

Твердотельные СВЧ-переключатели средней и большой мощности

Часть 3

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

УДК 621.389 | ВАК 05.27.01

В первых двух частях статьи, опубликованных в восьмом и девятом номерах журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2019 год, рассматривались особенности проектирования различных твердотельных СВЧ-переключателей средней и большой мощности и мощные рpn-диодные переключатели. В данном номере речь пойдет о нескольких других типах СВЧ-переключателей, выпускаемых рядом производителей.

ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ НА АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Основными производителями интегральных переключателей на основе арсенид-галлиевых полевых транзисторов являются компании: Analog Devices, Qorvo, MACOM, Skyworks Solutions, CEL, UMS, Filtronic, Mini-Circuits, Eudyna, ANADIGICS (табл. 8). Мощные переключатели на полевых транзисторах в основном используются в мобильных телефонах на частоте до 6 ГГц, и лишь в некоторых моделях максимальная рабочая частота достигает 20 ГГц. Этим переключателям свойственны очень низкие токи управления, что и делает их весьма привлекательными в задачах мобильной телефонии. К недостаткам переключателей этого вида можно отнести низкую стойкость к статическому электричеству и относительно высокую стоимость, что ограничивает их использование в коммерческих применениях.

Простейшие переключатели обычно реализуются на четырех полевых транзисторах (рис. 26). Для достижения повышенной коммутируемой мощности могут применяться рассмотренные ранее решения: метод трансформации импеданса, «этажерочное» включение транзисторов и метод резонансных звеньев.

Приведенные в технических описаниях зависимости включают в качестве параметра значения температуры окружающей среды из области допустимых значений. Так, на основании зависимостей $IL(f)$ и $Iso(f)$ на рис. 27 можно сделать вывод о том, что, например, в переключателе QPC6222, так же как и в рpn-диодных переключателях, вносимые потери весьма чувствительны к вариациям температуры окружающей среды, а развязка от них практически не зависит. Аналогичные зависимости для

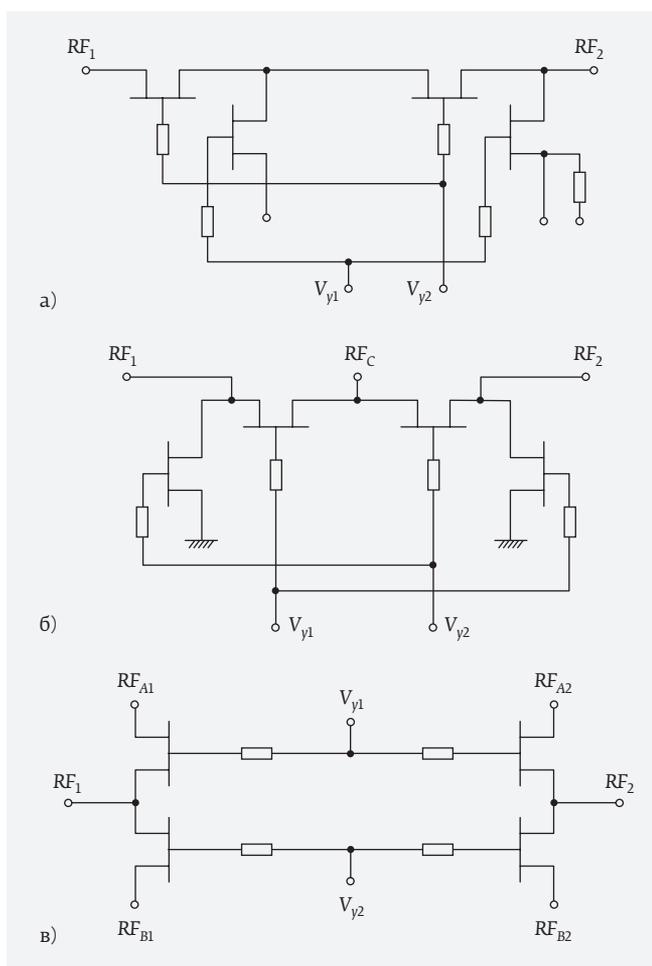


Рис. 26. Упрощенные принципиальные схемы СВЧ-переключателей на арсенид-галлиевых полевых транзисторах: а – модель MASW6020G (SPST), компания MACOM; б – модель CHS5104-99F (SPDT), компания UMS; в – модель MASW2040 (DPDT), компания MACOM. V_{g1} , V_{g2} – управляющие напряжения

¹ ООО «Радиокомп», генеральный директор.

² МТУСИ, доцент.

³ АО «Микро-Вис», заместитель генерального директора по науке.

Таблица 8. Интегральные переключатели на арсенид-галлиевых полевых транзисторах

Компания	Модель	Тип	Диапазон частот, ГГц	$P_{\text{доп}}$, дБм	IL, дБ	Iso, дБ	$T_{\text{п,нс}}$
Analog Devices	HMC646LP2	SPDT	0,1-2,1	44-46 ($P_{1\text{дБ}}$)	0,3-1,3	38-17	320
ANADIGICS	AWS5532R	SPDT	0,5-2,5	15 Вт	0,3-0,4	30-27	-
Qorvo	TQP4M3007	SP3T	0,5-2,5	38	0,45-0,55	28-20	1000
Filtronic	FMS2016QFN	SP4T	0,5-2,5	<38	<0,55-0,65	34-30	<1000
Qorvo	QPC6082	SP8T	0,7-2,7	38,5	0,4-0,76	31	-
Filtronic	FMS2007QFN	DPDT	0,5-3,0	38	0,6	23	20
Mini-Circuits	VSW2-33-10W+	SPDT	0,05-3,0	22-17 Вт	0,4-0,6	42-18	306
Eudyna	HS/M69DP4T320	DP4T	0,1-3,5	36	0,65-0,75	23-20	-
MACOM	MASW-008955	SP3T	0-3,5	35-31	0,55-0,60	22-20	30
Eudyna	FMM5317ZW	SPDT	0,5-4,0	35	0,55-0,70	25-20	110
Analog Devices	HMC1055	SPST	0,5-4,0	34	0,7-1,4	36-28	50
MACOM	MASW-SS0184	DPDT	0-4,0	37	0,6-1,2	46,5-27,0	90
KCB Solutions	KCB827H	SP4T	0-4,0	30 ($P_{1\text{дБ}}$)	1,2	50	-
UMS	CHS5104-QAG	SPDT	0-4,0	30-33	0,3-0,7	45-35	10
CEL	CG2185X2	SPDT	2,0-6,0	33	0,35-0,40	28-26	50
Skyworks Solutions	SKY13381-374LF	DPDT	0,1-6,0	39	0,5-1,4	31-14	55
CEL	CG2409X3	SPDT	0,05-6,0	38	0,3-6,0	32-28	100
MACOM	MASW6020G	SPST	0-6,0	34	0,8-2,5	30-11	10
KCB Solutions	KCB823H	SPDT	0-6,0	30 ($P_{1\text{дБ}}$)	0,75	55	-
Isolink	ISO13316	SPST	0-6,0	-	1,1	45	5
Custom MMIC	CMD273P3	DPDT	0-12,0	27	1,7	42	12
Mimix Broadband	CSW0118-BD	SPDT	0,5-18,0	20	1,8	35	2
Custom MMIC	CMD235C4	SP5T	0-18,0	27	2,5	44	60
Qorvo	TGS4310	SPDT	13,0-19,0	38	<1,7	>20	-
UMS	CHS5100	SPDT	0,5-20,0	30	1,15-2,10	53-30	-
MACOM	MASW-011107-DIE	SPDT	0-26,5	27 ($P_{1\text{дБ}}$)	0,7-1,5	53-41	20
MACOM	MASW-011102	SPDT	0-30,0	23 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	0,7-1,8	64-40	50
MACOM	MASW-011105	SPDT	17,7-31,0	24 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	1,6	30	60
Chengdu Ganide Technology	GMM-0146	SPDT	25,0-40,0	30	1,6	> 27	20
Aelius	ALS8007	SPDT	16,0-40,0	30	3,5	37	-
Custom MMIC	CMD215	SPDT	0-40,0	27	2,3	36	4
Analog Devices	HMC986	SPDT	0,1-50,0	25	1,7-2,2	36-28	<10

