

МОЩНЫЕ СВЧ LDMOS ИМПУЛЬСНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ И РАДАРНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

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

В статье представлены основные эксплуатационные и электрические параметры мощных СВЧ LDMOS кремниевых транзисторов разработки ОАО «НИИЭТ», предназначенных для работы в импульсных режимах в диапазонах частот до 500 МГц (серия 2П9120) и 1030...1090 МГц (серии 2П9115 и 2П9116). В этой группе транзисторов следует особо отметить 2П9120ВС с рекордными для отечественной электронной отрасли выходными характеристиками: $P_{\text{вых}} = 1200$ Вт на частоте 500 МГц при $K_{\text{ур}}$ более 16 дБ. Описаны также некоторые особенности поведения транзисторов в импульсном режиме.

Мощные ВЧ- и СВЧ-транзисторы на основе кремниевой LDMOS-технологии являются, пожалуй, наиболее востребованными по сравнению с другими транзисторами этого класса среди разработчиков приемопередающей аппаратуры. Основные преимущества СВЧ LDMOS-транзисторов по сравнению с биполярными, DMOS- и VDMOS-приборами описаны в [1]. Конечно, на мировом и отечественном рынках представлены еще и перспективные, не уступающие LDMOS-транзисторам, GaN СВЧ мощные транзисторы, однако их доля в общей номенклатуре изделий рассматриваемого направления пока невелика.

Как уже отмечалось, в данной статье речь пойдет о новых отечествен-

ных мощных СВЧ LDMOS-транзисторах, работающих в импульсном режиме в Р- и L-диапазонах частот. Транзисторы Р-диапазона – 2П9120АС, 2П9120БС и 2П9120ВС обеспечивают выходную импульсную мощность 500...1200 Вт на частоте до 500 МГц при напряжении питания 50 В и КПД свыше 45%. Транзисторы L-диапазона серий 2П9115, 2П9116 имеют значения выходной мощности от 30 Вт (2П9116А) до 500 Вт (2П9115АС) в диапазоне частот 1030...1090 МГц при напряжении питания 50 В и разных параметрах импульсов, которые указаны в спецификации на конкретные транзисторы. Все транзисторы собраны в надежных металлокерамических корпусах без использования бериллиевой керамики

(вывод истока транзисторов выведен на фланец корпуса).

Основными областями применения представленных транзисторов являются радиолокационные станции гражданского и специального назначения, радиопередающая бортовая и наземная аппаратура систем радиосвязи, средства опознавания, системы управления воздушным движением и инструментальной посадки самолетов.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРОВ СЕРИЙ 2П9115, 2П9116 (1030...1090 МГц)

К числу основных эксплуатационных (выходных) параметров мощных ВЧ- и СВЧ-транзисторов относятся, как

Таблица 1. Значения параметров транзисторов серий 2П9115, 2П9116

Тип транзистора	$P_{\text{вых ил}}$, Вт	$K_{\text{ур}}$, дБ		η_c , %	$R_{\text{сш отк}}$, Ом	$C_{11и}$, пФ	$C_{12и}$, пФ	$C_{22и}$, пФ	$R_{\text{тп к ил}}$, °С/Вт	S , А/В
		норма ТУ	типичное значение							
Режим измерения $P_{\text{вых ил}}$, $K_{\text{ур}}$, η_c : $f = 1090$ МГц, $U_{\text{си}} = 50$ В, $\tau_{и} = 13$ мс, $Q = 3$										
2П9115АС	500	13	18	40	0,18	420	1,1	1250	0,2	7,0
Режим измерения $P_{\text{вых ил}}$, $K_{\text{ур}}$, η_c : $f = 1030 \dots 1090$ МГц, $U_{\text{си}} = 50$ В, $\tau_{и} = 320$ мкс, $Q = 50$										
2П9116А	30	12	21	40	0,9	30	0,2	16,5	1,2	1,3
2П9116Б	110	12	18	40	0,29	200	0,6	610	0,33	3,9
2П9116В	300	12	18	40	0,19	425	2,6	1500	0,15	6,8

* Для параметров $R_{\text{сш отк}}$, $C_{11и}$, $C_{12и}$, $C_{22и}$, $R_{\text{тп к ил}}$, S указаны типовые значения.

