

Мощные радиочастотные VDMOS-транзисторы фирмы Microsemi и модули на их основе

Владимир ДЬЯКОНОВ,
д. т. н., профессор
vpdyak@yandex.ru

Радиочастотные полевые транзисторы с изолированным затвором класса VDMOS объединяют достоинства полевых транзисторов с вертикальным каналом и приборов DMOS, изготавливаемых методом двойной диффузии. Широкую номенклатуру VDMOS выпускает американская компания Microsemi, с вошедшей в нее фирмой Advanced Power Technology. В статье описаны приборы этих компаний с выходной мощностью от нескольких Вт до 2 кВт на частоте от 10 до 200 МГц и усилители мощности на их основе.

Введение

После освоения в СССР в конце 1970-х годов серийного производства первых в мире мощных полевых транзисторов с горизонтальным каналом КП901–КП904 [1, 2] во многих странах бурное развитие получили мощные полевые транзисторы с V- и U-образной структурой и вертикальным расположением канала. Первыми советскими приборами этого типа были транзисторы КП905, КП907, КП908, КП909, КП913 и др. [3, 5–7]. Их рабочая частота достигала 1–2 ГГц, и на них были отработаны принципы построения радиочастотных усилителей мощности [6, 7].

К сожалению, дно и стенки V-образной канавки, получаемой методом анизотропного травления, имели неидеальную структуру полупроводника, что вело к локализации электрического поля под ней и вызывало снижение максимального рабочего напряжения стока.

В конце 1970-х и особенно в 1980-х годах большое развитие получили приборы с двойной диффузией — DMOS. Они, по сути, являются гибридом полевого транзистора с горизонтальным каналом и транзистора с вертикальной структурой. Приборы класса DMOS имеют три

важных преимущества по сравнению с приборами с V- и U-образной канавками: отсутствие дефектных областей, улучшенное качество затвора и повышенная подвижность носителей в канале. В то же время они характерны большой емкостью структуры и меньшей рабочей частотой. Две серии таких приборов (с выходной мощностью 300 Вт) созданы Воронежским ФГУП и «НИИ электронной техники» [4].

Мощные VDMOS фирмы Microsemi

Мощные полевые транзисторы за рубежом сейчас производит множество фирм, например ST Microelectronics, Microsemi, IXYS, International Rectifiers, Philips и др. Компания Microsemi (www.microsemi.com) выпускает мощные радиочастотные полевые транзисторы VDMOS (Vertical Diffusion Metal Oxide Semiconductor), в которых объединены достоинства приборов с вертикальной структурой и DMOS-транзисторов.

Структура VDMOS-транзистора показана на рис. 1. Как нетрудно заметить, V- или U-образная канавка у прибора отсутствует, что заметно упрощает технологию его изготовления. Линии тока истока сначала от его металлических областей проходят через тонкий канал под поликристаллическим горизонтальным затвором и затем, пере-

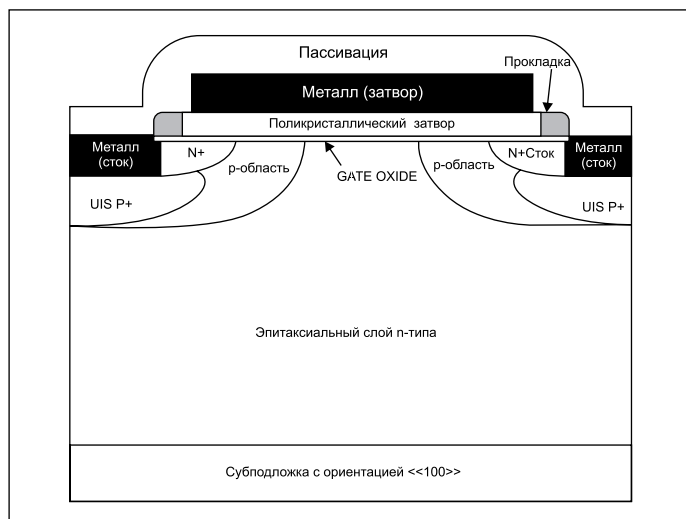


Рис. 1. Структура VDMOS-транзистора фирм Microsemi и Advanced Power Technology

Таблица 1. Основные параметры некоторых типов транзисторов VDMOS фирмы Microsemi

Выходная мощность, Вт	Частота, МГц	Напряжения V_{GS}/V_{DS} , В	Термический импеданс, °C/Вт	Корпус	Тип VDMOS
140	65	250/900	0,55	TO-247	ARF446G C-E
140	65	250/900	0,55	TO-247	ARF447G C-E
140	65	150/450	0,55	TO-247 A	ARF448AG/BG C-E
150	65	125/500	0,5	TO-247	ARF460AG/BG A-E
150	65	250/1 кВ	0,5	TO-247	ARF461AG/BG A-E
150	60	300/1,2 кВ	0,5	TO-247	ARF465AG/BG A-E
300	45	125/500	0,15	T11	ARF300 E
300	45	125/-500	0,15	T11	ARF301 E
300	45	200/1 кВ	0,35	TO-264	ARF466AG/BG A-E
300	45	200/1 кВ	0,13	T3	ARF466FL A-E
400	65	165/500	0,18	T3C	ARF477FL A-E
600	30	50/170	0,13	T2	VRF154FL
750	25	250/1000	0,13	T2	ARF1519 A-E
750	40	125/500	0,12	T1	ARF1500 A-E
750	40	250/1 кВ	0,12	T1	ARF1501 A-E
759	40	300/1,2 кВ	0,12	T1	ARF1505 A-E
750	40	400/1000	0,12	T1	ARF1510 D
750	40	380/500	0,12	T1	ARF1511 D

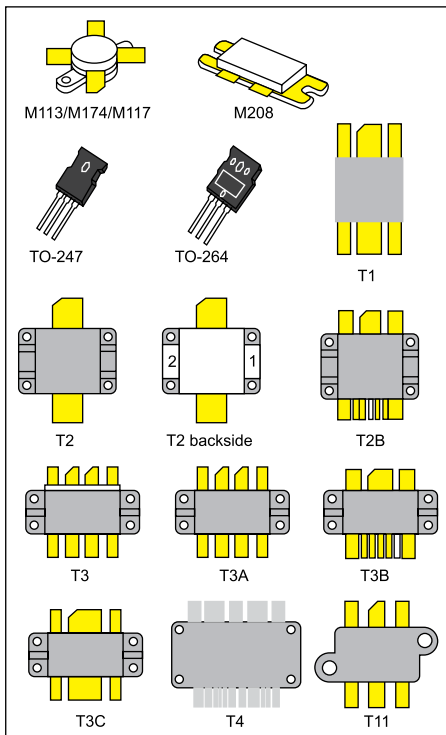


Рис. 2. Корпуса VDMOS мощных полевых транзисторов фирмы Microsemi

ходя в вертикальное положение, собираются стоком в его N-области и низкоомной подложке типа N⁺.

Параметры ряда серийных VDMOS даны в таблице 1. В основном это высоковольтные приборы. По сравнению с приборами LDMOS (ST Microelectronics и Philips [5]) значения рабочей частоты приборов ниже (до 200 МГц), но зато они имеют выдающиеся энергетические показатели — выходную мощность до 750 Вт и максимальное напряжение на стоке 1200 В. Некоторые приборы хорошо приспособлены для применения в усилителях мощности с низковольтным питанием (12–50 В).

Основные типы корпусов мощных VDMOS компании Microsemi представлены на рис. 2. Все корпуса имеют малую высоту, что позволяет размещать их на тонкой печатной плате или теплоотводящей пластине.