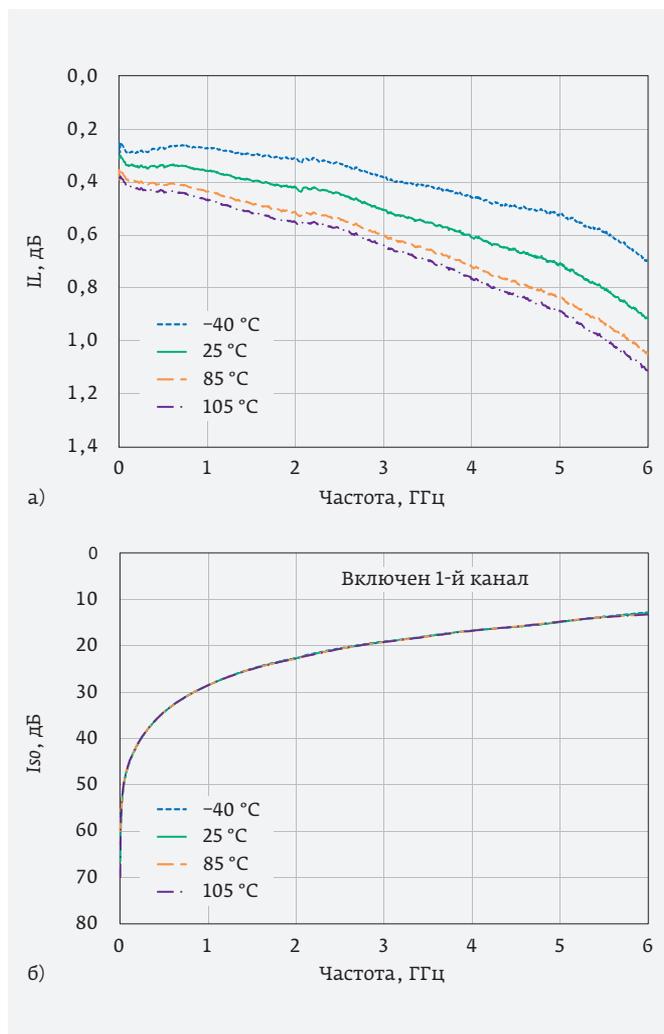


Рис. 27. Зависимости IL и Iso от частоты для нескольких значений температуры окружающей среды. Модель QPC6222, компания Qorvo

приемо-передающих переключателей HMC546LP2E представлены на рис. 28. Вносимые потери в передающем канале несколько меньше вносимых потерь в приемном канале (рис. 28а, б), а уровень развязки в приемном канале существенно превышает этот показатель в передающем канале (рис. 28в).

В DPDT-переключателях (рис. 29) характер этих зависимостей становится другим, вносимые потери и развязка зависят от пути прохождения сигнала: Ант1 – Тх, Ант1 – Rx, Ант2 – Тх, Ант2 – Rx (рис. 30).

В мощных переключателях вносимые потери и развязка зависят от большого числа факторов: уровня входной мощности, пути прохождения сигнала, величины управляющего напряжения, температуры окружающей среды и частоты (рис. 31). Анализируя зависимости $IL(P_{вх})$ на рис. 31а, б, можно сделать вывод о том, что резкое увеличение вносимых потерь с ростом управляющего

напряжения наступает при более высоких значениях входной мощности.

Линейность является важной характеристикой мощных переключателей. Чаще всего ее оценивают, анализируя зависимости $P_{0,1дБ}$, $P_{1дБ}$, ИРЗ и уровней 2-й и 3-й гармоник на выходе переключателя от частоты f , входной мощности $P_{вх}$, питающего напряжения U_n . Зависимости $P_{0,1дБ}(f)$ и $P_{1дБ}(f)$ при различных напряжениях питания показывают,

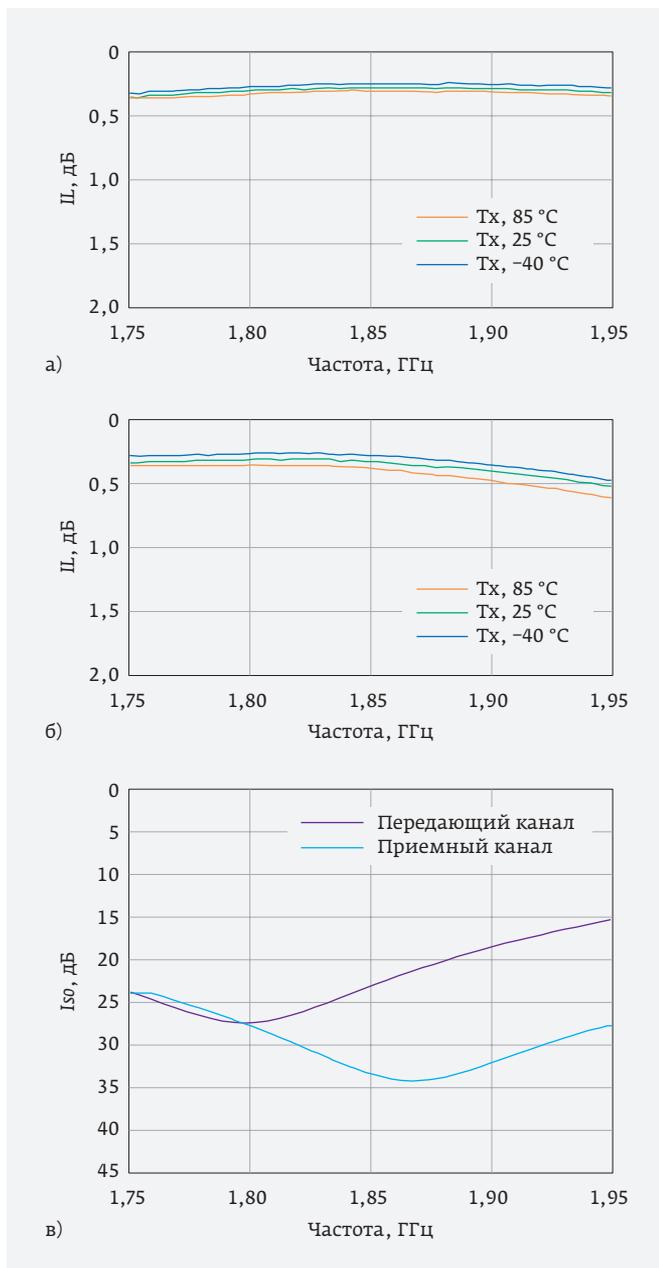


Рис. 28. Вносимые потери IL в передающем (а) и приемном (б) каналах при различных значениях температуры окружающей среды и развязка Iso в передающем и приемном каналах (в). Модель HMC546LP2E, компания Analog Devices

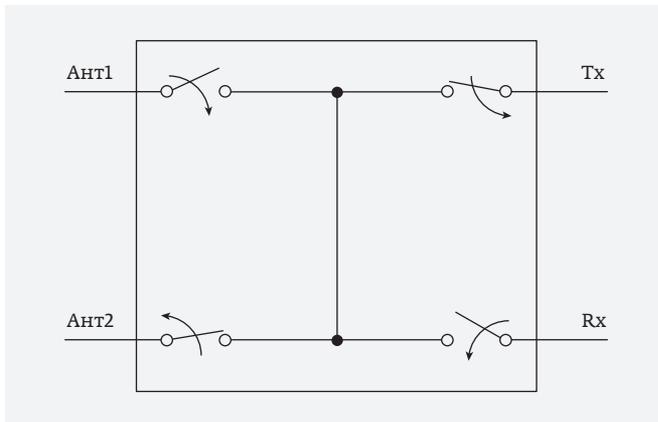


Рис. 29. Упрощенная структура DPDT-переключателя, обеспечивающего подключение передатчика Tx или приемника Rx к одной из двух антенн Ант1 и Ант2. Модель НМС393MS8G, компания Analog Devices

что значения $P_{0,1дБ}$ и $P_{1дБ}$ с увеличением напряжения питания существенно возрастают (рис. 32). При этом ИРЗ мало зависит от частоты и температуры окружающей среды (рис. 33а), но очень сильно меняется в зависимости от мощности двухтонового колебания и питающего напряжения (рис. 33б). Важно также отметить, что значения ИРЗ в приемном и передающем каналах ассиметричных переключателей существенно (на 30 дБм и более) различаются (рис. 33в).

О линейности мощных переключателей можно также судить по уровню появляющихся на их выходе гармонических составляющих (рис. 34). С ростом входной мощности эти составляющие увеличиваются.

