

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 *p-i-n*-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 *p-i-n*-диодные переключатели в модульном и интегральном исполнениях широко используются в коммерческих и военных радарах, 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 *p-i-n*-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 РНEMT-транзисторы. В отличие от *p-i-n*-диодных переключателей, где сначала появились модульные изделия на дискретных *p-i-n*-диодах и лишь затем были созданы интегральные изделия, процесс развития арсенид-галлиевых полевых переключателей был обратным. Сначала появились

¹ ООО «Радиокомп», генеральный директор.

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

³ МТУСИ, доцент кафедры радиооборудования и схемотехники.

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_{π} , T_r , T_f , T_{on} 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 видеоп脉冲 (так называемые transients) (см. рис. 4). Их амплитудные значения лежат в границах 5–150 мВ, что существенно меньше амплитуд, характерных для

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

Фирма	Модель	Диапазон частот, ГГц	$P_{\text{вх.}}$, Вт	IL, дБ	I_{so} , дБ	T_{π} , 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 ($P_{1\text{дБ}}$)	0,8–1,1	65–40	–	4	4	8	8	35
KCB Solutions	KCB 817	0–6,0	0,25 ($P_{1\text{дБ}}$)	0,50–0,78	57–35	–	5	5	15	15	–
Isolink	ISO13316	0–6,0	0,32 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	0,50–0,78	57–30	–	5	5	15	15	40
SuperApex	SAC3207	0–12,0	0,5 ($P_{1\text{дБ}}$)	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 ($P_{1\text{дБ}}$)	1,0	40	<10	–	–	–	–	–
Custom MMIC	CMD204	0–20,0	0,32 ($P_{1\text{дБ}}$)	1,0	50	–	1,8	1,8	18	7	–
Metda Semiconductors	NC1644C-120	0–26,0	0,2 ($P_{1\text{дБ}}$)	<2,0	45	10	–	–	–	–	–
Aelius Semiconductors	ASL 8001	0–35,0	0,2 ($P_{1\text{дБ}}$)	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

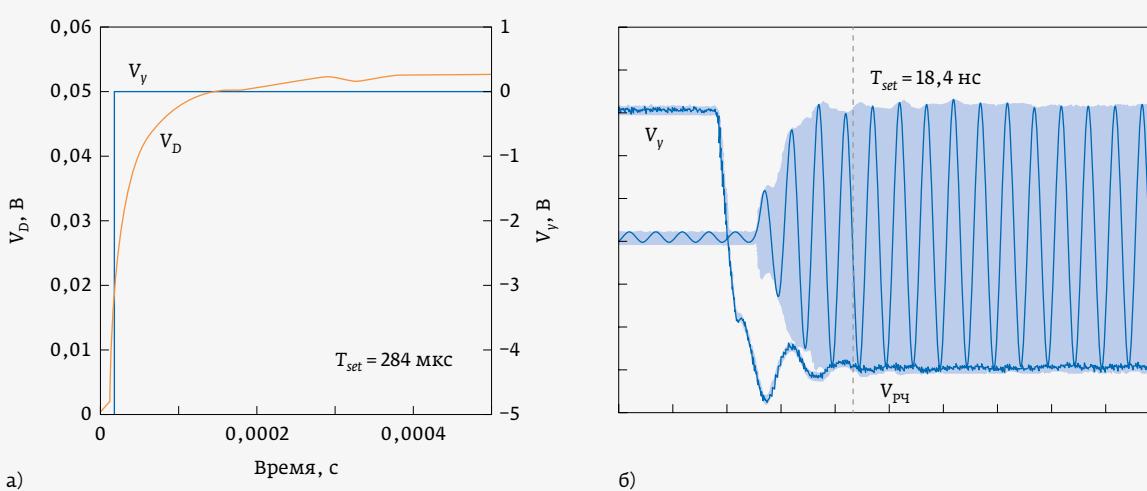


Рис. 22. Переходные процессы в арсенид-галлиевых РНEMT-переключателях: а – стандартный процесс (продетектированный сигнал V_D на выходе переключателя); б – модифицированный процесс (радиочастотный сигнал V_{pc} на выходе переключателя)

