

Твердотельные СВЧ-переключатели с высокой скоростью коммутации

Часть 3

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

УДК 621.389 | ВАК 05.27.01

В первых двух частях статьи, опубликованных в десятом за 2020 год и первом за 2021 год номерах журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес», было рассказано о рpн-диодных переключателях в различных исполнениях. В данном номере рассматриваются различные типы переключателей на полевых транзисторах.

АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫЕ И ФОСФИД-ИНДИЕВЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ НА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Кремниевые и арсенид-галлиевые рpн-диодные переключатели в модульном и интегральном исполнениях широко используются в коммерческих и военных радарх, системах связи, средствах радиоэлектронного подавления, измерительных и тестовых комплексах. Разработанные за последние 50–60 лет десятками компаний многие тысячи моделей переключателей широко представлены на сайтах производителей и до сих пор доступны потребителям. Вместе с тем рpн-диодным переключателям присущ ряд недостатков:

- нижнее значение входной частоты принципиально не может быть нулевым;
- для работы требуются два источника питания и два управляющих напряжения;
- токи по цепям смещения и управления лежат в пределах 10–100 мА, что требует применения достаточно сложных драйверов и приводит к увеличению потребляемой переключателями мощности;
- технологические сложности, возникающие при создании интегральных версий таких переключателей;
- большие искажения выходного радиосигнала, возникающие в процессе коммутации.

Всех этих недостатков лишены переключатели на арсенид-галлиевых полевых транзисторах (FET), которым на смену сначала пришли MESFET, а затем и PHEMT-транзисторы. В отличие от рpн-диодных переключателей, где сначала появились модульные изделия на дискретных рpн-диодах и лишь затем были созданы интегральные изделия, процесс развития арсенид-галлиевых полевых переключателей был обратным. Сначала появились

интегральные переключатели и лишь затем отдельные модульные изделия. Забегая вперед, отметим, что аналогичным образом шло развитие и нитрид-галлиевых изделий. В переключателях же, выполненных по кремниевым КМОП-технологиям, промышленностью выпускаются только интегральные изделия. Модульных изделий с применением этой технологии не удалось обнаружить и в журнальных публикациях.

Интегральные арсенид-галлиевые переключатели на полевых транзисторах выпускаются компаниями MACOM, KCB Solutions, Isolink, SuperApex, Qorvo, Aelius Semiconductors, Custom MMIC, Metda Semiconductors, QP Microwave, Chengdu Ganide Technology, UMS, CEL, arQana Technologies, Mimix Broadband, Filtronic, Microsemi, Analog Devices, Skyworks Solutions, Northrop Grumman.

Сведения о характеристиках арсенид-галлиевых переключателей на полевых транзисторах сведены в табл. 9–12. Анализ характеристик показывает, что многие переключатели имеют нулевую входную частоту, а верхняя рабочая частота достигает 50 ГГц. Времена переключения $T_{\text{п}}$, T_r , T_f , $T_{\text{он}}$ и T_{off} этих изделий находятся в границах 2–150 нс. Входная мощность этих переключателей обычно не превосходит 1–2 Вт.

В рекламных материалах компании Northrop Grumman имеется также информация о SPDT-переключателе SDH-148 на основе технологии GaAs HEMT, предназначенном для работы в диапазоне 80–100 ГГц. В этом изделии вносимое ослабление не превосходит 3 дБ. К сожалению, сведения о других характеристиках переключателя отсутствуют.

Существенным преимуществом переключателей, выполненных по GaAs-технологиям, являются низкие (1–1000 мкА) токи по цепям смещения и управления. Малыми в этих переключателях оказываются и возникающие в моменты коммутации при отключенном СВЧ-сигнале видеоимпульсы (так называемые transients) (см. рис. 4). Их амплитудные значения лежат в границах 5–150 мВ, что существенно меньше амплитуд, характерных для

¹ ООО «Радиокомп», генеральный директор.

² НИУ «МЭИ», заведующий кафедрой формирования и обработки радиосигналов.

³ МТУСИ, доцент кафедры радиооборудования и схемотехники.

Таблица 9. Интегральные SPST-переключатели на арсенид-галлиевых полевых транзисторах

| Фирма | Модель | Диапазон частот, ГГц | $P_{вх.}$, Вт | IL, дБ | ISO, дБ | $T_{п.}$ нс | $T_{r.}$ нс | $T_{f.}$ нс | $T_{on.}$ нс | $T_{off.}$ нс | V_T , мВ |
|---------------------------|------------------|----------------------|-------------------------|-----------|---------|-------------|-------------|-------------|--------------|---------------|------------|
| MACOM | MASWSS0162 | 0-2,5 | 0,06-0,20 ($P_{1дБ}$) | 0,8-1,1 | 65-40 | - | 4 | 4 | 8 | 8 | 35 |
| KCB Solutions | KCB 817 | 0-6,0 | 0,25 ($P_{1дБ}$) | 0,50-0,78 | 57-35 | - | 5 | 5 | 15 | 15 | - |
| Isolink | ISO13316 | 0-6,0 | 0,32 ($P_{0,1дБ}$) | 0,50-0,78 | 57-30 | - | 5 | 5 | 15 | 15 | 40 |
| SuperApex | SAC3207 | 0-12,0 | 0,5 ($P_{1дБ}$) | 0,9 | 40 | 5 | - | - | - | - | - |
| Qorvo | RFSW2040 | 0-20,0 | <1,0 | 0,65-1,40 | 40 | - | - | - | 21 | - | - |
| Aelius Semiconductors | ASL 8000 | 0-20,0 | 0,12 ($P_{1дБ}$) | 1,0 | 40 | <10 | - | - | - | - | - |
| Custom MMIC | CMD204 | 0-20,0 | 0,32 ($P_{1дБ}$) | 1,0 | 50 | - | 1,8 | 1,8 | 18 | 7 | - |
| Metda Semiconductors | NC1644C-120 | 0-26,0 | 0,2 ($P_{1дБ}$) | <2,0 | 45 | 10 | - | - | - | - | - |
| Aelius Semiconductors | ASL 8001 | 0-35,0 | 0,2 ($P_{1дБ}$) | 0,6-3,5 | 40-57 | <10 | - | - | - | - | - |
| QP Microwave | QP-SWS1A-0640-01 | 6,0-40,0 | - | <5,0 | > 60 | - | - | - | 25 | 25 | - |
| Chengdu Ganide Technology | GMM0341 | 0-40,0 | <1,0 | 0,8 | > 15 | 20 | - | - | - | - | - |

Примечание. Здесь, а также в табл. 12 и 14, V_T – амплитуда видеоимпульса, возникающего при переключении.

pin-диодных переключателей, где они могут быть равны 1 В и более. В арсенид-галлиевых переключателях на полевых транзисторах степень влияния этих процессов на выходной сигнал весьма мала.

По мере эксплуатации первых моделей арсенид-галлиевых переключателей на полевых транзисторах выявился весьма существенный недостаток – большое время установления T_{set} , многократно превышающее

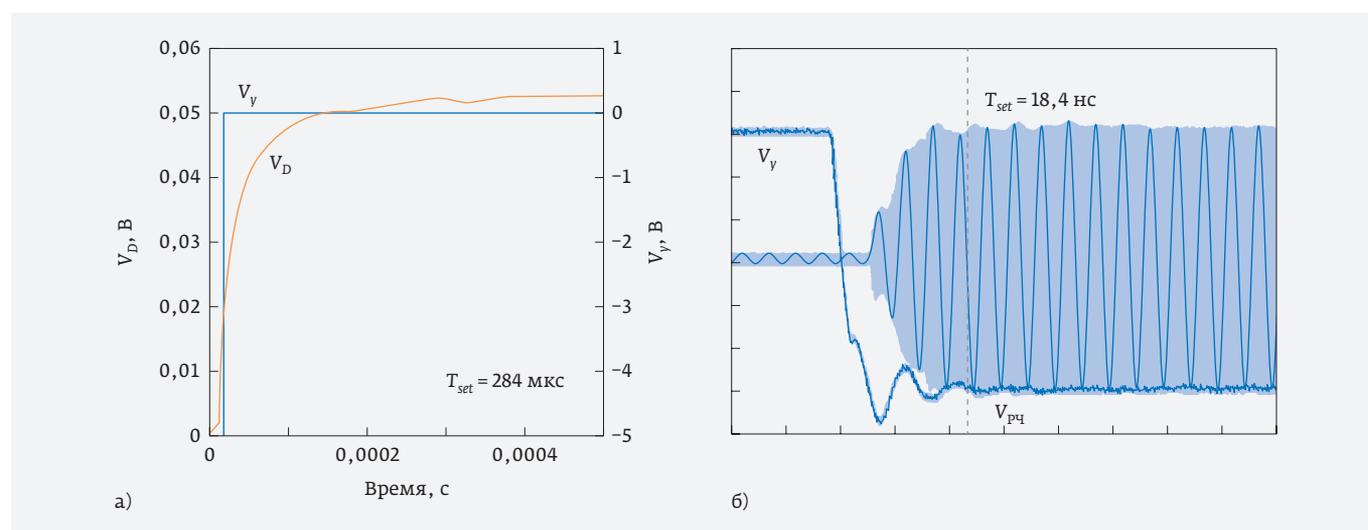


Рис. 22. Переходные процессы в арсенид-галлиевых РНЕМТ-переключателях: а – стандартный процесс (продетектированный сигнал V_D на выходе переключателя); б – модифицированный процесс (радиочастотный сигнал V_{PC} на выходе переключателя)