Таблица 2. Значения параметров транзисторов серии 2П9120

Тип транзистора	$P_{\text{вых ил}}$ Вт	$K_{\text{ур}}$ дБ		η_c , %	$R_{\text{си отк}}$ Ом	$C_{11\text{и}}$ пФ	$C_{12\text{и}}$ пФ	$C_{22\text{и}}$ пФ	$R_{\text{т п к ил}}$ °С/Вт	S , А/В
		норма ТУ	типичное значение							
Режим измерения $P_{\text{вых ил}}$, $K_{\text{ур}}$, η_c : $f = 500$ МГц, $U_{\text{си}} = 50$ В										
2П9120АС	500	21	21	45	0,25	262	2,6	170	0,20	4,7
2П9120БС	1000	18	19	45	0,17	492	6	296	0,10	6,9
2П9120ВС	1200	16	18	45	0,14	486	6	295	0,08	9,9

* Для параметров $R_{\text{си отк}}$, $C_{11\text{и}}$, $C_{12\text{и}}$, $C_{22\text{и}}$, $R_{\text{т п к ил}}$, S указаны типовые значения.

известно, выходная импульсная мощность $P_{\text{вых ил}}$, коэффициент усиления по мощности $K_{\text{ур}}$ и коэффициент полезного действия стока η_c . К числу важнейших электрических и электрофизических параметров транзисторов, которые интересуют разработчиков аппаратуры, относятся сопротивление сток-исток в открытом состоянии $R_{\text{си отк}}$, тепловое сопротивление переход-корпус $R_{\text{т п к ил}}$, максимально допустимая мощность рассеивания в импульсном режиме $P_{\text{и макс}}$, входная, проходная и выходная емкости ($C_{11\text{и}}$, $C_{12\text{и}}$, $C_{22\text{и}}$), крутизна характеристики S , а также значения максимально допустимого напряжения сток-исток $U_{\text{си макс}}$ и максимально допустимый импульсный ток стока $I_{\text{си макс}}$. Большая часть перечисленных параметров для транзисторов серий 2П9115, 2П9116 представлена в таблице 1.

Транзистор 2П9115АС, также как и транзисторы 2П9120АС, 2П9120БС, 2П9120ВС (их параметры будут представлены ниже), относится к числу так называемых балансных или push-pull-транзисторов и представляет собой сборку из двух приборов, выполненных в одном корпусе с общим истоком. Для таких транзисторов значения параметров $R_{\text{си отк}}$, $C_{11\text{и}}$, $C_{12\text{и}}$, $C_{22\text{и}}$, S приведены для каждой половины балансного транзистора.

Значение максимально допустимого постоянного напряжения сток-исток для всех перечисленных транзисторов составляет 100 В (при $t = 25^\circ\text{C}$). Следует отметить, что транзистор 2П9115АС относится к категории длинноимпульсных транзисторов – параметры импульса для него составляют: длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 13$ мс, скважность $Q = 3$, т.е. тепловой режим его работы в классе АВ близок к непрерывному. Аналогичный состав параметров для транзисторов серии 2П9120 представлен в таблице 2.

Значения длительности импульсов $\tau_{\text{и}}$ для транзисторов серии 2П9120 различны и составляют 25 мс для группы А; 5 мс для группы Б и 2 мс для группы В, соответственно. Скважность Q для всех трех типов (групп) транзисторов равна 10.

Большинство мощных транзисторов представленных серий, работающих

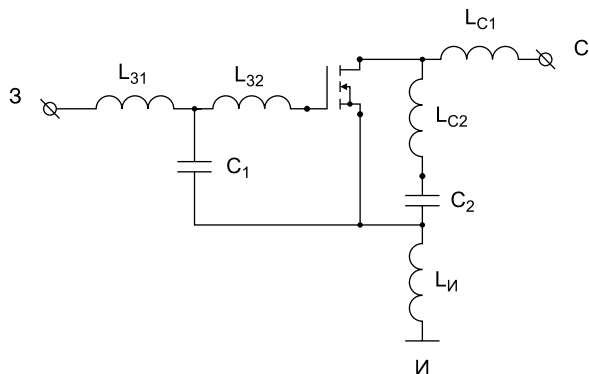


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема транзисторов 2П9116Б, 2П9116В