Большая коммутируемая мощность требуется не только в SPST-, SPDT- и DPDT-переключателях, но и в многопозиционных изделиях (рис. 35), обеспечивающих связь антенны с двумя передатчиками и четырьмя приемниками (микросхема FMS2028, компания Filtronic). Характеристики передающих и приемных каналов, как и в случае приемо-передающих SPDT-переключателей, существенно различаются. Так, вносимые потери в передающем

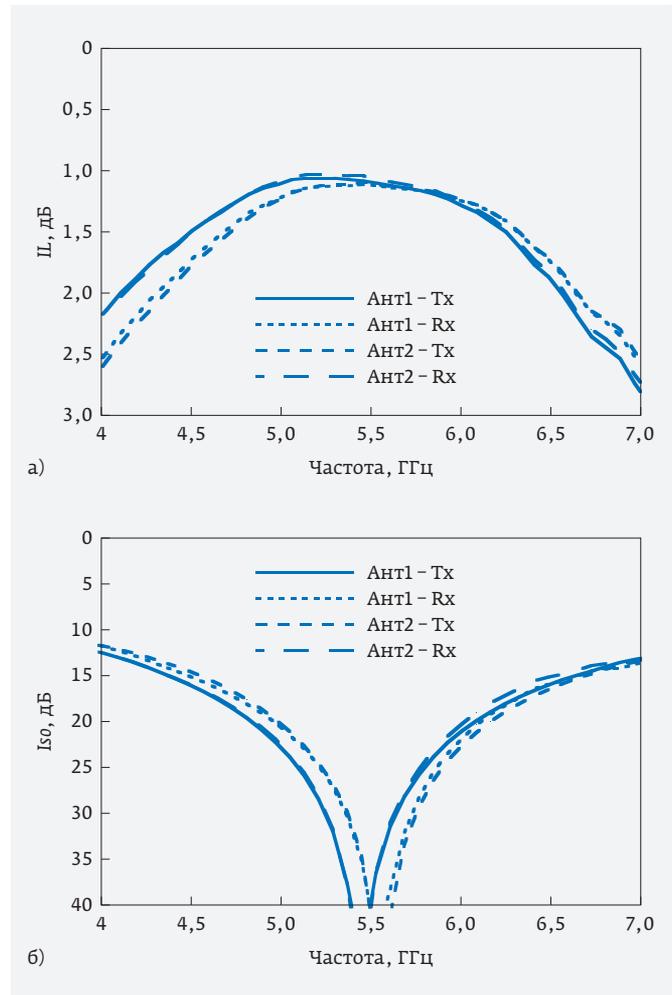


Рис. 30. Зависимости IL и Iso от частоты в DPDT-переключателе НМС393MS8G

и приемном каналах равны 0,40–0,41 дБ и 0,73–1,00 дБ соответственно, развязка между передающими каналами равна 28,5–21,0 дБ, между приемными каналами – 28–22 дБ, между передающими и приемными каналами – 47–42 дБ. При этом уровни 2-й и 3-й гармоник равны –80 дБн и –68...–72 дБн соответственно. Различные

РАЗРАБОТКА
ПРОИЗВОДСТВО
ИСПЫТАНИЯ
ПОСТАВКА

РАДИОКОМП

Измерительное оборудование AnaPico

www.radiocomp.ru

Анализаторы фазовых шумов
PNA7 / PNA20 / PNA40

- Измерение уровня фазового шума
- Непосредственный доступ к двухканальному БПФ-анализатору 100 МГц
- Измерение переходных процессов
- Стендовое испытание генераторов: контроль перестройки, смещения частоты, измерение ФШ

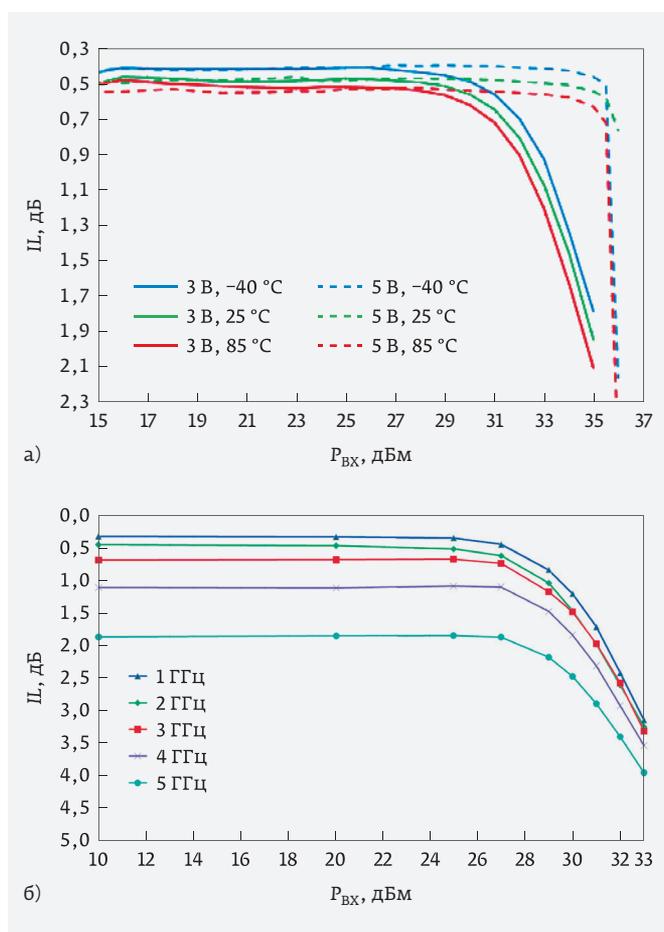


Рис. 31. Зависимости вносимых потерь IL от уровня входной мощности $P_{вх}$: а – при управляющих напряжениях 3 и 5 В и температурах окружающей среды -40 , 25 , 85 °С (модель RFSW6223, компания Qorvo); б – при входных частотах 1, 2, 3, 4 и 5 ГГц (модель CHS5104-QAG, компания UMS)

топологии многопозиционных переключателей на полевых транзисторах рассмотрены в [18].

Важной характеристикой мощных переключателей является также рассеиваемая в них мощность $P_{расс}$, которая определяется рядом факторов (в скобках приведены значения для интегрального переключателя CHS5105-QAG компании UMS):

- рекомендуемая максимальная температура р-п-перехода (168 °С);
- максимально возможная температура р-п-перехода (175 °С);
- тепловое сопротивление между р-п-переходом и корпусом (<30 °С/Вт);
- минимальная рабочая температура корпуса (-40 °С);
- максимальная рабочая температура корпуса (85 °С);
- минимальная температура хранения (-55 °С);
- максимальная температура хранения (150 °С).

Максимальная рассеиваемая мощность в переключателе CHS5105-QAG (рис. 36) существенно зависит от температуры корпуса, оставаясь постоянной (2,5 Вт) до температуры корпуса 85 °С и снижается до 0,5 Вт при температуре корпуса 150 °С. Заметим, что в переключателе CHS5105-QAG допустимая входная мощность (27–33 дБм) и мощность рассеивания сравнимы. В рп-диодных переключателях рассеиваемая мощность составляет обычно 20–30% от допустимой входной мощности.

Несмотря на большие коммутируемые мощности (33–38 дБм) некоторые переключатели имеют весьма малые размеры. Так, разработанные компанией CEL корпуса под разные виды монтажа являются, по-видимому, наименьшими из всех выпускаемых переключателей в корпусном исполнении. Например, корпус микросхемы CG2409M2 компании CEL имеет размеры $2,0 \times 1,25 \times 0,9$ мм и обеспечивает входную мощность до 38 дБм, а корпус микросхемы CG2185X2 той же компании размерами $1,0 \times 1,0 \times 0,37$ мм выдерживает входную мощность до 33 дБм.

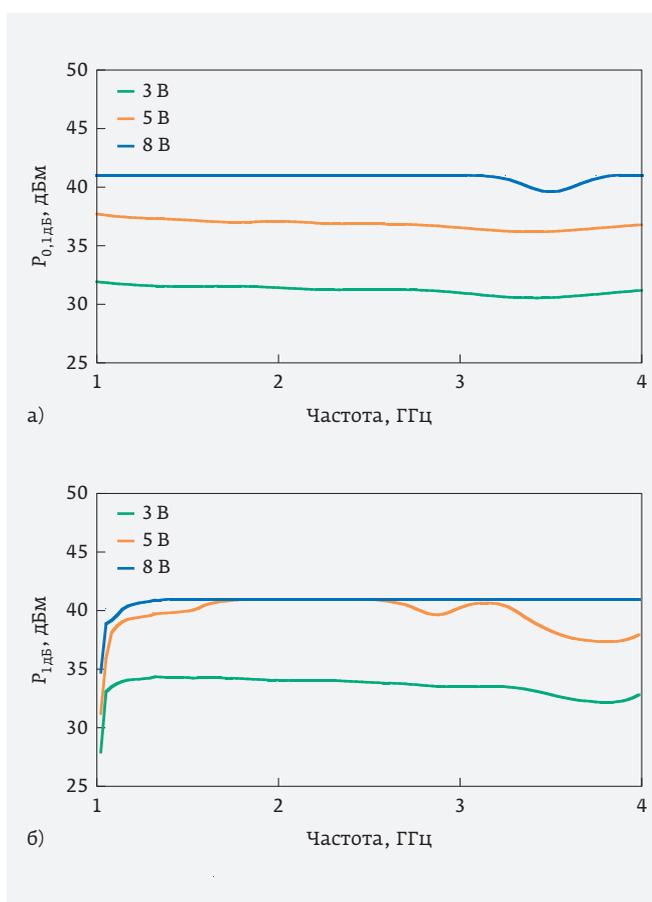


Рис. 32. Зависимости мощностей $P_{0,1дБ}$ (а) и $P_{1дБ}$ (б) от частоты (модель HMC784AMS8GE, компания Analog Devices)