Знакомство с VDMOS-транзисторами компании Microsemi начнем с прибора ARF1519. В качестве основных параметров приборов фирма указывает напряжение питания усилителя мощности, выходную мощность и частоту выходного сигнала. У этого прибора они равны 250 В, 750 Вт и 25 МГц. При работе резонансного усилителя в классе С напряжение на стоке достигает значений в 3–4 раза выше напряжения питания. Поэтому максимальное рабочее напряжение у этого транзистора нормируется на уровне 1000 В. Таким образом, ARF1519 — это высоковольтный мощный транзистор с умеренной (для такого класса приборов) максимальной рабочей частотой. В то же время она на порядок выше,

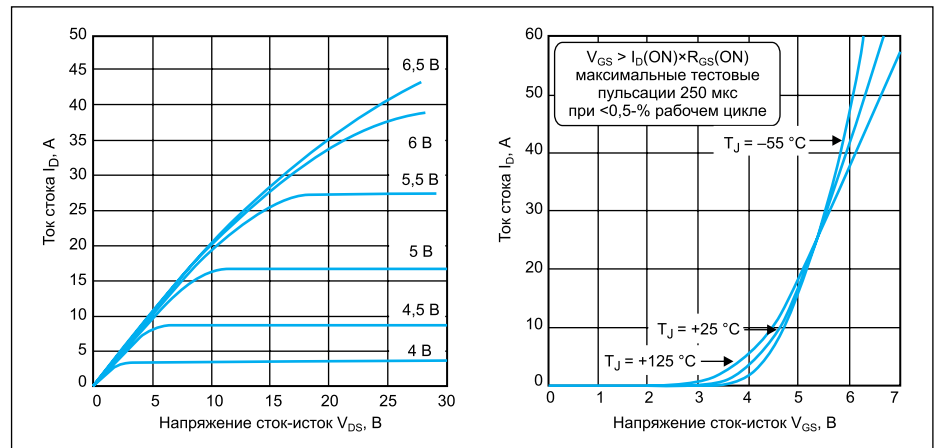


Рис. 3. Выходные и передаточные характеристики мощных полевых транзисторов ARF1519

чем рабочая частота сопоставимого по мощности и напряжению на стоке силового (ключающего) транзистора.

Выходные и передаточные характеристики транзистора ARF1519 показаны на рис. 3. Уровень остаточного напряжения на стоке включенного транзистора высок — до 15–20 В при максимальном рабочем токе. Семейство передаточных характеристик имеет характерную термостабильную точку: в ней кривые пересекаются. Пороговое напряжение транзистора — от 2 до 3 В.

Постоянный ток стока у этого транзистора нормируется на уровне 20 А, а импульсный может превышать 40 А. Естественно, такой сильноточный прибор имеет большую емкость. Зависимость емкости от напряжения «сток-исток» U_{DS} резко нелинейная (рис. 4). Средние значения емкостей: входная — 4600 пФ, выходная — 310 пФ, проходная — 90 пФ. Столь большие значения емкости указывают на то, что импедансы входа и выхода у транзистора очень малы, и поэтому особое значение приобретает согласование импедансов транзистора с импедансами источника входного сигнала и нагрузки (обычно 50 Ом).

Степень нагрева транзистора определяет его термический импеданс R_{th} (°C/Вт). Его зависимость от длительности импульса

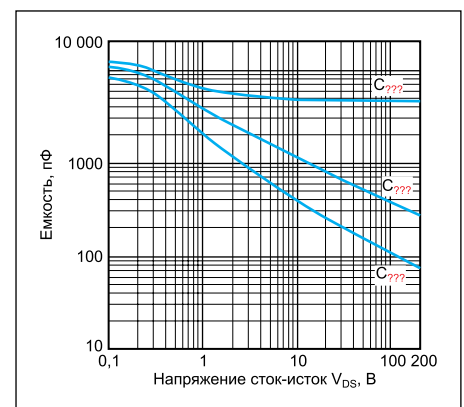


Рис. 4. Зависимости емкости транзистора ARF1519 от напряжения U_{DS}

тока стока представлена на рис. 5 и позволяет оценить степень допустимого увеличения тока стока от длительности импульса тока при заданном периоде повторения сигнала.

Основные квалификационные параметры транзистора оцениваются при его работе в составе тестовых схем усилителей мощности. Такие схемы SPICE-модели транзисторов для их расчета и моделирования компания Microsemi приводит практически для всех своих транзисторов. На рис. 6 представлена тестовая схема для транзистора ARF1519.

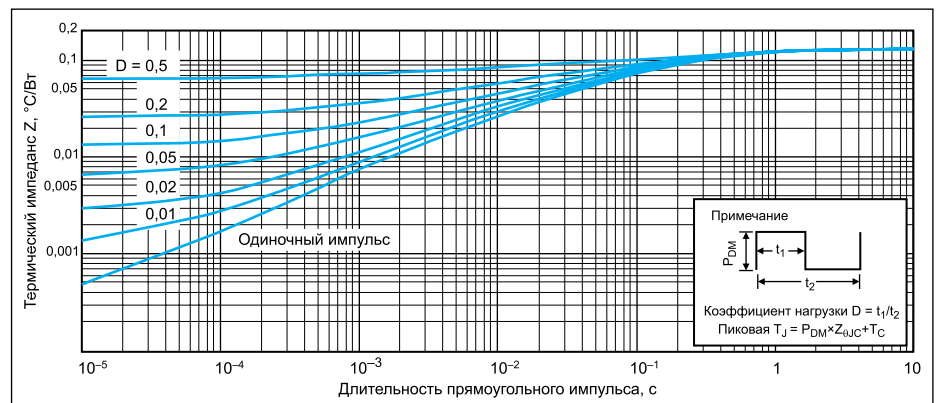


Рис. 5. Зависимости термического импеданса от длительности импульса тока стока у транзистора ARF1519

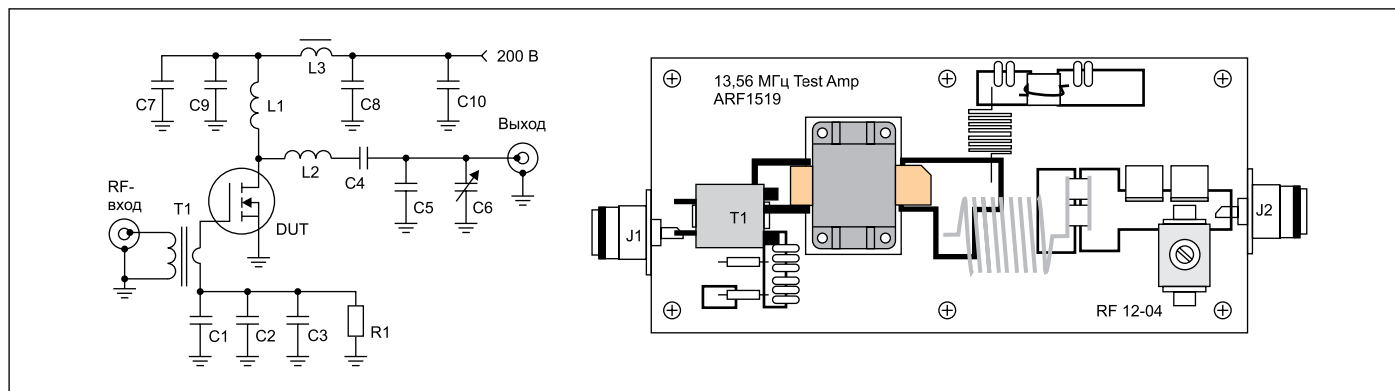


Рис. 6. Тестовая схема для снятия квалификационных параметров мощного полевого транзистора ARF1519 (спецификация элементов дана в оригинале)

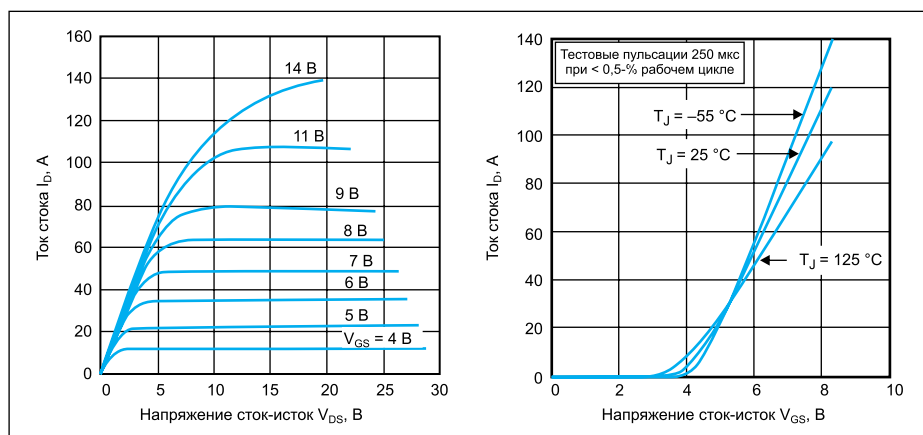


Рис. 7. Выходные и передаточные характеристики транзистора VRG154

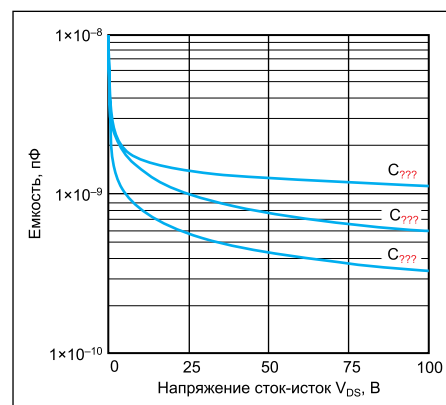


Рис. 8. Зависимости емкостей транзистора VRG154 от напряжения на стоке

Там же приведена спецификация компонентов этой схемы и чертеж варианта монтажа схемы на печатной плате.