значения T_r , T_f , T_{on} и T_{off} из data sheets на эти изделия. Много усилий по преодолению этого недостатка было приложено компанией MACOM, которой в конце концов удалось разработать модифицированный PHEMT-процесс, решивший эту проблему [7, 19, 21]. Так, если в переключателях, изготовленных с применением стандартного PHEMT-процесса, значения T_r и T_{set} составляли 15 нс и 284 мкс (рис. 22а) [21], то модифицированный PHEMT-процесс позволил уменьшить эти значения до 14 и 18,4 нс соответственно (рис. 22б) [21]. За время установления T_{set} в данном случае принималась разница времен, при которых огибающая выходного сигнала переключателя достигала 90 и 98% от своего установившегося значения. Кардинальное снижение времени установления T_{set} не только позволило применять такие

модифицированные переключатели в задачах тестирования большого количества испытуемых изделий, но и привело к существенному снижению мощности рассеяния, что сделало возможным использование таких переключателей при более высоких значениях входной мощности. В результате этой исследовательской деятельности компания MACOM выпустила на рынок большую партию переключателей MASW-007107, MASW-007587, MASW-007588, MASW-007921, MASW-008322, MASW-008543, MASW-008899, MASW-008955, MASW-009590, MASWSS0197 [7], в которых время установления было кардинально снижено.

Анализ data sheets для арсенид-галлиевых переключателей, выполненных на полевых транзисторах, дает представление о зависимости времен переключения от температуры окружающей среды и уровня входной мощности.

Таблица 10. Интегральные SPDT-переключатели на арсенид-галлиевых полевых транзисторах

| Фирма | Модель | Диапазон частот, ГГц | $P_{вх.}$, Вт | IL , дБ | Iso , дБ | T_d , нс | T_r , нс | T_f , нс | T_{on} , нс | T_{off} , нс |
|----------------------|------------------|----------------------|-------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|---------------|----------------|
| ОАО «НИИПП» | K6405КП1Т | 0–2,0 | 0,32 ($P_{1дБ}$) | 0,5–1,0 | 50–25 | 32 | – | – | – | – |
| UMS | CHS5104-99F | 0–4,0 | <2,0 ($P_{1дБ}$) | 0,25–0,50 | 38–20 | – | – | – | 10 | 10 |
| CEL | CG2185X2 | 2,0–6,0 | 0,5–1,6 ($P_{1дБ}$) | 0,35–0,40 | 28–26 | – | – | – | 50 | 50 |
| KCB Solutions | KCB 820 | 0,02–6,0 | 1,0 ($P_{1дБ}$) | 0,75–1,50 | 55–45 | – | 5 | 5 | 15 | 15 |
| Isolink | ISO13286 | 0–8,0 | 0,4 ($P_{1дБ}$) | 0,8–2,5 | 60–45 | – | 5 | 5 | 15 | 15 |
| ArQana Technologies | AW4400-QA | 0–12,0 | – | <1,5 | >35 | <50 | – | – | – | – |
| Mimix Broadband | CSW0118-BD | 0,5–18,0 | 0,10–0,15 ($P_{1дБ}$) | 1,4–2,7 | 40–23 | – | 2 | 2 | – | – |
| Qorvo | TGS4310-SM | 13,0–19,0 | 2,0 ($P_{0,1дБ}$) | <1,7 | >20 | – | – | – | – | 20 |
| Filtronic | FMS2027 | 0–20,0 | <0,2 ($P_{1дБ}$) | 0,85–2,10 | 42 | – | 17 | 42 | 27 | 53 |
| Microsemi | MMS006PP3 | 0–20,0 | 0,32 ($P_{1дБ}$) | 2,0 | 40 | – | 10 | 10 | 10 | 10 |
| SuperApex | SAC3206Q3 | 0–20,0 | 1,0 ($P_{1дБ}$) | 2,3 | 45 | 15 | – | – | – | – |
| QP Microwave | QP-SWS2A-0127-01 | 1,0–27,0 | <0,2 | <6,0 | >60 | – | – | – | 25 | 25 |
| ArQana Technologies | ASA7700 | 24,0–30,0 | – | <1,0 | >40 | <50 | – | – | – | – |
| Centellax | USD30SDC | 0–30,0 | 0,02 ($P_{1дБ}$) | 3 | 37 | 10 | – | – | – | – |
| MACOM | MASW-011105 | 17,7–31,0 | 0,25 ($P_{0,1дБ}$) | 1,6 | 30 | – | 6 | 6 | 12 | 12 |
| QP Microwave | QP-SWS2A-0140-01 | 1,0–40,0 | <0,2 | <6,0 | >60 | – | – | – | 25 | 25 |
| Custom MMIC | CMD215 | 0–40,0 | 0,08 ($P_{1дБ}$) | 2,3 | 36 | 4 | – | – | – | – |
| Metda Semiconductors | BW129 | 0–40,0 | 0,06 ($P_{1дБ}$) | <2,8 | >20 | 10 | – | – | – | – |
| Analog Devices | HMC986A | 0,1–50,0 | <0,6 ($P_{1дБ}$) | 2,0–2,3 | 36–30 | – | 2 | 2 | 11 | 11 |

Таблица 11. Интегральные многопозиционные переключатели на арсенид-галлиевых полевых транзисторах

| Фирма | Модель | Тип | Диапазон частот, ГГц | $P_{вх.}$, Вт | IL, дБ | ISO, дБ | $T_{п.}$, нс | $T_{r.}$, нс | $T_{f.}$, нс | $T_{он.}$, нс | $T_{off.}$, нс |
|---------------------------|-------------|------|----------------------|---------------------------|------------|-----------|---------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|
| CEL | CG2430X1 | SP3T | 0,1-6,0 | <1,25 ($P_{0,1дБ}$) | 0,4-0,6 | 33-25 | 80 | - | - | - | - |
| Qorvo | RFSW6131 | SP3T | 0-6,0 | 0,50-1,25 ($P_{0,1дБ}$) | 0,45-0,65 | 32-24 | - | 20 | 20 | 25 | 25 |
| SuperApex | SAC3215 | SP3T | 0-8,0 | 0,5 ($P_{1дБ}$) | 1,5 | 50 | 30 | - | - | - | - |
| Chengdu Ganide Technology | GMM0541 | SP3T | 0-18,0 | <1,0 | 1,0 | 50-45 | 20 | - | - | - | - |
| KCB Solutions | KCB 826 | SP4T | 0,02-4,0 | 1,0 ($P_{1дБ}$) | 0,9-1,5 | 55-38 | - | 21 | 21 | 125 | 125 |
| Microsemi | MMS008PP3 | SP4T | 0-8,0 | 0,8 ($P_{1дБ}$) | 1,2-1,7 | 55-43 | - | 10 | 10 | 85 | 35 |
| SuperApex | SAC3223 | SP4T | 0-12,0 | 0,1 ($P_{1дБ}$) | 2,1 | 35 | 43 | - | - | - | - |
| Custom MMIC | CMD203C4 | SP4T | 0-20,0 | 0,125 ($P_{1дБ}$) | 2,4 | 39 | - | 66 | 66 | 81 | 8 |
| Metda Semiconductors | NC1625C-120 | SP4T | 0-20,0 | 0,2 ($P_{1дБ}$) | $\leq 2,3$ | ≥ 20 | 10 | - | - | - | - |
| UMS | CHS2412-QDG | SP4T | 23,0-26,0 | <0,4 | 2,9 | 35 | 30 | - | - | - | - |
| Custom MMIC | CMD235C4 | SP5T | 0-18,0 | 0,1 ($P_{0,1дБ}$) | 2,5 | 44 | 60 | - | - | - | - |
| Analog Devices | HMC252QS24 | SP6T | 0-3,0 | 0,25 ($P_{1дБ}$) | 0,8-3,0 | 41-29 | - | 35 | 35 | 120 | 120 |
| Custom MMIC | CMD236C4 | SP6T | 0-18,0 | 0,06 ($P_{0,1дБ}$) | 2,5 | 42 | 60 | - | - | - | - |
| Analog Devices | HMC321LP4 | SP8T | 0-8,0 | 0,2 ($P_{1дБ}$) | 2,3-2,7 | 40-25 | - | 50 | 50 | 150 | 150 |
| Chengdu Ganide Technology | GNM4129 | SP8T | 0-10,0 | - | 2,4 | 24 | 20 | - | - | - | - |

