при построении многокаскадных усилителей. Транзисторы, изготовленные по LDMOS-технологии, имеют наилучшие характеристики по таким параметрам как коэффициент усиления по мощности  $K_{up}$  (15...30 дБ в зависимости от диапазона рабочих частот), коэффициент полезного действия  $\eta_c$ , электрическая и тепловая стабильность, устойчивость к рассогласованию нагрузки, высокая линейность, уровень максимально допустимой рассеиваемой мощности и надежность [1,2].

Свое реальное развитие LDMOS-технология получила в 90-х гг. прошлого века, когда возможности транзисторов, изготовленных по биполярной, DMOS- и VDMOS-технологиям были исчерпаны [2,3]. При этом первые промышленные образцы были созданы фирмами Motorola (в настоящее время M/A-COM) и Ericsson. В настоящее время СВЧ LDMOS-транзисторы разрабатывают и выпускают более 20 зарубежных фирм и компаний. Среди них наилучших результатов достигли NXP Semiconductors, Freescale Semiconductor, Microsemi, Integra, ST Microelectronics и некоторые другие. В отечественной промышлен-

ности разработкой и производством СВЧ-транзисторов по LDMOS-технологии занимаются ОАО «НПП «Пульсар» и ОАО «НИИЭТ».

## ОСОБЕННОСТИ И ПРЕИМУЩЕСТВА МОЩНЫХ LDMOS СВЧ- ТРАНЗИСТОРОВ

Как уже отмечалось, мощные ВЧ и СВЧ LDMOS-транзисторы имеют ряд преимуществ по сравнению с биполярными и DMOS полевыми транзисторами. Для проведения более детального анализа можно обратиться к результатам работы [4], в которой представлены отечественные DMOS-транзисторы P-диапазона частот, а также работы [3], где приводятся сведения о типовых конструкциях LDMOS-транзисторов. Основными являются конструкции с использованием заземленного экрана и заземленной металлизированной области.

Пример современной типовой конструкции (поперечное сечение) ячейки мощного СВЧ LDMOS транзисторного кристалла приведен на рисунке 1. К числу особенностей мощных СВЧ кремниевых транзисторов, изготовленных по LDMOS-технологии, можно отнести следующие.

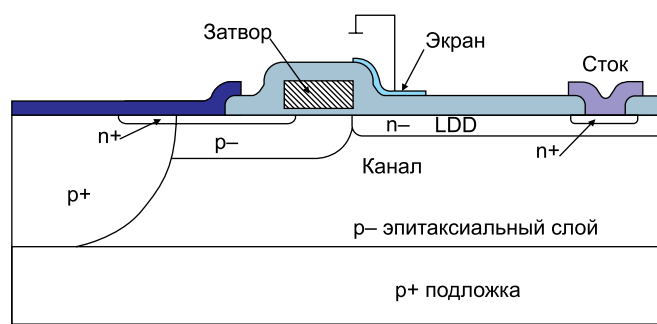


Рис. 1. Схема конструктивного варианта СВЧ LDMOS транзисторной ячейки с заземленным экраном

Таблица 1. Удельные выходные мощности транзисторов, изготовленных по разным технологиям

Напряжение питания, В	Удельная выходная мощность на единицу ширины канала (периметр эмиттера), Вт/мм		Удельная выходная мощность на единицу выходной емкости, Вт/пФ		
	DMOS-транзисторы	LDMOS-транзисторы	Биполярные транзисторы	DMOS-транзисторы	LDMOS-транзисторы
28	0,5	0,6	1,0	0,8	2,0
50	0,5	0,8			
		1,0 (импульсные)	2,5 (импульсные)		

