

Антенные переключатели

Часть 2

В. Кочемасов, к. т. н.¹, А. Сафин, к. т. н.², С. Дингес, к. т. н.³

УДК 621.389 | ВАК 2.2.2

В первой части статьи, опубликованной в седьмом номере журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2022 год, было рассказано о модульных рpн-диодных приемопередающих переключателях. В данном номере рассматриваются еще несколько типов антенных переключателей.

Интегральные Rx/Tx-переключатели

Мощные приемопередающие рpн-диодные переключатели в интегральном исполнении на основе SPDT-структур были разработаны для базовых станций, работающих по стандартам TD-SCDMA, WiMAX, Wi-Fi и LTE, радиолокационных приемопередающих модулей, входящих в состав АФАР, а также разнообразных систем связи военного, промышленного и коммерческого применения. Первые интегральные микросхемы, предназначенные для коммутации больших мощностей, были реализованы на стандартных симметричных структурах (см. рис. 3) и в малой степени удовлетворяли требованиям, предъявляемым к Rx/Tx-переключателям. Каналы в этих переключателях имели одинаковые характеристики (табл. 4).

Наибольшее распространение среди мощных симметричных переключателей получили изделия на базе двухканальной последовательно-параллельной структуры (рис. 3к). Максимальная переключаемая мощность в этих изделиях, как правило, не превышает 100 Вт. Коммутация каналов в таких переключателях достигается изменением сопротивления рpн-диодов от минимального в открытом до максимального в закрытом состояниях. Управление работой диодов осуществляется подачей соответствующих напряжений смещения и управления (рис. 14а, б). Наряду с классической схемой (рис. 3к) применяются ее различные модификации (рис. 3л, м, н), в которых к последовательным и параллельным диодам классической схемы последовательно или параллельно подключены дополнительные диоды. Такое техническое решение обеспечивает не только снижение вносимых потерь в обоих режимах, но и увеличение предельной мощности коммутации. Например, в модели MSW2040X (рабочий диапазон частот 0,05–4,0 ГГц) эта мощность достигает 158 Вт, а в модели MSW2T-2040X-198 (0,1–2,0 ГГц) – 400 Вт. Использование

структуры, показанной на рис. 3е, в которой шунтирующие диоды отсутствуют, а вместо одиночных последовательных диодов используются по три параллельно

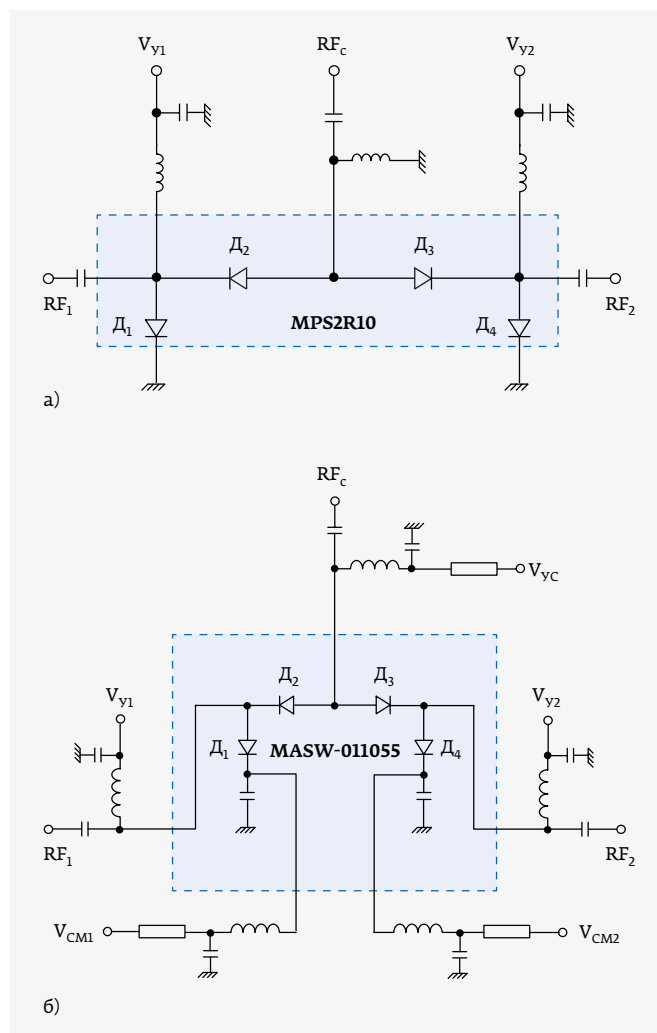


Рис. 14. Схемы интегральных симметричных переключателей с внешними цепями смещения и управления: а – MPS2R10 (Microsemi); б – MASW-011055 (MACOM). RF_c – общий (антенный) порт

¹ ООО «Радиокомп», генеральный директор, vkochemasov@radiocomp.ru.

² НИУ «МЭИ», заведующий кафедрой формирования и обработки радиосигналов, arsaafin@gmail.com.

³ МТУСИ, доцент кафедры радиооборудования и схемотехники.

Таблица 4. Характеристики симметричных Rx/Tx-переключателей на кремниевых рpn-диодах в интегральном исполнении

Компания	Модель	Диапазон частот, ГГц	$P_{вх}$, Вт	ППЗ, дБ	П, дБ	ISO, дБ	$T_{п}$, мкс
Wei Bo Associates	MSW2T-020522-232	0,02-0,52	1000	65	<0,7	>40	5
Wei Bo Associates	MSW2T-2040X-194	0,1-1,0	320	65	0,15	45	4
Microsemi	MPS2R10-606	0,05-1,0	100	-	0,1-0,5	60-47	-
MACOM	MSW2040-204	0,05-1,0	160	65	0,2	50	2
Wei Bo Associates	MSW2T-2040-193	0,05-1,0	160	65	0,15	50	2
Wei Bo Associates	MSW2T-2030-192	0,05-1,0	100	65	0,3	52	0,75
MACOM	MSW2030-203	0,05-1,0	100	65	0,3	52	2
Wei Bo Associates	MSW2T-2060-195	0,02-1,2	100	65	0,25	53	0,75
Wei Bo Associates	MSW2T-2040X-198	0,1-2,0	400	65	0,15	45	2
KCB Solutions	KS 113-52	0,02-2,0	50	-	0,03-0,75	45	-
Skyworks Solutions	SKY1224-478LF	0,05-2,7	40	73	0,22-0,53	52-33	0,032
MACOM	MASW-011055	0,03-3,0	100	66	0,1-0,35	54-51	0,5
KCB Solutions	KS 03R2-22	0,02-3,0	200	-	0,4-0,7	26-22	-
MACOM	MSW2041-204	0,4-4,0	160	65	0,5	33	2
Wei Bo Associates	MSW2T-2041-193	0,4-4,0	160	65	0,5	33	2
Wei Bo Associates	MSW2T-2031-192	0,4-4,0	100	65	0,4	35	0,75
MACOM	MSW2031-203	0,4-4,0	100	65	0,5	35	1
Wei Bo Associates	MSW2T-2061-195	0,2-4,5	100	65	0,5	35	0,75
Wei Bo Associates	MSW2T-2032-192	2,0-6,0	100	65	0,6	35	0,75
MACOM	MSW2032-203	2,0-6,0	100	65	0,6	35	1
MACOM	MASW-011060	0,5-6,0	158	75	0,15-0,80	47-28	1,1
Wei Bo Associates	MSW2T-2062-195	1,5-6,5	100	65	0,7	34	0,75
MACOM	MASW-011071	8,0-10,5	20	60	0,9-1,2	36-39	0,13
MACOM	MASW-010647	8,0-10,5	20	60	0,70-0,85	33-39	0,13
Wei Bo Associates	MSW2T-8512-740	8,5-12,0	100	-	0,75	35	1
Analog Devices	HMC975	2,0-50,0	0,1-0,6	-	0,6-1,7	50-45	-

включенных диода, позволило получить в модели MSW2T-020522-232 (0,02–0,52 ГГц) максимальную входную мощность 1000 Вт. На более высоких частотах (в X-диапазоне) в каждом из каналов используется по два шунтирующих диода (рис. 15а), обеспечивающих коммутацию 20-Вт мощностей (модели MASW-010647 и MASW-011071). Наибольшая коммутируемая мощность (100 Вт) в X-диапазоне была достигнута в переключателе MSW2T-8512-740, реализованном по схеме, представленной на рис. 15б, с использованием двух шунтирующих диодов, разделенных двумя четвертьволновыми микрополосковыми линиями.

В сверхширокополосном переключателе НМС975 (рис. 3м) к каждому из шунтирующих диодов параллельно подключены еще по два диода (рис. 15в). Коммутация мощностей 0,1–0,6 Вт реализуется в диапазоне

частот 2–50 ГГц. Вносимые ослабления в обоих каналах во включенном состоянии практически идентичны и зависят лишь от частоты и температуры окружающей среды (рис. 16а, б). Развязки Ант–Тх, Ант–Rx, Тх–Rx (порт Ант включен), Тх–Rx (порт Rx включен) между портами мало отличаются друг от друга, особенно на частотах до 30 ГГц (рис. 16в). Вносимые потери зависят также от величины входной мощности $P_{вх}$ (рис. 16г).

