

Мощные ВЧ и СВЧ полевые транзисторы для аппаратуры средств радиосвязи

Валерий АСЕССОРОВ,
д. т. н.
Владимир КОЖЕВНИКОВ,
к. т. н.
Владимир ДИКАРЕВ
Андрей ЦОЦОРИН,
к. ф.-м. н.
niiet@vmail.ru

В данной статье речь идет о новых мощных ВЧ и СВЧ полевых (DMOS) генераторных транзисторах, разработанных и освоенных на Воронежском ФГУП «НИИ электронной техники».

Мощные кремниевые ВЧ и СВЧ транзисторы в дискретном конструктивном исполнении по-прежнему остаются основными и незаменимыми активными элементами передающих устройств различных средств телекоммуникаций [1]. В настоящее время наиболее динамично развивается разработка и применение мощных полевых транзисторов. 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. В сравнении с мощными кремниевыми биполярными транзисторами в полевых транзисторах практически отсутствует механизм тепловой и электрической неустойчивости. Эти свойства полевых транзисторов делают их привлекательными при построении генераторных усилителей мощности. Отсутствие тепловой неустойчивости у мощных полевых

транзисторов дает им существенный выигрыш: оптимизированные для работы, например, на частотах диапазонов МВ и ДМВ (100–200 и 400–500 МГц), они могут устойчиво работать на более низких частотах КВ-диапазона (вплоть до 1 МГц). Для аналогичных биполярных транзисторов это достаточно проблематично, так как со снижением частотного диапазона режим работы приближается к статическому, где явление тепловой неустойчивости проявляется наиболее резко, и повышается склонность к автогенерации. В этом случае, как известно, для обеспечения надежной работы биполярного транзистора специально предусматриваются конструктивные меры и вводятся параметрические ограничения, сужающие область их применения. Справедливо ради надо отметить, что, несмотря на указанные преимущества полевых транзисторов, первые разработки отечественных СВЧ полевых транзисторов характеризовались низким значением коэффициента усиления по мощности $K_{\text{уп}}$ на уровне 3–5 [2].

Повышение значений $K_{\text{уп}}$ можно достичь за счет уменьшения удельной проходной емкости, значение которой непосредственно влияет на усилительные свойства транзистора [3].

При создании приборов рассматриваемого класса данная задача решалась путем разработки оригинальной конструкции транзисторной ячейки [4]. Фрагмент вертикального среза такой базовой транзисторной ячейки показан на рис. 1. Из приведенного рисунка видно, что транзисторная структура реализуется методом двойной диффузии по так называемой технологии DMOS. В предложенной конструкции полевого транзистора эффект снижения проходной емкости достигается за счет дополнительно встроенной области толстого подзатворного окисла (3) над стоковой областью. При оптимальном соотношении площади подзатворного тонкого (2) и толстого (3) окисла и их толщин удастся существенно увеличить значение коэффициента усиления по мощности транзистора (примерно в 2–2,5 раза) по сравнению с традиционной конструкцией полевого транзистора.

Расчет и оптимизация параметров технологических процессов изготовления кристаллов мощных СВЧ транзисторов проводились с использованием программно-аппаратных средств: ПК на базе процессора AMD Athlon 64 3,0 ГГц с пакетом программ ISE TCAD 10.0, позволяющих создать адекватную модель кремниевой технологии и определить режимы для получения необходимых профилей распределения примесей в структурах. Далее полученные выходные данные моделирования технологического процесса, такие как двумерные профили распределения примесей и параметры технологических слоев стоковых, истоковых и затворных областей кристалла, закладываются в модель транзистора. В результате моделирования технологического процесса создавалась базовая ячейка транзисторного кристалла с оптимальными параметрами. На основе созданной модели