1. Областью истока транзисторного кристалла является подложка. Это позволяет реализовать минимальные значения индуктивности источкового вывода, вследствие чего значительно увеличиваются значения коэффициента усиления по мощности  $K_{ур}$ .
2. В конструкции транзисторного кристалла реализована минимальная площадь перекрытия областей стока и затвора, в результате чего в несколько раз снижается величина проходной емкости  $C_{12и}$ . Кроме того, в транзисторах последних поколений (пятого, шестого и выше) предусмотрены дополнительные защитные экраны (shielding) для еще более существенного снижения  $C_{12и}$ . Все это в итоге также приводит к увеличению коэффициента усиления по мощности.
3. При монтаже кристалла LDMOS-транзистора в корпус вывод истока напрямую соединяется с фланцем корпуса. Это исключает применение в составе корпуса керамики из окиси бериллия (BeO) и приводит к существенному снижению теплового сопротивления переход-корпус и, как следствие, к повышению максимально допустимой рассеиваемой мощности.
4. Пробивное напряжение сток-исток определяется топологической протяженностью низколегированной п-области стока (LDD – область) и концентрационным профилем легирующей примеси в ней.
5. В транзисторах последних поколений имеется встроенная защита от статического электричества.
6. При прочих равных условиях LDMOS-транзисторы по сравнению с DMOS-приборами имеют существенно более низкие значения межэлектродных емкостей (в частности, выходной емкости  $C_{22и}$ ). В таблице 1 приведены удельные выходные мощности транзисторов, изготовленных по разным технологиям, на единицу ширины канала и на единицу выходной емкости. Конструктивно-технологические особенности LDMOS-транзисторов позволяют в несколько раз увеличить коэффициент усиления по мощности

по сравнению с DMOS- и биполярными транзисторами и расширить диапазон рабочих частот до 4 ГГц.

### КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ БАЗИС ИЗГОТОВЛЕНИЯ LDMOS-ТРАНЗИСТОРОВ



Рис. 2. Транзистор 2П9805С ( $P_{вых} = 150$  Вт,  $f = 860$  МГц,  $U_{си} = 32$  В)

Конструктивно-технологический базис изготовления ВЧ- и СВЧ LDMOS мощных транзисторов начал создаваться в ОАО «НИИЭТ» в конце 90-х – начале 2000-х гг. Первые промышленные образцы транзисторов данного класса серии 2П980 были выпущены в 2006 г. (см. рис. 2).

На этом этапе технология формирования LDMOS-транзисторных структур предполагала наличие одного уровня металлизации [5] (см. рис. 3), а минимальный топологический размер (по поликремниевому затвору) составлял 1,6–1,8 мкм.

Особенностью данной транзисторной структуры является то, что область истока с рабочей поверхности через глубокий р+ карман выведена на обратную сторону кристалла. В случае с транзисторами, применяемыми в схемах с общим истоком, это сделало возможным напавание кристалла непосредственно на фланец корпуса, что позволило [6, 7]:

- обеспечить наилучшие условия для отвода тепла;

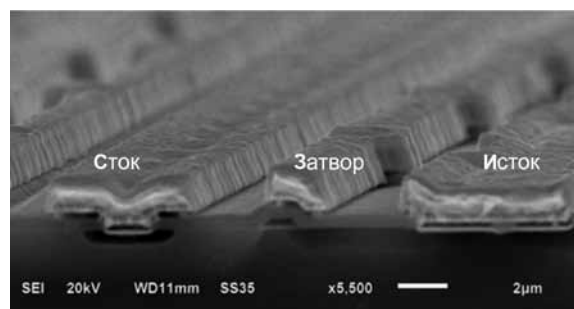


Рис. 3. Микрофотография поперечного сечения кристалла транзистора 2П9805С

- максимально снизить тепловое сопротивление переход корпус ( $R_{тп-к}$ ) и существенно расширить область безопасной работы транзисторов;
- исключить применение в конструкции корпуса держателей из бериллиевой керамики.

Кроме того, как уже отмечалось ранее, за счет вывода истока на обратную сторону кристалла удалось на порядок снизить величину входной индуктивности и, как следствие, значительно поднять значения коэффициента усиления по мощности  $K_{ур}$  (по сравнению с биполярными и DMOS-транзисторами). В LDMOS-транзисторах первого и второго поколений с одноуровневой металлизацией не удалось обеспечить существенного выигрыша по такому характеристическому параметру как удельная выходная мощность на единицу выходной емкости – по сравнению с DMOS-транзисторами он не превысил 20%.