Значительная часть мощных (от 50 до 500 Вт) интегральных переключателей на кремниевых рпн-диодах выполняется по асимметричным схемам (см. рис. 4), из которых чаще всего используются структура, показанная на рис. 4в, и ее модификации, в которых последовательный диод в передающем канале или шунтирующий диод в приемном канале могут быть заменены несколькими

Таблица 5. Характеристики Rx/Тх-переключателей с отличающимися характеристиками приемного и передающего каналов

Компания	Модель	Диапазон частот, ГГц	$P_{вх}$, Вт		ИРЗ, дБм	ИЛ, дБ	
			Тх	Rx		Тх-Ант	Ант-Rx
MACOM	MSW2022-202	0,05-1,0	160	10	65	0,2	0,3
MACOM	MSW2010-201	0,05-1,0	100	20	65	0,15	0,25
MACOM	MSW2000-200	0,05-1,0	100	20	65	0,15	0,25
Wei BO Associates	MSW2T-2050-194	0,05-1,0	160	20	65	0,15	0,25
Wei BO Associates	MSW2T-0025-195	1,0-2,0	100	10	65	0,3	0,3
Skyworks Solutions	SKY12212-478LF	0,05-2,7	100	40	67	0,29-0,55	0,24-0,44
Skyworks Solutions	SKY12208-306LF	0,02-0,7	50	40	45	0,15-0,40	0,10-0,43
Wei BO Associates	MSW2T-2735-196/197	2,7-3,5	500	50	-	0,7	0,7
Skyworks Solutions	SKY12207-478LF	0,9-4,0	50	40	78	0,25-0,41	0,28-0,70
Skyworks Solutions	SKY12210-478LF	0,9-4,0	100	40	78	0,52-0,33	0,56-0,26
MACOM	MSW2011-201	0,4-4,0	100	20	65	0,3	0,4
Wei BO Associates	MSW2T-2051-194	0,4-4,0	160	20	65	0,3	0,8
Wei BO Associates	MSW2T-2001-199	0,4-4,0	125	20	65	0,3	0,4
MACOM	MSW2002-200	2,0-6,0	100	20	65	0,6	0,9
Wei BO Associates	MSW2T-2002-199	2,0-6,0	125	20	65	0,6	0,9
MACOM	MASW-000822-12770T	0,05-6,0	10	2	65	0,35-0,50	0,55-0,80
MACOM	MASW-000825-12770T	0,05-6,0	<20	<8	64	0,29-0,59	0,42-0,95
MACOM	MASW-000834	0,05-6,0	50	14-11	64	0,22-0,48	0,27-0,72
MACOM	MASW-000936	0,05-6,0	120-80	14	50	0,07-0,25	0,2-0,7
Wei BO Associates	MSW2T-2000-199	0,05-6,0	125	20	65	0,15	0,25
MACOM	MASW-000932	0,01-6,0	80-45	14	72	0,25-0,45	0,60-0,80

последовательно и/или параллельно включенными p-n диодами (рис. 4г–ж). Наиболее успешно на этом рынке работают компании Skyworks Solutions, MACOM и Wei Bo Associates (табл. 5).

При разработке переключателей эти компании используют стандартные кремниевые технологии (Skyworks Solutions), запатентованную компанией MACOM технологию HMIC с размещением внешних компонентов на стеклянной подложке (MACOM, Wei Bo Associates) и технологию, в которой стеклянная подложка заменена керамической (MACOM, Wei Bo Associates). Переключатели со стандартной и HMIC технологиями размещаются в QFN- или PQFN-корпусах, размером 4×4 мм, а изделия на керамических, а иногда и на стеклянных подложках – в SMP-корпусах, размером 8,0×5,0×2,5 мм. Такие

Tx-Rx	Iso, дБ		Tx, нс	
	Rx-Tx	Ант-Tx		Ант-Rx
45	23	-	1500	
52	26	-	2000	
52	26	-	3000	
50	26	-	1000	
20	15	-	1500	
50-29	-	50-28	47-29	600
50-34	-	58-29	49-39	85
-	-	40	-	700
42-32	-	26-16	42-30	170
50-34	-	35-25	44-33	157
36	14	-	-	1500
34	13	-	-	1000
46	14	-	-	1000
34	13	-	-	1000
34	13	-	-	1000
29,5-21,5	24,5-17,5	-	-	500
28,6-22,4	24,2-18,5	-	-	200
53,6-26,6	27,4-11,8	-	-	200
-	-	16-11	50-40	200
52	26	-	-	1000
-	-	14-10	43-35	200

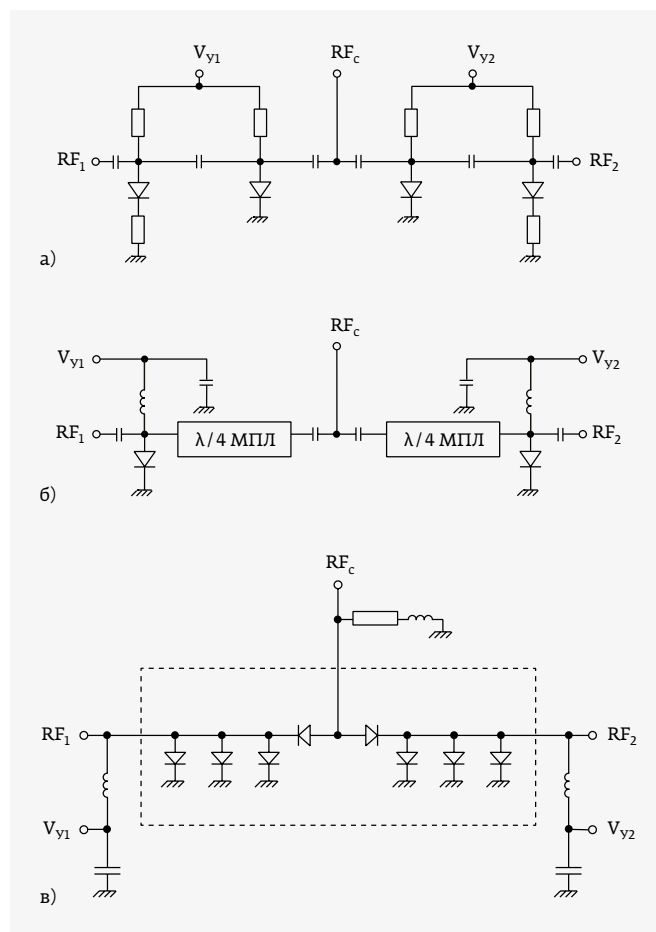


Рис. 15. Практические схемы интегральных симметричных переключателей, предназначенных для работы в X-диапазоне: а – MASW-011071, MASW-010647 (компания MACOM); б – MSW2T-8512-740 (компания Wei Bo Associates); в – HMC975 (компания Analog Devices)

гибридные микросхемы обеспечивают низкое тепловое сопротивление (от 25 до 4,3 °С/Вт) между кристаллом и нижним основанием корпуса, что позволяет реализовать изделия со средней мощностью до 500 Вт и импульсной – более 1000 Вт.

Максимально допустимые мощности переключателей «прием-передача» могут быть определены исходя из предельной температуры кристалла 175 °С (рис. 17), температуры основания корпуса микросхемы (рис. 18а, б) и температуры нижней стороны печатной платы (рис. 18в, г).

Многие модели переключателей «прием-передача» выпускаются на базе одного кристалла и отличаются лишь диапазоном рабочих частот, который зависит от номиналов используемых внешних индуктивностей (L), блокировочных ($C_{бл}$) и разделительных (C_p) конденсаторов (табл. 6). Для всех переключателей «прием-передача» производители приводят также сведения о минимально необходимом для запирающего диодов обратном напряжении, которое

