

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

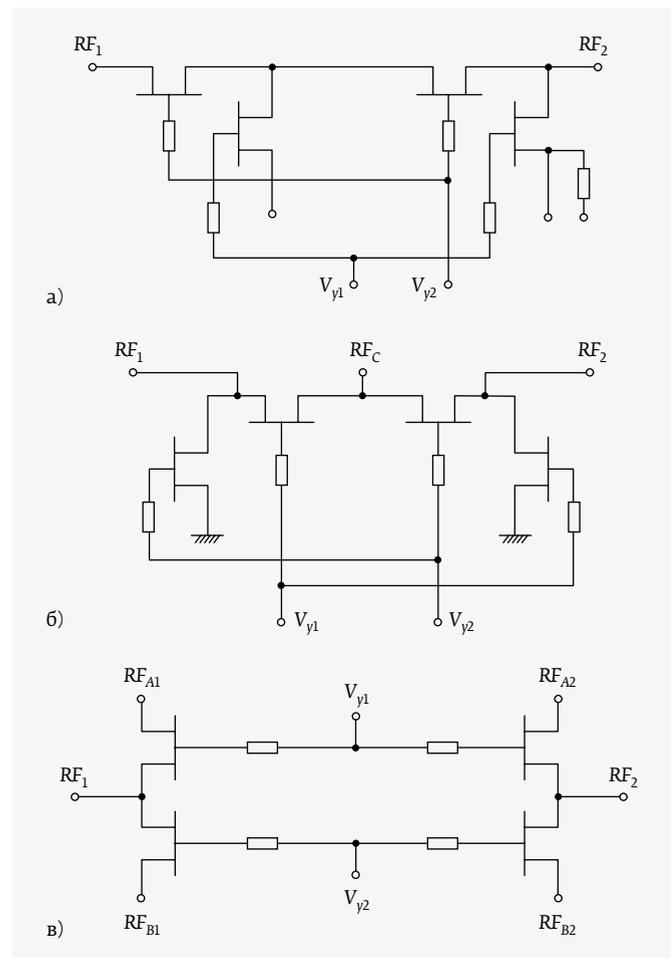


Рис. 26. Упрощенные принципиальные схемы СВЧ-переключателей на арсенид-галлиевых полевых транзисторах: а – модель MASW6020G (SPST), компания MACOM; б – модель CHS5104-99F (SPDT), компания UMS; в – модель MASW2040 (DPDT), компания MACOM. V_{y1} , V_{y2} – управляющие напряжения

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 | I_L , дБ | I_{50} , 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 |

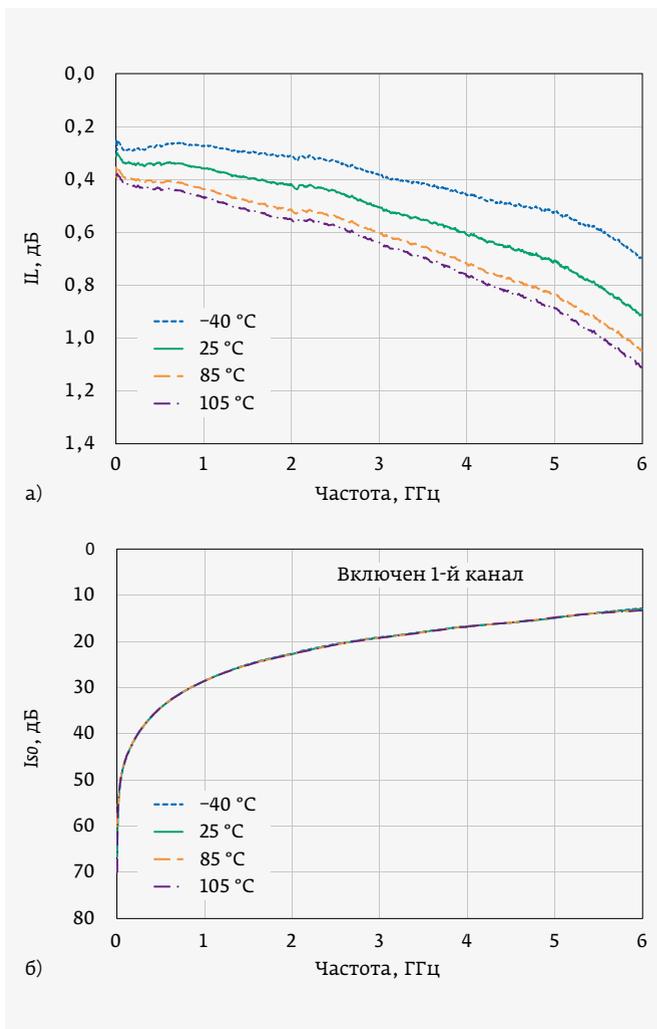


Рис. 27. Зависимости IL и I_{so} от частоты для нескольких значений температуры окружающей среды. Модель QRC6222, компания Qorvo