Следующий качественный скачок в части улучшения технических характеристик мощных СВЧ LDMOS-транзисторов произошел благодаря совершенствованию методов их проектирования и освоению в отечественной электронной отрасли двух новых базовых технологических процессов с минимальными топологическими размерами (по поликремнию) 0,6–0,8 мкм и 0,3–0,4 мкм.

При использовании новых базовых технологических процессов удалось решить задачу снижения проходной емкости затвор-сток ( $C_{12и}$ ), что привело к дальнейшему росту коэффициента усиления по мощности транзисторов. Для достижения этой цели в рамках технологического процесса с проектными нормами 0,3–0,4 мкм были спроектированы и реализованы универсальные LDMOS-транзисторные ячейки с многоуровневой металлизацией, в которых между поликремниевым затвором и металлической шиной стока технологически встроены заземленные экраны [8, 9]. Вариант использования такого экрана приведен на рисунке 4. Применение экрана позволяет существенно снизить



Рис. 4. Микрофотография поперечного сечения LDMOS транзисторного кристалла с двумя уровнями металлов и заземленным экраном

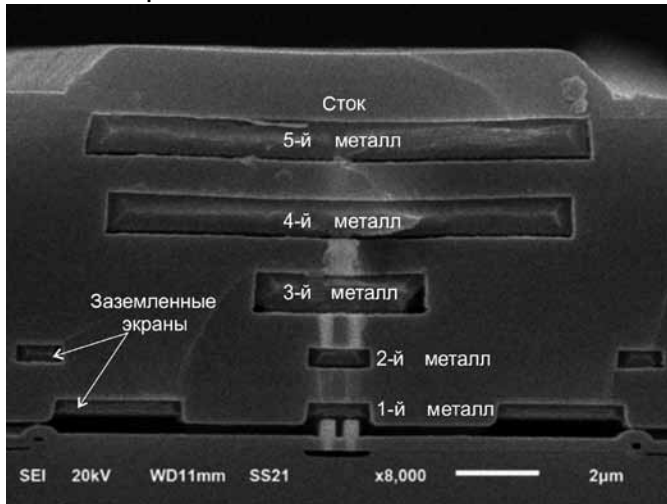


Рис. 5. Микрофотография поперечного сечения LDMOS-транзисторного кристалла с пятью уровнями металлов

удельную проходную емкость (емкость, отнесенную к единице ширины затвора).

Дальнейшего снижения удельной проходной емкости можно достичь, применяя дополнительный экран между токоведущими шинами второго и последующих слоев металлизации и поликремниевым затвором (с л. рис. 5). В зависимости от конкретной транзисторной структуры общая удельная проходная емкость снижается примерно в 8–10 раз.

Выбор конструкции системы экранов является важной составляющей оптимизации LDMOS транзисторной структуры, поскольку одновременно со снижением проходной емкости могут несколько возрасти значения входной и выходной емкостей, что повлияет на ширину диапазона рабочих частот [10].

Одновременно проводились и другие работы по совершенствованию конструкции транзисторного кристалла, в частности, по оптимизации физикотопологических параметров области стока. Это касалось длины низколегированной области стока LDD (см. рис. 1), а также концентрации и профиля распределения легирующей примеси в ней для обеспечения высоких пробивных напряжений (до 120–130 В) при минимальном сопротивлении сток-исток в открытом состоянии.

#### ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИСТОРОВ

Описанные конструктивные и технологические решения были использованы

при разработке и оптимизации элементарных транзисторных ячеек и топологии кристаллов LDMOS-транзисторов для работы при напряжениях питания 28 В и 50 В [11–13]. На их основе в ОАО «НИИЭТ» были созданы пять серий мощных СВЧ LDMOS-транзисторов. Транзисторы серий 2П980, 2П988 относятся к транзисторам второго поколения. Их основные эксплуатационные и электрофизические параметры представлены в таблице 2.