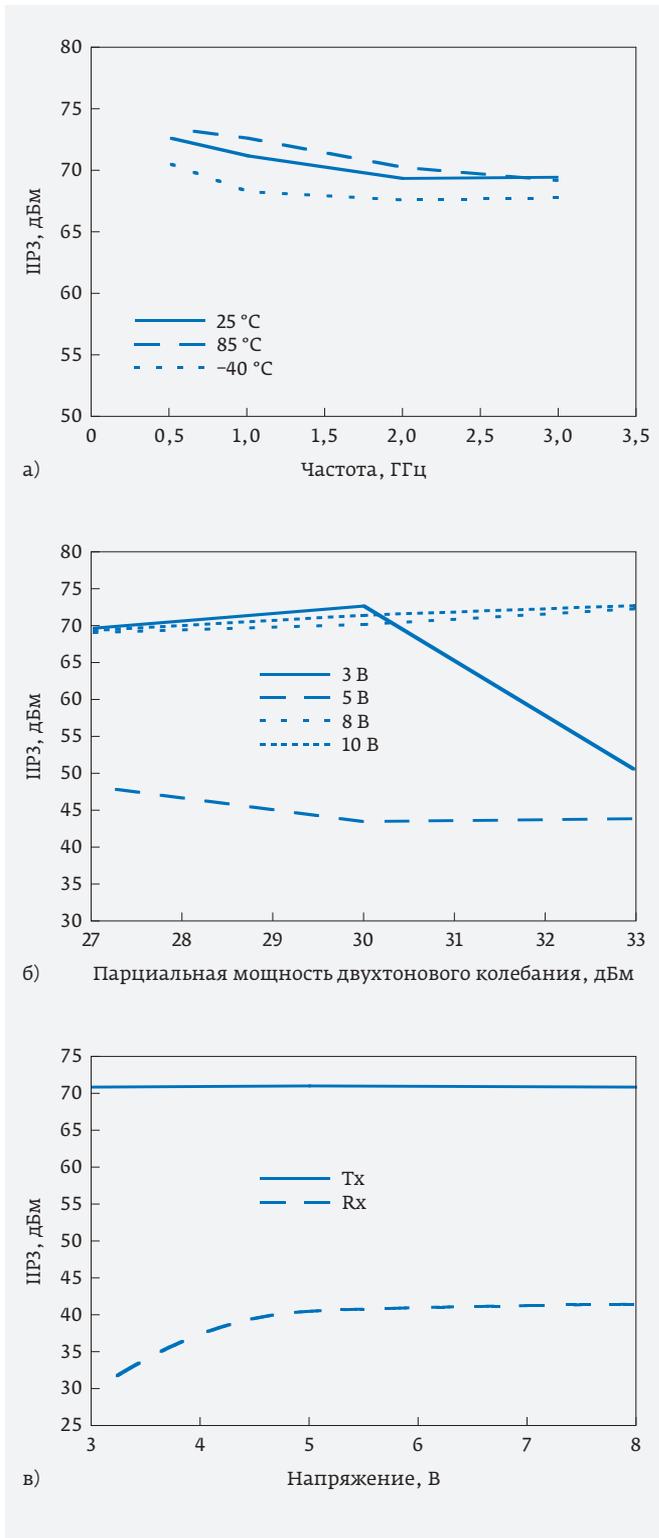


Рис. 33. Зависимости IP3 от частоты при различных температурах (а), от мощности двухтонового колебания при различных значениях напряжения питания (б), от напряжения питания в передающем и приемном каналах (в). Модели HMC484MS8G (а, б) и HMC646LP2 (в) компании Analog Devices

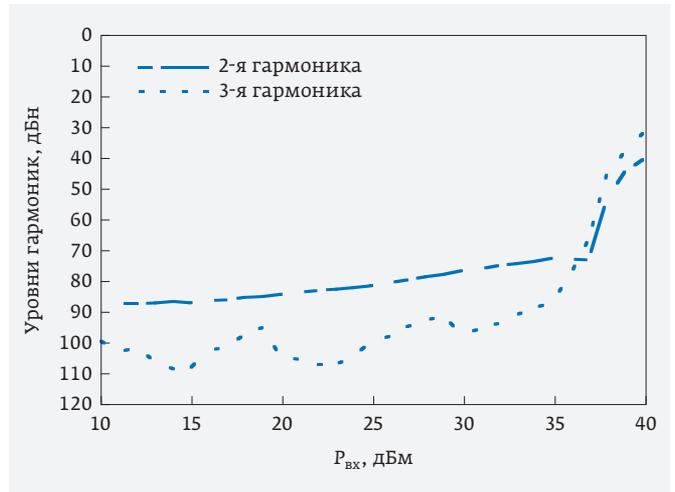


Рис. 34. Зависимости уровней 2-й и 3-й гармоник от входной мощности (модель HMC484MS8G, компания Analog Devices). $f=900$ МГц, $U_{п}=5$ В

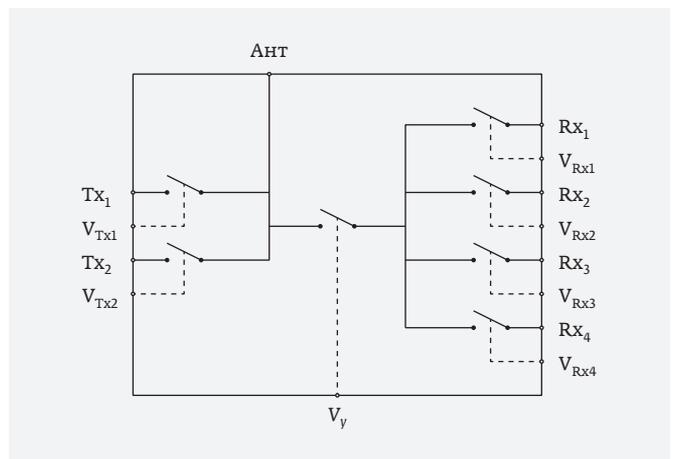


Рис. 35. Многопозиционный переключатель, обеспечивающий связь антенны Ант с двумя передатчиками Tx и четырьмя приемниками Rx (модель FMS2029, компания Filtronic)

ООО
СМП

ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН

www.SMD.ru

электронные КОМПОНЕНТЫ

Для поверхностного монтажа

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Низкоомные резисторы типоразмеров 0402 и 0603
- Керамические конденсаторы большой емкости

Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32; e-mail: sale@smd.ru
Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780

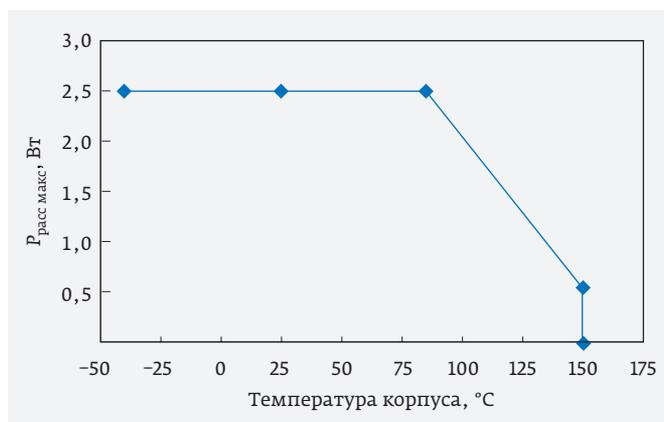


Рис. 36. Зависимость максимальной рассеиваемой мощности от температуры корпуса (модель CHS5105-QAG, компания UMS)

Наряду с переключателями, рассчитанными на достаточно большие мощности в частотном диапазоне до 6 ГГц, в последнее время появляется все больше арсенид-галлиевых изделий, которые работают на частотах до 10–40 ГГц (см. табл. 8). Наибольших успехов в этой области достигли компании Mimix Broadband, Chengdu Ganide Technology, Filtronic, Qorvo, MACOM, Analog Devices и Custom MMIC.

Подобные СВЧ-переключатели могут входить также в состав более сложных изделий. Так, интегральный приемо-передающий модуль размером 3×4 мм, изготовленный по технологии GaAs pHEMT, является элементом АФАР, работающей в диапазоне 14,5–17,0 ГГц. Он содержит 5-Вт усилитель, МШУ и два переключателя, обеспечивающих попеременное подключение к антенне передающего и приемного каналов [19].