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,

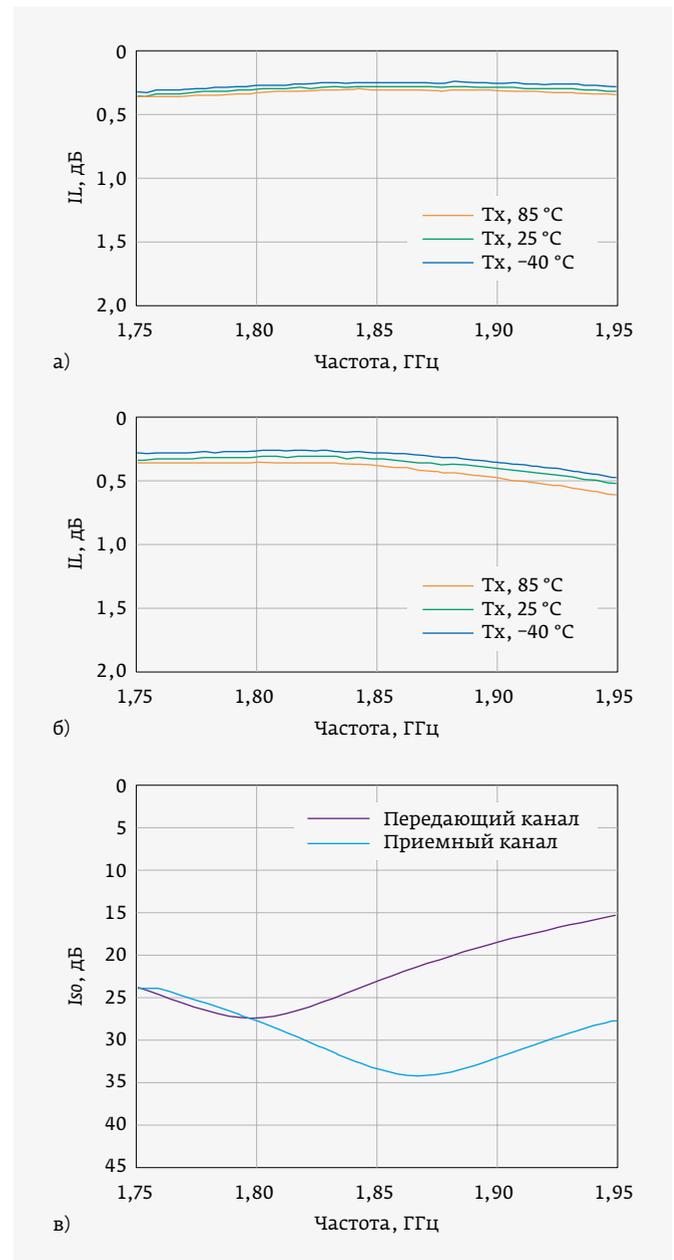


Рис. 28. Вносимые потери IL в передающем (а) и приемном (б) каналах при различных значениях температуры окружающей среды и развязка I_{so} в передающем и приемном каналах (в). Модель HMC546LP2E, компания Analog Devices

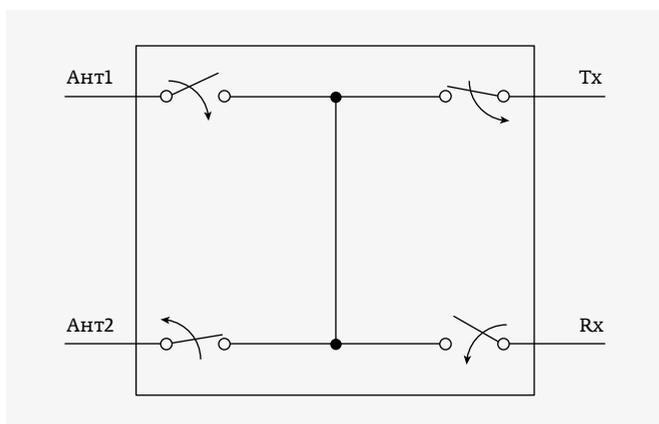


Рис. 29. Упрощенная структура DPDT-переключателя, обеспечивающего подключение передатчика Tx или приемника Rx к одной из двух антенн Ант1 и Ант2. Модель НМС393MS8С, компания Analog Devices

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 асимметричных 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 Filtronics). Характеристики передающих и приемных каналов, как и в случае приемо-передающих SPDT-переключателей, существенно различаются. Так, вносимые потери в передающем