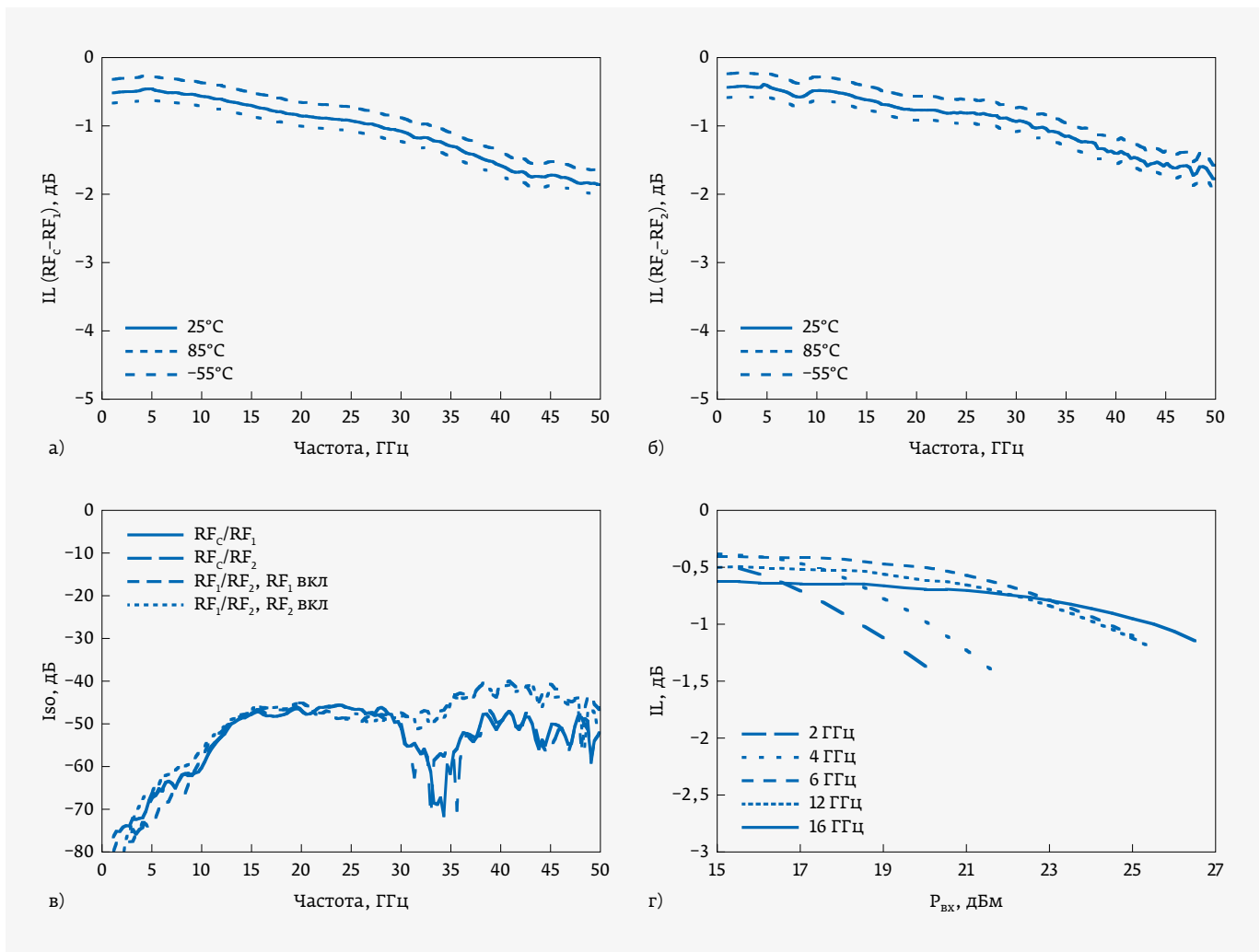


Рис. 16. Характеристики симметричного SPDT-переключателя НМС975 (компания Analog Devices): а – вносимые потери $IL(f)$ в зависимости от $(RF_c - RF_1)$; б – вносимые потери в зависимости от $(RF_c - RF_2)$; в – развязка $Iso(f)$ между каналами; г – вносимые потери в зависимости от уровня входной мощности

зависит от частоты входного сигнала (табл. 7), входной мощности, характеристик рin-диодов, импедансов и КСВ каждого из каналов. Для каждого переключателя эти рекомендации, приведенные в data sheets, индивидуальны. Помимо этих сведений, в data sheets в обязательном порядке присутствуют таблицы истинности (табл. 8), в которых для передающего и приемного режимов содержатся

сведения о напряжениях и токах смещения в различных цепях переключателя. Иногда эти сведения можно почерпнуть из приводимых в data sheets упрощенных схем (рис. 19).

Верхняя граница рабочих частот асимметричных переключателей лежит в пределах 1–6 ГГц (табл. 5). Большинство моделей переключателей, приведенных в табл. 5,

Таблица 6. Номиналы конденсаторов и индуктивностей, используемых в переключателях MSW2T-200X-199, при их работе в диапазонах частот 50–1000, 400–4000 и 4000–6000 МГц

Модель	Диапазон частот, МГц	$C_{бл}$, мкФ	C_p , пФ	L , нГн
MSW2T-2000-199	50–1000	0,1	105	4700
MSW2T-2001-199	400–4000	27	270	82
MSW2T-2002-199	4000–6000	22	33	33

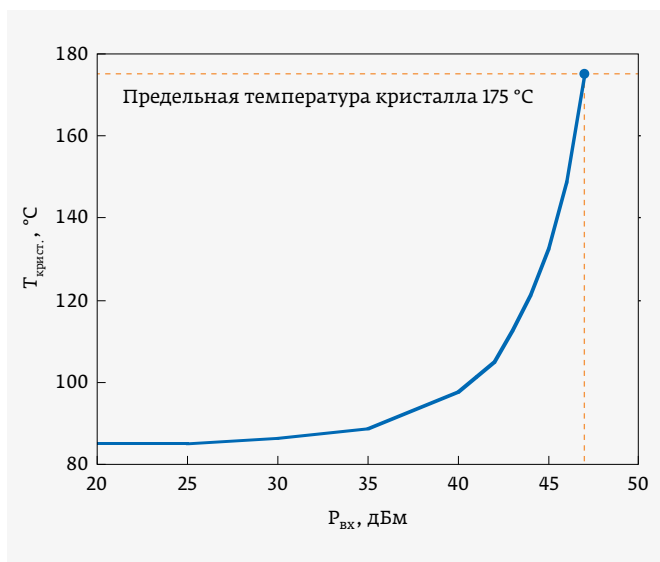


Рис. 17. Зависимость температуры кристалла от входной мощности (MASW-000932, компания MASCOM)

выполнено по асимметричным схемам, обеспечивающим отличие характеристик в передающем и приемном каналах. Однако, это отличие может быть реализовано и в переключателях по симметричным схемам (MASW-000822-12770T, MASW-000825-12770T) выбором номиналов пассивных компонентов в соответствующих цепях смещения. Отметим также, что графики зависимостей $IL(f)$ и $Iso(f)$ в различных моделях переключателей могут существенно отличаться (рис. 20). Кроме того, вносимые потери зависят от входного уровня мощности и рабочих значений напряжений и токов (рис. 21). Большинство разработанных переключателей «прием-передача» обладают высокой линейностью. В отдельных переключателях, выпускаемых компанией Skyworks Solutions, ППЗ (точка пересечения интермодуляции третьего порядка по входу) достигает 78 дБм (табл. 5).

Обычно в Rx/Tx-переключателях используется положительное напряжение питания, которое при необходимости может быть изменено на двуполярное (рис. 22). Иногда наряду с положительным источником +28 В используется