Совсем недавно компания Teledyne Relays выпустила интегральный SPDT-переключатель InP1012-40, в котором вместо арсенида галлия используется фосфид индия (InP HEMT). В этом переключателе, рассчитанном на диапазон частот 0–40 ГГц, обеспечиваются вносимые потери 1,2–2,9 дБ, развязка 69–17 дБ, время переключения менее

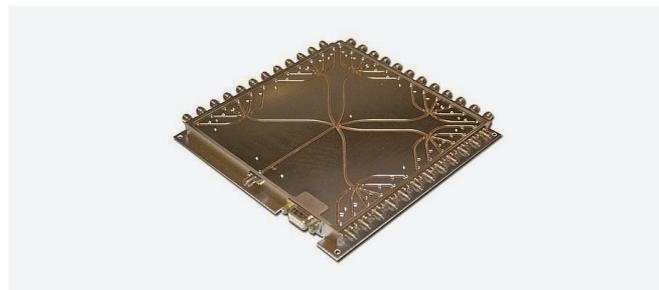


Рис. 37. Многопозиционный (SP36T) переключатель GG-75431-64 на полевых транзисторах компании Microsemi

100 нс и мощность $P_{0,1\text{дБ}} = 14,9$ дБм на частоте 18 ГГц. Изделие выполнено во flip-chip корпусе размером 3×3×1 мм и обеспечивает работоспособность в диапазоне температур –65...125 °C при наличии ударных, вибрационных и радиационных (до 100 крад) воздействий, что делает его весьма перспективным для военных и космических применений.

Стоит также отметить публикацию [20], в которой сообщается о создании трех СВЧ-переключателей по технологии mHEMT (metamorphic high-electron-mobility transistor) для диапазонов частот 52–168, 75–170 и 122–330 ГГц с вносимыми потерями 3,1; 4,5; 2,2 дБ и развязками 42,1; 56,4; 17,4 дБ соответственно. Значения $P_{1\text{дБ}}$ для первых двух разработок составили соответственно 19 и 14 дБм. Расчетные значения FOM (Figure of Merit) для этих изделий равны 796, 792 и 624 ГГц соответственно.

Все промышленно выпускаемые переключатели проходят испытания по утвержденным или стандартным методикам. Виды испытаний и порядок их следования определяются стандартами, которые существенно различаются для коммерческих, промышленных, военных и космических исполнений. Например, виды испытаний и их последовательность, используемые при тестировании переключателя VSW2-33-10W+ (компания Mini-Circuits), регламентируются стандартом IPC/JEDEC J-STD-020D. Испытания проводятся с применением тестовой платы ТВ-530+.

Таблица 9. Модульные переключатели на арсенид-галлиевых полевых транзисторах

Компания	Модель	Тип	Диапазон частот, ГГц	$P_{\text{доп}}$, дБм	IL , дБ	I_{iso} , дБ	$T_{\text{п}}$, нс
R&K	R&K-SW050-0S	SPDT	0,05–6,0	33 ($P_{1\text{дБ}}$)	1,5–2,5	>18	<100
HXI	10A4BU	SPDT	0–4,0	4 Вт	4	120	–
Microsemi	GG-75431-64	SP36T	0,1–20,0	1 Вт	<7	>70	100
R&K	R&K-SW060-0S	SP4T	0,1–3,5	24 ($P_{1\text{дБ}}$)	1,5–2,5	>18	<200
R&K	R&K-SW070-0S	SP8T	0,1–2,5	23 ($P_{1\text{дБ}}$)	2,0–3,5	>20	<200

Таблица 10. Нитрид-галлиевые переключатели в интегральном исполнении

Компания	Модель	Тип	Диапазон частот, ГГц	$P_{доп}$, дБм	IL, дБ	ISO, дБ	$T_{п}$, нс
Bowei Integrated Circuits	BW1044	SPDT	0-8,0	10 ($P_{0,1дБ}$)	<0,9	>50	-
Bowei Integrated Circuits	BW1048	SPDT	8,0-12,0	20 ($P_{0,1дБ}$)	0,7	37	-
Bowei Integrated Circuits	BW135	SPDT	12,0-18,0	10 ($P_{0,1дБ}$)	0,85	36	-
Chengdu Ganide Technology	GNM4109	SPDT	0-2,0	49,5 дБм	0,5	37	10
Chengdu Ganide Technology	GNM4134	SPDT	0-6,0	46 дБм	0,25	40	40
Chengdu Ganide Technology	GNM4131	SPDT	0-12,0	41,5 дБм	1,0	30	20
Chengdu Ganide Technology	GNM4132	SPDT	0-18,0	40 дБм	1,5	25	40
MEC	MECGaNTRSX	SPDT T/R	8,0-11,5	40, 20 ($P_{1дБ}$)	<1,0	>30,0	-
MEC	MECGaNWBSPDT	SPDT	0-20,0	<40, 33 ($P_{1дБ}$)	1,4-2,0	45	-
Qorvo	QPC1005	SPDT	0,15-2,80	60, 50 ($P_{0,1дБ}$)	0,3-0,7	57-29	30
Qorvo	QPC1006	SP3T	0,15-2,80	60, 50 ($P_{0,1дБ}$)	0,3-1,0	57-30	50
Qorvo	TGS2354	SPDT	0,5-6,0	40	0,5-0,8	>26	<50
Qorvo	TGS2355-SM	SPDT	0,5-6,0	62,5 ($P_{0,1дБ}$)	0,7-1,0	40	-
Qorvo	RFSW2100D	SPDT	0,03-6,0	69, 55 ($P_{0,1дБ}$)	0,29-0,74	48,1-26,0	-
Qorvo	TGS2352-2	SPDT	0,1-12,0	25	<1	35	31
Qorvo	TGS2353-2	SPDT	0,5-18,0	12,5	<1,5	30	31
UMS	CHS7012-99F	SPDT	0-12,0	40,5 дБм ($P_{1дБ}$)	1,4	35	20
UMS	CHS8618-99F	SPDT	6,0-18,0	42 дБм ($P_{1дБ}$)	1,3	34	30
RFcore	RCS001070D50A	-	0,1-7,0	50 дБм ($P_{0,1дБ}$)	1,0	-	-
RFcore	RCS001080D46A	-	0,1-8,0	46 дБм ($P_{0,1дБ}$)	1,0	-	-

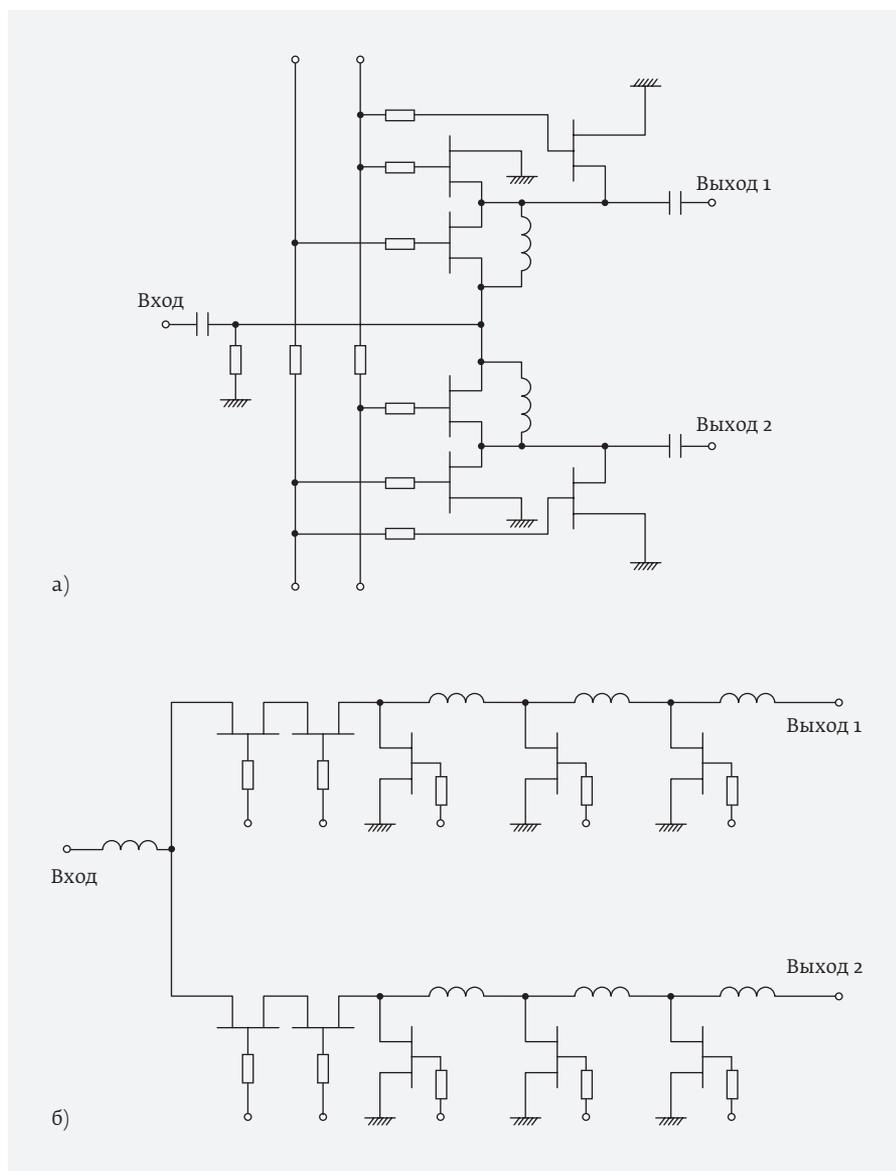


Рис. 38. Принципиальные схемы интегральных нитрид-галлиевых SPDT-переключателей: а – CHS8618-99F, компания UMS; б – компания Plextek RFI

Модульные переключатели на базе арсенид-галлиевых полевых транзисторов вследствие относительно невысоких значений допустимой входной мощности и не очень высоких рабочих частот по сравнению с модульными переключателями на рпн-диодах широкого распространения не получили (табл. 9).