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 РНEMT-процесс, решивший эту проблему [7, 19, 21]. Так, если в переключателях, изготовленных с применением стандартного РНEMT-процесса, значения T_r и T_{set} составляли 15 нс и 284 мкс (рис. 22а) [21], то модифицированный РНEMT-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 уставившегося 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	I_{so} , дБ	T_r , нс	T_f , нс	T_{on} , нс	T_{off} , нс
ОАО «НИИПП»	K6405КП1Т	0–2,0	0,32 ($P_{1\text{дБ}}$)	0,5–1,0	50–25	32	–	–	–
UMS	CHS5104-99F	0–4,0	<2,0 ($P_{1\text{дБ}}$)	0,25–0,50	38–20	–	–	10	10
CEL	CG2185X2	2,0–6,0	0,5–1,6 ($P_{1\text{дБ}}$)	0,35–0,40	28–26	–	–	50	50
KCB Solutions	KCB 820	0,02–6,0	1,0 ($P_{1\text{дБ}}$)	0,75–1,50	55–45	–	5	5	15
Isolink	ISO13286	0–8,0	0,4 ($P_{1\text{дБ}}$)	0,8–2,5	60–45	–	5	5	15
ArQana Technologies	AW4400-QA	0–12,0	–	<1,5	>35	<50	–	–	–
Mimix Broadband	CSW0118-BD	0,5–18,0	0,10–0,15 ($P_{1\text{дБ}}$)	1,4–2,7	40–23	–	2	2	–
Qorvo	TGS4310-SM	13,0–19,0	2,0 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	<1,7	>20	–	–	–	20
Filtronic	FMS2027	0–20,0	<0,2 ($P_{1\text{дБ}}$)	0,85–2,10	42	–	17	42	27
Microsemi	MMS006PP3	0–20,0	0,32 ($P_{1\text{дБ}}$)	2,0	40	–	10	10	10
SuperApex	SAC3206Q3	0–20,0	1,0 ($P_{1\text{дБ}}$)	2,3	45	15	–	–	–
QP Microwave	QP-SWS2A-0127-01	1,0–27,0	<0,2	<6,0	>60	–	–	–	25
ArQana Technologies	ASA7700	24,0–30,0	–	<1,0	>40	<50	–	–	–
Centellax	USD30SDC	0–30,0	0,02 ($P_{1\text{дБ}}$)	3	37	10	–	–	–
MACOM	MASW-011105	17,7–31,0	0,25 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	1,6	30	–	6	6	12
QP Microwave	QP-SWS2A-0140-01	1,0–40,0	<0,2	<6,0	>60	–	–	–	25
Custom MMIC	CMD215	0–40,0	0,08 ($P_{1\text{дБ}}$)	2,3	36	4	–	–	–
Metda Semiconductors	BW129	0–40,0	0,06 ($P_{1\text{дБ}}$)	<2,8	>20	10	–	–	–
Analog Devices	HMC986A	0,1–50,0	<0,6 ($P_{1\text{дБ}}$)	2,0–2,3	36–30	–	2	2	11

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

Фирма	Модель	Тип	Диапазон частот, ГГц	$P_{\text{вх.}}$, Вт	IL, дБ	Iso, дБ	T_n , нс	T_r , нс	T_f , нс	T_{on} , нс	T_{off} , нс
CEL	CG2430X1	SP3T	0,1-6,0	<1,25 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	0,4-0,6	33-25	80	-	-	-	-
Qorvo	RFSW6131	SP3T	0-6,0	0,50-1,25 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	0,45-0,65	32-24	-	20	20	25	25
SuperApex	SAC3215	SP3T	0-8,0	0,5 ($P_{1\text{дБ}}$)	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 ($P_{1\text{дБ}}$)	0,9-1,5	55-38	-	21	21	125	125
Microsemi	MMS008PP3	SP4T	0-8,0	0,8 ($P_{1\text{дБ}}$)	1,2-1,7	55-43	-	10	10	85	35
SuperApex	SAC3223	SP4T	0-12,0	0,1 ($P_{1\text{дБ}}$)	2,1	35	43	-	-	-	-
Custom MMIC	CMD203C4	SP4T	0-20,0	0,125 ($P_{1\text{дБ}}$)	2,4	39	-	66	66	81	8
Metda Semiconductors	NC1625C-120	SP4T	0-20,0	0,2 ($P_{1\text{дБ}}$)	$\leq 2,3$	≥ 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 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	2,5	44	60	-	-	-	-
Analog Devices	HMC252QS24	SP6T	0-3,0	0,25 ($P_{1\text{дБ}}$)	0,8-3,0	41-29	-	35	35	120	120
Custom MMIC	CMD236C4	SP6T	0-18,0	0,06 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	2,5	42	60	-	-	-	-
Analog Devices	HMC321LP4	SP8T	0-8,0	0,2 ($P_{1\text{дБ}}$)	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	$P_{\text{вх.}}$, Вт	IL, дБ	Iso, дБ	T_n , нс	T_r , нс	T_f , нс	T_{on} , 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 ($P_{1\text{дБ}}$)	0,6-1,2	46-27	-	64	80	90	90	5
Skyworks Solutions	SKY13355-374LF	0,1-6,0	<2,0 ($P_{1\text{дБ}}$)	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 ($P_{1\text{дБ}}$)	0,6-0,8	37-16	-	20	20	35	35	-
Filtronic	FMS2007	0-6,0	<0,5	0,9-1,3	39-28	-	30	30	-	-	-
Analog Devices	HMC427LP3	0-8,0	0,4 ($P_{1\text{дБ}}$)	1,2-1,6	48-32	-	2	2	4	4	-
Custom MMIC	CMD272P3	0-10,0	0,32 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	1,6	43	10	-	-	-	-	-
Custom MMIC	CMD273P3	0-12,0	0,32 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	1,7	42	12	-	-	-	-	-