Таблица 12. Интегральные DPDT-переключатели на арсенид-галлиевых полевых транзисторах

| Фирма | Модель | Диапазон частот, ГГц | $P_{вх.}$, Вт | IL, дБ | ISO, дБ | $T_{п.}$, нс | $T_{r.}$, нс | $T_{f.}$, нс | $T_{он.}$, нс | $T_{off.}$, нс | V_T , мВ |
|--------------------|----------------|----------------------|----------------------|----------|---------|---------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|------------|
| MACOM | MASW2040 | 0-2,0 | <2,5 | <0,4-0,6 | >25-15 | - | 3 | 3 | 6 | 6 | 20 |
| MACOM | MASW-007587 | 0-4,0 | <12,5 ($P_{1дБ}$) | 0,6-1,2 | 46-27 | - | 64 | 80 | 90 | 90 | 5 |
| Skyworks Solutions | SKY13355-374LF | 0,1-6,0 | <2,0 ($P_{1дБ}$) | 0,5-0,9 | 31-15 | - | 20 | 20 | 30 | 30 | - |
| CEL | CG2164X3 | 0,05-6,0 | <2,0 | 0,4-0,6 | 37-15 | - | - | - | 30 | 30 | - |
| Qorvo | RFSW6223 | 0,01-6,0 | <2,5 ($P_{1дБ}$) | 0,6-0,8 | 37-16 | - | 20 | 20 | 35 | 35 | - |
| Filtron | FMS2007 | 0-6,0 | <0,5 | 0,9-1,3 | 39-28 | - | 30 | 30 | - | - | - |
| Analog Devices | HMC427LP3 | 0-8,0 | 0,4 ($P_{1дБ}$) | 1,2-1,6 | 48-32 | - | 2 | 2 | 4 | 4 | - |
| Custom MMIC | CMD272P3 | 0-10,0 | 0,32 ($P_{0,1дБ}$) | 1,6 | 43 | 10 | - | - | - | - | - |
| Custom MMIC | CMD273P3 | 0-12,0 | 0,32 ($P_{0,1дБ}$) | 1,7 | 42 | 12 | - | - | - | - | - |

Таблица 13. Фосфид-индиевые (InP-HEMT) SPDT-переключатели в интегральном исполнении компании Teledyne Relays

| Модель | Диапазон частот, ГГц | $P_{1дБ}$, дБм | IL , дБ | Iso , дБ | $T_{п}$, нс |
|------------|----------------------|-----------------|-----------|------------|--------------|
| InP1012-14 | 0–14,0 | 8,6–21,8 | 0,9–2,0 | 69–30 | <100 |
| InP1012-20 | 0–20,0 | 8,6–21,8 | 0,9–2,5 | 69–26 | <100 |
| InP1012-30 | 0–30,0 | 8,6–21,8 | 0,9–3,3 | 69–23 | <100 |
| InP1012-40 | 0–40,0 | 8,6–21,8 | 1,0–3,7 | 75–18 | <100 |
| InP1012-60 | 0–60,0 | 8,6–21,8 | 0,9–3,7 | 69–17 | <100 |

Так, для микросхемы RFSW6124 компании Qorvo приводятся сведения о том, что при изменении температуры окружающей среды от -40 до 85 °C время нарастания уменьшается на 10%, а время спада – на 20%.

Более значительное влияние на время переключения оказывает изменение уровня входной мощности (рис. 23). При горячем переключении изменение уровня входной мощности импульсного сигнала ($T_{имп.} = 500$ мкс, $Q = 50\%$) с 25 до 33 дБм приводит к увеличению времени переключения с 20 до 45 нс.

Схемотехнические решения, используемые при создании SPST (рис. 24а), SPDT (рис. 24б), SPMT (рис. 24в) и DPDT (рис. 24г) переключателей, отличаются значительным разнообразием, однако все они базируются на последовательных, параллельных или последовательно-параллельных структурах. Порядок включения последовательных и параллельных ветвей, а также число

транзисторов в каждой из них могут существенно различаться. Многопозиционные переключатели строятся на основе SPST-структур. Входной сигнал подается одновременно на входы всех параллельно включенных SPST-структур (рис. 24в). DPDT-изделия реализуются на четырех элементарных переключателях (рис. 24г), сложность которых зависит от требований, предъявляемых к характеристикам всего изделия. В схеме, показанной на рис. 24г, при $V_{y1} = 0$ В и $V_{y2} = -5$ В между входом A_1 и выходом A_2 обеспечивается большая развязка, а между входом B_1 и выходом B_2 – малые потери. Смена управляющих напряжений ($V_{y1} = -5$ В и $V_{y2} = 0$ В) приводит к малым потерям между входом A_1 и выходом A_2 и большой развязке между входом B_1 и выходом B_2 . Все переключатели могут быть как отражательными, так и поглощающими. В случае необходимости обеспечения большой входной мощности транзисторы в переключателях могут включаться группами (рис. 25), причем их количество может быть очень большим. Нельзя не упомянуть также линейку переключателей, созданных компанией Teledyne Relays по технологии InP-HEMT. Эти компактные изделия во flip-chip исполнении с размерами $3 \times 3 \times 1$ мм были разработаны применительно к измерительным, связным и радиолокационным задачам. В линейку входят пять переключателей, рассчитанных на диапазоны частот 0–14, 0–20, 0–30, 0–40 и 0–60 ГГц (табл. 13). Все они обеспечивают время коммутации 100 нс, обладают устойчивостью к ударам, вибрационным и радиационным (до 100 крад) воздействиям. Четыре возможных режима работы этих SPDT-переключателей определяются значениями управляющих напряжений V_{y1} и V_{y2} (рис. 26), каждое из которых может принимать два значения: 0 и $-2,5$ В. Рабочий диапазон температур этих переключателей $-65...125$ °C.

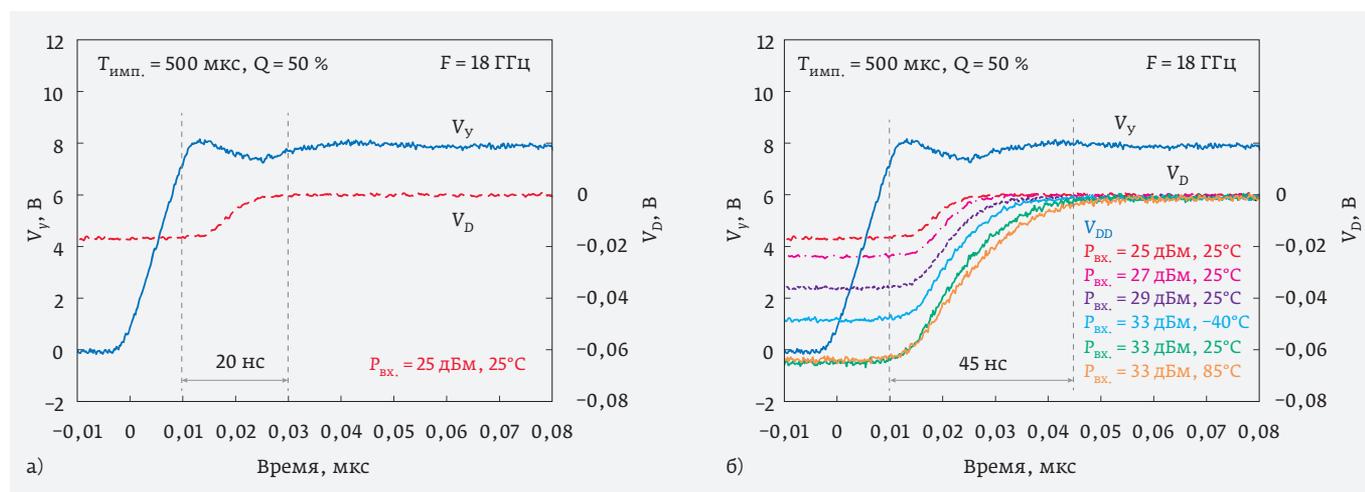


Рис. 23. Управляющее напряжение V_y и протектированный выходной сигнал V_D в SPDT-переключателе TGS4310-SM компании Qorvo в режимах холодного (а) и горячего (б) переключения при различных уровнях входной мощности импульсного сигнала и температурах окружающей среды. Длительность импульсов – 500 мкс, скважность $Q = 50\%$