В данной таблице помимо эксплуатационных параметров ( $P_{\text{ВЫХ}}$ ,  $K_{\text{УР}}$ ,  $\eta_c$ ) представлены и такие важные параметры как  $R_{\text{СИ ОТК}}$  – сопротивление сток-исток в открытом состоянии,  $C_{12И}$  – проходная емкость затвор-сток и  $R_{\text{Т П-К}}$  – тепловое сопротивление переход-корпус, определяющее область безопасной работы. Транзисторы серий 2П980 и 2П998 предназначены для работы в радиопередающих устройствах различных средств радиосвязи, в РЛС, бортовых и стационарных радиостанциях.

Следующие три линейки мощных СВЧ LDMOS-транзисторов серий 2П9103, 2П9110, 2П9111 относятся

к транзисторам шестого поколения, в которых минимальные топологические размеры (по поликремниевому затвору) составляют 0,3–0,4 мкм. В их конструкции предусмотрено наличие заземленных экранов и защита от статического электричества.

Транзисторы серии 2П9103, включающей 5 типоминиалов, с уровнем выходной мощности 10...300 Вт на частотах до 1000 МГц относятся к классу линейных транзисторов и обеспечивают низкий уровень интермодуляционных искажений. Их основные параметры приведены в таблице 3.

Транзисторы серии 2П9103 предназначены для применения в аппаратуре радиосвязи с высокими требованиями по линейности, в т.ч. в аппаратуре РЭБ, передающих станциях эфирного телевидения, линейных усилителях мощности. Коэффициент интермодуляционных искажений третьего порядка ( $M_3$ ) для данных транзисторов не превышает уровня –25 дБ.

Транзисторы серии 2П9111 с высокими значениями  $K_{\text{УР}}$  и КПД (более 65%) и напряжением питания 28 В применяются в высокоэффективных усилительных трактах радиопередающей аппаратуры, в первую очередь, в бортовых и стационарных радиостанциях общего и специального назначения.

Импульсные СВЧ LDMOS-транзисторы L-диапазона частот серии 2П9110 обеспечивают выходную мощность 10...450 Вт на частоте 1550 МГц при напряжении питания 50 В и следующих параметрах импульса: длительность ( $\tau_{\text{И}}$ ) – до 3,5 мс, скважность (Q) – 10. Основные параметры транзисторов этой серии приведены в таблице 4.

Транзисторы серии 2П9110 предназначены для работы в диапазоне «Авионика» (1030...1550 МГц) и используются в системах управления воздушным движением (радиолокации, навигации, опознавания), системах связи, посадки и предупреждения столкновения самолетов (TCAS, TACAN, DME и т.д.), радаров и средствах вторичной радиолокации. В таблице 5 показан внешний вид корпусов, которые были использованы для сборки транзисторов всех вышеперечисленных серий.

Таблица 2. Основные параметры транзисторов серий 2П980 и 2П998

Тип транзистора	$P_{\text{ВЫХ}}$ Вт	$K_{\text{УР}}$ дБ	$\eta_c$ %	$R_{\text{СИ ОТК}}$ Ом	$C_{12И}$ пФ	$R_{\text{Т П-К}}$ °С/Вт	Тип корпуса
Режим измерения: $f = 860$ МГц, $U_{\text{СИ}} = 28$ В (2П980А), $U_{\text{СИ}} = 32$ В (2П980БС)							
2П980А	6,5	11	40	2,5	3,5	10	КТ-55С-1
2П980БС	100	10	45	0,4	8,0	0,8	КТ-103А-1
Режим измерения: $f = 500$ МГц, $U_{\text{СИ}} = 28$ В							
2П998А	35	15	50	0,6	4,0	2,9	КТ-55С-1
2П998БС	150	15	60	0,37	8	0,8	КТ-103А-1