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

Модель	Диапазон частот, ГГц	$P_{1\text{дБ}}$, дБм	IL, дБ	I_{so} , дБ	T_{n} , 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 ($T_{\text{имп.}} = 500$ 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 $-65...125^{\circ}\text{C}$.

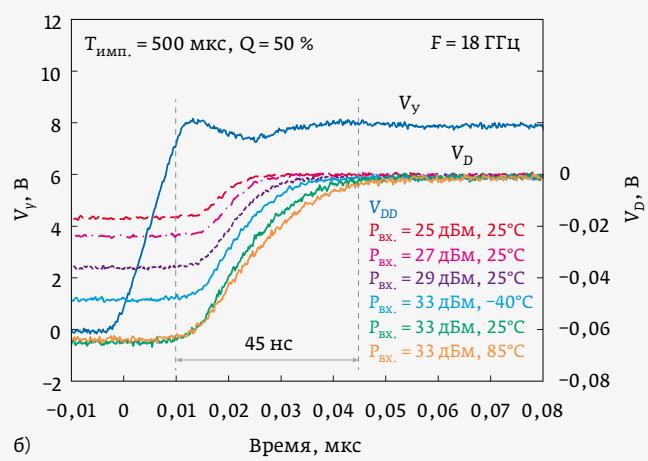
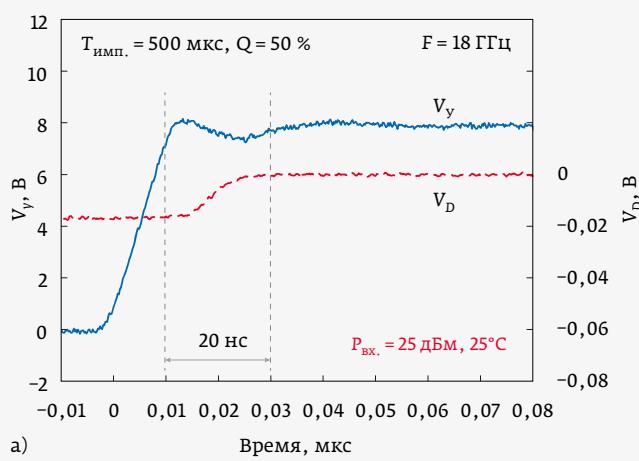


Рис. 23. Управляющее напряжение V_y и продетектированный выходной сигнал V_D в SPDT-переключателе TCS4310-SM компании Qorvo в режимах холодного (а) и горячего (б) переключения при различных уровнях входной мощности импульсного сигнала и температурах окружающей среды. Длительность импульсов – 500 мкс, скважность $Q = 50\%$