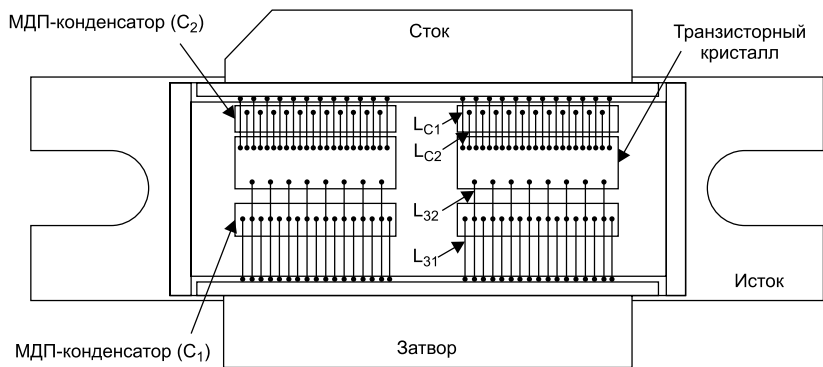


Рис. 2. Схема размещения и разварки транзисторных кристаллов прибора 2П9116В

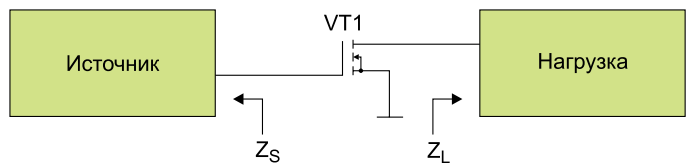


Рис. 3. Схема определения импеданса источника Z_s и нагрузки Z_L для транзистора VT1

в L диапазоне частот, имеют встроенные входные и выходные согласующие цепи (исключение составляют транзисторы малой и средней мощности, например, 2П9116А). Использование встроенных цепей согласования позволяет увеличить входные и выходные импедансы транзисторов до значений, приемлемых для разработчиков аппаратуры при осуществлении настройки и согласовании

транзистора в усилительном тракте. В качестве примера на рисунке 1 приведена принципиальная электрическая схема транзисторов 2П9116Б и 2П9116В со встроенными цепями согласования, а в таблице 3 – номиналы элементов в этой цепи.

Конструктивно и технологически реализация входных и выходных согласующих цепей осуществляется

Таблица 3. Номиналы элементов в электрической принципиальной схеме транзисторов 2П9116Б, 2П9116В

Тип транзистора	C_1 , пФ	C_2 , пФ	L_{31} , нГн	L_{32} , нГн	L_{c1} , нГн	L_{c2} , нГн	$L_{и}$, нГн
2П9116Б	115	600	0,2	0,5	0,5	0,9	0,03
2П9116В	230	1200	0,2	0,4	0,5	0,45	0,03

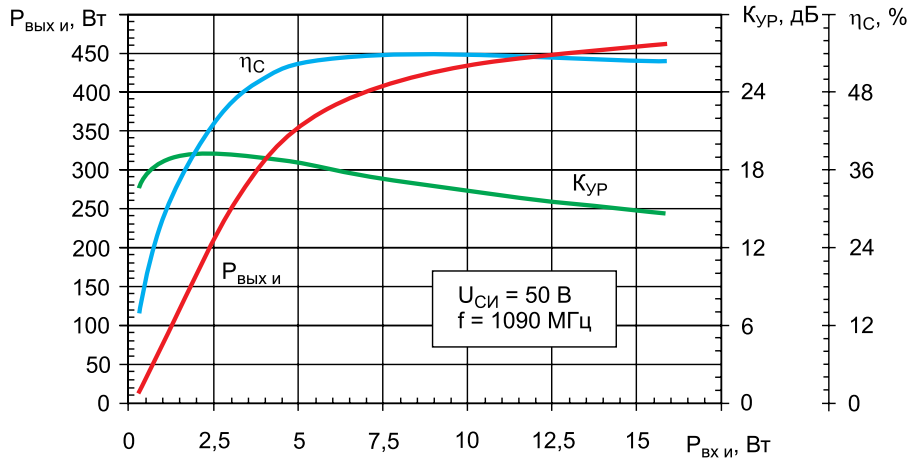


Рис. 4. Типовые зависимости $P_{\text{вых и}}$, $K_{\text{ур}}$ и $\eta_{\text{с}}$ от входной импульсной мощности $P_{\text{вх и}}$ для транзистора 2П9116В на частоте 1090 МГц ($t_k = 25 \pm 10^\circ\text{C}$)

с помощью монтажа соответствующих МДП-конденсаторов (C_1, C_2) в непосредственной близости от транзисторных кристаллов и выбранной последовательности разварки проволочных выводов. Схема размещения

транзисторных кристаллов, МДП-конденсаторов и разварки проволочных выводов для транзистора 2П9116В приведена на рисунке 2.