Среди приведенных в табл. 9 моделей следует отметить SPDT-переключатель, обеспечивающий развязку 120 дБ. Столь большой уровень развязки достигается последовательным включением нескольких арсенид-галлиевых переключателей. Платой за такую высокую развязку являются повышенные вносимые потери (4 дБ).

Достоин упоминания также модульный многопозиционный (SP36T) переключатель на полевых транзисторах GG-75431-64 компании Microsemi (рис. 37). Предназначенный для маршрутизации входного сигнала по многим направлениям, этот широкополосный (100 МГц – 20 ГГц) переключатель с вносимыми потерями менее 7 дБ, развязкой более 70 дБ, допустимой мощностью 1 Вт, управляемый 6-разрядным цифровым драйвером, работает в диапазоне температур от –55 до 95 °С и удовлетворяет всем требованиям военного стандарта MIL-PRF-883. Опционально переключатель может поставляться в герметичном исполнении, отличаться от стандартной модели рабочим

Таблица 11. Параметры нитрид-галлиевого переключателя TGS2355-SM компании Qorvo при работе в непрерывном и импульсном режимах

Условия тестирования	Тепловое сопротивление, °С/Вт	Температура канала, °С	Наработка на отказ, ч
Непрерывный режим: $T_{\text{корп}} = 85 \text{ °С}$, $V_{Y1} = 0 \text{ В}$, $V_{Y2} = -40 \text{ В}$, $P_{\text{вх}} = 100 \text{ Вт}$, $P_{\text{расс}} = 29,3 \text{ Вт}$	4,37	213	$4,15 \cdot 10^6$
Импульсный режим: $T_{\text{корп}} = 85 \text{ °С}$, $V_{Y1} = 0 \text{ В}$, $V_{Y2} = -40 \text{ В}$, $P_{\text{вх}} = 100 \text{ Вт}$, $P_{\text{расс}} = 29,3 \text{ Вт}$, $T_{\text{и}} = 100 \text{ мкс}$, $Q = 10\%$	1,88	140	$5,43 \cdot 10^9$

Примечание: $T_{\text{корп}}$ – температура корпуса.

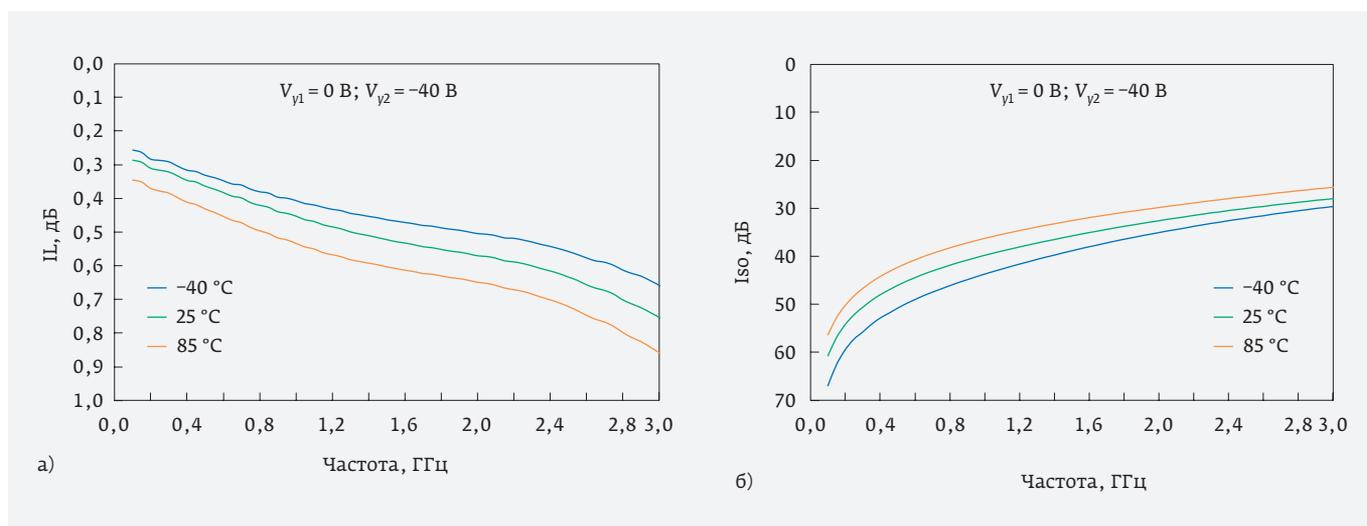


Рис. 39. Зависимости IL и Iso от частоты при температурах окружающей среды -40 , 25 и 85 °C (SPDT-переключатель QPC1005, компания Qorvo). Сигнал проходит со входа на выход 1

Таблица 12. Мощные нитрид-галлиевые переключатели в модульном исполнении

Компания	Модель	Тип	Диапазон частот, ГГц	$P_{\text{макс}}$, Вт	IL , дБ	Iso , дБ	$T_{\text{п}}$, мкс
CPI	VLSI 522A	SPDT	3,05–3,55	$<1000 (P_{\text{и}})$	$<1,0$	>25	5
RF-Lambda	RFSP2TR5M06G	SPDT	0,5–6,0	$100 (P_{\text{и}})$	1,1–1,6	48–38	0,1
RF-Lambda	RFSP4TR5M06G	SP4T	0,5–6,0	$100 (P_{\text{1дБ}})$	2,0	80	0,05
RF-Lambda	RFSP4TRDC18G	SP4T	0–18,0	$10 (P_{\text{1дБ}})$	1,9–3,6	40–25	0,1
RF-Lambda	RFSP8TR5M06G	SP8T	0–6,0	$100 (P_{\text{и}})$	2,2–2,8	45–38	0,1
RF-Lambda	RFSP8TRDC18G	SP8T	0–18,0	$10 (P_{\text{1дБ}})$	4,0	90	0,018
RFcore	RSW002050H50F	SPDT	0,02–0,5	$50–100 (P_{\text{доп}})$	0,4–0,2	80	3
RFcore	RSW1020H54D	SPDT	1,0–2,0	$200 (P_{\text{ср}})$	0,5	>40	2
RFcore	RSW0525H50F	SPDT	0,5–2,5	$100 (P_{\text{доп}})$	0,5	70	3
RFcore	RSW2030H54D	SPDT	2,0–3,0	$200 (P_{\text{доп}})$	0,75	>30	2
RFcore	RSW1030H50F	SPDT	1,0–3,0	$<100 (P_{\text{ср}})$	0,65	60	3
Metropole Products	RS-104L	SP4T	0,291–0,318	$130 (P_{\text{доп}})$	$<1,0$	>30	400
PMI	P2T-6G18G-25-T-TFF-100W	SPDT	6,0–18,0	$100 (P_{\text{доп}})$	2,0	>25	1
PMI	P20T-7R2G8R3G-35-28-SFF	SP20T	7,2–8,3	$200 (P_{\text{доп}})$	<10	>35	20
CMC	-	SPDT	0,025–1,0	$200 (P_{\text{доп}})$	0,5	40	20
CMC	-	SPDT	1,0–2,9	$100 (P_{\text{доп}})$	0,5	25	5
CMC	-	SP3T	4,0–5,0	$100 (P_{\text{доп}})$	0,45	25	5