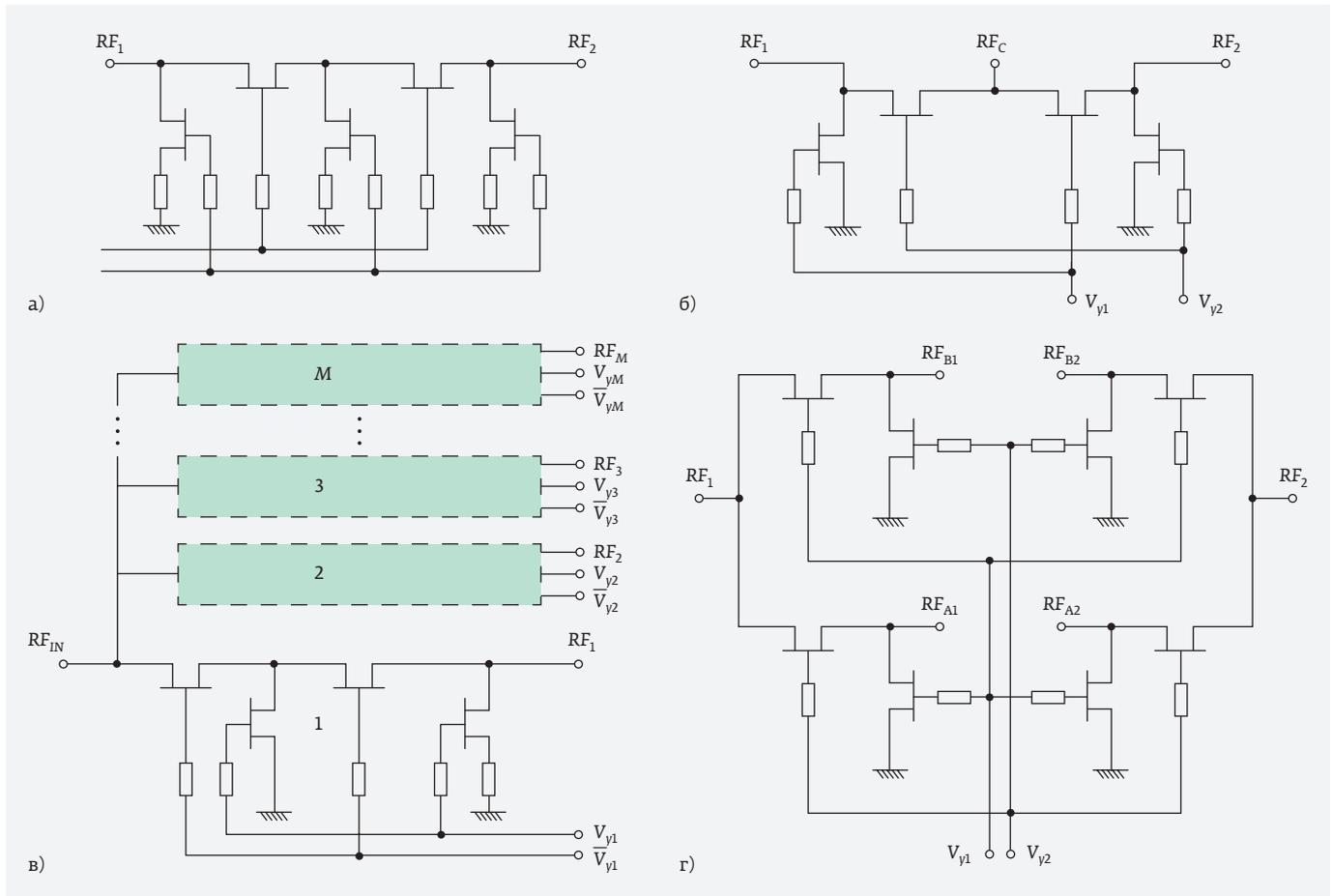


Рис. 24. Принципиальные схемы арсенид-галлиевых переключателей на полевых транзисторах: а - SPST; б - SPDT; в - SPMT; г - DPDT

Количество компаний, производящих арсенид-галлиевые переключатели на полевых транзисторах в модульном исполнении, невелико: Analog Devices, Keysight Technologies, American Microwave Corporation (AMC), Microsemi (табл. 14). Они продвигают на рынок SPST-, SPDT-, SP4T- и SP36T-переключатели (рис. 27). За исключением изделий, разработанных компанией Keysight Technologies, все переключатели имеют малое время коммутации, причем в большинстве изделий, поставляемых компанией Analog Devices, значения T_r и T_f не превышают 3 нс. Переключатели компании Keysight Technologies, предназначенные для тестирования больших объемов испытуемых изделий, разработаны по технологии,

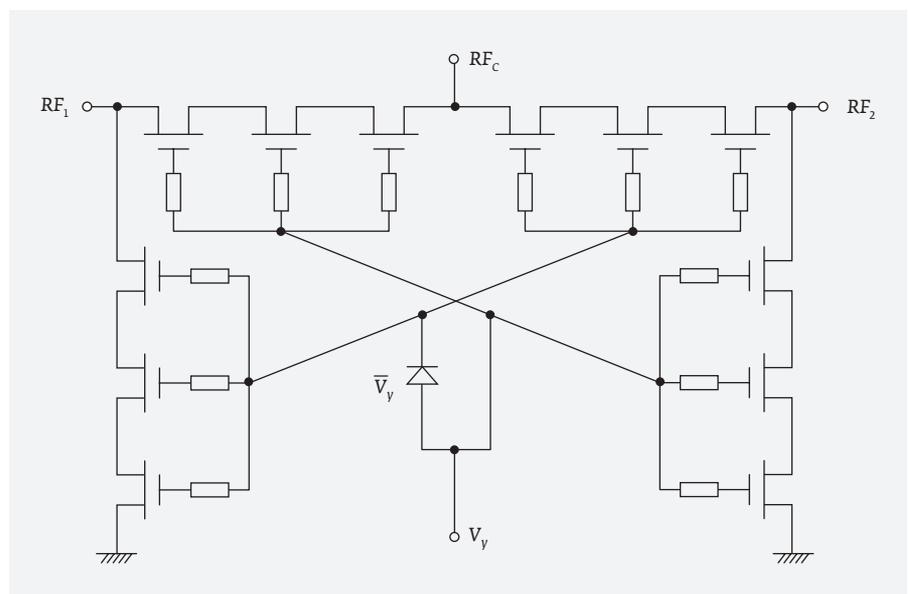


Рис. 25. Принципиальная схема арсенид-галлиевого SPDT-переключателя с групповым включением полевых транзисторов

Таблица 14. Переключатели на арсенид-галлиевых полевых транзисторах в модульном исполнении

| Фирма | Модель | Тип | Диапазон частот, ГГц | $P_{вк.}$, Вт | IL , дБ | Iso , дБ | T_n , нс | T_r , нс | T_f , нс | $T_{оп}$, нс | T_{off} , нс | V_T , мВ |
|-----------------------|-------------|-------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|---------------|----------------|------------|
| Analog Devices | HMC-C019 | SPST | 0–20,0 | 0,20 ($P_{1дБ}$) | 3,0–6,0 | 100–65 | – | 2,5 | 2,5 | 8,5 | 8,5 | 20 |
| Analog Devices | HMC-C583 | SPST | 0,1–40,0 | 0,12 ($P_{1дБ}$) | 7,0 | 50 | – | 1 | 1 | 10 | 10 | – |
| Keysight Technologies | U9397A | SPDT | 0,0003–8,0 | 0,8 | 3,5 | 100 | – | 5000 | 500 | – | – | 10 |
| Keysight Technologies | U9397C | SPDT | 0,0003–18,0 | 0,5 | 6,5 | 90 | – | 5000 | 500 | – | – | 10 |
| Analog Devices | HMC-C058 | SPDT | 0–18,0 | 0,50 ($P_{1дБ}$) | 1,6–3,0 | 65–55 | – | 3 | 3 | 12 | 12 | 12 |
| Analog Devices | HMC-C011 | SPDT | 0–20,0 | 0,20 ($P_{1дБ}$) | 1,8–4,0 | 46–35 | – | 1,3 | 1,3 | 5 | 4 | 20 |
| AMC | SWM-DC20-2D | SPDT | 0–20,0 | 0,32 ($P_{1дБ}$) | <2,2–3,5 | 50–40 | – | 10 | 10 | 20 | 20 | – |
| Analog Devices | HMC-C071 | SP4T | 0–20,0 | 0,25 ($P_{1дБ}$) | 2,7–3,5 | 48–37 | – | 17 | 17 | 130 | 130 | – |
| Microsemi | GG-75431-64 | SP36T | 0,1–20,0 | 1,0 | <7,0 | >70 | 100 | – | – | – | – | – |

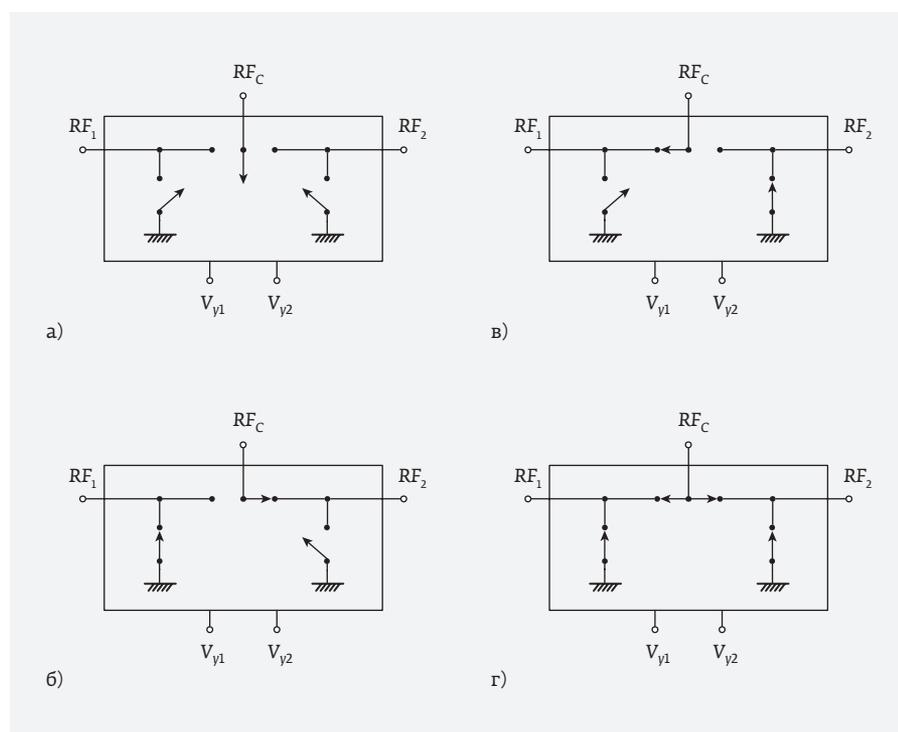


Рис. 26. Режимы работы фосфид-индиевых переключателей, выпускаемых компанией Teledyne Relays: а – $V_{y1} = V_{y2} = -2,5$ В; б – $V_{y1} = -2,5$ В, $V_{y2} = 0$ В; в – $V_{y1} = 0$ В, $V_{y2} = -2,5$ В; г – $V_{y1} = V_{y2} = 0$ В

обеспечивающей малое время установления T_{set} . И, безусловно, уникальным представляется 36-канальный переключатель GG-75431-64, разработанный компанией Microsemi (рис. 27д) со 100-нс временем коммутации.