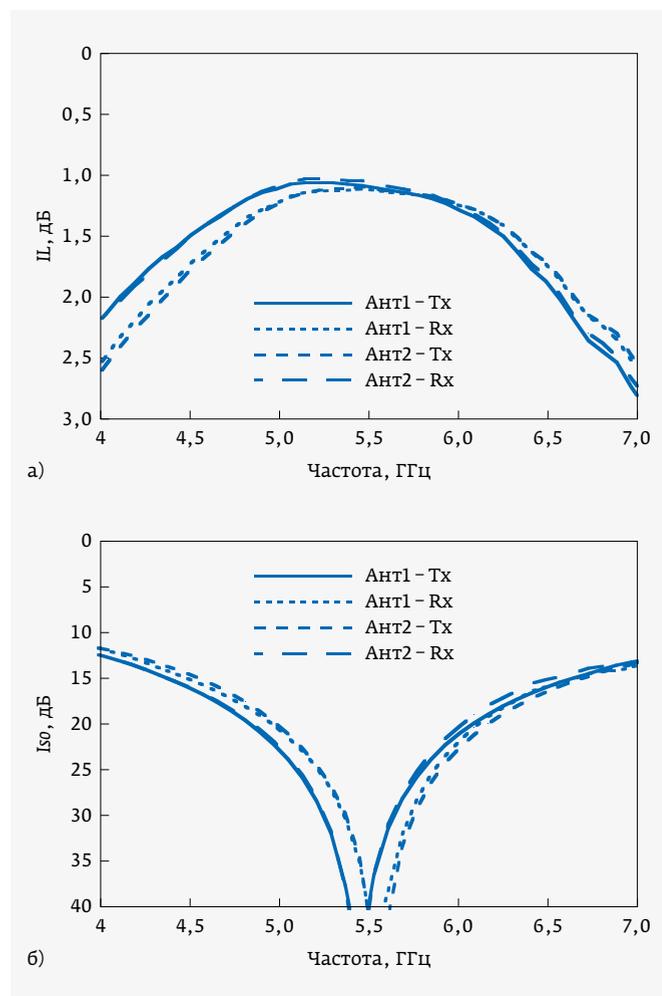


Рис. 30. Зависимости IL и Iso от частоты в DPDT-переключателе НМС393MS8С

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

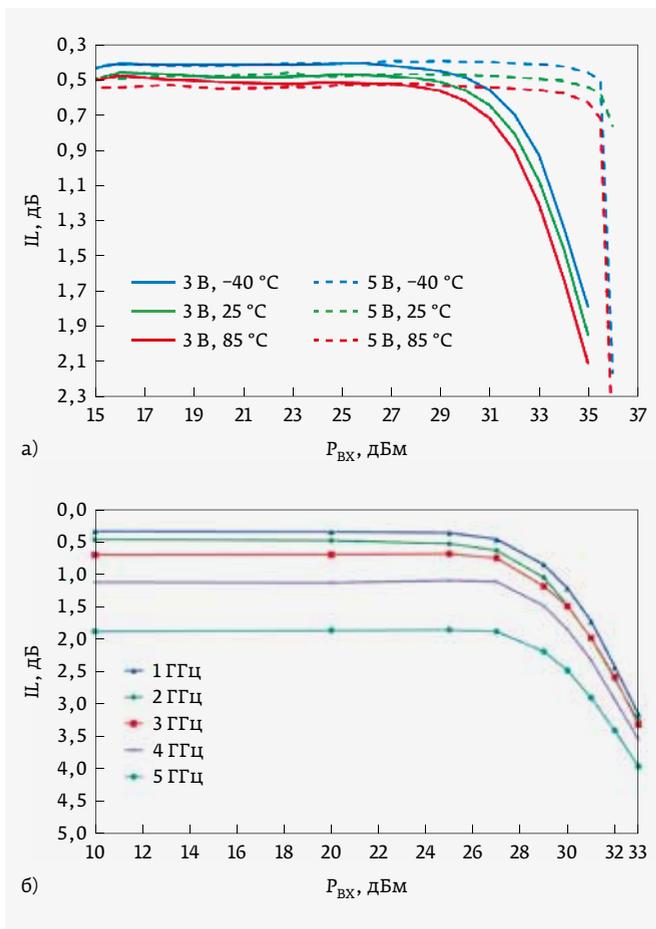


Рис. 31. Зависимости вносимых потерь IL от уровня входной мощности $P_{вх}$: а - при управляющих напряжениях 3 и 5 В и температурах окружающей среды -40 , 25 , 85 °С (модель RFSW6223, компания Qorvo); б - при входных частотах 1, 2, 3, 4 и 5 ГГц (модель CHS5104-QAG, компания UMS)

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 размера $1,0 \times 1,0 \times 0,37$ мм выдерживает входную мощность до 33 дБм.

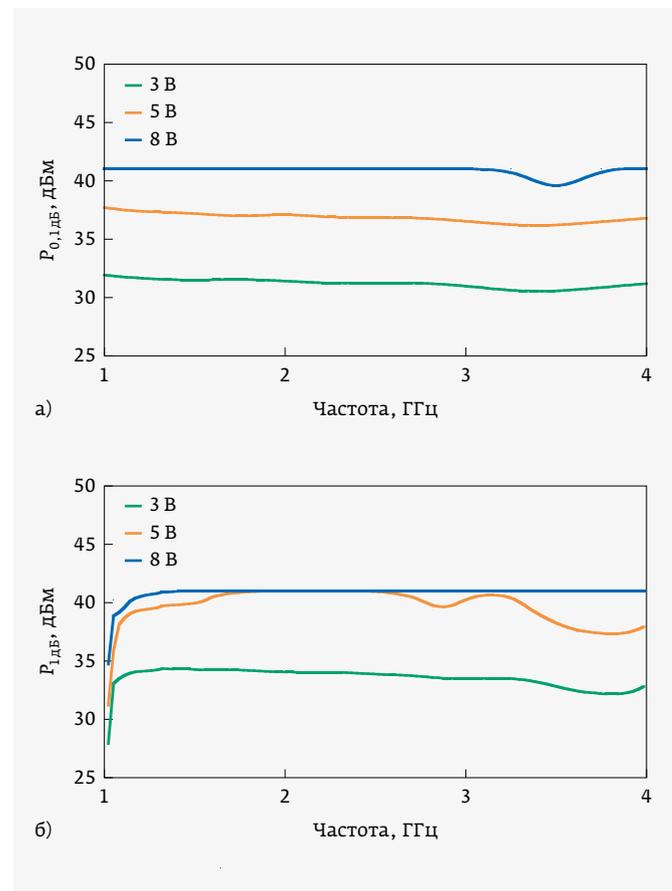


Рис. 32. Зависимости мощностей $P_{0,1дБ}$ (а) и $P_{1дБ}$ (б) от частоты (модель HMC784AMS8GE, компания Analog Devices)