Выбор ARF1519 в качестве первого транзистора для ознакомления с продукцией Microsemi не случаен: тестовая схема для него, показанная на рис. 6, — самая простая и наглядная. Это обычный одноконтурный каскад усилителя мощности на транзисторе, включенном с общим истоком. Для согласования выходного сопротивления генератора входного сигнала (50 Ом) с низким входным импедансом полевого транзистора служит обычный ВЧ-трансформатор с большим коэффициентом трансформации (10:1). В стоке транзистора установлен последовательный резонансный контур с емкостной цепью согласования с нагрузкой (тоже 50 Ом). Усилитель работает в классе С и развивает на частоте 13,56 МГц мощность 750 Вт (!). В схеме усилителя нет никакой «экзотики».

Низковольтные силовые VDMOS

Теперь рассмотрим транзистор VRG154, предназначенный для применения в устройствах с малым напряжением питания (от 12 до 50 В). Максимальное напряжение на стоке этого прибора — 170 В, непрерывный ток коллектора — 60 А, а импульсный может

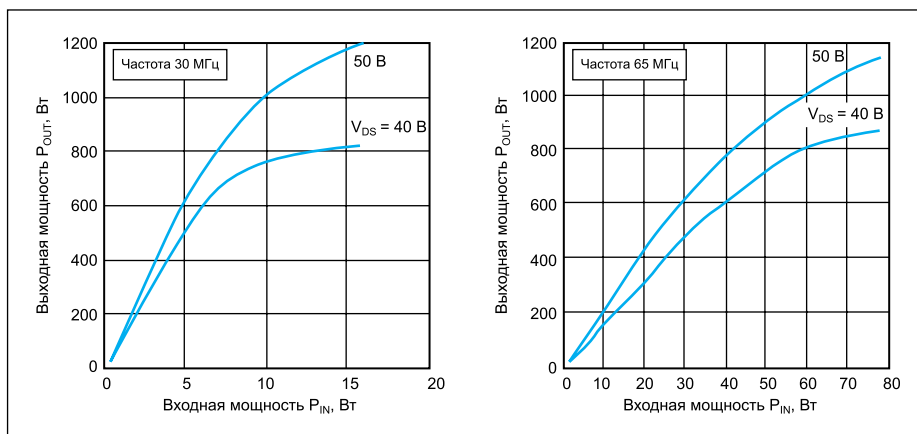


Рис. 9. Зависимости выходной мощности от входной на частоте 30 МГц (левые графики) и 55 МГц (правые графики) для транзистора VRG154

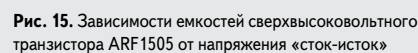
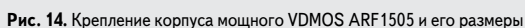
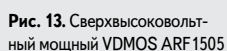
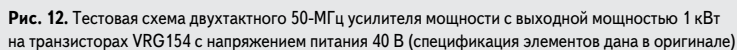
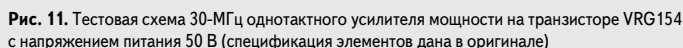
достигать удвоенных значений. При этом прибор способен развивать мощность 600 Вт на частоте 80 МГц при напряжении питания усилителя мощности 50 В и КПД 75%. Максимальная рассеиваемая на стоке мощность у этого прибора 1350 Вт!

Выходные и передаточные характеристики транзистора VRG154 представлены на рис. 7. Выходные характеристики (рис. 7а) демонстрируют малые значения напряжения «сток-исток» при больших (до 60 А) токах стока. Именно это обстоятельство позволяет

применять эти транзисторы в схемах с низковольтным напряжением питания и рекордно большой выходной мощностью.

На рис. 8 показаны графики зависимости емкостей транзистора от напряжения «сток-исток». Этот мощный прибор имеет большую и резко нелинейную зависимость емкости.

Зависимость выходной мощности от входной на частоте 30 и 55 МГц для транзистора VRG154 показана на рис. 9. Видно, что выходная мощность транзистора при этих значениях частоты может превышать 1000 Вт.



В схеме двухтактного усилителя мощности (рис. 12) пара транзисторов VRG154 способна при напряжении питания 40 В отдавать на выходе мощность 1 кВт. Для стабилизации напряжения смещения мощных полевых транзисторов и температурной компенсации используется специальный термочувствительный стабилизатор напряжения смещения на интегральной микросхеме IC1. Согласование импедансов источника входного сигнала и входа усилителя обеспечивается с помощью ВЧ-трансформаторов T1. Для согласования выходного импеданса с импедансом нагрузки применены цепи на отрезках линий передачи их коаксиального кабеля [13].

Графики зависимости емкости от напряжения «сток-исток» у этого прибора нелинейные (рис. 15). При напряжении «сток-исток» 1 В

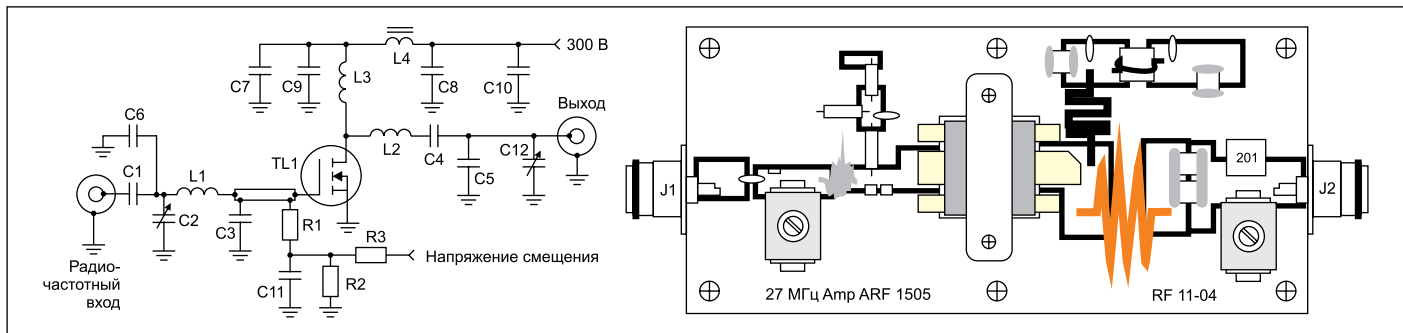


Рис. 17. Тестовая схема 27-МГц усилителя мощности с напряжением питания 300 В на сверхвысоковольтном транзисторе ARF1505 (спецификация элементов дана в оригинале)

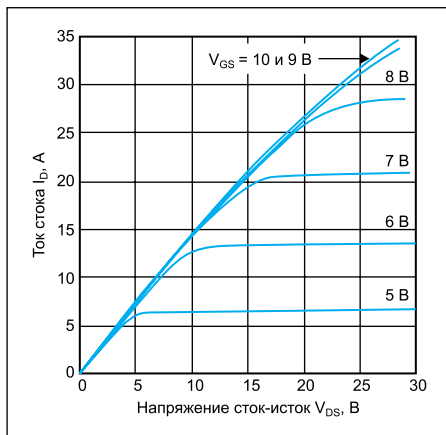


Рис. 16. Выходные ВАХ сверхвысоковольтного транзистора ARF1505

они превышают 10 000 пФ, но с ростом этого напряжения быстро падают. В технических данных на этот транзистор указаны следующие средние значения емкостей:

- входная — 5400 пФ;
- выходная — 400 пФ;
- проходная — 160 пФ.

Выходные ВАХ транзистора ARF1505 показаны на рис. 16. Пороговое напряжение отсечки у этих приборов от 3 до 6 В. Для сверхвысоковольтного прибора видимые на рис. 16 уровни остаточного напряжения малы. Температурный диапазон работы транзистора — от -55 до +175 °С.

Тестовая схема усилителя мощности на частоту 27 МГц с напряжением питания 300 В показана на рис. 17. Схема проста и от простейших схем отличается отрезком линии передачи во входной цепи. На рис. 17 справа показана конструкция этого усилителя на печатной плате. Выходная мощность усилителя — 750 Вт при коэффициенте полезного действия 75% и коэффициенте усиления 17 дБ. Усилитель работает в классе С.