Очевидным недостатком арсенид-галлиевых переключателей на полевых транзисторах, который так и не удалось преодолеть, является их высокая чувствительность к воздействию статического электричества (модель человеческого тела (HBM), класс 1).

НИТРИД-ГАЛЛИЕВЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

Переключатели на арсенид-галлиевых полевых транзисторах начали активно применяться с 1980 года и вследствие их низкой стоимости прочно обосновались на рынке сотовой связи. Появились они благодаря финансовым вливаниям со стороны DAPRA и значительному спросу

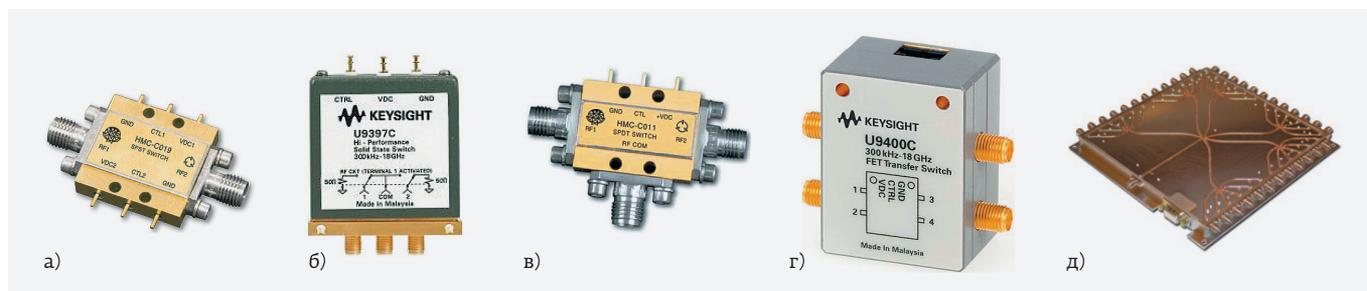


Рис. 27. Конструкции GaAs PHEMT переключателей в модульном исполнении: а – модель HMC-C019, SPST, компания Analog Devices; б – модель U9397C, SPDT, компания Keysight Technologies; в – модель HMC-C011, SPDT, компания Analog Devices; г – модель U9400C, SP4T, компания Keysight Technologies; д – модель GG-75431-64, SP36T, компания Microsemi

со стороны военных и коммерческих структур. Эти широкополосные переключатели на полевых транзисторах, являющиеся по сути дела управляемыми напряжением резисторами, с маломощными цепями управления, достаточно высокой линейностью, входной мощностью, достигающей 2 Вт, реализуемые в малых габаритах, и более простые в разработке в сравнении с рpn-диодными изделиями, достаточно быстро закрепились на рынке сотовой связи. В 1990-е годы на смену FET / MESFET-изделиям пришли переключатели, изготовленные по PHEMT-технологии.

Многие недостатки, свойственные первым изделиям, выполненным по этой технологии, были в последующем устранены, однако, кардинального улучшения характеристик не последовало.

В конце 90-х годов прошлого столетия с развитием средств РЭБ и РЛС с АФАР потребовались более мощные переключатели. И здесь, как и в случае с GaAs-изделиями, своевременным оказалось финансирование технологии создания мощных нитрид-галлиевых транзисторов со стороны DAPRA.

Фильтры ФИЛИН

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

Фильтры ВЧ/СВЧ, в том числе переключаемые и перестраиваемые, и устройства на их основе для частот до 26,5 ГГц и выше

- Диплексеры
- Мультиплексеры
- Генераторы
- Фазовращатели
- Делители/сумматоры мощности
- Направленные ответвители

Любые виды заказов:

- крупносерийные заказы
- единичные заказы
- срочные заказы
- НИР, ОКР

Разработка, производство, испытания устройств с учетом требований заказчика

- Устройства на сосредоточенных элементах
- Устройства на керамических резонаторах
- Гребенчатые и встречно-стержневые фильтры
- Моноблочные керамические фильтры
- Устройства на микрополосковых линиях
- Волноводные устройства
- Устройства по технологии LTCC

109316, Москва, Волгоградский проспект, 42 Отдел продаж: +7 495 95 777 45 Техподдержка: +7 495 361 09 04

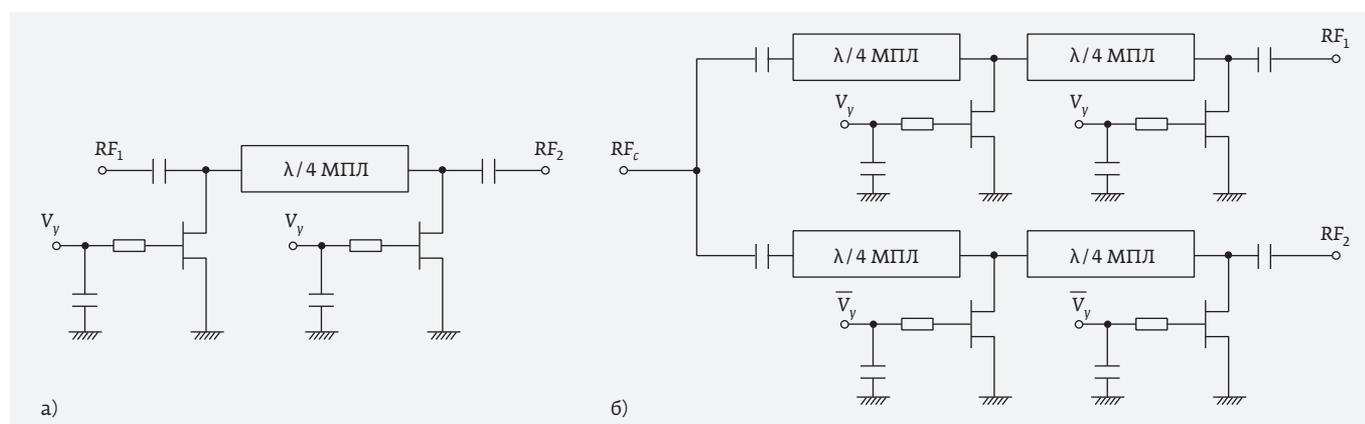


Рис. 28. Упрощенные принципиальные схемы AlGaIn/GaN-переключателей с использованием четверть-волновых микрополосковых линий ($\lambda/4$ МПЛ): а – SPST; б – SPDT

Имея лучшие технические характеристики и более широкий диапазон частот, нитрид-галлиевая технология отличается рядом свойств, которые делают ее весьма подходящей для использования в мощных СВЧ-изделиях. GaN-транзисторы обеспечивают наивысшую плотность мощности и отличаются от полупроводниковых изделий на основе других технологий более высокой надежностью, особенно при высоких температурах. Перечисленные факторы позволяют создавать мощные изделия чрезвычайно малых размеров.

В качестве подложек при изготовлении нитрид-галлиевых транзисторов могут использоваться кремний, карбид кремния и другие материалы. При соединении разнородных материалов подложки и эпитаксиальной пленки равенство постоянных их кристаллических решеток является одним из наиболее важных условий. Второе существенное условие – близость коэффициентов термического расширения подложки и эпитаксиальной пленки. Из-за невыполнения этого условия может произойти деформация гетероструктуры, вплоть до ее растрескивания. Для решения этой проблемы между GaN и материалом подложки используют буферные слои, коэффициент расширения которых близок к коэффициенту термического расширения подложки, а также применяют другие, более подходящие виды подложек. Одной из наиболее часто используемых, особенно в силовой электронике, является гетероструктура GaN on Si, в которой к настоящему времени достигнуто пробивное напряжение до 1600 В. Толщина слоя GaN на кремнии доведена в этих транзисторах до 30 мкм, что исключает возможность деформаций.

В СВЧ-изделиях чаще всего применяются гетероструктуры GaN on SiC [22] и AlGaIn/GaN [23]. Первые из них обеспечивают широкие полосы рабочих частот при высоких уровнях входной мощности. Альтернативой SiC-подложкам является подход, основанный на использовании достаточно толстых переходных изолирующих слоев AlN, позволяющий

изготовить на таких SiC/AlN-подложках транзисторы нового поколения, обеспечивающие большие мощности при разумной стоимости. В GaN SiC изделиях высокая мощность сочетается с низкими значениями сопротивления включения R_{on} , емкости в выключенном состоянии C_{off} , низким вносимым ослаблением, высоким напряжением пробоя V_{br} и высокой теплопроводностью, которая в шесть раз превышает теплопроводность GaAs-подложек.