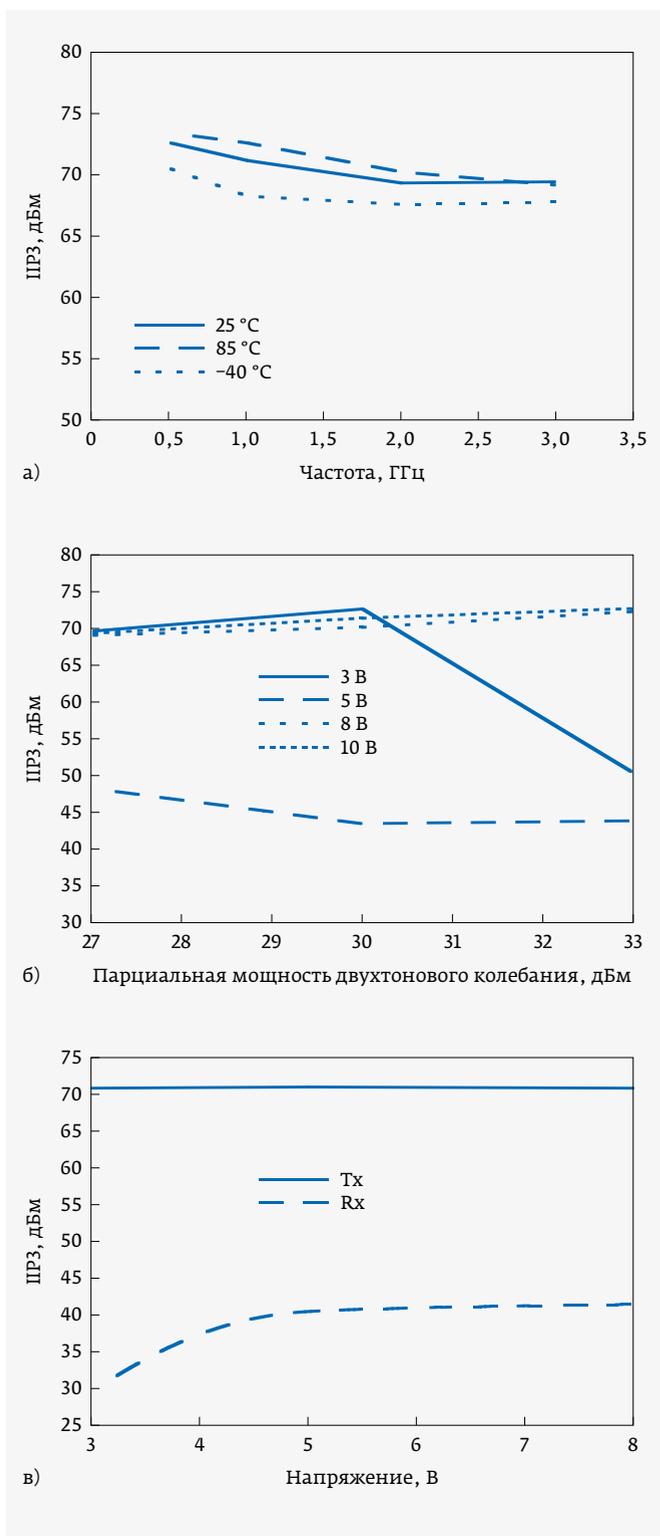


Рис. 33. Зависимости IP3 от частоты при различных температурах (а), от мощности двухтонового колебания при различных значениях напряжения питания (б), от напряжения питания в передающем и приемном каналах (в). Модели HMC484MS8G (а, б) и HMC646LP2 (в) компании Analog Devices

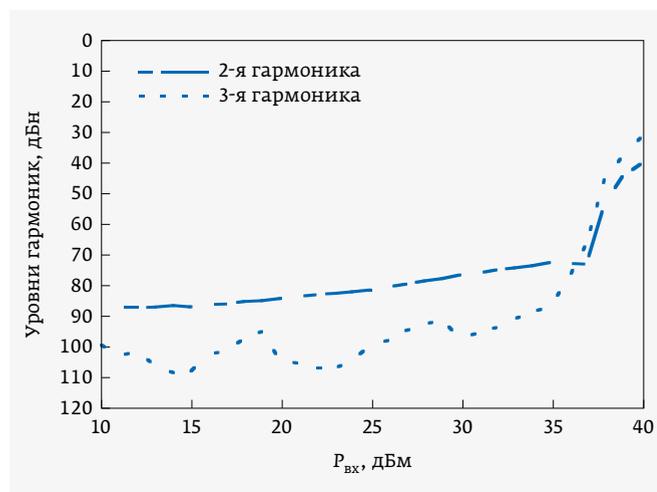


Рис. 34. Зависимости уровней 2-й и 3-й гармоник от входной мощности (модель HMC484MS8G, компания Analog Devices). $f=900$ МГц, $U_{п}=5$ В

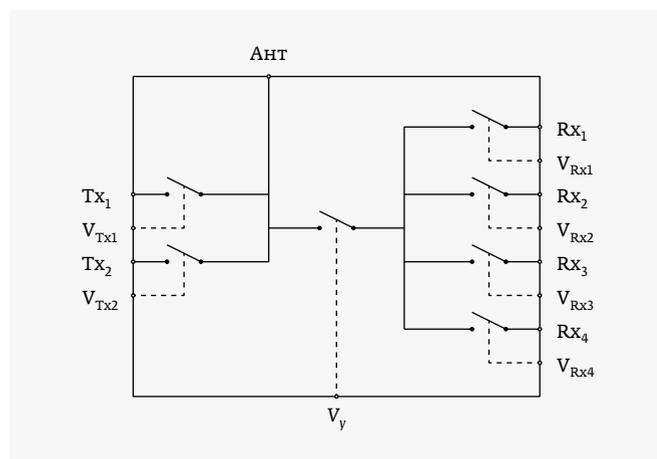


Рис. 35. Многопозиционный переключатель, обеспечивающий связь антенны Ант с двумя передатчиками Tx и четырьмя приемниками Rx (модель FMS2029, компания Filtronic)

ООО СМД 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) 340-6245, (499) 343-8782