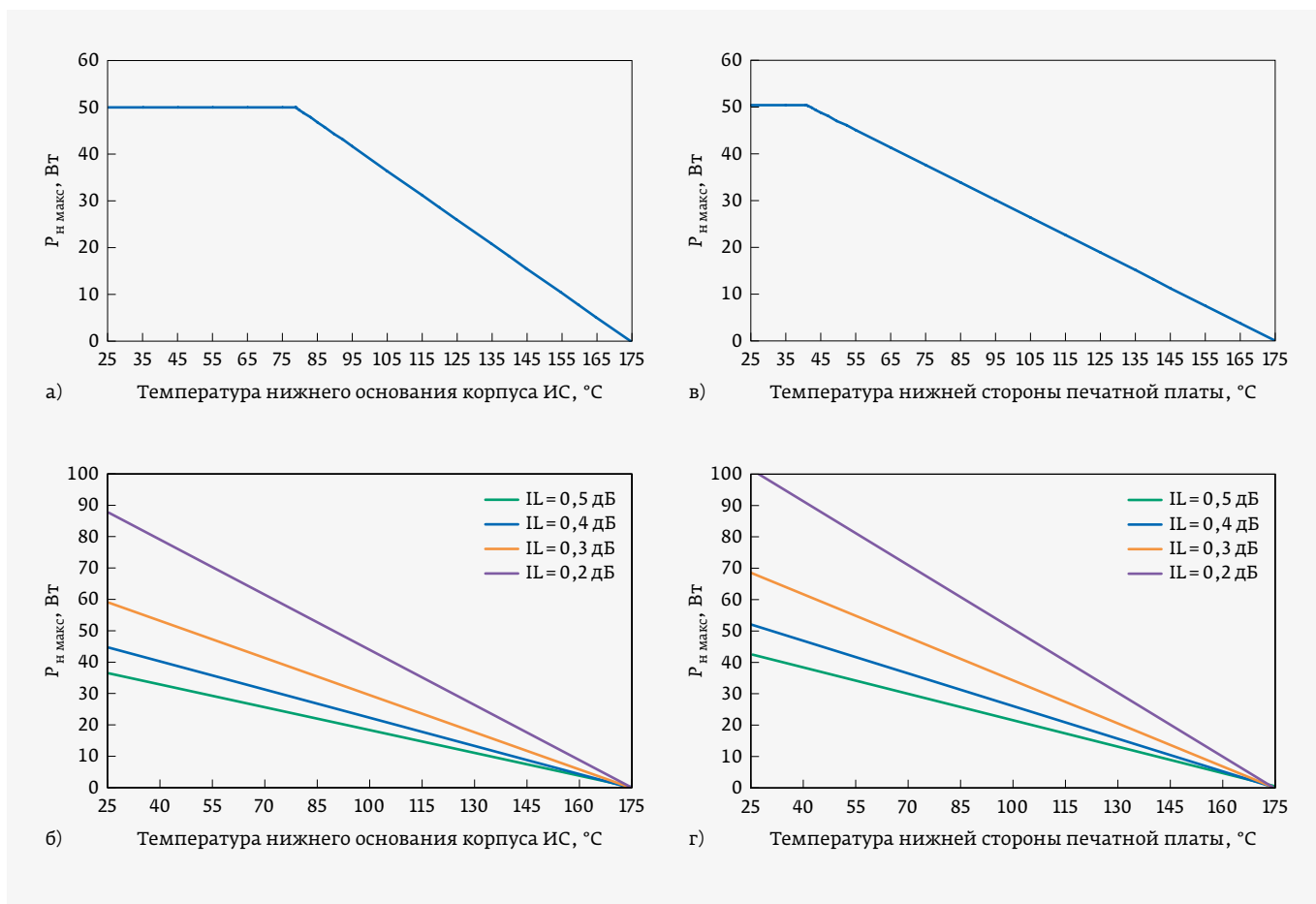


Рис. 18. Зависимость предельно допустимой входной мощности от температуры основания корпуса в микросхемах SKY12208-306LF (а), SKY12241-492LF (б) и температуры нижней стороны основания печатной платы в микросхемах SKY12208-306LF (в) и SKY12241-492LF (г)

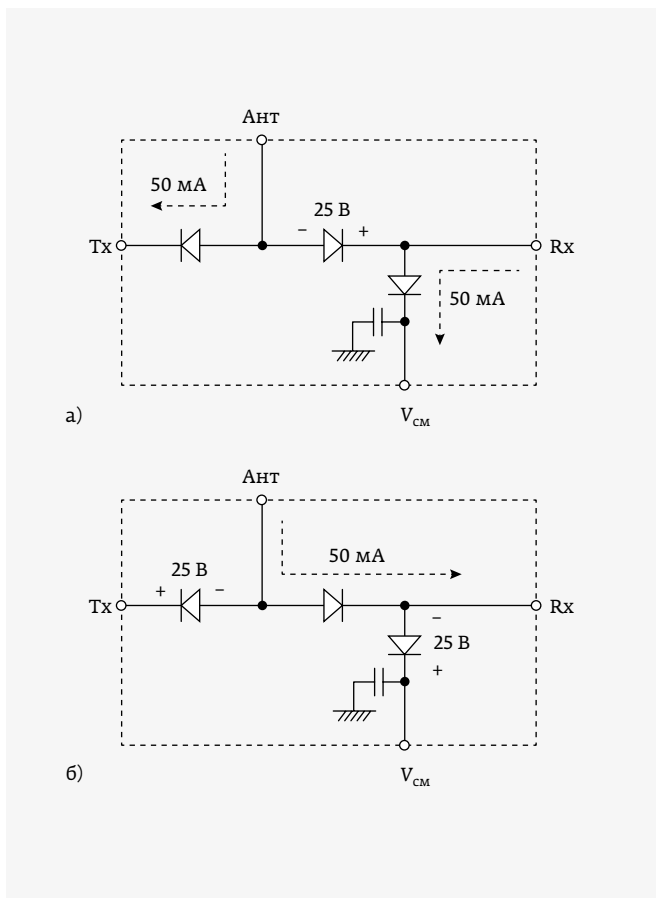


Рис. 19. Схематическое изображение принципиальной схемы переключателя MASW-000834 с указанием действующих напряжений и токов: а – включен передающий канал; б – включен приемный канал

небольшое дополнительное положительное или отрицательное напряжение, которое подается на антенный порт переключателя.

Максимально возможная коммутируемая мощность 500 Вт достигается в Rx/Tx-переключателе MSW2T-2735-196/-197 при подаче на его вход импульсов длительностью 500 мкс, следующих со скважностью 20%. Еще большая пиковая мощность (до 2000 Вт) может быть получена в микросхеме MASW-000932 при коммутации 5-мкс импульсов с 1%-ной скважностью.

В качестве приемопередающих модулей могут быть использованы и рpn-диодные переключатели, выполненные по AlGaAs-технологии. Разработанные компанией MACOM SPDT-переключатели MASW-011036 и MASW-011094 для диапазонов частот 26–40 и 24–37 ГГц обеспечивают входные мощности 12 и 40 Вт соответственно. Эти микросхемы обладают высокой скоростью переключения (время нарастания $T_r=10$ нс, время спада $T_f=8$ нс в микросхеме MASW-011036 и $T_r=16$ нс, $T_f=34$ нс в изделии MASW-011094) и характеризуются высокой линейностью.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ SPDT-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ НА АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Значительное число приемопередающих SPDT-переключателей создано по технологии GaAs PHEMT [16, 17]. Основной вклад в разработку и продвижение на рынок этих изделий был внесен компаниями Analog Devices, Eudyna Devices, Skyworks Solutions, Filtronic, Qorvo (табл. 9). Разработанные этими компаниями изделия в основном используются в мобильных телефонах на частотах до 6 ГГц, где коммутируемые мощности не превосходят 3–5 Вт,

Таблица 7. Минимально необходимое обратное напряжение смещения (В), используемое в модификациях переключателя MSW2T-2000X-199 в различных диапазонах частот

Модель	Рабочая частота, МГц					
	20–100	100–200	200–400	400–1000	1000–4000	>4000
MSW2T-2000-199	120	110	85	55	28	–
MSW2T-2001-199	–	–	110	85	55	28
MSW2T-2002-199	–	–	–	–	28	28

Таблица 8. Таблица истинности переключателя MSW2T-200X-199

Канал Ант–Tx	Канал Ант–Rx	Tx	Ант	Rx	V1*
Низкие вносимые потери	Высокая развязка	–100 мА	+100 мА	25 мА, 28 В	+25 мА
Высокая развязка	Низкие вносимые потери	+28 В	+100 мА	–100 мА, 0 В	+28 В

* V1 – напряжение смещения.