Последнее обстоятельство позволяет работать этим изделиям при более высоких температурах, чем при использовании GaAs- и Si-подложек, а при температуре, совпадающей с температурой окружающей среды, обеспечивает повышенную надежность и среднее время наработки на отказ по сравнению с арсенид-галлиевыми изделиями. Снижение рабочей температуры подложек позволяет реализовать переключатели в кристаллах меньших размеров. GaN on SiC имеют исключительно высокую теплопроводность, в результате чего изделия, в которых они используются, при одинаковой рассеиваемой мощности остаются холодными в сравнении с устройствами, где применяется GaN on Si.

Вследствие сложной технологии GaN-изделия значительно дороже своих аналогов. При этом, однако, следует иметь в виду, что вследствие их большой мощности и малых габаритов существенно снижается стоимость разработки и конструирования. Более высокая теплопроводность снижает также затраты на отвод тепла, а больший срок службы уменьшает эксплуатационные расходы.

Число компаний, занимающихся производством GaN СВЧ-переключателей, невелико: Qorvo, UMS, Microwave Electronics for Communications (MEC), Chengdu Ganide Technology, Metda Semiconductors, Bowei Integrated Circuits. Мощность выпускаемых ими переключателей равна 10–100 Вт, верхняя граница их рабочего диапазона не превышает 18 ГГц, а время коммутации находится в пределах 10–50 нс (табл. 15). Два SPDT-переключателя по технологии



ИНТЕЛЛЕКТ. КАЧЕСТВО.

АО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»
Москва, Щелковское шоссе, д.5, стр.1
Тел. (499) 644-21-03, (499) 644-25-62
(многоканальный)
Факс +7(499) 644-19-70
E-mail: mwsystems@mwsystems.ru
www.mwsystems.ru

- СОВРЕМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО И ТЕХНОЛОГИИ
- ОПТИМАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ ЦЕНА/КАЧЕСТВО
- ПОЛНЫЙ СПЕКТР УСЛУГ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ПРОИЗВОДСТВУ МОНОЛИТНЫХ И ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ, МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ И БЛОКОВ РЭА (0,3 - 22 ГГц)

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»

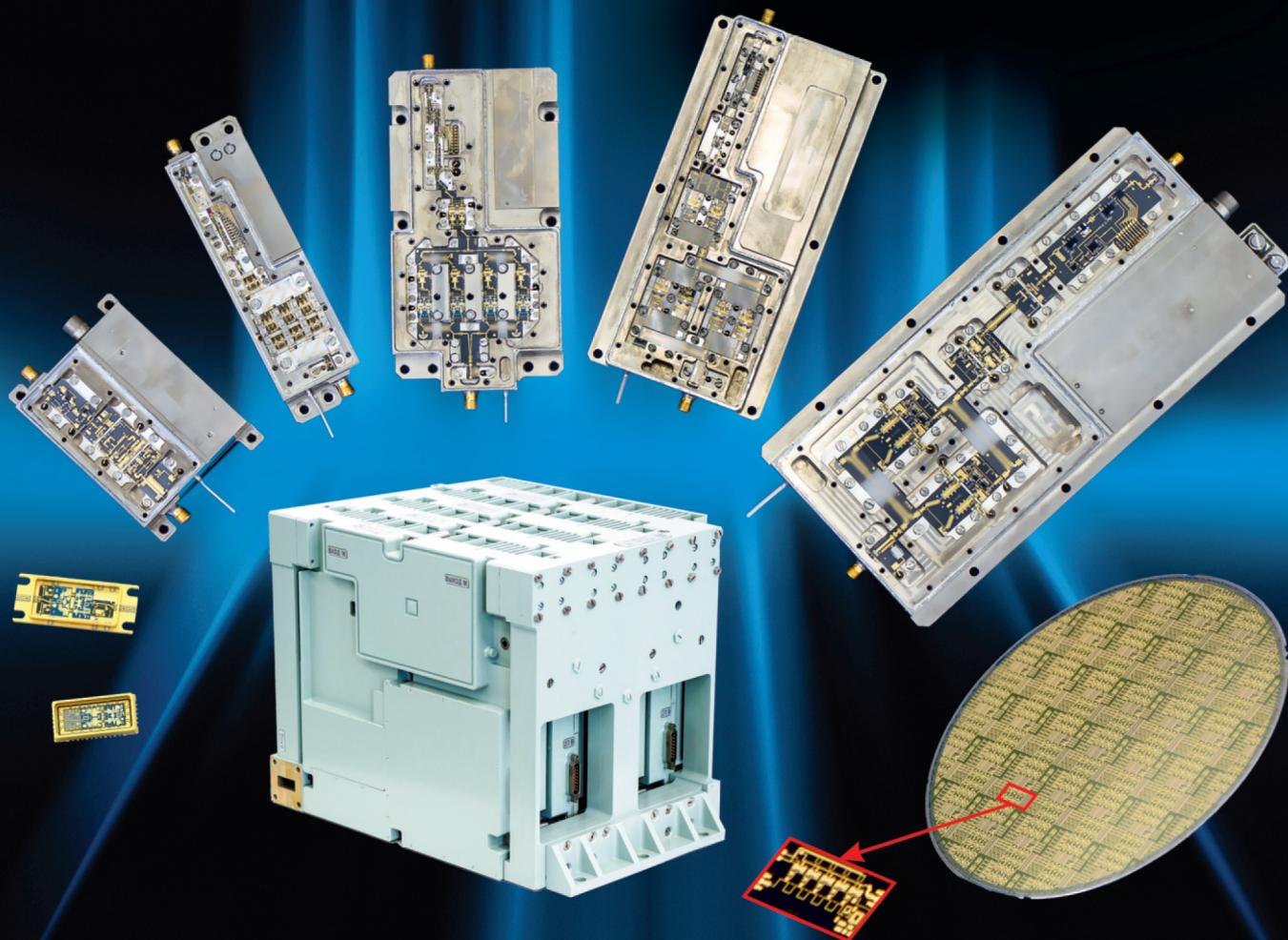


Таблица 15. Интегральные нитрид-галлиевые (GaN) переключатели

| Фирма | Модель | Тип ПК | Диапазон частот, ГГц | $P_{вх.}$, Вт | IL , дБ | Iso , дБ | $T_{п.}$, нс | $T_{r.}$, нс | $T_{f.}$, нс | $T_{оп.}$, нс | $T_{off.}$, нс |
|---------------------------|-------------|--------|----------------------|---------------------|-----------|------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|
| Chengdu Ganide Technology | GNM4109 | SPDT | 0–2,0 | 100 | 0,5 | 37 | 10 | - | - | - | - |
| Qorvo | QPC1005 | SPDT | 0,15–2,8 | 50 ($P_{0,1дБ}$) | 0,3–0,7 | 57–29 | 30 | - | - | - | - |
| Qorvo | TGS2355-SM | SPDT | 0,5–6,0 | 100 ($P_{0,1дБ}$) | 0,7–1,1 | 40 | - | <50 | 50 | - | - |
| Qorvo | RFSW2100 | SPDT | 0,03–6,0 | 40 ($P_{0,1дБ}$) | 0,45 | 39 | 40 | - | - | 40 | 22 |
| Qorvo | TGS2352-2 | SPDT | 0,5–12,0 | <25 | <1,0 | 35 | - | - | - | 31 | 18 |
| UMS | CHS7012-99F | SPDT | 0–12,0 | <12,5 | 1,4 | 35 | - | - | - | 20 | 20 |
| UMS | CHS8618-99F | SPDT | 6,0–18,0 | 16 ($P_{1дБ}$) | 1,3 | 34 | - | - | - | 30 | 30 |
| Qorvo | TGS2353-2 | SPDT | 0,5–18,0 | 10 | <1,5 | 30 | - | - | - | 31 | 18 |
| Chengdu Ganide Technology | GNM4201 | SPDT | 0–18,0 | 40 | - | - | 20 | - | - | - | - |
| Qorvo | QPC1006 | SP3T | 0,15–2,8 | <60 | 0,3–1,0 | 57–30 | 50 | - | - | - | - |

GaN HEMT с допустимой входной мощностью более 4 Вт выпускает компания Northrop Grumman. Диапазон рабочих частот этих микросхем составляет 0–20 ГГц (модель SDN-109) и 0–40 ГГц (модель SDN-106). Сведения о временах переключения, достигаемых в этих микросхемах, отсутствуют.

Схемотехника GaN-переключателей (рис. 28) мало отличается от решений, принимаемых при разработке GaAs-изделий на полевых транзисторах. Приведенные на рис. 28 принципиальные схемы SPST- и SPDT-переключателей реализованы с использованием четвертьволновых микрополосковых линий ($\lambda/4$ МПЛ).