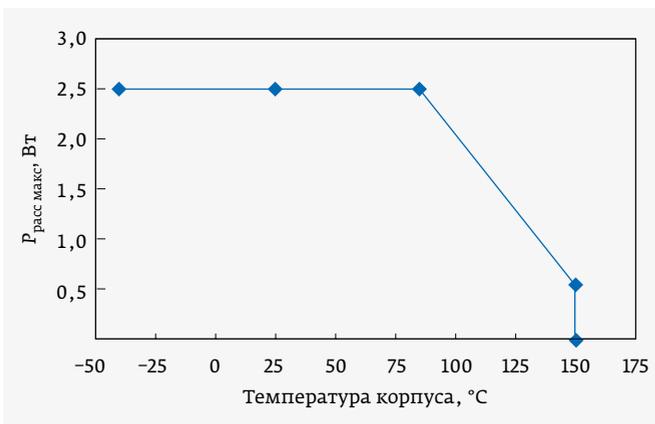


Рис. 36. Зависимость максимальной рассеиваемой мощности от температуры корпуса (модель CHS5105-QAG, компания UMS)

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

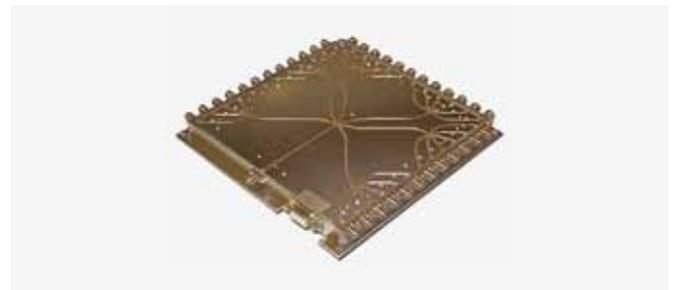


Рис. 37. Многопозиционный (SP36T) переключатель GG-75431-64 на полевых транзисторах компании Microsemi

100 нс и мощность $P_{0,1\text{дБ}} = 14,9$ дБм на частоте 18 ГГц. Изделие выполнено во flip-chip корпусе размером $3 \times 3 \times 1$ мм и обеспечивает работоспособность в диапазоне температур $-65 \dots 125$ °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 TB-530+.

Таблица 9. Модульные переключатели на арсенид-галлиевых полевых транзисторах

| Компания | Модель | Тип | Диапазон частот, ГГц | $P_{\text{доп}}$, дБм | Л, дБ | 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 | CNM4109 | SPDT | 0-2,0 | 49,5 дБм | 0,5 | 37 | 10 |
| Chengdu Ganide Technology | CNM4134 | SPDT | 0-6,0 | 46 дБм | 0,25 | 40 | 40 |
| Chengdu Ganide Technology | CNM4131 | SPDT | 0-12,0 | 41,5 дБм | 1,0 | 30 | 20 |
| Chengdu Ganide Technology | CNM4132 | 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 | - | - |

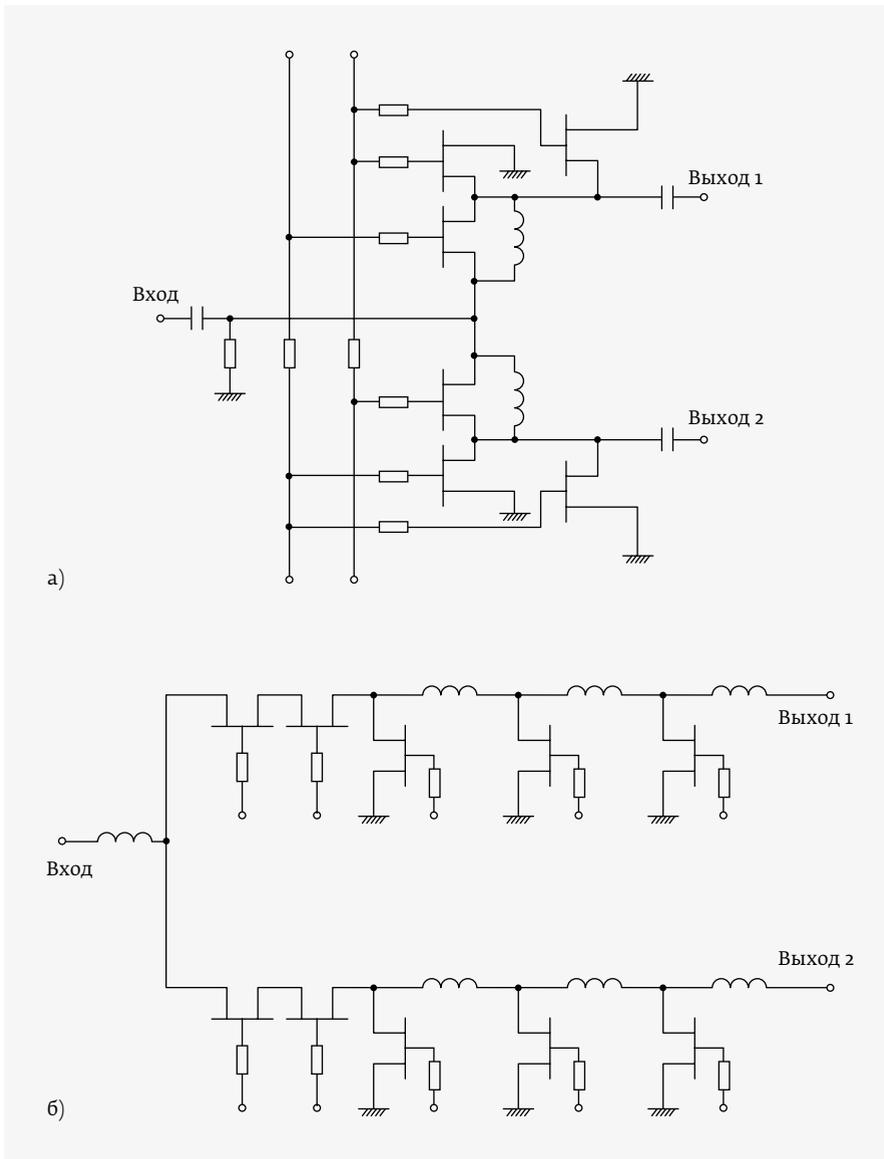


Рис. 38. Принципиальные схемы интегральных нитрид-галлиевых SPDT-переключателей: а – CHS8618-99F, компания UMS; б – компания Plextek RFI