Мощные VDMOS с частотой выходного сигнала более 100 МГц

Представительную, хотя и не очень многочисленную группу VDMOS составляют транзисторы с повышенной (100 МГц и выше)

Таблица 2. Основные параметры некоторых типов высокочастотных VDMOS фирмы Microsemi

Выходная мощность, Вт	Частота, МГц	Напряжения V_{BB}/V_{DS} , В	Термический импеданс, °С/Вт	Корпус	Тип VDMOS
90	120	150/450	0,76	TO-247	ARF449AG/BG C-E
100	100	125/500	0,7	TO-247	ARF463AG/BG A-E
100	100	125/500	0,7	TO-247	ARF463AP1G/BP1G A-E
150	150	165/500	0,6	M174	ARF521 A-E
300	150	165/500	0,35	M208	ARF473 A-E
300	150	165/500	0,31	T3A	ARF475FL A-E
300	150	165/500	0,31	T3C	ARF476FL A-E
150	175	28/80	0,6	M174	VRF141
30	175	50/170	1,52	M113	VRF148A
150	150	50/170	0,6	M174	VRF150
150	175	50/170	0,6	M174	VRF151
150	175	50/170	0,45	M174A	VRF151E
300	175	28/80	0,35	M208	VRF141G
300	175	50/170	0,35	M208	VRF151G
150	175	50/130	0,6	M174	VRF152
150	175	50/130	0,45	M174A	VRF152E

частотой выходного сигнала. Их данные приведены в таблице 2.

Одним из таких приборов является транзистор VRF151 (рис. 18). Свои параметры он реализует при напряжении питания 50 В.

Почти аналогичный транзистор VRF150 имеет мощность выходного сигнала 150 Вт на немного более низкой частоте — 150 МГц. А транзистор VRF141 позволяет получать мощность 150 Вт на частоте 175 МГц при более низком напряжении питания — 28 В. VRF151 имеет рабочее напряжение на стоке до 170 В, ток стока 16 А, рассеиваемую на стоке мощность до 300 Вт и температурный диапазон работы от -65 до +150 °С. Выходные

и передаточные характеристики прибора показаны на рис. 19.

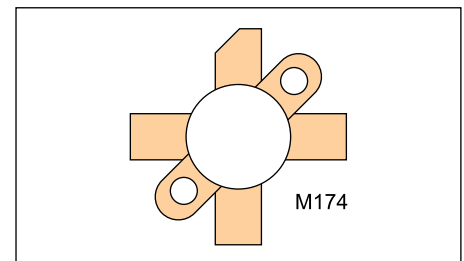


Рис. 18. Мощный 150-Вт 175-МГц VDMOS-транзистор VRF151

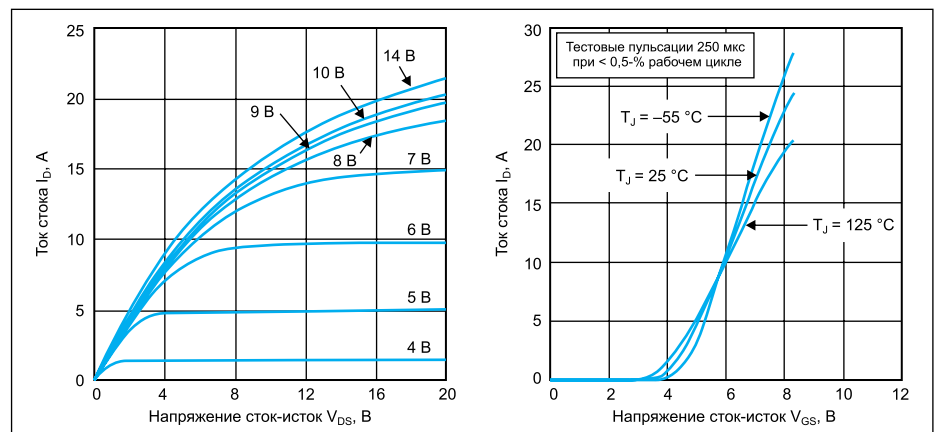


Рис. 19. Выходные и передаточные характеристики транзистора VRF151

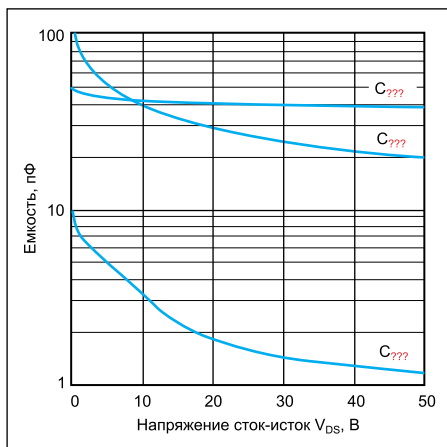


Рис. 20. Зависимости емкости транзистора VRF151 от напряжения «сток-исток»

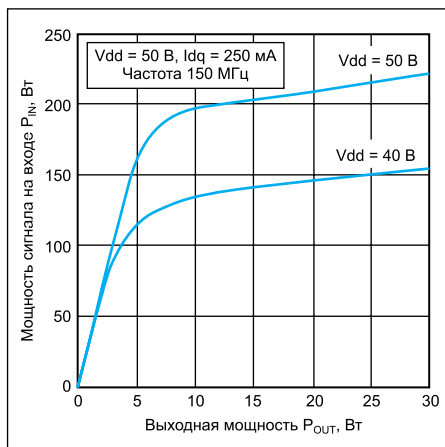


Рис. 21. Зависимости выходной мощности от мощности сигнала на входе для транзистора VRF151

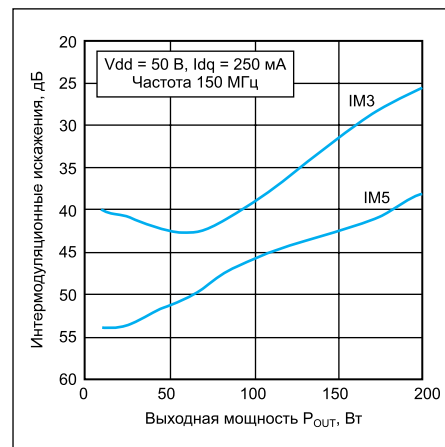


Рис. 22. Зависимости интермодуляционных искажений от мощности выходного сигнала

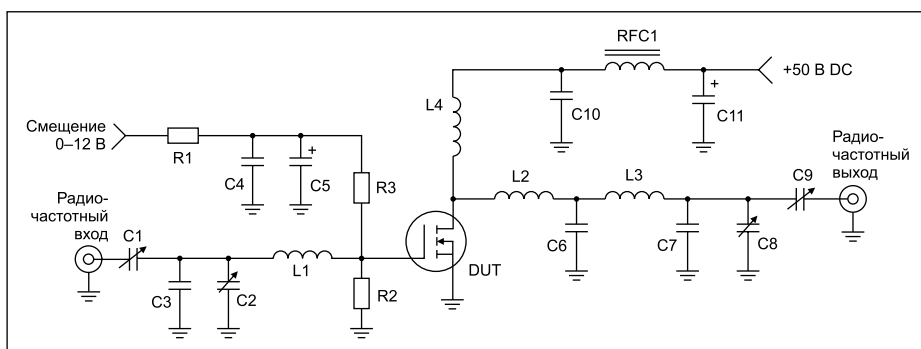


Рис. 23. Тестовая схема усилителя мощности с частотой 175 МГц (спецификация элементов дана в оригинале)

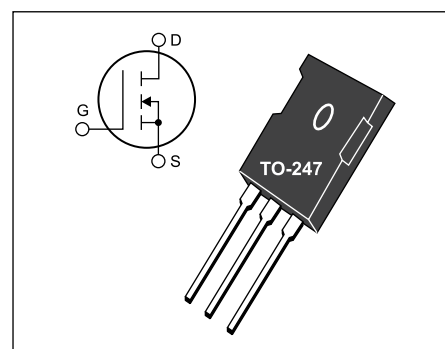


Рис. 24. Мощный 120-Гц 90-Вт транзистор ARF449 в пластмассовом корпусе TO247

Высокочастотные мощные полевые транзисторы имеют на порядок меньшие емкости, чем их менее высокочастотные собратья. Это видно на рис. 20. Средние значения емкостей составляют: входная — 375 пФ, выходная — 200 пФ и проходная — 12 пФ. Эти, вполне умеренные значения емкостей расширяют частотный диапазон работы транзисторов до примерно 200 МГц.