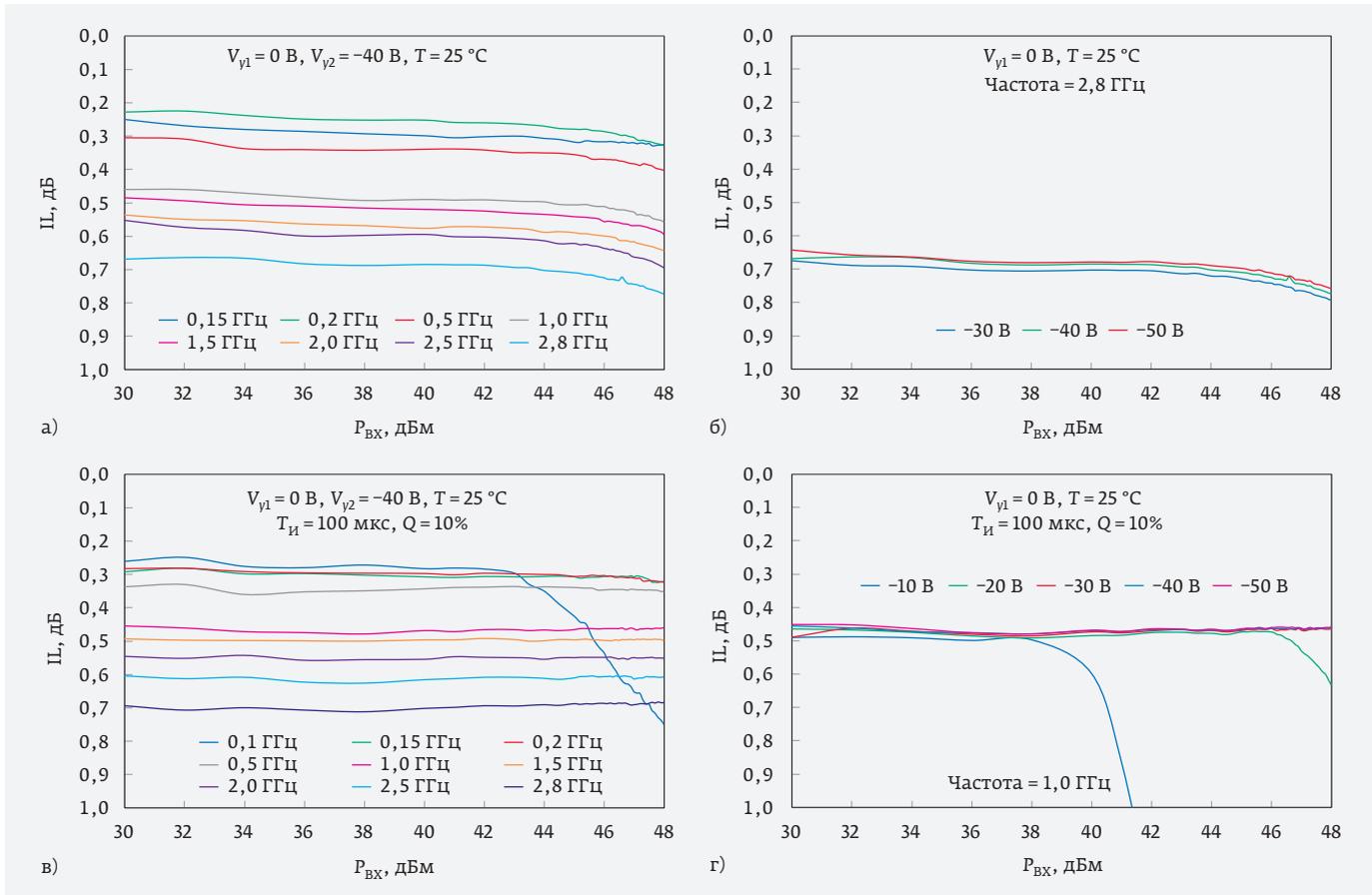


Рис. 40. Зависимости вносимых потерь от уровня мощности при непрерывном (а, б) и импульсном (в, г) характере входного сигнала: а, в – при различных частотах; б, г – при различных значениях напряжения питания. Модель QPS1005, компания Qorvo

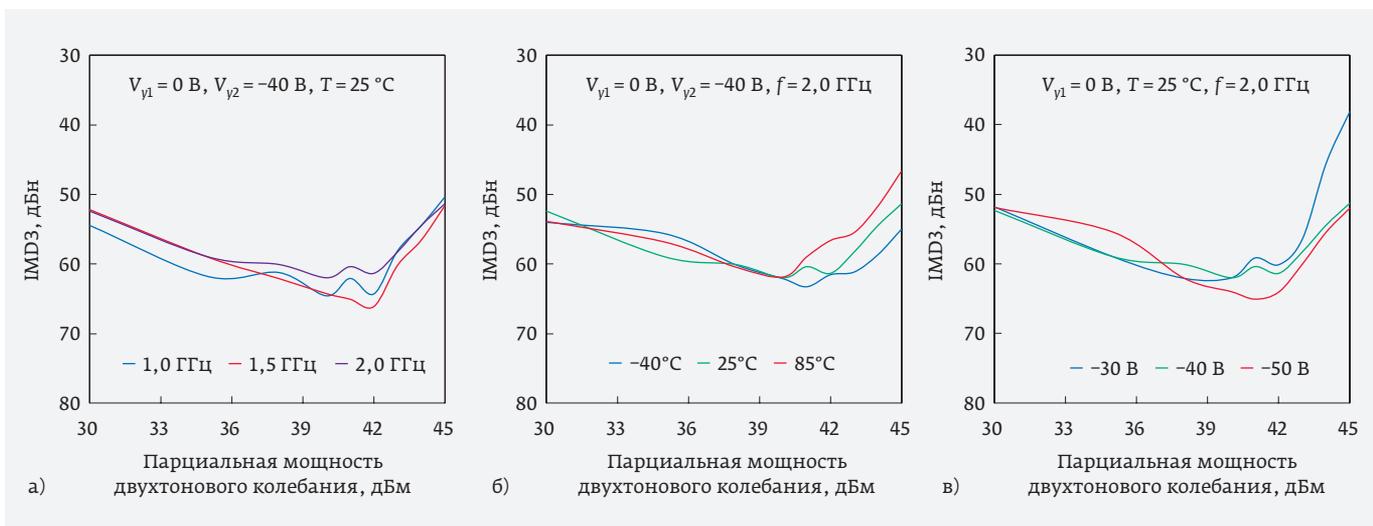


Рис. 41. Зависимости интермодуляционных искажений 3-го порядка IMD3 от уровня мощности одного из двухтоновых колебаний: а – для различных частот; б – для различных температур окружающей среды; в – для различных управляющих напряжений V_{у2}. Разнесение по частоте составляющих двухтонового колебания – 10 МГц. Модель QPS1005, компания Qorvo

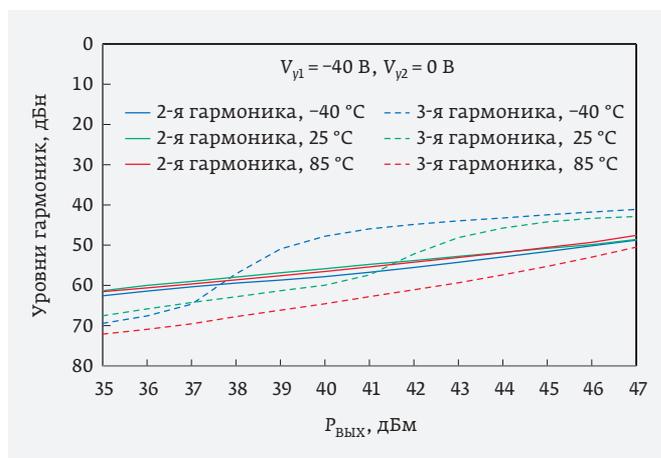


Рис. 42. Зависимости уровней 2-й и 3-й гармоник от выходной мощности при различных температурах окружающей среды (SPDT-переключатель TGS2355-SM, компания Qorvo). Непрерывный режим работы, $f=3$ ГГц

диапазоном частот и обеспечивать любой необходимый объем испытаний.

НИТРИД-ГАЛЛИЕВЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

Нитрид-галлиевые технологии чрезвычайно широко применяются при создании мощных усилителей как за рубежом, так и в Российской Федерации. Однако, количество производителей интегральных GaN-переключателей невелико (табл. 10), что возможно связано с дороговизной нитрид-галлиевых изделий, ограничивающей их применение в коммерческих задачах. Надо также отметить, что из шести выявленных производителей этих изделий две компании китайские и одна японская. Изделия японской компании RFcore появятся на рынке в 2019 году.

Все нитрид-галлиевые переключатели выполняются по технологии GaN/SiC pHEMT с длиной затвора 0,25 мкм. Коммутируемая мощность в этих переключателях не превосходит 100 Вт на частотах до 6 ГГц (TGS2355-SM) и 10–15 Вт на частотах более 10 ГГц (TGS2352-2, TGS2353-2, MECGaNBSPDT, MECGaNTRSX, BW1048, GNM4132, CHS8618-99F).

Схематика GaN-переключателей с симметричной последовательно-параллельной структурой (рис. 38) мало отличается от технических решений, применяемых в переключателях на GaAs полевых транзисторах. Переключатель, выполненный по схеме, показанной на рис. 38б, обеспечивает вносимые потери от 0,75 до 1,30 дБ и развязку более 45 дБ в диапазоне рабочих частот 0–20 ГГц. Площадь кристалла составляет 1,6 мм².