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 (SP36Т) 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: $T_{корп} = 85\text{ °С}, V_{y1} = 0\text{ В}, V_{y2} = -40\text{ В}, P_{вх} = 100\text{ Вт}, P_{расс} = 29,3\text{ Вт}$ | 4,37 | 213 | $4,15 \cdot 10^6$ |
| Импульсный режим: $T_{корп} = 85\text{ °С}, V_{y1} = 0\text{ В}, V_{y2} = -40\text{ В}, P_{вх} = 100\text{ Вт}, P_{расс} = 29,3\text{ Вт}, T_{и} = 100\text{ мкс}, Q = 10\%$ | 1,88 | 140 | $5,43 \cdot 10^9$ |

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

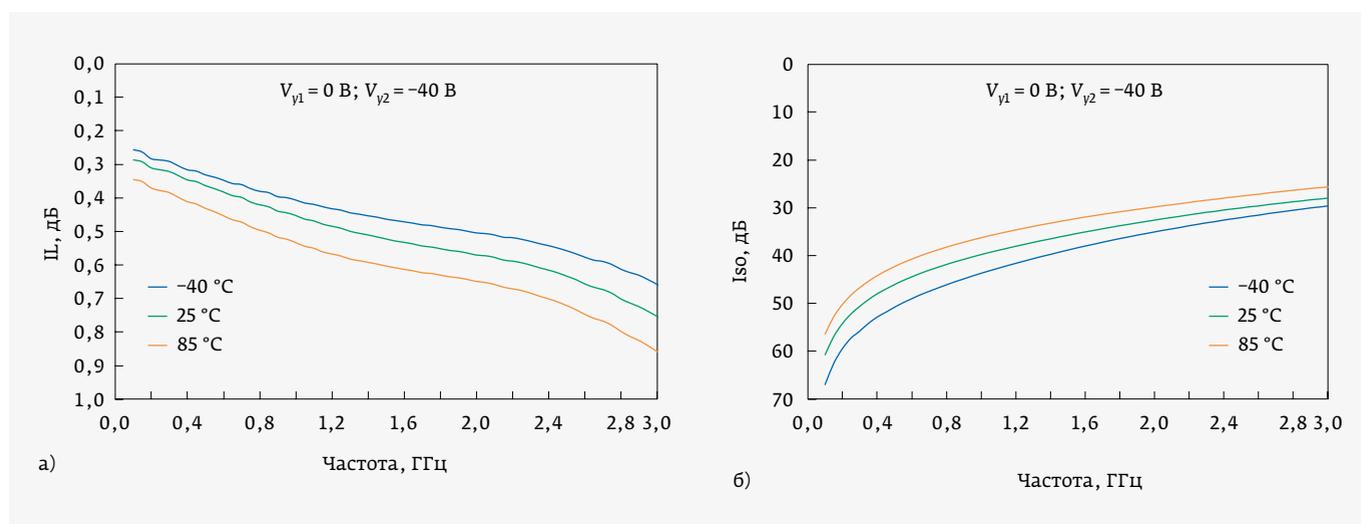


Рис. 39. Зависимости IL и Iso от частоты при температурах окружающей среды -40 , 25 и 85 °C (SPDT-переключатель QPC1005, компания Qorvo). Сигнал проходит со входа на выход 1

Таблица 12. Мощные нитрид-галлиевые переключатели в модульном исполнении

| Компания | Модель | Тип | Диапазон частот, ГГц | $P_{\text{макс}}$, Вт | IL , дБ | Iso , дБ | T_p , 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 ($P_{1\text{дБ}}$) | 2,0 | 80 | 0,05 |
| RF-Lambda | RFSP4TRDC18G | SP4T | 0-18,0 | 10 ($P_{1\text{дБ}}$) | 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 ($P_{1\text{дБ}}$) | 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 |