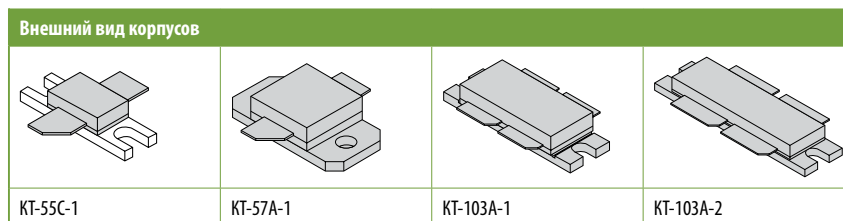
Таблица 3. Основные параметры транзисторов серий 2П9103 и 2П9111

Тип транзистора	$P_{\text{выл}}, \text{Вт}$	$K_{\text{ур}}, \text{дБ}$	$\eta_{\text{с}}, \%$	$R_{\text{си отк}}, \text{Ом}$	$C_{12\text{м}}, \text{пФ}$	$R_{\text{т-кр}}, \text{°C/Вт}$	Тип корпуса
Режим измерения: $f_1 = 860 \text{ МГц}$ , $f_2 = 860,1 \text{ МГц}$ , $U_{\text{си}} = 32 \text{ В}$							
2П9103А	10	16	40	0,95	0,33	6,0	КТ-55С-1
2П9103Б	45	16	40	0,27	1,20	2,0	КТ-55С-1
2П9103В	75	16	40	0,18	1,70	0,95	КТ-55С-1
2П9103ГС	150	16	40	0,16	1,75	0,60	КТ-103А-1
2П9103ДС	300	16	40	0,12	3,50	0,33	КТ-103А-2
Режим измерения: $f = 500 \text{ МГц}$ , $U_{\text{си}} = 28 \text{ В}$ , $t_{\text{к}} = 40^\circ\text{C}$							
2П9111А	80	17	65	0,22	1,5	2,0	КТ-55С-1
2П9111БС	150	16	65	0,19	1,6	0,7	КТ-103А-1
2П9111ВС	250	15	65	0,13	2,5	0,45	КТ-103А-2

Таблица 4. Основные параметры транзисторов серии 2П9110

Тип транзистора	$P_{\text{выл}}, \text{Вт}$	$K_{\text{ур}}, \text{дБ}$	$\eta_{\text{с}}, \%$	$R_{\text{си отк}}, \text{Ом}$	$C_{12\text{м}}, \text{пФ}$	$R_{\text{т-кр}}, \text{°C/Вт}$	Тип корпуса
Режим измерения: $f = 1550 \text{ МГц}$ , $U_{\text{си}} = 50 \text{ В}$ , $\tau_{\text{и}} = 3,5 \text{ мс}$ , $Q = 10$							
2П9110А	10	12	40	1,8	0,1	7,5	КТ-55С-1
2П9110Б	35	12	40	1,0	0,2	2,2	КТ-55С-1
2П9110В	50	12	40	0,61	0,35	0,153	КТ-55С-1
2П9110Г	100	12	40	0,28	0,6	0,76	КТ-57А-1
2П9110Д	200	12	40	0,18	0,9	0,39	КТ-57А-1
2П9110ЕС	370	12	40	0,18	1,2	0,21	КТ-103А-1
2П9110ЖС	450	12	40	0,17	1,2	0,19	КТ-103А-2

Таблица 5. Внешний вид корпусов мощных СВЧ LDMOS-транзисторов



Как уже отмечалось, во всех этих корпусах отсутствует бериллиевая керамика, а вывод истока транзисторного кристалла выведен непосредственно на металлический фланец. Транзисторы в корпусах типа КТ-55С-1, КТ-57А-1 используются в однотактных схемах. Более мощные транзисторы, такие как 2П980БС, 2П9103ГС, 2П9103ДС, 2П9110ЕС, 2П9111БС и другие, выполненные в корпусах КТ-103А-1, КТ-103А-2, относятся к числу так называемых балансных транзисторов (это означает наличие в одном корпусе двух транзисторов). При двухтактном включении балансного транзистора потенциал средней точки равен нулю, что соответствует условию виртуальной земли. Это позволяет исключить влияние внешней индуктивности истокового вывода и повысить входной и выходной импедансы транзистора, что упрощает конструкцию усилительного каскада и повышает его коэффициент усиления по мощности в более широкой полосе рабочих частот.