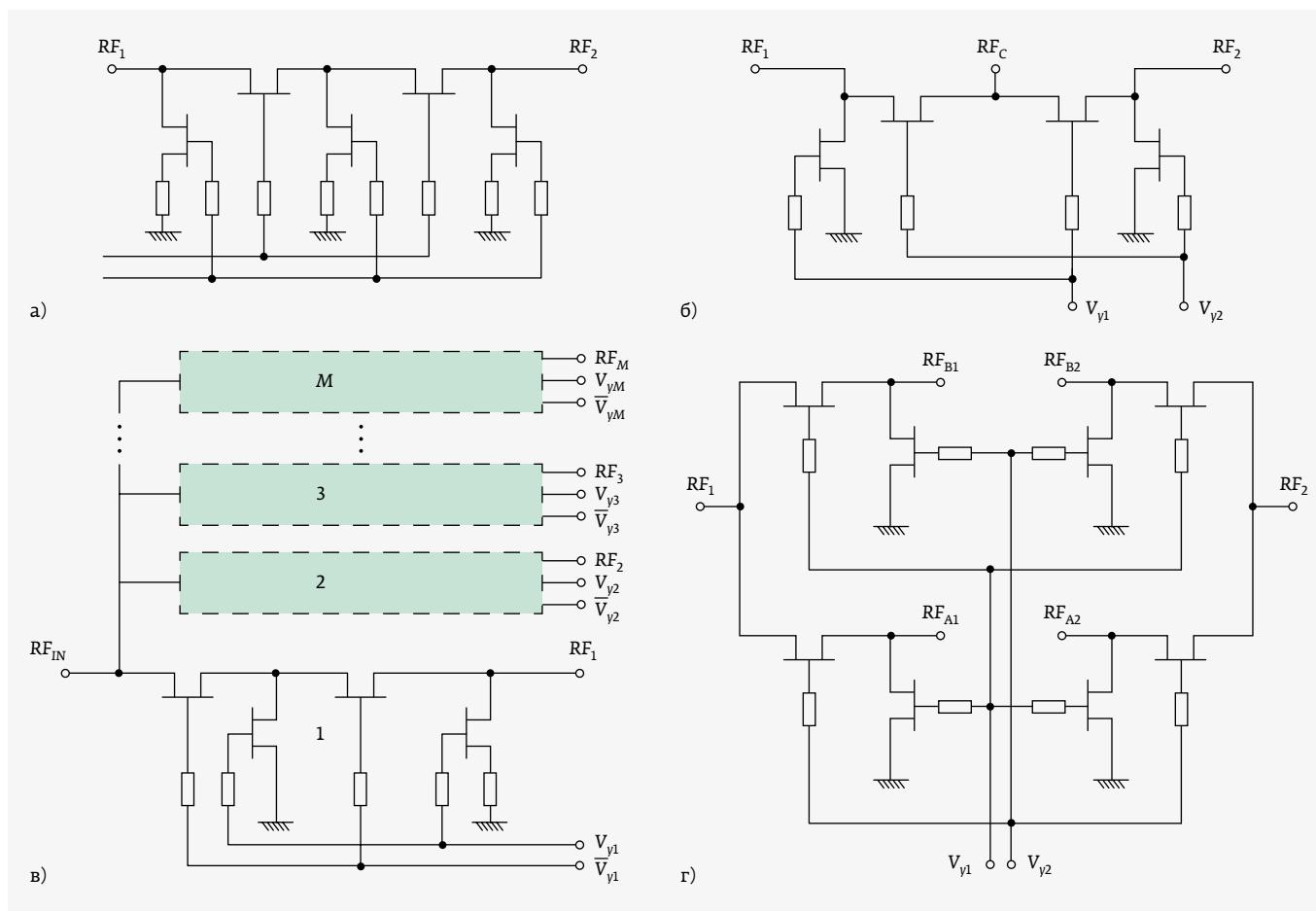


Рис. 24. Принципиальные схемы арсенид-галлиевых переключателей на полевых транзисторах: а - SPST; б - SPDT; в - SP3T; г - DPDT