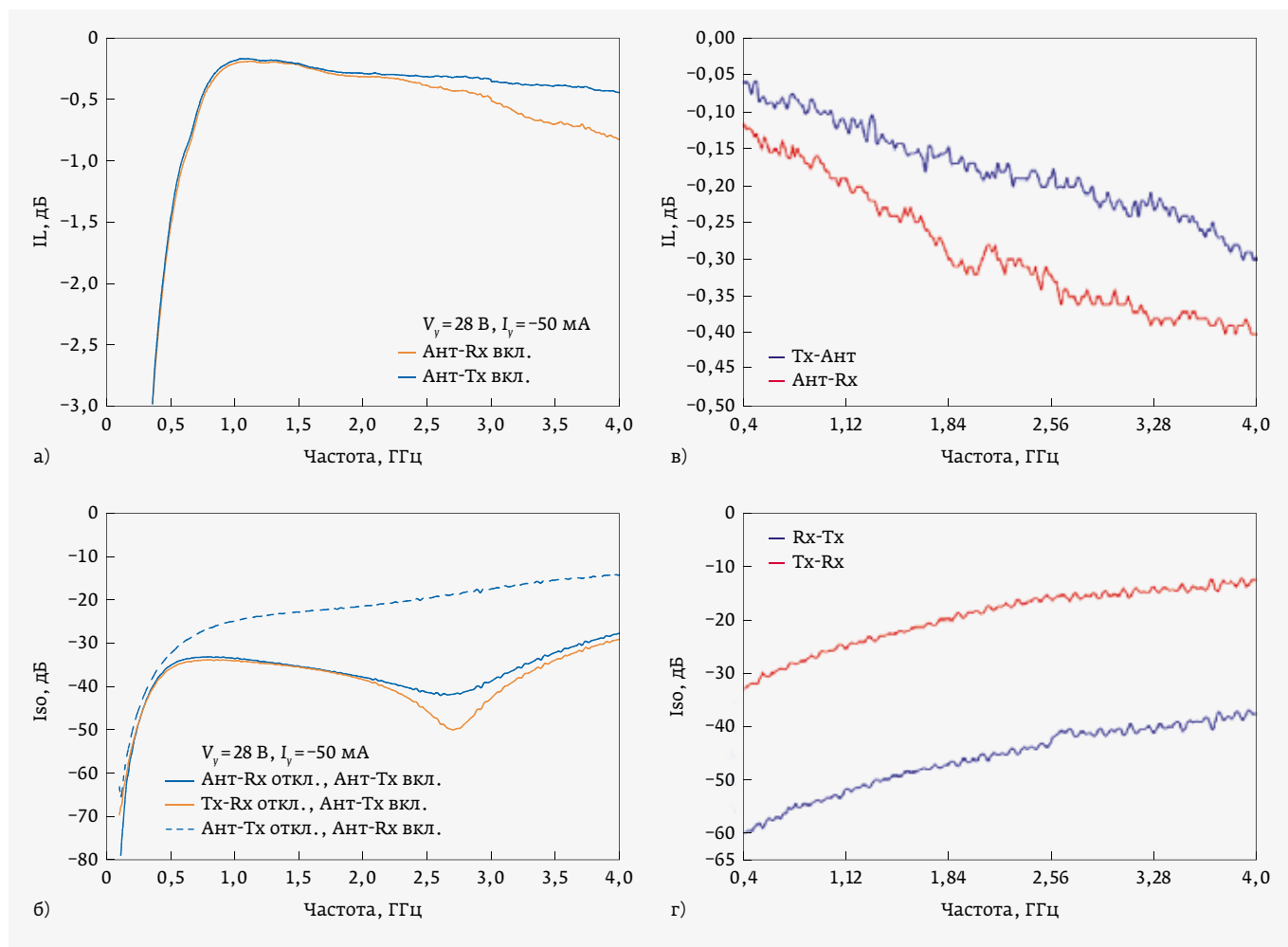


Рис. 20. Частотные характеристики приемопередающих каналов в асимметричных переключателях SKY12207-478LF (а, б) и MSW2011-201 (в, г): а, в – вносимые потери; б, г – развязки

и лишь некоторые из них, обеспечивающие коммутацию мощностей 8–40 Вт, находят применение в базовых станциях и ретрансляторах. Большинство таких переключателей реализуются на симметричных SPDT-структурах и имеют одинаковые значения допустимых входных мощностей, вносимых потерь, развязок и ПРЗ в передающем и приемном каналах. Анализируя характеристики этих арсенид-галиевых переключателей (см. табл. 9), можно отметить, что они уступают характеристикам Rx/Tx-переключателей на кремниевых рpn-диодах. При этом, конечно, следует помнить, что токи смещения и управления в арсенид-галиевых переключателях как минимум на два порядка меньше, чем у кремниевых изделий.

Все эти микросхемы запитываются от одного или двух источников положительного напряжения. Максимальное значение этого напряжения находится обычно в пределах +3...+10 В. Напряжение смещения заметно сказывается на уровне компрессионной мощности $P_{0, \text{дБ}}$ (рис. 23а) и уровнях второй и третьей гармоник (рис. 23б).

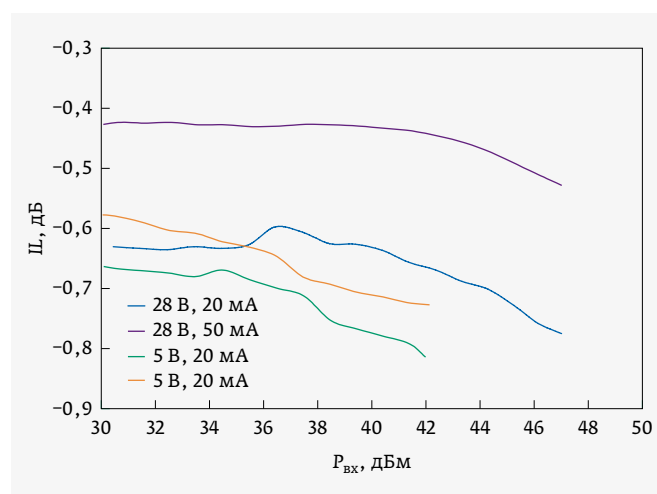


Рис. 21. Зависимость вносимых потерь от входной мощности передающего канала в переключателе SKY12207-478LF при различных значениях напряжений и токов смещения

Таблица 9. Характеристики переключателей «прием-передача», выполненных на арсенид-галлиевых полевых транзисторах

Компания	Модель	Диапазон частот, МГц	$P_{вх}$, дБм	ППЗ, дБм	IL, дБ	ISO(Tx), дБ	T_r , нс	T_f , нс	T_{on}^* , нс	T_{off}^{**} , нс
Analog Devices	HMC646LP2	0,1-2,1	46 ($P_{1дБ}$), Tx 20 ($P_{1дБ}$), Rx	74 (Tx-RF _c) 42 (RF _c -Rx)	0,6 (Tx-RF _c) 0,8 (RF _c -Rx)	22 (Tx-RF _c) 30 (RF _c -Rx)	100	100	320	320
Analog Devices	HMC174MS8G	0-3,0	36 ($P_{1дБ}$)	60-56	0,4-1,3	26-20	10	10	24	24
Analog Devices	HMC484MS8G	0-3,0	40 ($P_{1дБ}$)	72-70	0,4-0,9	30	15	15	40	40
Eudyna Devices	FMM5317ZW	0,5-4,0	34 ($P_{0,1дБ}$)	-	0,55-0,70	25-20	-	-	110	70
UMS	CHS5105-QAG	0-4,0	30 ($P_{1дБ}$)	-	0,3-0,7	45-35	-	-	10	10
Analog Devices	HMC224MS8G	5,0-6,0	33 ($P_{1дБ}$)	37	1,2-1,3	24-31	10	10	25	25
Filtronic	FMS2031-001	2,0-6,0	39,5-38,0 ($P_{0,1дБ}$)	65	0,5-0,9	35-23	300	300	800	800
Skyworks Solutions	SKY13592-689LF	1,0-6,0	30 ($P_{0,1дБ}$)	55-50	0,45-0,55	35-24	210	210	450	-
Eudyna Devices	HS/M69SPDT 312	0,1-6,0	34 ($P_{0,1дБ}$)	-	0,55-0,75	25-22	-	-	-	-
Filtronic	FMS2020-001	1,0-6,0	41-38,5 ($P_{0,1дБ}$)	69-66	0,40-0,75	30-18	300	300	-	-
KCB Solutions	KCB820	0,02-6,0	30 ($P_{1дБ}$)	46	0,75-1,5	55-45	5	5	15	15
Analog Devices	HMC536MS8G	0-6,0	34 ($P_{0,1дБ}$)	56-48	0,5-0,7	27-32	15	15	30	30

* T_{on} – время включения, ** T_{off} – время выключения.

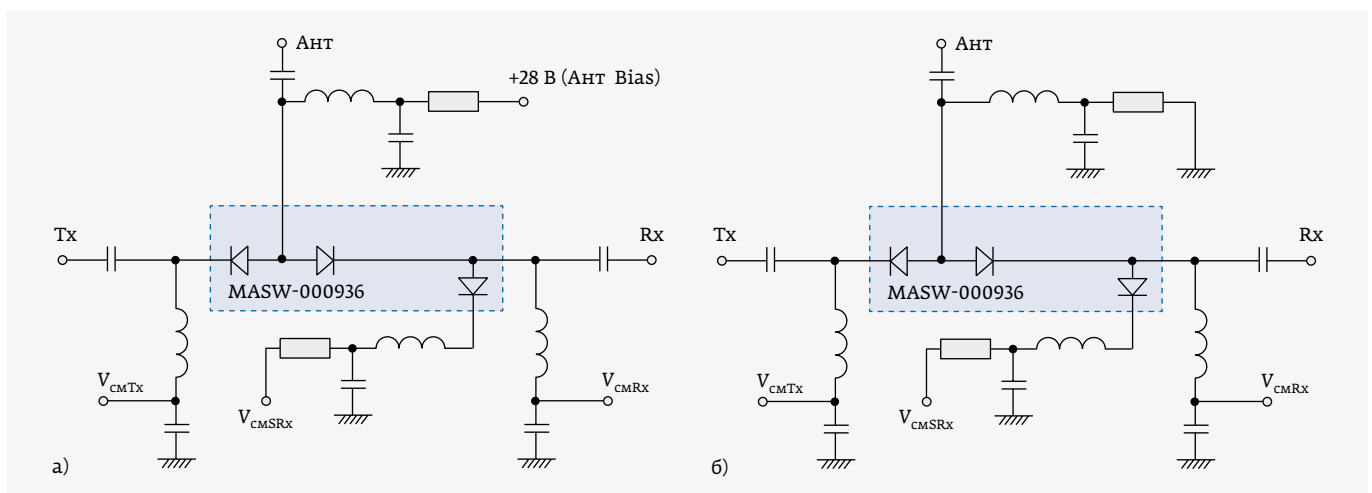


Рис. 22. Принципиальные схемы переключателя MASW-000936 при однополярном (а) и двуполярном (б) включениях