Характер зависимостей $IL(f)$ и $Iso(f)$ свидетельствует о весьма значительном увеличении вносимых потерь и уменьшении развязки с ростом частоты, а также о значительном влиянии температуры окружающей среды

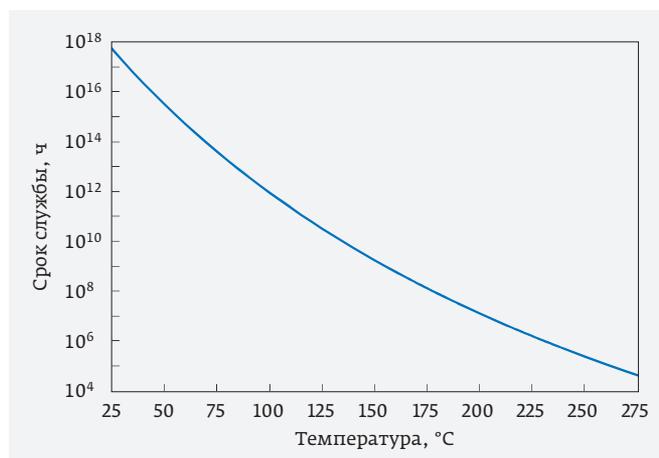


Рис. 43. Зависимость срока службы от температуры канала. Модель TGS2355-SM, компания Qorvo

на эти характеристики (рис. 39). Полезную информацию можно также получить, анализируя поведение вносимых потерь от уровня входной мощности при работе переключателей в непрерывном (рис. 40а, б) и импульсном (рис. 40в, г) режимах.

Линейность нитрид-галлиевых переключателей можно оценить по величине интермодуляционных искажений 3-го, 5-го и других порядков. Уровень этих искажений

ООО "Руднев-Шиляев"

- разработка измерительных систем по техническому заданию Заказчика.
- помощь в составлении технического задания Заказчика.
- производство измерительных систем.
- разработка и производство приборов.
- разработка программно-аппаратного обеспечения по ТЗ Заказчика.
- сертификация измерительных систем и приборов.

Инструментальные решения задач заказчика!

125130, г. Москва, ул. Клары Цеткин, д. 33 корп. 35
www.rudshel.ru, e-mail: adc@rudshel.ru
тел./факс: (495) 787-6367, 787-6368

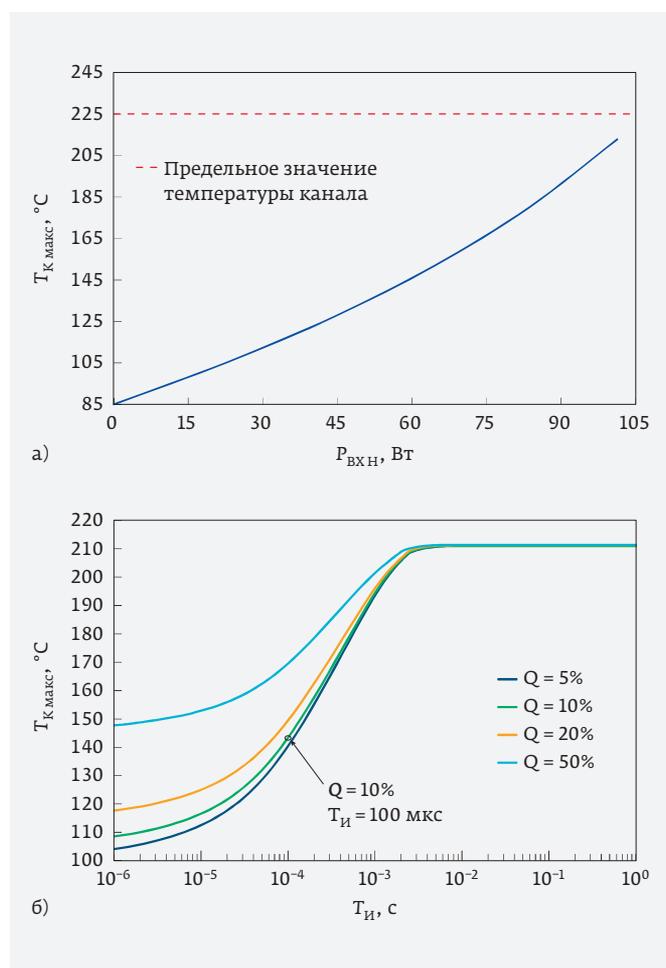


Рис. 44. Зависимости максимально допустимой температуры канала от мощности непрерывного входного колебания (а) и длительности входных 100-Вт импульсов, следующих с различной скважностью Q (б). Модель TGS2355-SM, компания Qorvo

определяется величиной паразитных спектральных составляющих, появляющихся на выходе переключателя при подаче на его вход двух непрерывных колебаний с небольшим (например, 10 МГц) разнесением по частоте. Приведенные в техническом описании переключателя QPC1005 характеристики IMD3 ($P_{\text{вх}}$) позволяют оценить зависимость вклада этих составляющих не только от уровня входной мощности двухтоновых колебаний, но и от частоты, температуры и управляющего напряжения (рис. 41). О линейности мощных переключателей можно также судить по уровням появляющихся на его выходе 2-й и 3-й гармоник в зависимости от уровня выходной мощности (рис. 42).

Надежность (срок службы) нитрид-галлиевых переключателей (рис. 43) зависит также от температуры канала, которая в свою очередь определяется уровнем входной мощности, подаваемой на переключатель в непрерывном (рис. 44а) или импульсном (рис. 44б) режимах.

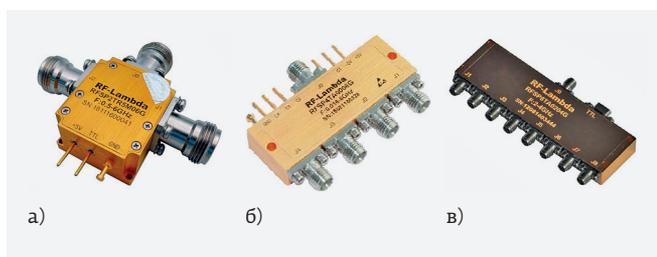


Рис. 45. Конструктивное исполнение модульных нитрид-галлиевых переключателей компании RF-Lambda: а – модель RFSP2TR5M06G; б – модель RFSP4TA0006G; в – модель RFSP8TA0204G

Анализ зависимостей на рис. 43, 44 и данных табл. 11 из технического описания микросхемы TGS2355-SM показывает, что срок службы в импульсном режиме более, чем в 1000 раз превосходит срок службы при работе с непрерывными сигналами.

В модульном исполнении (рис. 45) нитрид-галлиевые переключатели выпускаются небольшим числом компаний (табл. 12). Все переключатели, выпускаемые компанией RF-Lambda, имеют герметичное исполнение и обеспечивают работу на высотах до 60 000 футов, в диапазоне температур $-45...85$ °C. Управление осуществляется TTL-совместимым драйвером, введенным в состав переключателей. Коммутируемая мощность в переключателях компании RF-Lambda лежит в пределах от 10 до 100 Вт в диапазонах частот 0–18 ГГц и 0–6 ГГц соответственно. Время переключения в этих изделиях не превышает 18–100 нс. Наибольшие значения развязок 70–90 дБ обеспечиваются в моделях RFSP4TRDC12G, RFSP4TR5M06G, RFSP8TRDC18G.

Для использования в военных и гражданских РЛС, военных системах связи и средствах радиоэлектронной борьбы используются переключатели компании CPI. При холодном переключении изделия этой компании обеспечивают коммутацию сигналов с импульсной мощностью до 1000 Вт (см. табл. 12).

ЛИТЕРАТУРА

- Lai R-B., Chao S-F., Tsai Z-M. et al. Topology Analysis and Design of Passive HEMT Millimeter-Wave Multiple-Port Switches // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2008. V. 56. № 7. P. 1545–1554.
- Yuan Y., Fan Y., Yang Z., Lin H. 5 W, Ku-Band GaAs T/R MMIC with Switch Topology // Microwave Journal. Aerospace and Defense Supplement. June 2017. P. 32, 34, 36, 38, 40.
- Thome F., Ambacher O. Highly Isolating and Broadband Single-Pole Double-Throw Switches for Millimeter-Wave Applications Up to 330 GHz // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2018. V. 66. № 4. P. 1998–2009.



Разработка и производство конденсаторов

оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы
K50-15, K50-17, K50-27, K50-37, K50-68, K50-74, K50-76, K50-77, K50-80,
K50-81, K50-83, K50-84, K50-85, K50-86, K50-87, K50-88, K50-89, K50-90,
K50-91, K50-92, K50-93, K50-94, K50-95(чип), K50-96, K50-98

объемно-пористые танталовые конденсаторы
K52-1, K52-1М, K52-1БМ, K52-1Б, K52-9, K52-11,
K52-17, K52-18, K52-19, K52-20, K52-21, K52-24,
K52-26(чип), K52-27(чип)

оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы
K53-1А, K53-7, K53-65(чип), K53-66, K53-68(чип),
K53-71(чип), K53-72(чип), K53-74(чип),
K53-77(чип), K53-78(чип)

суперконденсаторы (ионисторы)
K58-26

накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов

Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям ISO 9001

Россия, 427968, Удмуртская Республика, г. Сарапул, ул. Калинина, 3
Тел.: (34147) 2-99-53, 2-99-89, 2-99-77, факс: (34147) 4-32-48, 4-27-53
e-mail: elecond-market@elcudm.ru, <http://www.elecond.ru>