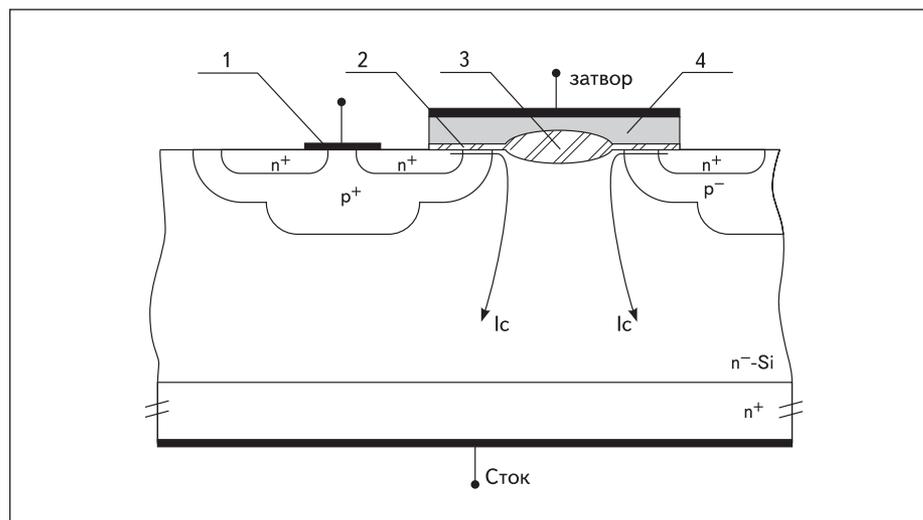


Рис. 1. Поперечное сечение элементарной ячейки структуры вертикального DMOS транзистора.
1 – металл, 2 – подзатворный тонкий окисел, 3 – подзатворный толстый окисел, 4 – поликремний

Таблица 1. Основные эксплуатационные параметры двух серий мощных СВЧ (DMOS) транзисторов

Тип транзистора	Выходная мощность $P_{\text{вых}}$, Вт	Коэффициент усиления по мощности $K_{\text{ур}}$, раз	Напряжение питания $U_{\text{пит}}$, В	Коэффициент полезного действия, %	Тип корпуса	Функциональный аналог (фирма)
Диапазон рабочих частот до 230 МГц						
2П979А	60	25	28	50	КТ-56	D1003UK (Semelab)
2П979Б	150	20	28	50	КТ-56	D1017UK (Semelab)
2П819А	300	10	28	50	КТ-82	D1028UK (Semelab)
2П979В	300	30	50	50	КТ-82	SD2932 (ST Microelectronics)
Диапазон рабочих частот до 500 МГц						
2П978А	5	20	28	50	КТ-83	BLF542 (Philips)
2П978Б	10	20	28	50	КТ-81	BLF543 (Philips)
2П978В	20	15	28	50	КТ-81	D1014UK (Semelab)
2П978Г	40	15	28	50	КТ-81	D1016UK (Semelab)
2П978Д	80	12	28	50	КТ-44	BLF546 (Philips)
2П977А	150	10	28	50	КТ-82	D1020UK (Semelab)

Таблица 2. Предельно- допустимые электрические режимы эксплуатации транзисторов в диапазоне рабочих температур

Наименование параметра, единица измерения	Условное обозначение	Тип транзистора										Примечание
		2П979А	2П979Б	2П819А	2П979В	2П978А	2П978Б	2П978В	2П978Г	2П978Д	2П977А	
Максимально допустимое постоянное напряжение затвор-исток, В	$U_{\text{зи макс}}$	±20		±40	±20							
Максимально допустимое постоянное напряжение сток-исток ($U_{\text{зи}} = -10$ В), В	$U_{\text{си макс}}$	65	60	125	65						60	
Верхняя частота рабочего диапазона, МГц	$f_{\text{вд}}$	230				500						
Максимально допустимая температура р-п-перехода, °С	$t_{\text{п макс}}$	200										
Максимально допустимый постоянный ток стока, А	$I_{\text{с макс}}$	11	17,5	35	40	1,5	3	6	12	18	30	
Максимально допустимая средняя рассеиваемая мощность в динамическом режиме, Вт	$P_{\text{ср макс}}$	100	180	350	420	20	40	70	90	130	255	1
Максимально допустимая температура корпуса, °С	$t_{\text{к макс}}$	125										
Минимально допустимая температура окружающей среды, °С	$t_{\text{с мин}}$	-60										

Примечания: 1 — значения $P_{\text{ср макс}}$ приведены для температуры корпуса +60 °С

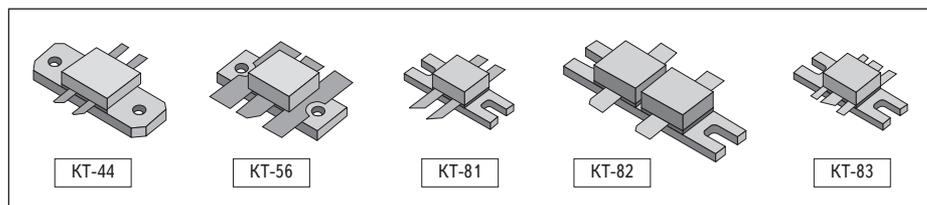


Рис. 2. Внешний вид корпусов

рассчитывались электрофизические характеристики (распределение токов, тепловых полей, напряженностей электрического поля по площади транзисторной структуры), а на их основе — SPICE-параметры разрабатываемых транзисторов [5, 6].