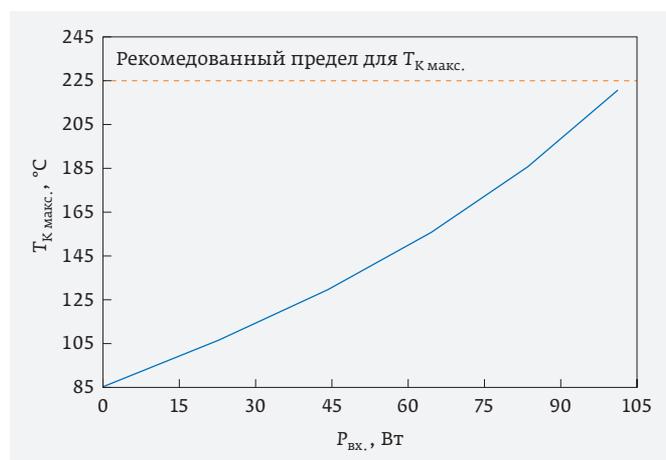


Рис. 29. Зависимость максимальной температуры канала $T_{K макс.}$ от уровня непрерывной входной мощности $P_{вх.}$ в GaN-переключателе TGS2355 (компания Qorvo)

Напряжение пробоя в интегральных переключателях, включенных в табл. 15, отрицательное и находится в пределах –25...–40 В. Однако в ряде публикаций встречаются упоминания о более высоких значениях V_{br} , например 100 В [24] и даже 200 В [25]. Можно также полагать, что достигнутые в GaN on Si транзисторах напряжения до 1600 В в ближайшее время существенным образом скажутся на значениях входной мощности в СВЧ-переключателях.

Интегральные GaN переключатели весьма перспективны там, где требуется большая коммутируемая мощность.

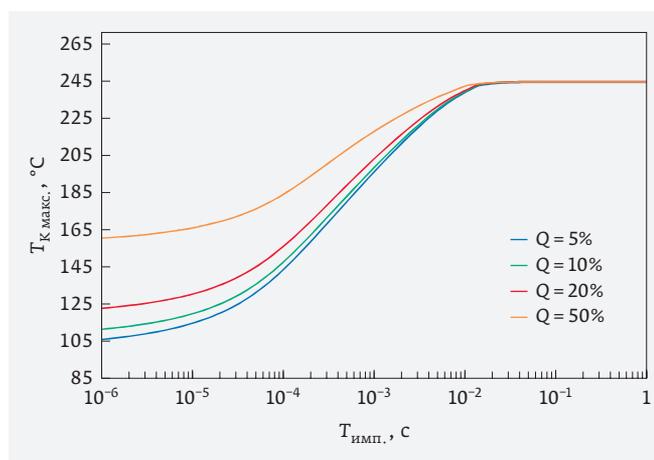


Рис. 30. Зависимость максимальной температуры канала $T_{K макс.}$ от длительности $T_{имп.}$ сигналов с импульсной мощностью $P_{имп.} = 100$ Вт при различных значениях скважности Q (модель TGS2355, компания Qorvo)



ПРОЕКТИРОВАНИЕ



ГЕНЕРАЦИЯ
ИЗОБРАЖЕНИЙ



КОНТРОЛЬ
ФОТОШАБЛОНОВ



РЕМОНТ
ФОТОШАБЛОНОВ



ФОТОЛИТОГРАФИЯ



КОНТРОЛЬ
ПЛАСТИН



СБОРКА ИЗДЕЛИЙ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

БЕЗМАСОЧНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Многоканальные лазерные генераторы изображений
- Проектная норма 0.35, 0.6 μm
- Высокая точность совмещения
- $\varnothing 200, 150, 100$ мм



ГЕНЕРАТОРЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Диапазон UV, DUV
- Проектная норма 90, 130 нм
- 16/32-лучевая архитектура
- Фазосдвигающие шаблоны
- Быстрая переналадка пластина – шаблон



КОНТРОЛЬ ФОТОШАБЛОНОВ

- Проектная норма 90, 130, 250 нм
- Твердотельный лазер
- Контроль методом D2DB, D2D
- Высокая производительность
- Контроль неплоскостности



РЕМОНТ ФОТОШАБЛОНОВ

- Фемтосекундный лазер
- 0.15/ 0.3/ 0.5 μm min элемент
- Размер шаблона до 9"х9"
- Ремонт копированием
- Ремонт через пелликл
- Прозрачные / непрозрачные дефекты



КОНТАКТНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Ручная и автоматизированная загрузка
- Двусторонняя литография
- Высокая точность совмещения
- Низкий уровень генерации дефектов
- Высокая энергоэффективность



СТЕППЕРЫ

- Проектная норма 0.35, 0.8 μm
- Автоматический масштаб
- Двустороннее совмещение
- $\varnothing 200, 150, 100$ мм
- Твердотельный источник света



КОНТРОЛЬ ТОПОЛОГИИ

- Контроль привносимых дефектов пластин без топологии
- Автоматический микро и макро контроль дефектов пластин с топологией
- Высокая производительность



АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЕ

- Контроль микроразмеров
- Контроль неплоскостности
- Контроль координат
- Контроль толщин
- Контроль рассовмещения



ЗОНДОВЫЙ КОНТРОЛЬ

- $\varnothing 200, 150, 100$ мм
- ± 4 мкм погрешность контактирования
- Ручное / полуавтоматическое / автоматическое оборудование



РАЗДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИН И ПОДЛОЖЕК

- $\varnothing 300, 200, 150, 100$ мм
- 2 независимые зоны разделения в одной установке
- 2.4 кВт мощность электрошпинделя
- Полуавтоматическое / автоматическое оборудование



Создаем традиции будущего!



Приглашаем вас
13-15 апреля
на наш стенд
№А3117 на
EXPOELECTRONICA /
ELECTRONTECHEXPO
2021 (г.КРАСНОГОРСК)

ваш планар



- Единое таможенное пространство
- 59 лет опыта в разработке и производстве прецизионного оптико-механического и сборочного оборудования
- Высокий уровень применяемых технологий и современного оборудования
- Полный цикл разработки и производства, высококвалифицированный персонал
- Высокое качество изделий подтверждено национальными и международными стандартами
- Возможность комплексной поставки оборудования, адаптированного для Российского рынка, программного обеспечения для поддержки процессов изготовления фотошаблонов и 3D-моделирования для фотолитографии компании GenISys (Германия)

Республика Беларусь
220033, г. Минск
Партизанский пр-т, 2

тел: (+375 17) 226 09 82
(+375 17) 223 22 26
факс: (+375 17) 226 12 05

office@kbtem-omo.by
kbtem.omo@gmail.com
www.planar.by



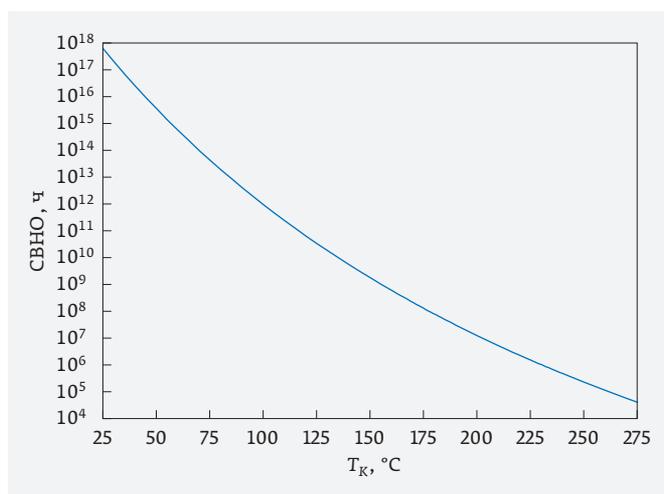


Рис. 31. Зависимость среднего времени наработки на отказ (СВНО) от максимальной температуры канала (модель TGS2355, компания Qorvo)

Пока значения этой мощности не превышают 100 Вт (см. табл. 15). Несколько меньшую мощность ($P_{0,1\text{дБ}} = 40$ Вт) обеспечивает GaN SPDT-переключатель RFSW2100 [26], работающий в диапазоне 0,03–6 ГГц с уровнем вносимых потерь <0,45 дБ, развязкой 39 дБ, временем коммутации 40 нс и током управления менее 0,5 мА ($I_{IP3} = 72$ дБм, $V_{br} = -60$ В). Этот переключатель доступен в виде кристалла (RFSW2100D) или в 12-выводном QFN-корпусе размером 3×3 мм (RFSW2100). При использовании эффективного радиатора изделие RFSW2100D обеспечивает входную мощность до 75 Вт. Эта же технология GaN on SiC была использована компанией Qorvo для создания широкополосных (0,5–6; 0,1–12 и 0,5–18 ГГц) переключателей TGS2351-SM,

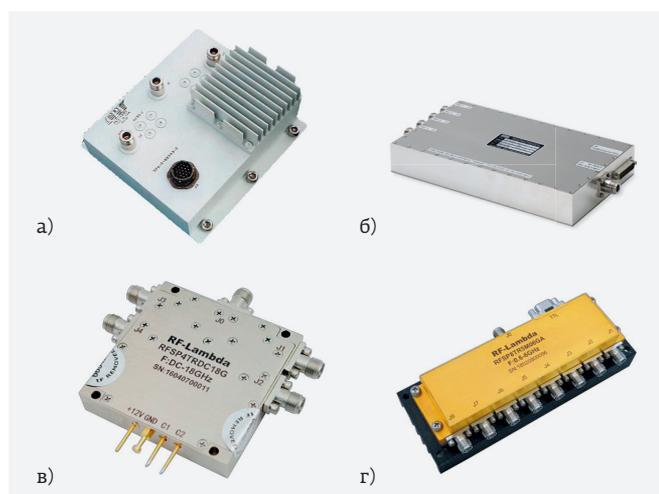


Рис. 32. Конструкции нитрид-галлиевых переключателей в модульном исполнении: а – модель VLC1599, SPDT, компания CPI; б – модель RS-104L, SP4T, компания MPI; в – модель RFSP4TRDC18G, SP4T, компания RF-Lambda; г – модель RFSP8TR5M06GA, SP8T, компания RF-Lambda