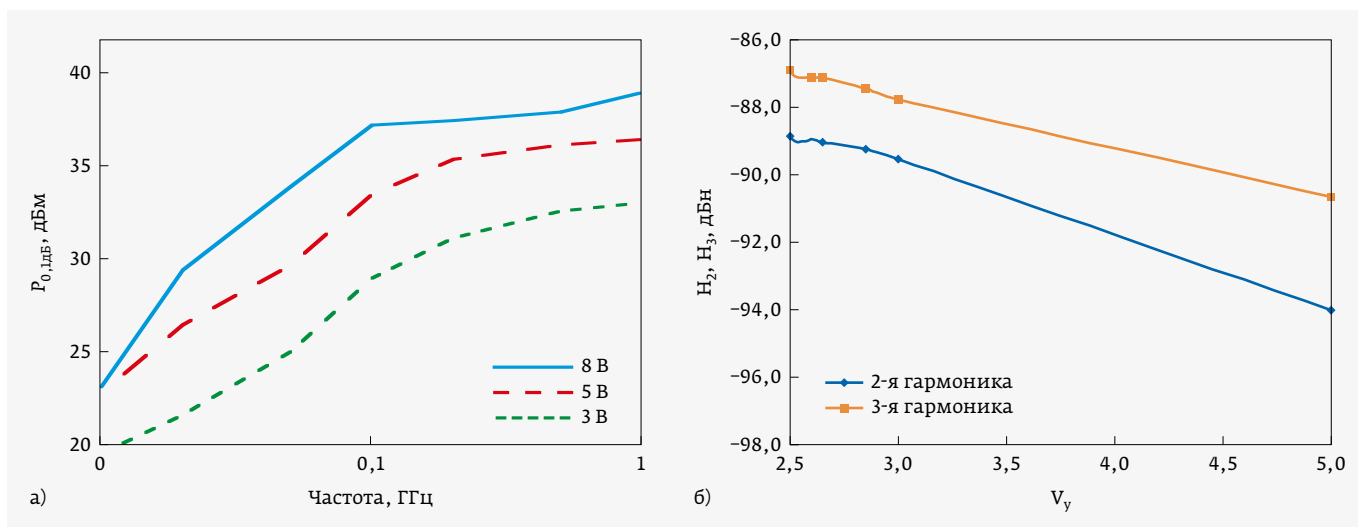


Рис. 23. Характеристики симметричных Rx/Tx-переключателей на GaAs полевых транзисторах:
 а - $P_{0,dBm}(f)$ при различных напряжениях смещения (модель HMC574MS8, компания Analog Devices);
 б - уровни второй (H_2) и третьей (H_3) гармоник в зависимости от управляющего напряжения V_g при температуре окружающей среды 25 °С (модель RF1201, компания Qorvo)

Эффективность отвода тепла в микросхемах этого типа определяется тепловым сопротивлением используемых транзисторов. Минимальное тепловое сопротивление 14,75 °С/Вт на транзисторах в передающем и приемном

каналах достигается в переключателе HMC646LP2. Среди всех приведенных в табл. 9 моделей этот переключатель является единственным, в котором характеристики двух каналов существенно различаются (рис. 24а-в).

**Качество высокое
Цены низкие**

Любые виды заказов:
 • СЧОКР • срочные заказы
 • единичные/крупносерийные заказы
www.filin-rf.ru

ФИЛИН
 Filter Innovations
www.radiocomp.ru
filin-rf@radiocomp.ru

Фильтры на сосредоточенных элементах

Диапазон частот, МГц	Полоса пропускания, %	КСВН в полосе пропускания	Гарантированное затухание, дБ	Вносимые потери в полосе пропускания, дБ
1 – 3 000	1 – 150	1,5 – 2,0	Определяется отстройкой от номинальной частоты и порядком фильтра	Зависят от порядка фильтра

ЗННК-П1400-Б/Б

- ФНЧ 3 порядка
- Частота среза 1400 МГц
- Сверхмалые потери в полосе пропускания (до 0,3 дБ)
- Допустимая мощность 125 Вт

5CN7-525H250-4/4

- ПФ 5 порядка
- Номинальная частота 525 МГц
- Негерметичный корпус
- Под поверхностный монтаж
- Масса изделия менее 5 г

9НСГ7-T530.5-8/8

- ФНЧ 9 порядка
- Частота среза 520 МГц
- Герметичный корпус
- Под поверхностный монтаж
- Срок службы изделия – 20 лет

109316, Москва, Волгоградский проспект, 42 +7 495 020 4000 / +7 495 95 777 45

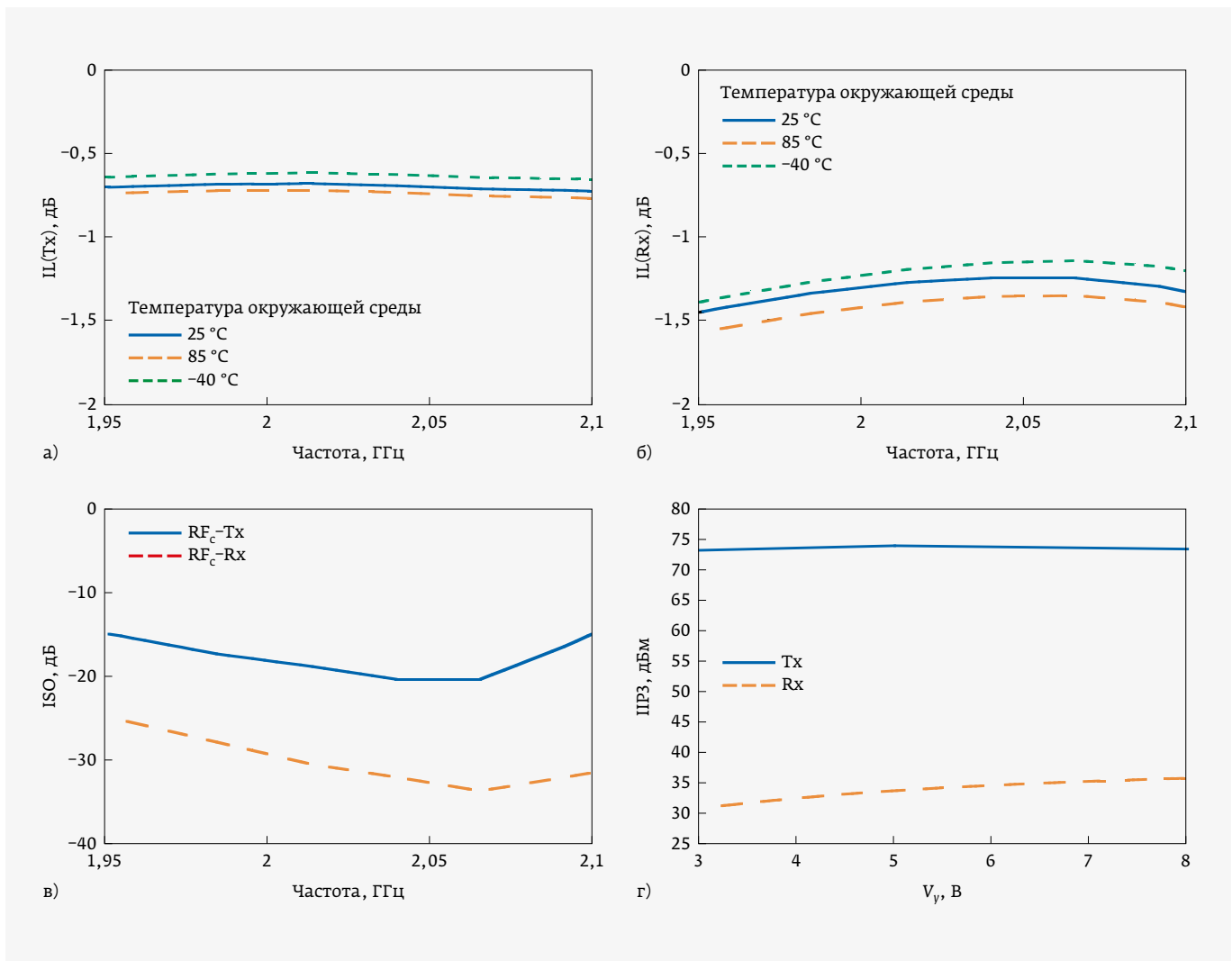


Рис. 24. Характеристики мощного асимметричного Rx/Tx-переключателя НМС646LP2 (Analog Devices) на GaAs полевых транзисторах: а – $IL(f)$ в передающем тракте; б – $IL(f)$ в приемном тракте; в – $ISO(f)$ в передающем и приемном трактах; г – $IP3(V_{in})$ в передающем и приемном трактах. Частота входного сигнала 2015 МГц

Особенно сильно разнятся показатели $IP3$, характеризующие линейность передающего и приемного трактов (рис. 24г). Во всех других переключателях показатели $IP3$ в обоих каналах отличаются незначительно. Отсутствие в data sheets на микросхему НМС646LP2 принципиальной схемы не позволяет определенно сказать является она симметричной или асимметричной. При этом показатель линейности $IP3$ в значительной степени зависит от температуры окружающей среды (рис. 25а) и на него мало влияет величина управляющего напряжения (рис. 25б). Компрессионные мощности $P_{1дБ}$ и $P_{0,1дБ}$ от температуры и управляющего напряжения практически не зависят (рис. 25в, г).