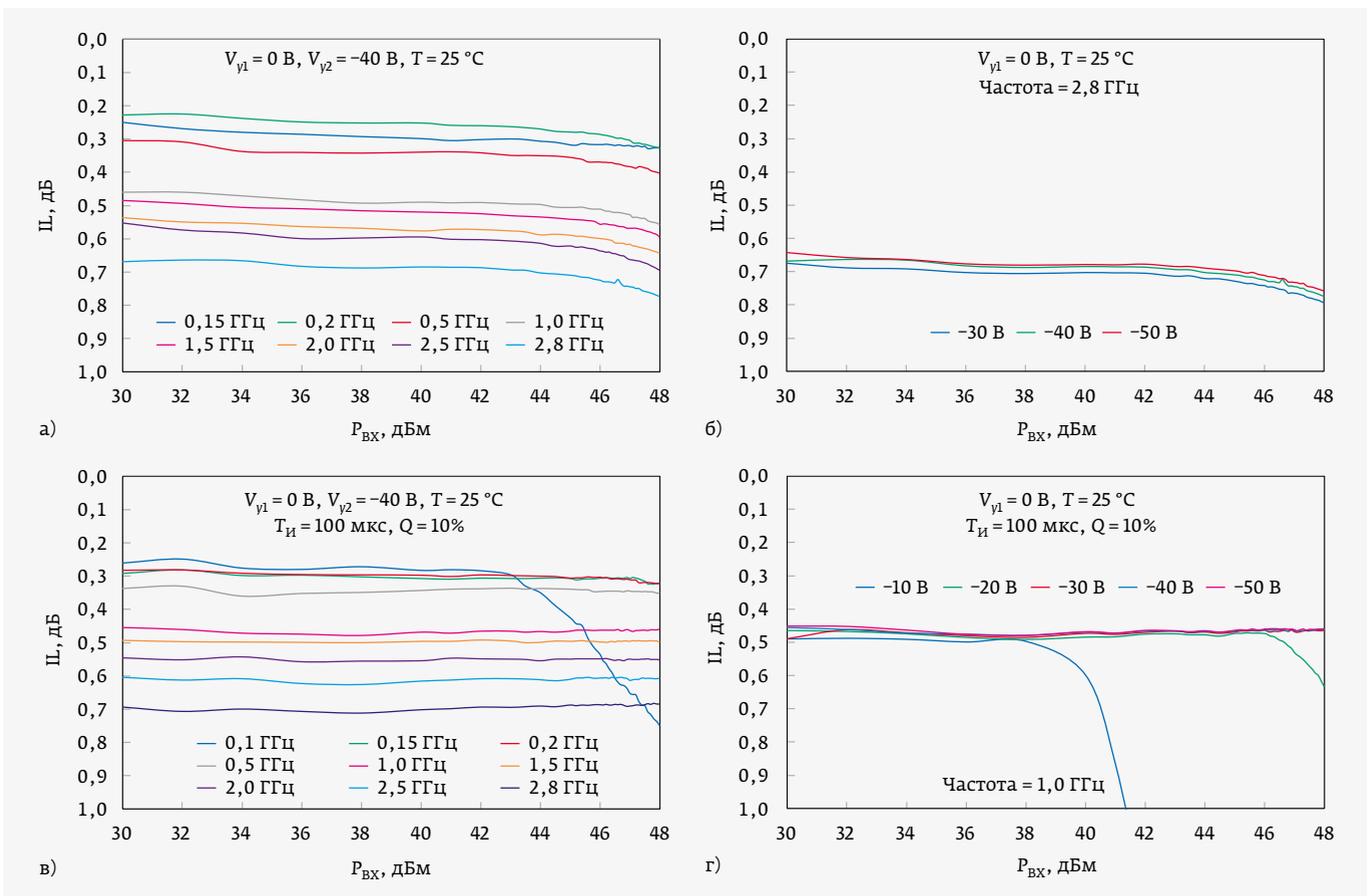


Рис. 40. Зависимости вносимых потерь от уровня мощности при непрерывном (а, б) и импульсном (в, г) характере входного сигнала: а, в – при различных частотах; б, г – при различных значениях напряжения питания. Модель QRC1005, компания Qorvo

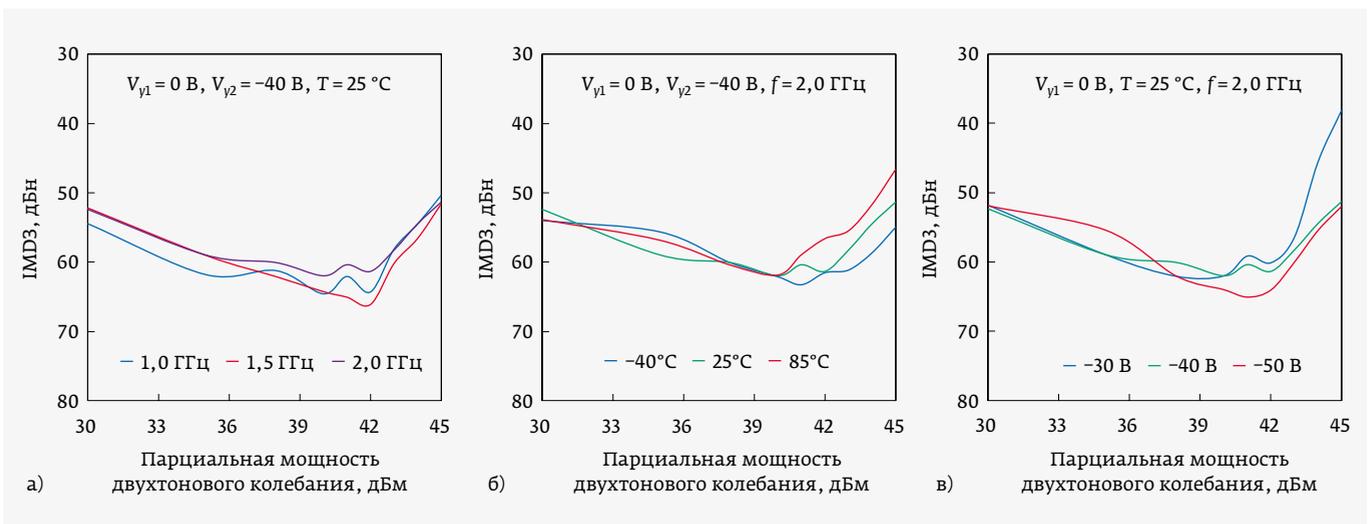


Рис. 41. Зависимости интермодуляционных искажений 3-го порядка IMD3 от уровня мощности одного из двухтоновых колебаний: а – для различных частот; б – для различных температур окружающей среды; в – для различных управляющих напряжений V_{y2} . Разнесение по частоте составляющих двухтонового колебания – 10 МГц. Модель QRC1005, компания Qorvo