Графики зависимости выходной мощности от мощности входного сигнала показаны

на рис. 21 при двух значениях напряжения питания тестовой схемы — 50 и 40 В. Вид этих графиков типовой, и каких-либо особенностей они не имеют.

Для ВЧ- и СВЧ-транзисторов часто указывают параметры вносимых ими искажений. На рис. 22 представлены кривые интермодуляционных искажений для транзистора VRF151.

Тестовая схема одноконтурного усилителя мощности на частоту 175 МГц показана на рис. 23.

Ряд транзисторов этой группы выпускается в более дешевых пластмассовых корпу-

сах, рассчитанных на меньшую мощность. Например, это транзистор ARF449 (рис. 24).

Он тестируется в схеме на частоте 81,36 МГц. Зависимость мощности выходного сигнала от мощности входного сигнала для усилителя мощности на транзисторе ARF449 показана на рис. 25.

На рис. 26 представлена тестовая схема усилителя мощности на транзисторе ARF449, работающего в классе С. Усилитель обеспечивает мощность выходного сигнала 90 Вт, КПД 75% и коэффициент усиления 13 дБ.

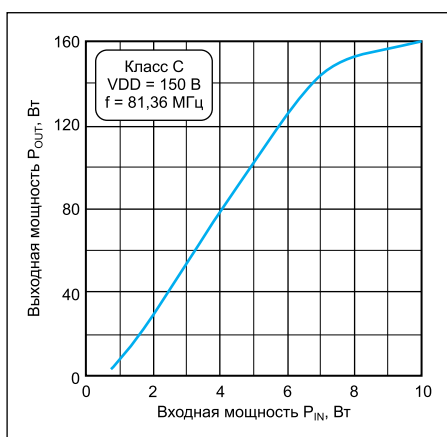


Рис. 25. Зависимость мощности выходного сигнала от мощности входного сигнала для усилителя мощности на транзисторе ARF449

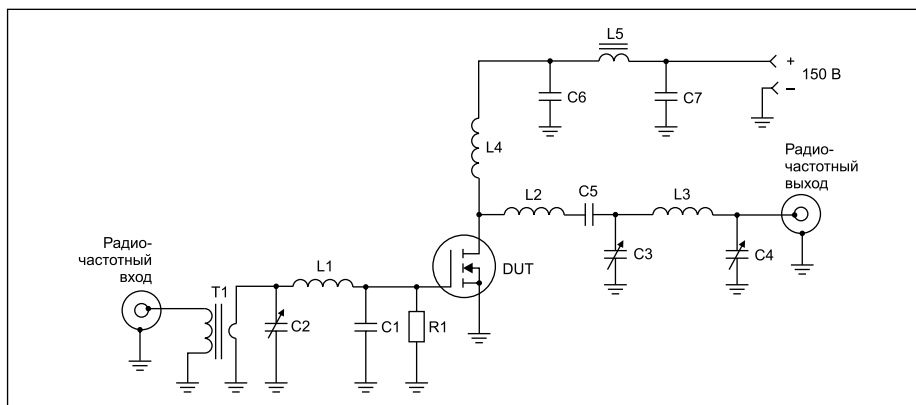


Рис. 26. Тестовая схема усилителя на транзисторе ARF449 с напряжением питания 150 В (спецификация элементов дана в оригинале)

Сдвоенный мощный низковольтный VDMOS VRF141G

Для создания двухтактных СВЧ-усилителей мощности с низковольтным (28 В) питанием служит сдвоенный мощный низковольтный VDMOS VRF141G (рис. 27). Под маркой MRF141G этот прибор выпускает и компания Motorola. Усилители мощности на этих транзисторах обеспечивают мощность 300 Вт на частоте 175 МГц при напряжении питания 28 В.

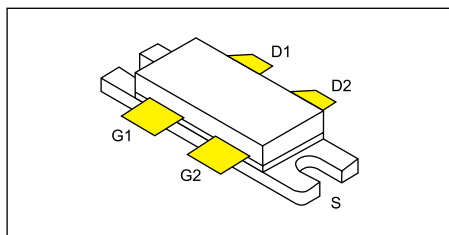


Рис. 27. Сдвоенный мощный радиочастотный полевой транзистор VRF141G (MRF141G)

Выходные ВАХ и передаточные характеристики одного транзистора VRF141G показаны на рис. 28, а зависимость емкостей этих приборов от напряжения «сток-исток» приведена на рис. 29. Это типичные характеристики для мощных низковольтных VDMOS полевых транзисторов.

Типовой является и зависимость емкостей (для одного транзистора) от напряжения «сток-исток».

На рис. 30 представлена тестовая схема двухтактного усилителя мощности на сдвоенном мощном VDMOS VRF141G. Входной фазоинвертор и устройство согласования входного импеданса с импедансом источника входного сигнала выполнены по схеме широкополосного трансформатора на трех отрезках коаксиального кабеля. Выходной трансформатор также построен на трех отрезках коаксиального кабеля. Приняты меры по ослаблению проникновения гармоник выходного сигнала в цепь источника питания с напряжением 28 В. Усилитель обеспечивает КПД в 50% и типовой коэффициент усиления 14 дБ на частоте 175 МГц.

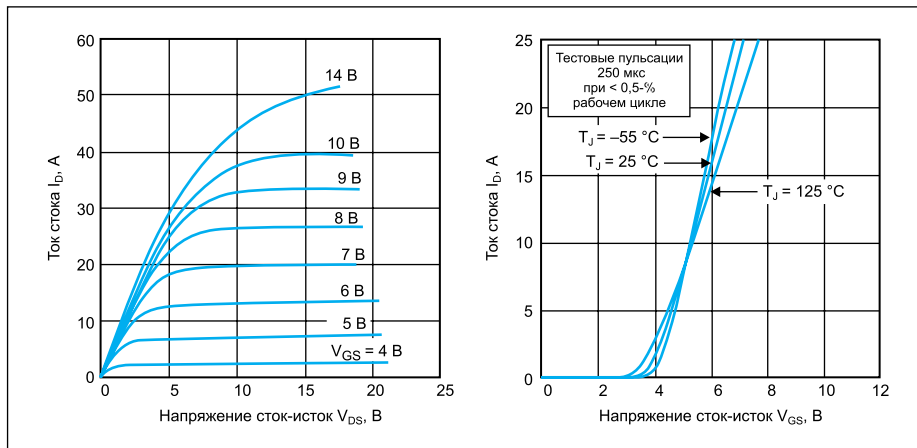


Рис. 28. Выходные ВАХ и передаточные характеристики одного транзистора VRF141G

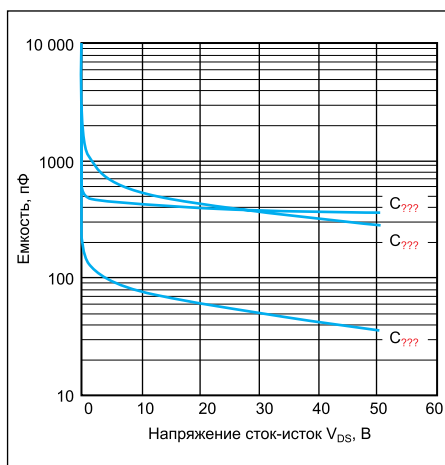


Рис. 29. Зависимости емкостей одного транзистора VRF141G

Мощные высоковольтные сверхскоростные VDMOS со встроенными драйверами

Особенно высокими энергетическими показателями обладают мощные высоковольтные VDMOS со встроенным драйвером управления затвором (табл. 3). По существу, это гибридные микросхемы, содержащие мощные транзисторы с драйверами и ряд бескорпусных компонентов внутри единого корпуса. Применение встроенного драйвера (или двух драйверов в приборах с двумя мощными транзисторами) обеспечивает время переключения мощных приборов в единицы нс, что позволяет использовать их в усилителях класса D (работающих в ключевом режиме) с частотой выше 10 МГц с высоким КПД — до 90%.