Среди SPDT-переключателей, изготовленных по арсенид-галлиевой технологии, есть и более высокочастотные изделия (табл. 10), которые также могут

использоваться в качестве приемопередающих переключателей. Однако максимальная коммутируемая мощность в них не превышает 33 дБм (модель TGS4310-SM, компания Qorvo) и с увеличением верхней границы частотного диапазона падает до 8–25 дБм (модель НМС986А, компания Analog Devices). Снижение компрессионных мощностей $P_{0,1дБ}$ и $P_{1дБ}$ с ростом частоты (рис. 26) также является характерной особенностью, присущей многим переключателям. Компрессионные мощности падают и с увеличением мощности, подаваемой на вход переключателя (рис. 27а). При этом мощность рассеяния $P_{расс}$ с увеличением входной мощности возрастает весьма существенно (рис. 27б).

Высокое значение развязки (50 дБ) в микросхеме CGY2890SUN/CI достигается за счет использования восьми переключателей (рис. 28), положение которых

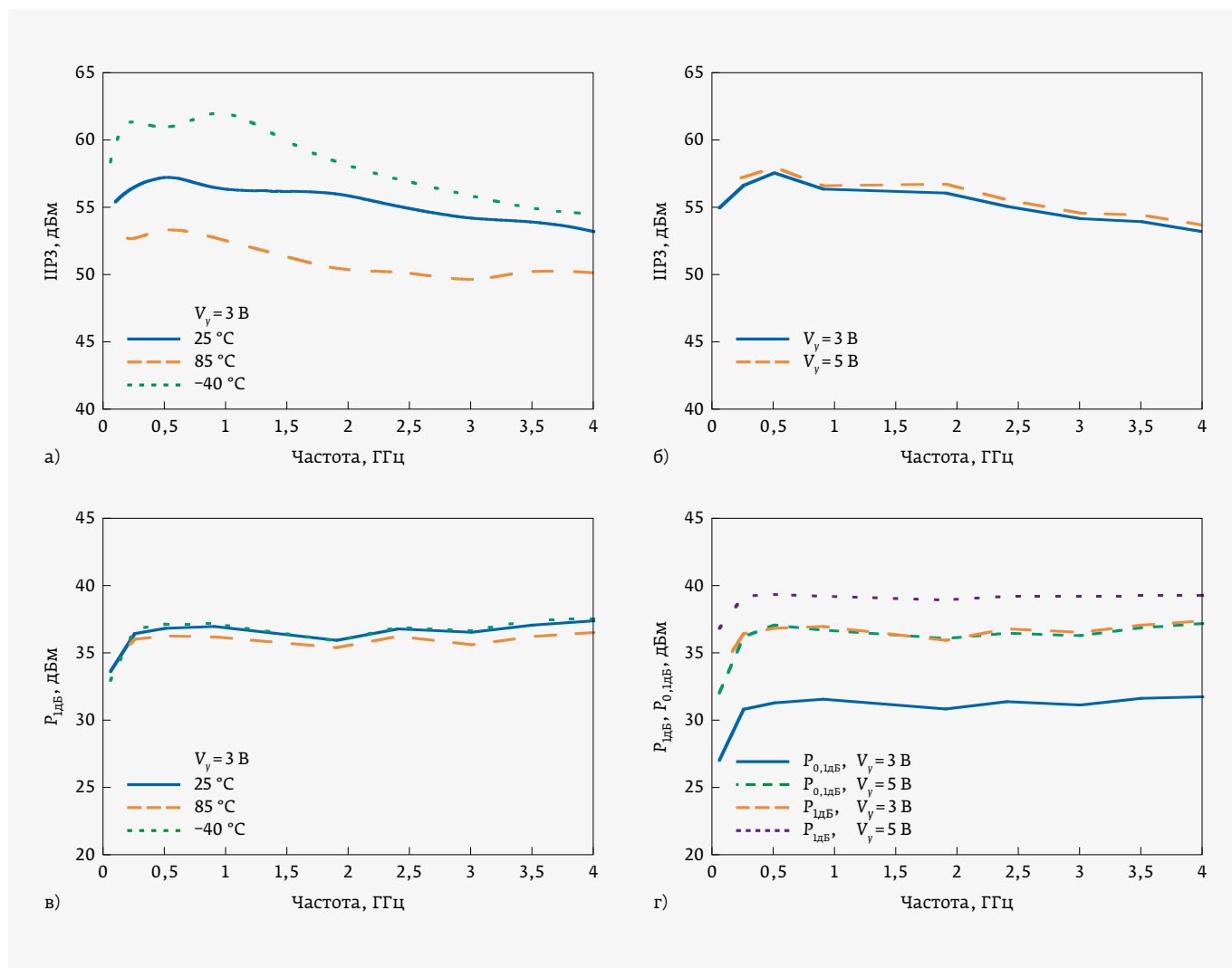


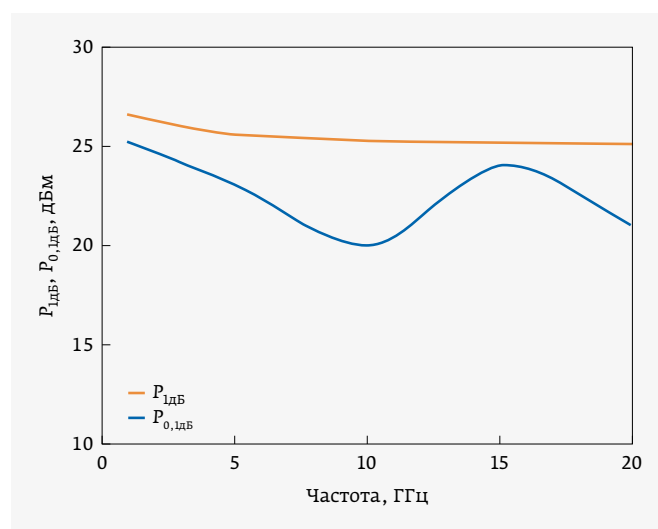
Рис. 25. Характеристики симметричного SPDT-переключателя HMC544 (компания Analog Devices), выполненного по технологии GaAs: а – $IP3(f)$ при вариациях температуры; б – $IP3(f)$ при вариациях управляющего напряжения; в – $P_{лдб}(f)$ при вариациях температуры; г – $P_{0,лдб}(f)$; $P_{лдб}(f)$ при вариациях управляющего напряжения

обеспечивает минимальное просачивание мощности между каналами.

Принципиальные схемы (рис. 29а–г) арсенид-галлиевых SPDT-переключателей не отличаются разнообразием. Из пассивных компонентов в них используются в основном резисторы (рис. 29а, б) и иногда, дополнительно, катушки индуктивности (рис. 29в) и конденсаторы (рис. 29г).

Переключатели, выполненные по арсенид-галлиевым технологиям, выпускаются и в модульном исполнении (модели HMC-C058 и HMC-C011 компании Analog Devices). Компрессионные мощности в этих моделях весьма

Рис. 26. Компрессионные мощности $P_{лдб}(f)$ и $P_{0,лдб}(f)$ в микросхеме MMS006PP3 (Microsemi)



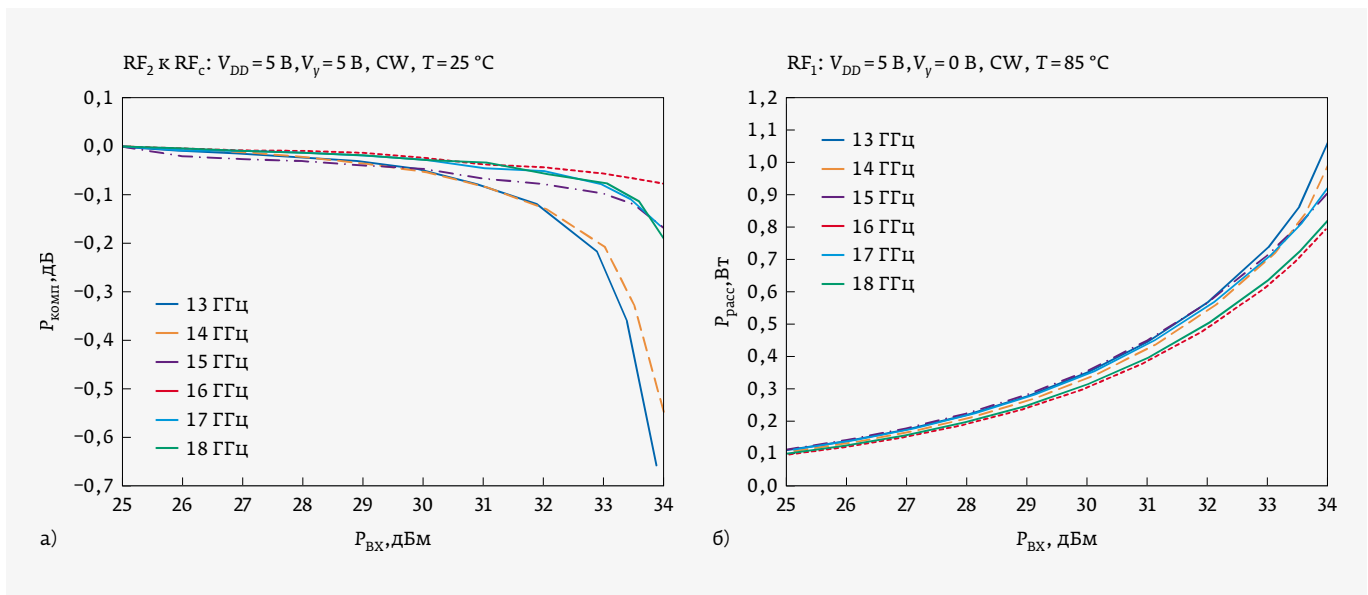


Рис. 27. Мощностные характеристики микросхемы TGS4310-SM компании Qorvo: а - $P_{\text{комп}}(P_{\text{вх}})$ в канале RF₂-RF_c; б - мощность рассеяния $P_{\text{расс}}(P_{\text{вх}})$ в передающем канале RF₁-RF_c