Для потребителей наиболее полезной информацией являются данные

Таблица 4. Результаты Source и Load Pull теста для транзисторов 2П9116Б

f, МГц	Z_s	Z_L
1030	$2,53 - j5,79$	$4,54 - j3,46$
1090	$3,76 - j5,46$	$3,76 - j3,08$

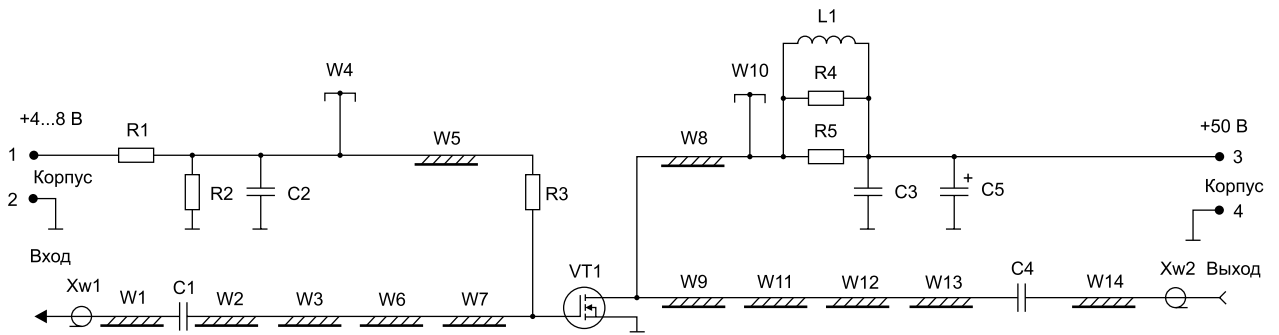


Рис. 5. Электрическая принципиальная схема измерительного усилителя для проверки $P_{\text{вых и}}$, $K_{\text{ур}}$ и $\eta_{\text{с}}$ транзисторов 2П9116В на частоте 1090 МГц (спецификация элементов указана в технических условиях)

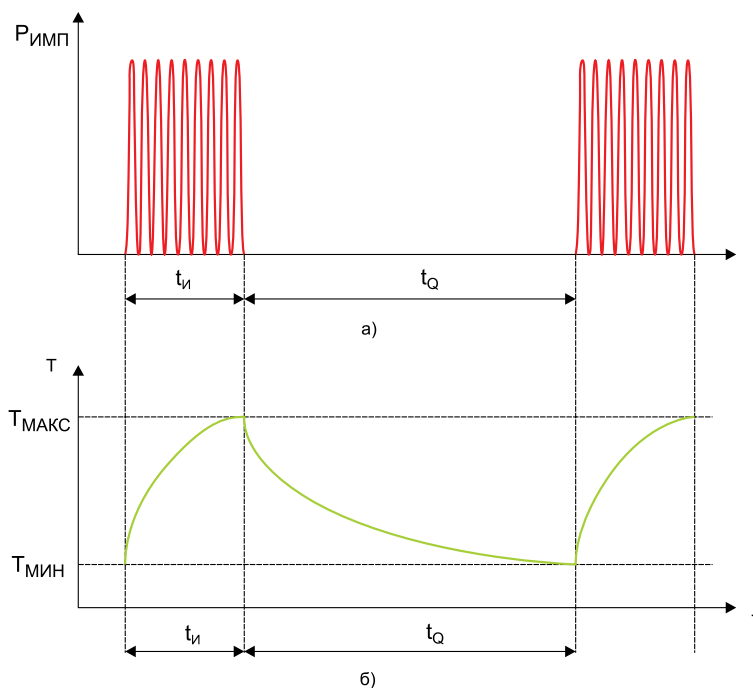


Рис. 6. Импульсно-периодический режим работы СВЧ-транзистора (а) и характер изменения температуры поверхности кристалла (б)

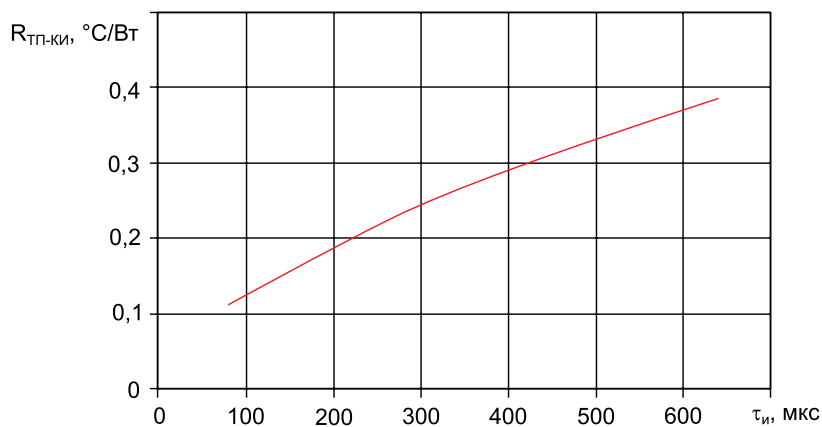


Рис. 7. Типовая зависимость импульсного теплового сопротивления переход-корпус от длительности импульса для транзисторов типа 2П9116Б при $Q = 50$