Таблица 3. Параметры мощных VDMOS со встроенным драйвером управления затвором

Выходная мощность, Вт	Частота, МГц	Напряжение V_{DS} , В	Ток I_D , А	Термический импеданс, °C/Вт	Корпус	Тип	Класс	N
600	30	1000	13	1	T2B	DRF1200	D, E	1
1060	30	1000	26	0,25	T2B	DRF1201		2
1060	30	500	50	0,25	T2B	DRF1202		2
600	30	1000	12	0,09	T2B	DRF1203		1
1000	30	500	30	0,06	T4	DRF1300		2
1000	30	1000	15	0,06	T4	DRF1301		2
1500	30	500	—	0,06	T4	DRF1400A/B		2

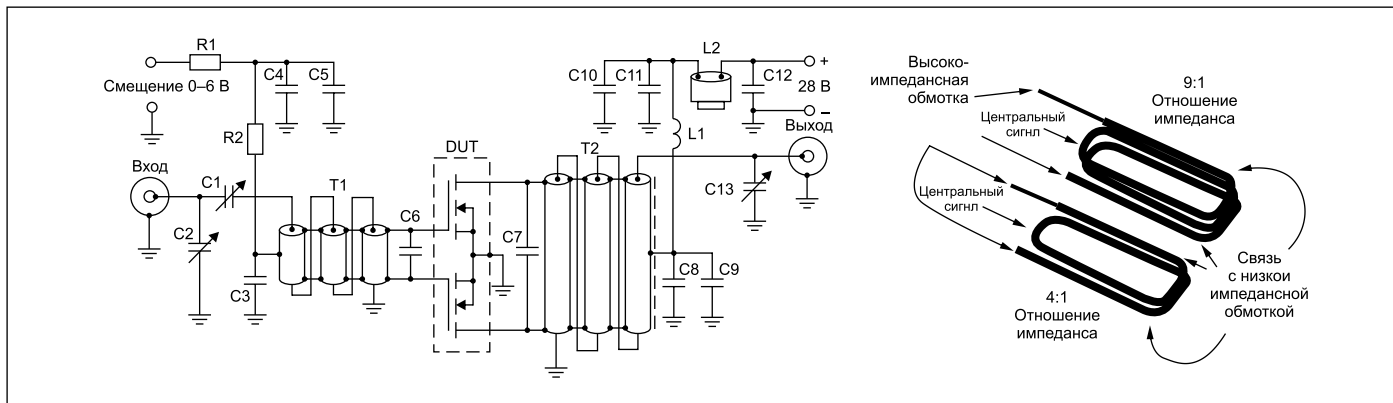


Рис. 30. Тестовая схема двухтактного усилителя мощности на сдвоенном мощном VDMOS VRF141G (спецификация элементов дана в оригинале)

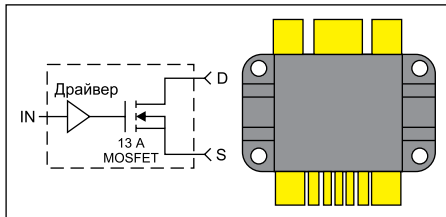


Рис. 31. Мощный высоковольтный VDMOS DRF1200 со встроенным драйвером

На рис. 31 показан одиночный ($N = 1$) мощный высоковольтный транзистор DRF1200 со встроенным драйвером управления затвором. Драйвер требует дополнительного напряжения питания 15–18 В. Входное напряжение драйвера — 3 В. Прибор DRF1201 содержит два параллельно включенных VDMOS, что увеличивает ток стока до 26 А.

Функциональная схема драйвера показана на рис. 32. Драйвер построен на основе скоростного триггера Шмитта и двухтактной схемы быстрого заряда-разряда входной емкости мощного полевого транзистора, куда входят комплементарные полевые транзисторы средней мощности.

На рис. 33 представлена схема, в которой тестируется прибор. По существу, это схема ключа на мощном полевом транзисторе с резистивной нагрузкой RL.

На рис. 34 приведены осциллограммы процессов переключения ключа на транзисторе DRF1200 с драйвером. Напряжение питания ключа — 800 В, сопротивление нагрузки — 51 Ом. Время выключения ключа в 3,4 нс — это очень малое значение для такого мощного ключа. Сопротивление «сток-исток» включенного транзистора — 0,9 Ом. Максимальное напряжение на стоке полевого транзистора — 1000 В, максимальная рассеиваемая транзистором мощность — 360 Вт. Типовые значения емкостей: входная — 2000 пФ, выходная — 165 пФ, проходная — 75 пФ.

Печатная плата тестовой схемы ключа на транзисторе DRF1200 показана на рис. 35. Благодаря тестированию во временной, а не в частотной области, конструкция платы заметно упрощена. Разумеется, прибор мож-