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,

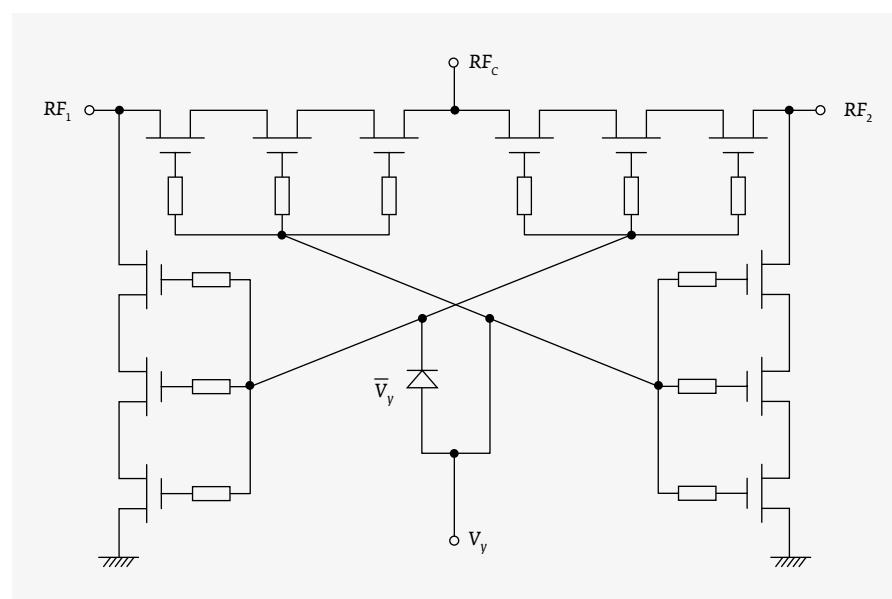


Рис. 25. Принципиальная схема арсенид-галлиевого SPDT-переключателя с групповым включением полевых транзисторов

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

Фирма	Модель	Тип	Диапазон частот, ГГц	$P_{\text{вх}}, \text{ Вт}$	$\text{IL}, \text{ дБ}$	$\text{Iso}, \text{ дБ}$	$T_n, \text{ нс}$	$T_r, \text{ нс}$	$T_f, \text{ нс}$	$T_{on}, \text{ нс}$	$T_{off}, \text{ нс}$	$V_T, \text{ мВ}$
Analog Devices	HMC-C019	SPST	0–20,0	0,20 ($P_{1\text{дБ}}$)	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 ($P_{1\text{дБ}}$)	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 ($P_{1\text{дБ}}$)	1,6–3,0	65–55	–	3	3	12	12	12
Analog Devices	HMC-C011	SPDT	0–20,0	0,20 ($P_{1\text{дБ}}$)	1,8–4,0	46–35	–	1,3	1,3	5	4	20
AMC	SWM-DC20-2D	SPDT	0–20,0	0,32 ($P_{1\text{дБ}}$)	<2,2–3,5	50–40	–	10	10	20	20	–
Analog Devices	HMC-C071	SP4T	0–20,0	0,25 ($P_{1\text{дБ}}$)	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	–	–	–	–	–

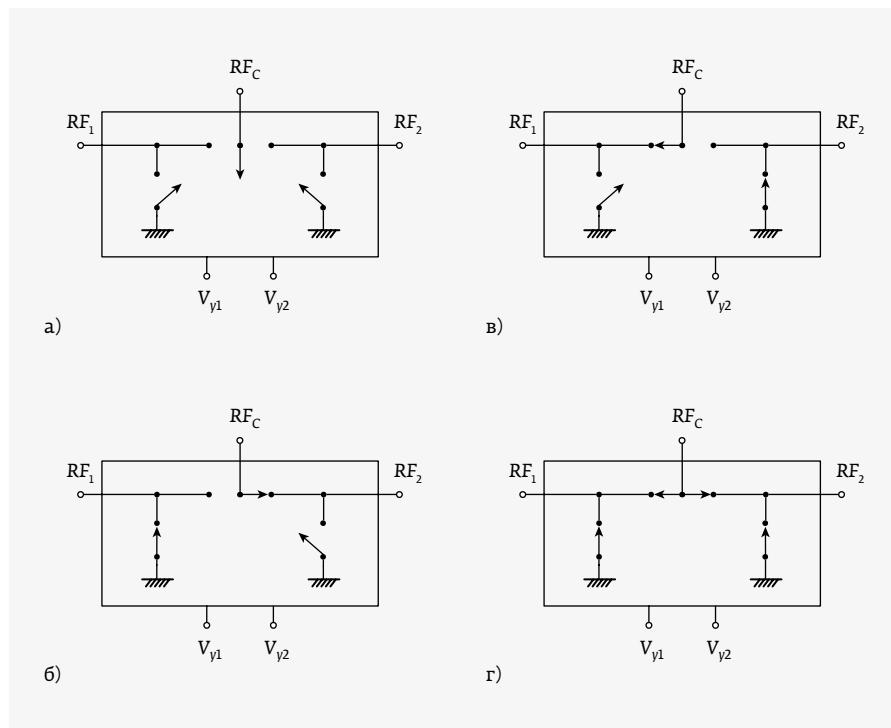


Рис. 26. Режимы работы фосфид-индиевых переключателей, выпускаемых компанией Teledyne Relays: а – $V_{y1} = V_{y2} = -2,5 \text{ В}$; б – $V_{y1} = -2,5 \text{ В}$, $V_{y2} = 0 \text{ В}$; в – $V_{y1} = 0 \text{ В}$, $V_{y2} = -2,5 \text{ В}$; г – $V_{y1} = V_{y2} = 0 \text{ В}$