Таблица 10. Широкополосные арсенид-галлиевые интегральные SPDT-переключатели

Компания	Модель	Диапазон частот, ГГц	$P_{\text{вх}}, \text{дБм}$	$IL, \text{дБ}$	$I_{\text{so}}, \text{дБ}$	$T_r, \text{нс}$	$T_f, \text{нс}$	$T_{\text{он}}, \text{нс}$	$T_{\text{off}}, \text{нс}$	$T_{\text{п}}, \text{нс}$	$T_{\text{set}}^*, \text{нс}$
OMMIC	CGY2890SUN/C1	6,0-18,0	-	1,5	>50	-	-	-	-	-	-
Mimix Broadband	CSW0118-BD	0,5-18,0	20-21,5 ($P_{1\text{дБ}}$)	1,4-2,7	40-23	2	2	-	-	-	-
Qorvo	TGS4310-SM	13,0-19,0	33 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	<1,7	>20	-	-	-	20	-	-
Custom MMIC	CMD195	0-20,0	25 ($P_{1\text{дБ}}$)	2,0	41	1,8	1,8	11	4	-	-
Filtron	FMS2027	0-20,0	23-21 ($P_{1\text{дБ}}$)	0,85-2,10	42	17	42	27	53	-	-
SuperApex	SAC3206Q3	0-20,0	30 ($P_{1\text{дБ}}$)	2,3	45	-	-	-	-	15	-
Microsemi	MMS006PP3	0-20,0	25 ($P_{1\text{дБ}}$)	2,0	40	10	10	10	10	-	-
Centellax	USD30SDC	0-30,0	13,5 ($P_{1\text{дБ}}$)	3,0	37	-	-	-	-	10	-
MACOM	MASW-011105	17,7-31,0	24 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	1,6	30	6	6	12	12	-	60
Custom MMIC	CMD215	0-40,0	17 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	2,3	36	-	-	-	-	4	-
Analog Devices	HMC986A	0,1-50,0	8-25 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	2,0-2,3	36-30	2	2	11	11	-	-

* T_{set} - время установления процесса.

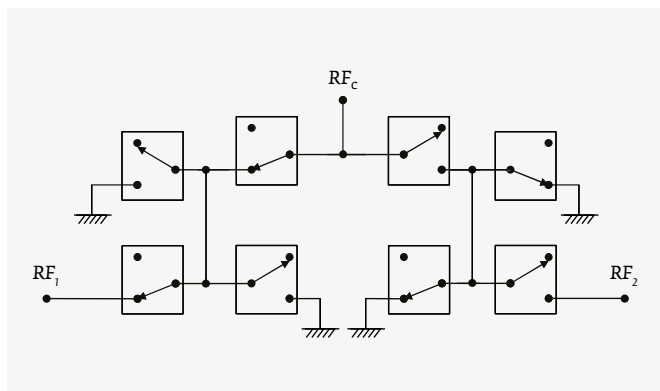


Рис. 28. Упрощенная схема переключателя CGY2890SUN/C1 (компания OMMIC), обеспечивающая высокий уровень развязки

малы: 27 и 23 дБм соответственно. Отличительной особенностью модульных изделий являются малые времена коммутации T_r и T_f , которые в этих переключателях равны 3,0 и 1,3 нс соответственно. Внешне эти модульные изделия ничем не отличаются от их аналогов, реализованных на pin-диодах.

ЛИТЕРАТУРА

- Zhu H. R., Ning X. Y., Huang Z. X. et al. Miniaturized, Ultra-Wideband and High Isolation Single Pole Double Throw Switch by Using I-Type Topology in GaAs pHEMT Technology // IEEE Trans on Circuits and Systems. 2021. V. 68. No. 1. PP. 191–195.
- Kameche M., Drozdovski N. V. GaAs-, InP- and GaN HEMT-based Microwave Control Devices: What is Best and Why // Microwave Journal. 2005. May. PP. 164–180.

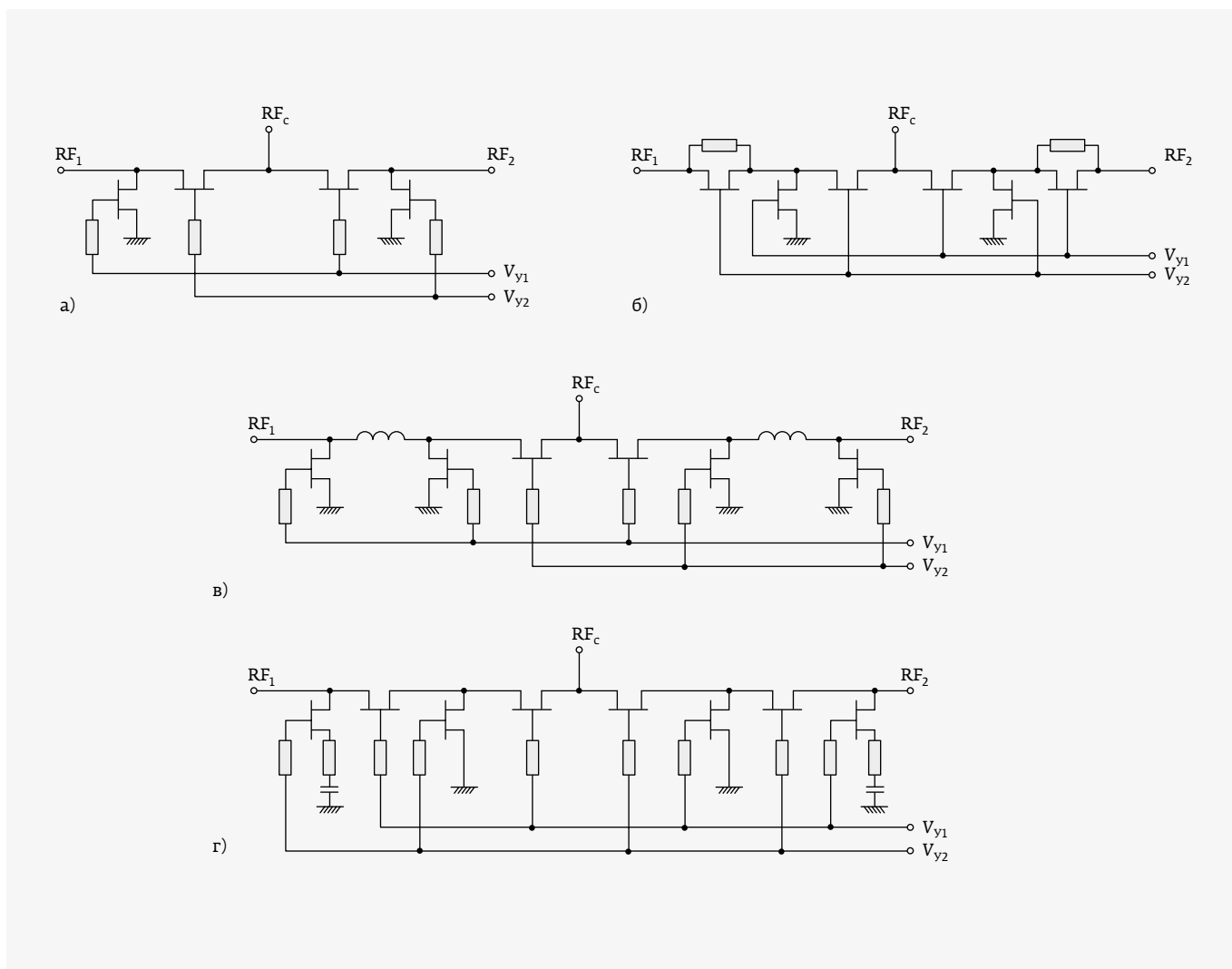


Рис. 29. Практические схемы интегральных SPDT-переключателей на арсенид-галлиевых полевых транзисторах: а - CHS5105-QAG (компания UMS); б - USD30SDC (компания Centellax); в - CSW0118-BD (компания Mimix Broadband); г - KCB820, KCB821, KCB822 (компания KCB Solutions)