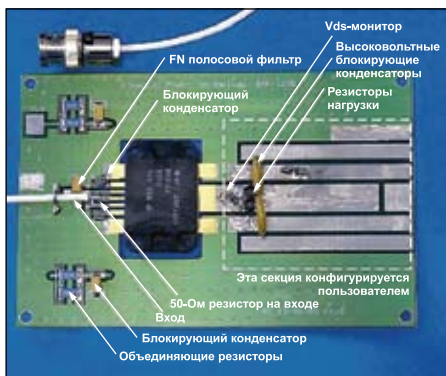


Рис. 35. Печатная плата ключа на транзисторе DRF1200

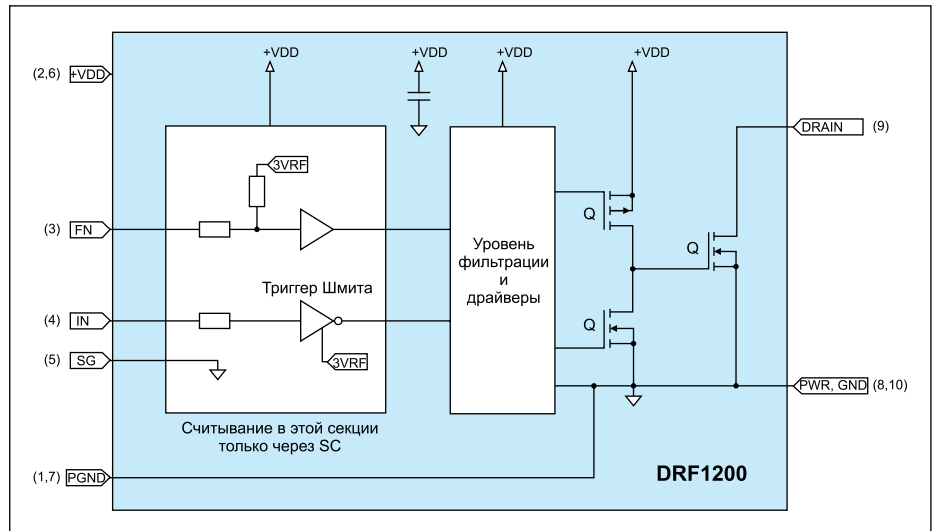


Рис. 32. Функциональная схема прибора DRF1200

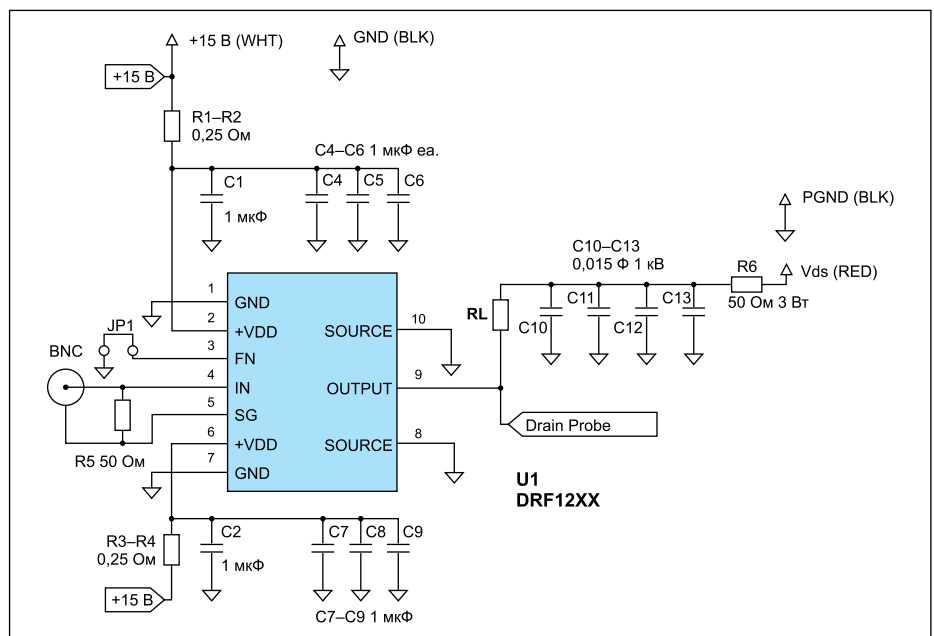


Рис. 33. Схема тестирования прибора DRF1200

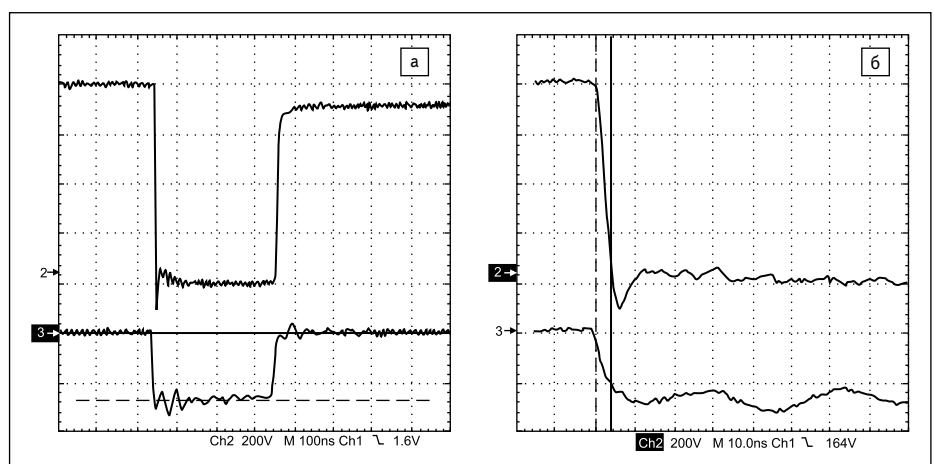


Рис. 34. Осциллограммы процессов переключения VDMOS DRF1200: а) напряжение на стоке и ток стока; б) детально спад напряжения на стоке и изменение тока

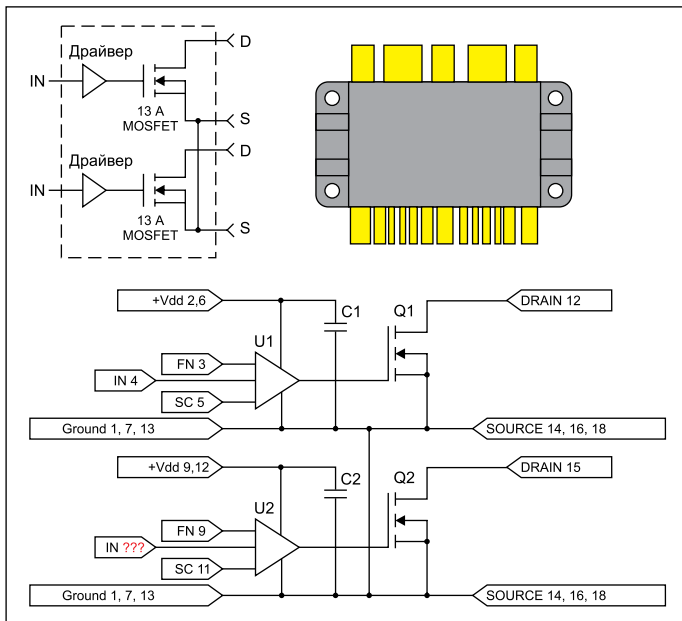


Рис. 36. Сдвоенный мощный высоковольтный VDMOS со встроенными драйверами

но использовать и в частотной области для построения усилителей мощности с частотой до 30 МГц.

Транзистор DRF1200 предназначен для построения усилителей мощности класса E и преобразователей с импульсным регулированием.

Выпускаются также мощные двойные ($N = 2$) высоковольтные VDMOS DRF1301 (рис. 36) для двухтактных устройств. Их применение может упростить построение некоторых устройств мощной усилительной и преобразовательной техники.

Для демонстрации возможностей мощных VDMOS со встроенными драйверами фирма Microsemi выпускает ряд генераторов мощных синусоидальных сигналов с выходной мощностью от 600 до 2500 Вт. Два из них показаны на рис. 37.

Прибор VDMOS DRF1400 содержит полумост из двух высоковольтных транзисторов с драйверами затвора [13]. Он предназначен для построения усилителей, работающих в классе D (в ключевом режиме) (рис. 38). Их транзисторы управляются прямоугольными импульсами с широтно-импульсной модуляцией. Когда верхний транзистор открыт, нижний — закрыт. И наоборот.

На рис. 39 показаны платы, образующие тестовый генератор с усилителем класса D на приборе DRF1400. Усилитель обеспечивает на рабочей частоте 13,56 МГц выходную мощность 1,7 кВт при КПД 87%.

Моделирование устройств на VDMOS в системе MATLAB+Simulink

Сложность расчета и построения мощных высокоскоростных устройств и трудности их экспериментальной отладки делают важным математическое моделирование таких устройств. В последние годы одной из основных систем для такого моделирования является матричная система MATLAB с пакетом блочного имитационного моделирования Simulink [9–11].

В последней реализации этой системы MATLAB+Simulink R2012 а имеются пакеты расширения SimPowerSystem и SimElectronics, библиотеки моделей которых содержат мощные MOSFET и средства их контроля, в том числе расчета температуры внутренней области и рассеиваемой мощности. При этом есть как упрощенные модели, так и SPICE-совместимые. Встроенный пример моделирования характеристики позволяет легко подобрать параметры MOSFET с BAX нужного вида.

Для примера рассмотрим моделирование мощного усилителя звуковой частоты с широтно-импульсным регулятором. Диаграмма мо-

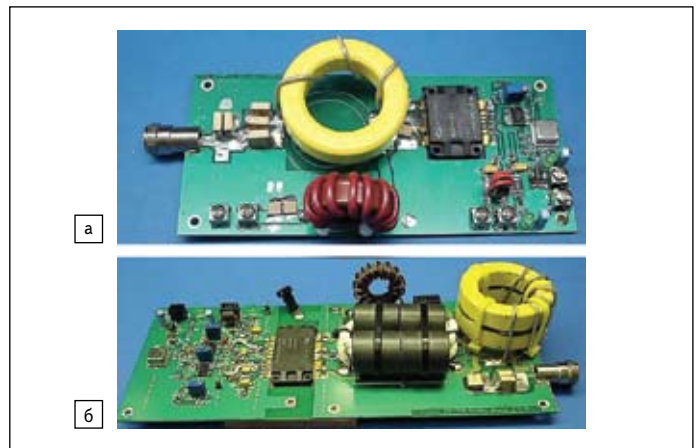


Рис. 37. Генераторы мощных синусоидальных сигналов фирмы Microsemi: а) одноконтный на транзисторе DRF1200 с выходной мощностью 600 Вт на частоте 27,12 МГц в классе E; б) двухтактный на транзисторах DRF1300 с выходной мощностью 2000 Вт на частоте 13,56 МГц в классе D

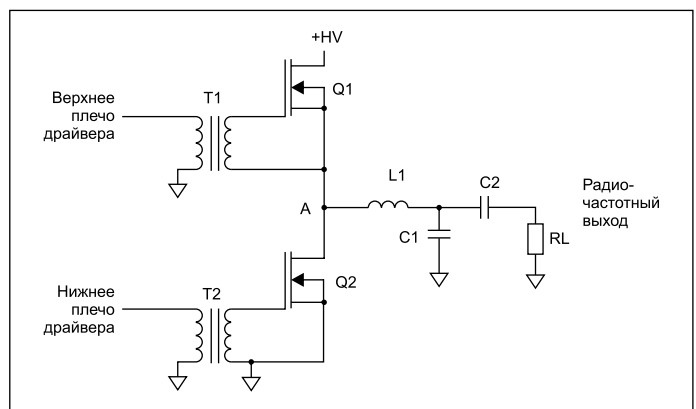


Рис. 38. Упрощенная схема усилителя, работающего в классе D

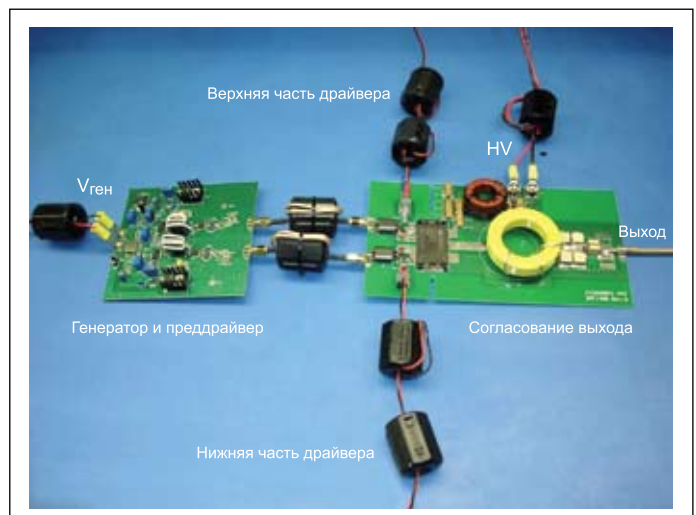


Рис. 39. Набор плат генератора на основе усилителя мощности класса D на приборе DRF1400

дели усилителя представлена на рис. 40. В правой ее части показано окно установки входного сигнала — две синусоиды с частотами 2000 и 2500 Гц и амплитудой 15 В. В диаграмме использован блок Feedback Controller широтно-импульсного регулятора из пакета расширения SimElectronics. Преобразование идет на частоте 1 МГц.