TGS2352 и TGS2353-2 с входными мощностями 40, 20 и 10 Вт, соответственно, и временем коммутации 35–50 нс [27]. Имеется в линейке продукции, выпускаемой компанией Qorvo, и многопозиционный SP3T-переключатель QPC1006, обеспечивающий за 50 нс коммутацию сигналов мощностью до 60 Вт. Упоминается в литературе также и 200-Вт переключатель, разработанный компанией Fujitsu в кооперации с японским министерством обороны для радиолокатора L-диапазона [28]. С большой вероятностью изделия, выполненные по этой технологии, заменят переключатели на дискретных pin-диодах. Предельные возможности

Таблица 16. Нитрид-галлиевые переключатели в модульном исполнении

| Фирма | Модель | Тип | Диапазон частот, ГГц | $P_{вх}$, Вт | IL , дБ | Iso , дБ | $T_{п}$, нс |
|-----------|--------------|------|----------------------|----------------------------|-----------|------------|----------------|
| RFcore | RSW1020H54D | SPDT | 1,0–2,0 | 200 | 0,5 | >40 | $2 \cdot 10^3$ |
| RFcore | RSW2030H54D | SPDT | 2,0–3,0 | 200 | 0,75 | >30 | $2 \cdot 10^3$ |
| CPI | VLS1522A | SPDT | 3,05–3,55 | 1000 (пик.) | <1,0 | >25 | $5 \cdot 10^3$ |
| RF-Lambda | RFSP2TRDC06G | SPDT | 0–6,0 | 40 ($P_{0,1\text{дБ}}$) | 0,8–1,1 | 37–28 | <100 |
| RF-Lambda | RFSP2TRDC18G | SPDT | 0–18,0 | 10 ($P_{0,1\text{дБ}}$) | 0,8–1,7 | 45–25 | 50 |
| MPI | RS-104L | SP4T | 0,291–0,318 | 130 | <1,0 | >25 | $5 \cdot 10^3$ |
| RF-Lambda | RFSP4TRDC12G | SP4T | 0–12,0 | 20 ($P_{1\text{дБ}}$) | 1,8 | 70 | <18 |
| RF-Lambda | RFSP4TRDC18G | SP4T | 0–18,0 | 10 ($P_{0,1\text{дБ}}$) | 1,9–3,6 | 40–25 | <100 |
| RF-Lambda | RFSP8TR5M06G | SP8T | 0–6,0 | 100 ($P_{0,1\text{дБ}}$) | 2,2–2,8 | 45–38 | <100 |
| RF-Lambda | RFSP8TRDC18G | SP8T | 0–18,0 | 10 ($P_{1\text{дБ}}$) | <4,0 | 90 | 18 |

РОССИЙСКАЯ НЕДЕЛЯ
ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ



СВЯЗЬ

«Информационные и коммуникационные
технологии»

15–18 июня 2021

33-я международная
выставка

Организатор



При поддержке:

- Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ
 - Комитета Государственной Думы ФС РФ по образованию и науке
- Под патронатом ТПП РФ

12+

Реклама



Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

www.sviaz-expo.ru

GaN-переключателй зависят от рабочей температуры канала T_K , которая определяется уровнем подаваемой на них мощности (рис. 29). При работе с импульсными сигналами условия работы переключателй существенно облегчаются и зависят от длительности импульсов и их скважности Q (рис. 30). В свою очередь рабочая температура канала определяет надежность переключателй, оцениваемую средним временем наработки на отказ (СВНО), которое оказывается весьма большим даже при предельных значениях этой температуры (рис. 31). Для изделий компании Qorvo $T_{K\text{макс.}} = 250\text{--}275^\circ\text{C}$.

Один из наиболее перспективных рынков нитрид-галлиевых изделий – это аэрокосмические системы. В результате испытаний, включающих воздействие накопленной дозы радиации, превышающей 1 Мрад, существенных изменений в характеристиках испытываемых изделий обнаружено не было.

Нитрид-галлиевые переключателй выпускаются и в модульном исполнении (рис. 32). Производят эти изделия компании: RF-Lambda, RFcore, CPI и MPI (табл. 16). В модульных переключателйх напряжение питания обычно равно +28 В (RFcore, CPI, MPI). Но есть исключение. В GaN-переключателйх компании RF-Lambda напряжение питания поддерживается равным +5 или +12 В. Токи потребления в этих изделиях в зависимости от уровня СВЧ-мощности (10–200 Вт) находятся в пределах от 100 до 700 мА. Значения пиковых мощностей в изделиях компании RFcore могут достигать 1 кВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Геворкян В., Кочемасов В.** Ферритовые переключателй // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 6. С. 90–94; № 9. С. 122–131.
2. **Кочемасов В.** Электромеханические переключателй ВЧ/СВЧ-сигналов – основные типы и производители // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2016. № 7. С. 114–121; № 8. С. 96–106; № 9. С. 128–134.
3. **Кочемасов В., Майстренко А.** СВЧ-переключателй на основе МЭМС // СВЧ-электроника. 2016. № 1. С. 36–42.
4. **Кочемасов В., Кирпичников А.** Твердотельные СВЧ-переключателй // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 10. С. 92–97; 2018. № 1. С. 116–124; 2018. № 2. С. 150–163.
5. **Кочемасов В., Рауткин Ю.** Интегральные СВЧ-переключателй // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2018. № 4. С. 122–127; № 5. С. 152–163; № 6. С. 80–93.
6. **Кочемасов В., Дингес С., Шадский В.** Твердотельные СВЧ-переключателй средней и большой мощности // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 8. С. 108–112; № 9. С. 116–130; № 10. С. 82–94; 2020. № 1. С. 142–151.
7. **Freeston A., Boles T., Varmazis C.** Speedy Switches Minimize Gate Lags // Microwave & RF. March 2010. PP. 98–102.
8. Understanding RF/Microwaves Solid State Switches and their Applications. Application Note. – Agilent Technologies.
9. Agilent U9397A/C FET Solid State Switches (SPDT) Technical overview. Agilent Technologies.
10. U9400A/C Solid State FET Transfer Switches. Technical overview. – Keysight Technologies.
11. Switches. – Каталог компании General Microwave.
12. **Blair E., Farrington K., Tubbs K.** Selecting the Right RF Switch. – Каталог компании Daico Industries. PP. 253–262.
13. Microwave Switches. – Каталог компании Elisra.
14. **Chinoy P., Jain N., Li P., et al.** Manufacture of Low-Loss Microwave Circuits using HMIC Technology // IEEE MTT-S Digest. 1994. PP. 1137–1140.
15. **Heston D. D., Seymour D. J., Zych D.** 100 MHz to 20 GHz Monolithic Single-Pole, Two-, Three-, and Four-Throw GaAs PIN Diode Switches. – 1991 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. PP. 429–432.
16. **Баров А., Гущин С.** GaAs МИС PIN диодного двухпозиционного коммутатора // Chip News. 2008. № 1. С. 50–51.
17. **Alekseev E., Pavlidis D., Ziegler V.** 77 GHz High-Isolation Coplanar Transmit-Receive Switch Using InGaAs/InP PIN Diodes. – 1998 IEEE GaAs IC Symposium.
18. **Lam K., Ding H., Liu X. et al.** Wideband Millimeter Wave PIN Diode SPDT Switch using IBM 0.13 μm SiGe Technology. – Proceeding of the European Microwave Integrated Circuit Conference. 2007. PP.108–111.
19. **Song P., Schmid R. L., Ulusoy A. C., Cressler J. D.** A High-Power, Low Loss W-band SPDT Switch Using SiGe PIN Diodes. – IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. 2014. PP. 195–198.
20. **Yang J. G., Yang K.** High-Linearity K-band Absorptive-Type MMIC Switch Using GaN PIN-Diodes // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2013. V. 23. No.1. PP. 37–39.
21. **Boles T., Freeston A.** New NanoSecond Switch Technology // Microwave Journal. June 2010. PP. 56–60.
22. **Campbell C. F., Dumka D. C.** Wideband High Power GaN on SiC SPDT Switch MMICs. 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. PP. 145–148.
23. **Ma B. Y., Boutros K. S., Hacker J. B. et al.** High Power AlGaIn/GaN Ku-band MMIC SPDT Switch and Design Consideration. – 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. PP. 1473–1476.
24. **Gotch D.** A Review of Technological Advances in Solid-State Switches // Microwave Journal. November 2007. PP. 24–34.
25. **Vye D., Pelletier L., Theeuwens S. et al.** The New Power Brokers: High Voltage RF Device // Microwave Journal. June 2009. PP. 22–40.
26. GaN Switches Enable Hot Switching at Higher Power // Microwave Journal. January 2012. PP. 134–136.
27. GaN MMIC Switch Handles 40 W from DC to 6 GHz // Microwave Journal. November 2011. PP. 132–134.
28. **Vye D.** Divine Innovation: 10 Technologies Changing the Future of Passive and Control Components // Microwave Journal. November 2011. PP. 22–42.