о фактических значениях импедансов источника Z_S и нагрузки Z_L , полученные для транзистора в реальных условиях при измерении выходных параметров. В качестве примера на рисунке 3 приведена схема, поясняющая определение Z_S и Z_L , а в таблице 4 – результаты Source и Load Pull теста для транзисторов 2П9116Б.

Значения импедансов источника Z_S и нагрузки Z_L вместе с S-параметрами [2] обеспечивают разработчикам приемопередающей радиоаппаратуры достаточную первоначальную информацию для проектирования усилителей мощности и их последующей доработки.

Важную информацию для разработчиков аппаратуры представляют также различные типовые зависимости параметров, которые обычно приводятся в справочных данных на каждый транзистор. К ним относятся типовые зависимости $P_{вых и}$, $K_{ур}$, η_C от входной импульсной мощности, от напряжения сток-исток или от частоты; типовые зависимости $C_{11и}$, $C_{12и}$, $C_{22и}$ от напряжения сток-исток; типовые зависимости максимально допустимой импульсной рассеиваемой мощности от температуры корпуса и другие. В качестве примера на рисунке 4 представлены типовые зависимости выходных параметров $P_{вых и}$, $K_{ур}$ и η_C от $P_{вх и}$ для транзистора 2П9116Б на частоте 1090 МГц. Измерения выходных параметров осуществлялись на специальном тестовом усилителе (см. рис. 5).

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Существует достаточно много опубликованной информации об импульсных усилителях мощности и об особенностях применения в них полевых, в т.ч. ВЧ- и СВЧ-транзисторов. Например, подробный материал представлен в работе [3] под общей редакцией профессора В.П. Дьяконова. В режиме мощных радиоимпульсов про-

исходит циклический процесс разогрева и остывания транзисторного кристалла, а также всего сборочного узла, включающего сами кристаллы, МДП-конденсаторы, проволочные выводы и области непосредственных контактов выводов к кремнию и различным металлам. В конце прохождения импульса температура достигает максимального значения ($T_{МАКС}$), а в паузе между импульсами – минимального ($T_{МИН}$), см. [4]. Для наглядности на рисунке 6 приведена иллюстрация импульсно-периодического режима работы СВЧ-транзистора и показан характер изменения температуры на поверхности кристалла [4].

Разница температур $\Delta T = T_{МАКС} - T_{МИН}$ может достигать 60...120°C. Величина этой разницы зависит от параметров импульсов – длительности и скважности, а также уровня выходной импульсной мощности $P_{вых и}$, отдаваемой транзистором в нагрузку. При увеличении длительности импульсов и уменьшении скважности увеличивается разогрев кристалла, возрастает тепловое сопротивление $R_{тп к и}$ (см. рис. 7) и, как следствие, снижается уровень максимально допустимой импульсной рассеиваемой мощности $P_{и МАКС}$. В результате происходит снижение (ограничение) и величины выходной импульсной мощности $P_{вых и}$.

Разработчикам радиопередающей аппаратуры следует учитывать особенности работы мощных импульсных транзисторов, т.е. при проектировании усилителей мощности необходимо следить за тем, чтобы для каждого режима применения транзистора не превышалась максимально допустимая импульсная рассеиваемая мощность, а рабочая точка не выходила за пределы области безопасной работы (ОБР) – по величине максимально допустимого импульсного тока стока $I_{С И МАКС}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожевников В., Дикарев В., Горохов В.,

Цоцорин А. Мощные СВЧ LDMOS транзисторы ОАО «НИИЭТ» для средств радиосвязи и радиолокации // Электронные компоненты № 4, 2015.

2. Бошнаков И. Разработка СВЧ-усилителей мощности класса А за один цикл проектирования с использованием только S-параметров // Chip News № 1 (94), 2005.

3. Дьяконов В., Максимчук А., Ремнев А., Смердов В. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах – М.: Солон-Р-2002.

4. Гришаков М., Синкевич В. Физика отказов мощных СВЧ-транзисторов при работе в импульсных режимах // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, выпуск 2, 2007.