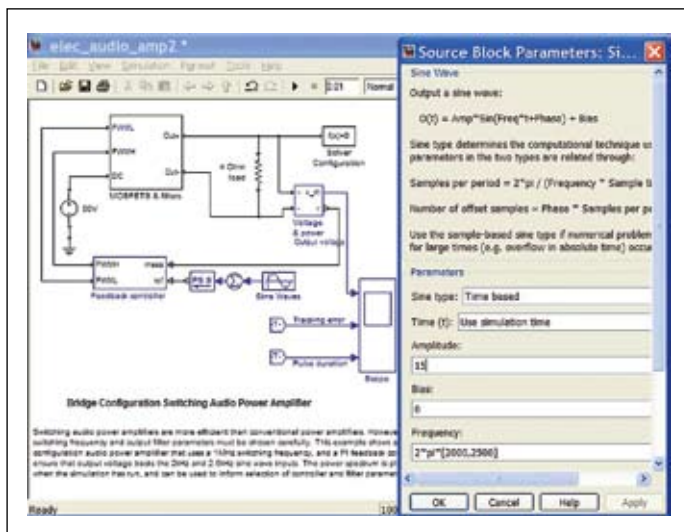


Рис. 40. Диаграмма модели мощного усилителя с широтно-импульсным регулятором

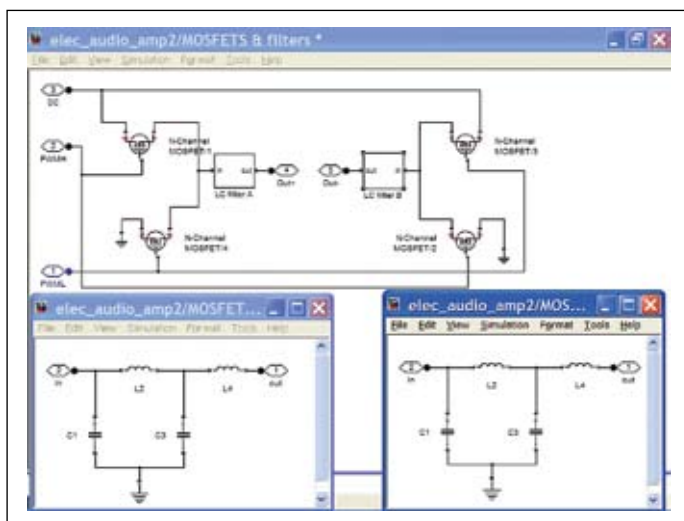


Рис. 41. Субмодели ключей на мощных MOSFET и LC-фильтрах

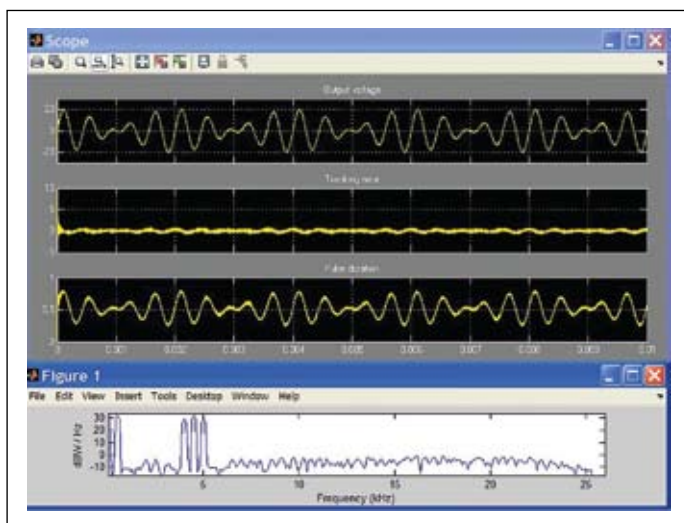


Рис. 42. Временные диаграммы работы модели усилителя (рис. 36) и спектры сигналов

Субмодель мостового регулятора на двух полумостах с мощными MOSFET представлена блоком MOSFETS&Filters. Сделав на этом

блоке двойной щелчок правой клавишей мыши, можно вывести диаграмму моделей ключей: она показана на рис. 41 сверху. Там же показаны диаграммы субмоделей LC-фильтров, которые гасят пульсации сигнала, связанные с широтно-импульсным характером регулирования.

Эта модель с помощью виртуального осциллографа строит временные диаграммы работы усилителя (рис. 42 сверху) и спектр мощности частот входного и выходного сигналов. Он показан на рис. 42 снизу. Для получения этих данных модель запускают на исполнение кнопкой с изображением черного треугольника в панели инструментов диаграммы модели (рис. 40).

Входной сигнал в виде двух синусоид дает характерные биения, в результате чего он напоминает сигнал модуляции. Он позволяет оценить динамику и динамический диапазон усилителя. На осциллограммах (рис. 42) представлены выходной сигнал, сигнал ошибки и входной сигнал широтно-импульсного регулятора. Нетрудно заметить, что на глаз входной и выходной сигнал имеют одинаковую форму и отличаются только масштабом.

Заключение

Мощные полевые радиочастотные транзисторы класса VDMOS удачно сочетают достоинства VMOS-транзисторов с приборами класса DMOS. Несколько уступая приборам VMOS по значениям максимальной рабочей частоты, они заметно превосходят их по основным энергетическим параметрам — выходной мощности, рабочим напряжениям и токам стока. Обширная номенклатура выпускаемых фирмой Microsemi полевых транзисторов класса VDMOS позволяет строить на них усилители с мощностью выходного сигнала от единиц Вт до 1–2,5 кВт на частоте от 10 до 150 МГц. Такие усилители применяются в телевизионной, спутниковой, радиолокационной, медицинской аппаратуре и аппаратуре для связи, успешно заменяя применяемые ранее устройства на электронных лампах и биполярных транзисторах.

Литература

1. Бачурин В. В., Дьяконов В. П., Сопов О. В. Мощные высокочастотные и сверхвысокочастотные МДП-транзисторы // Электронная промышленность. 1979. № 8.
2. Бачурин В. В., Дьяконов В. П., Сопов О. В. Мощный высокочастотный МДП-транзистор КП904 // Электронная промышленность. 1979. № 5.
3. Бачурин В. В., Бычков С. С., Дьяконов В. П., Прушинский А. К. Мощный кремниевый сверхвысокочастотный МДП-транзистор КП908 // Электронная промышленность. 1980. № 1.
4. Ассессоров В., Кожевников В., Дикарев В., Цоцорин А. Мощные ВЧ и СВЧ полевые транзисторы для аппаратуры средств радиосвязи // Компоненты и технологии. 2006. № 5.
5. Захаров В. Мощные СВЧ-транзисторы фирмы Philips Semiconductor // Компоненты и технологии. 2003. № 6.
6. Дьяконов В. П. Мощные полевые транзисторы: история, развитие и перспективы. Аналитический обзор // Силовая электроника. 2011. № 3.
7. Бачурин В. В., Ваксбург В. Я., Дьяконов В. П. и др. Схемотехника устройств на мощных полевых транзисторах: Справочник. М.: Радио и связь, 1994.
8. Дьяконов В. П., Максимчук А. А., Ремнев А. М., Смердов В. Ю. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах. М.: СОЛОН-Р, 2002.
9. Дьяконов В. П. Физическое моделирование схем на полевых транзисторах в Simulink и SimElectronics // Компоненты и технологии. 2011. № 11.
10. Дьяконов В. П. Моделирование в MATLAB+Simulink электронных компонентов, систем и устройств // Компоненты и технологии. 2011. № 4.
11. Дьяконов В. П. MATLAB и Simulink для радиоинженеров. М.: ДМК-Пресс, 2011.
12. Ред Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике. М.: Мир, 1990.
13. Gui Shoi. 13.56 MHz. Class-D Half Bridge, RF Generator with EDF1400. Application Note 1817. Microsemi. March 2012.