Так, на основе разработанной базовой ячейки полевого транзистора была создана серия современных приборов с выходной мощностью 60, 150 и 300 Вт для применения в диапазоне частот до 230 МГц, а также 5, 10, 20, 40, 80 и 150 Вт — для диапазона частот до 500 МГц. Схематехнические вопросы по созданию тестовых усилителей мощности для разработанных транзисторов решались на основе системы сквозного моделирования и проектирования Microwave Office 2002 фирмы AWR. Основные эксплуатационные

параметры разработанных ВЧ и СВЧ полевых транзисторов приведены в таблице 1. Следует отметить, что уровень регламентированных значений коэффициента усиления по мощности для всего ряда рассматриваемых полевых транзисторов лежит в диапазоне 10–30. В этой же таблице приведены и ближайшие зарубежные функциональные аналоги.

Данные полевые транзисторы предназначены для построения предварительных, промежуточных и оконечных каскадов усиленных трактов в аппаратуре радиосвязи специального назначения. Но они могут быть использованы и как приборы «двойного» назначения. Основная область их применения — бортовые и стационарные радиостанции. Область применения связана

с напряжением источника питания 28 В, используемого в аппаратуре указанного класса, и частотным диапазоном, отведенным для радиосвязи. Надежность транзисторов отвечает требованиям отечественных военных стандартов и обеспечивается уровнем применяемой современной эпитаксиально-планарной технологии, многослойной системой металлизации на основе золота и соответствующим корпусным исполнением приборов. Предельно допустимые электрические режимы эксплуатации транзисторов приведены в таблице 2.

Для наглядности внешний вид примененных стандартных золоченых металлокерамических корпусов показан на рис. 2. В конструкции корпусов использована металлизированная керамика из окиси бериллия. Тип корпуса для каждого конкретного транзистора выбирался из соображений реализации оптимального соотношения мощностных, усилительных и теплофизических свойств прибора. Для каждого заданного уровня выходной (и, соответственно, рассеиваемой) мощности корпус должен быть как можно более миниатюрным и удобным для монтажа на плату или теплоотвод. Транзисторы 2П979А и 2П979В выполнены в корпусе КТ-56. Транзистор 2П978А выполнен в корпусе КТ-83. Данные транзисторы используются в одноконтурных схемах. Наиболее мощные транзисторы, такие как 2П819А, 2П979В, 2П977А, а также 2П978Б, 2П978В, 2П978Г и 2П978Д, являются балансными, что означает наличие двух кристаллов транзистора с соединенными истоковыми областями в одном корпусе. Последние выполнены, соответственно, в корпусах типа КТ-82, КТ-81 и КТ-44. 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.

Как видно из табличных данных, параметры разработанных мощных СВЧ полевых транзисторов отвечают самым высоким требованиям, предъявляемым к современной элементной базе приборов рассматриваемого класса, и соответствуют высокому техническому уровню. Обладая невысокой ценой (примерно на 25–30% ниже по сравнению с аналогичными зарубежными), эти транзисторы способны конкурировать на внутреннем и внешнем рынках. В ходе выполнения разработки отдельные типы опытных образцов полевых транзисторов прошли успешные испытания в составе аппаратуры ряда заинтересованных потребителей. Разработанные транзисторы выпускаются на Воронежском ФГУП «НИИЭТ».

Литература

1. Ассессоров В. В., Кожевников В. А., Дикарев В. И., Ассессоров А. В. Мощные СВЧ транзисторы для связной радиоаппаратуры // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 1999. № 2.
2. Перельман Б. Л. Новые транзисторы. Ч. 3. М.: 1996.
3. Ассессоров В. В., Кожевников В. А., Дикарев В. И. и др. Исследование зависимости коэффициента усиления по мощности в МОП СВЧ транзисторах от емкости обратной связи // *Межвузовский сборник научных трудов «Твердотельная электроника и микроэлектроника»*. Воронеж. 2003.
4. Ассессоров В. В., Кожевников В. А., Дикарев В. И. и др. Исследование и разработка высокоэффективных структур МДП-транзисторов для генераторных усилителей мощности в диапазоне до 500 МГц. // *Труды восьмой Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники»*. Ч. 2. Дивноморское. 2002.
5. Кожевников В. А., Григорьев Р. Г., Быкадорова Г. В. Программный комплекс для моделирования структуры истоковых и канальных областей мощных полевых СВЧ транзисторов // *Труды восьмой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники»*. Ч. 2. Дивноморское. 2002.
6. Ассессоров В. В., Петров Б. К., Кожевников В. А., Дикарев В. И. и др. Моделирование процесса легирования истоковых и канальных областей мощных СВЧ МОП транзисторов // *Труды девятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники»*. Ч. 2. Дивноморское. 2004.