В заключение следует отметить, что в настоящее время с целью предо-

ставления более полной технической информации о параметрах разработанных мощных СВЧ LDMOS-транзисторов проводится работа по определению их импедансных характеристик и S параметров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шаропин Ю. СВЧ-транзисторы компании Advanced Power Technology для авионики и радаров//Компоненты и технологии № 1, 2006.
2. Бачурин В., Васильев А., Крымко М., Сопов О. Динамика развития отечественных мощных кремниевых полевых ВЧ- и СВЧ МОП-транзисторов//Электронная техника, серия 2 «Полупроводниковые приборы», выпуск 2 (221), 2011.
3. Фармикуон Г. и др. Технология мощных СВЧ LDMOS- транзисторов для радарных передатчиков L-диапазона и авиационных применений//Компоненты и технологии № 10, 2007.
4. Асесоров В., Кожевников В., Дикарев В., Цоцорин А. Мощные ВЧ- и СВЧ полевые транзисторы для аппаратуры средств радиосвязи//Компоненты и технологии № 5, 2006.

5. Цоцорин А., Дикарев В., Кожевников В., Ткачев А. Свидетельство № 2012630053 о государственной регистрации топологии 10-Вт СВЧ LDMOS транзисторной структуры L-диапазона с напряжением питания 12,5 В, 2012.

6. Ткачев А., Петров Б., Асесоров В., Кожевников В., Дикарев В., Цоцорин А. Разработка конструкции и оптимизация параметров периферийных участков стоковых областей мощных СВЧ LDMOS-транзисторов//Труды XVI международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2010.

7. Ткачев А., Петров Б., Асесоров В., Кожевников В., Дикарев В., Цоцорин А. Особенности моделирования перспективных конструкций СВЧ LDMOS-транзисторов//Материалы международного научно-методического семинара «Флуктуационные и деградационные процессы в полупроводниковых приборах», Москва, 2009.

8. Tkachev A., Petrov B., Asessorov V., Kozhevnikov V., Dikarev V., Tsotsorin A. Simulation of the electrical characteristics of LDMOS transistor structures with the field electrode//Материалы работы XIV международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», т. 2, Воронеж, 2008.

9. Ткачев А., Цоцорин А., Дикарев В., Кожевников В. Свидетельство № 2012630060 о государственной регистрации топологии 30-Вт СВЧ LDMOS транзисторной структуры L-диапазона с двухуровневой системой металлизации и напряжением питания 50 В, 2012.

10. Ткачев А., Цоцорин А., Дикарев В., Кожевников В. Свидетельство № 2013630151 о государственной регистрации топологии 30-Вт сверхвысокочастотной LDMOS транзисторной структуры L-диапазона с двухуровневой системой металлизации и напряжением питания 50 В, 2013.

11. Ткачев А., Цоцорин А., Дикарев В., Кожевников В. Свидетельство № 2013630152 о государственной регистрации топологии 50-Вт сверхвысокочастотной LDMOS транзисторной структуры L-диапазона с четырехуровневой системой металлизации и напряжением питания 50 В, 2013.

12. Ткачев А., Цоцорин А., Дикарев В., Кожевников В. Свидетельство № 2013630154 о государственной регистрации топологии 125-Вт сверхвысокочастотной LDMOS транзисторной структуры L-диапазона с четырехуровневой системой металлизации и напряжением питания 50 В, 2013.

13. Ткачев А., Цоцорин А., Дикарев В., Кожевников В. Свидетельство № 2013630155 о государственной регистрации топологии 13-Вт сверхвысокочастотной LDMOS транзисторной структуры L-диапазона с четырехуровневой системой металлизации и напряжением питания 50 В, 2013.