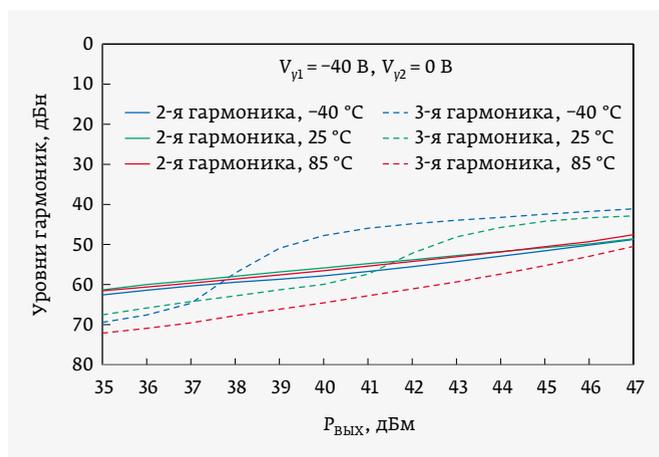


Рис. 42. Зависимости уровней 2-й и 3-й гармоник от выходной мощности при различных температурах окружающей среды (SPDT-переключатель TGS2355-SM, компания Qorvo). Непрерывный режим работы, $f = 3$ ГГц

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 RFcoqe 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, MECGaNWSPDT, MECGaNTRXS, 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

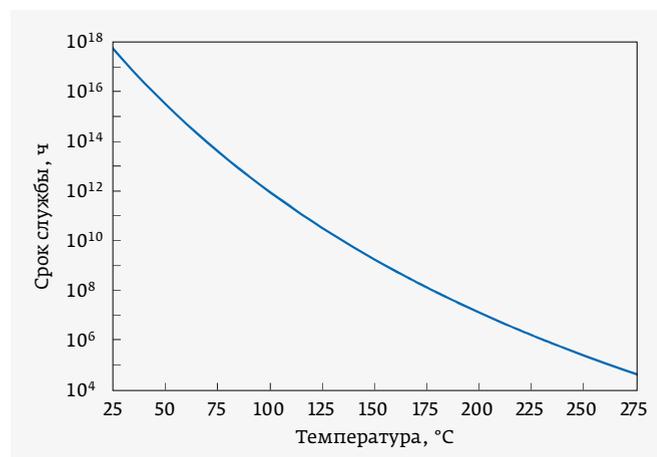


Рис. 43. Зависимость срока службы от температуры канала. Модель TGS2355-SM, компания Qorvo

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

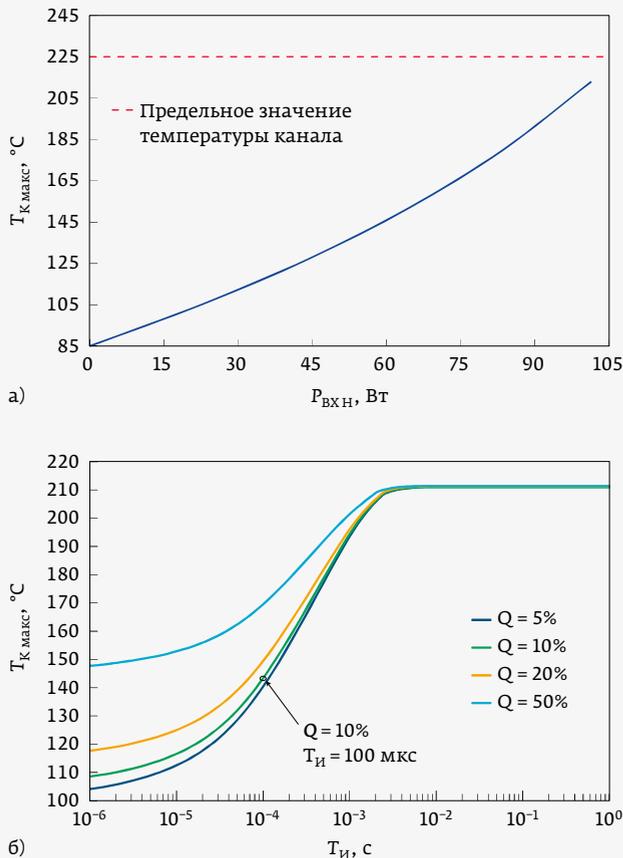


Рис. 44. Зависимости максимально допустимой температуры канала от мощности непрерывного входного колебания (а) и длительности входных 100-Вт импульсов, следующих с различной скважностью Q (б). Модель TGS2355-SM, компания Qorvo

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 ($P_{вхн}$) 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.

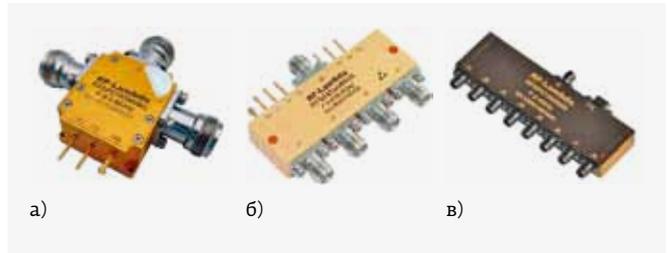


Рис. 45. Конструктивное исполнение модульных нитрид-галлиевых переключателей компании RF-Lambda: а – модель RFSP2TR5M06G; б – модель RFSP4TA0006G; в – модель RFSP8TA0204C

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 $-45...85$ °С. 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, K52-1M, K52-1BM, K52-1B, 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

K53-1A, 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>