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

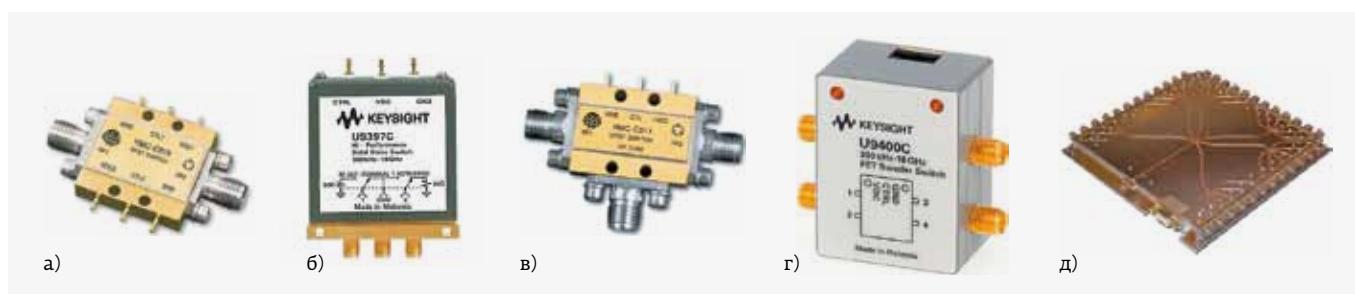


Рис. 27. Конструкции GaAs PHEMT переключателей в модульном исполнении: а - модель HMC-C019, SPST, компания Analog Devices; б - модель U9397C, SPDT, компания Keysight Technologies; в - модель HMC-C011, SPDT, компания Analog Devices; г - модель U9400C, SP4T, компания Keysight Technologies; д - модель GG-75431-64,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

ФИЛИН
filter innovations
www.filin-rf.ru
www.radiocomp.ru
filin-rf@radiocomp.ru

**Разработка, производство,
испытания устройств
с учетом требований
заказчика**

- Устройства на сосредоточенных элементах
- Устройства на керамических резонаторах
- Гребенчатые и встречно-стержневые фильтры
- Моноблокные 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

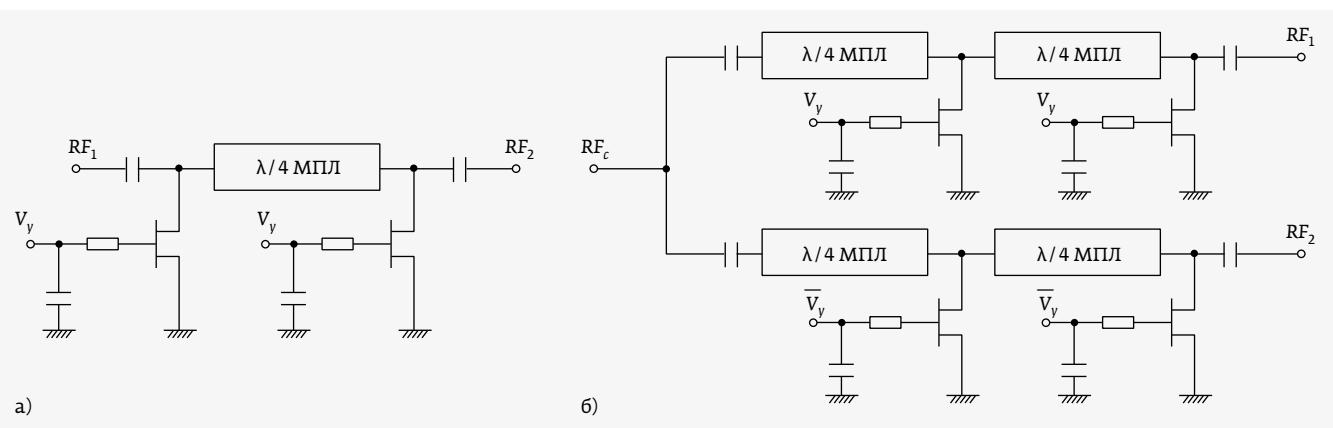


Рис. 28. Упрощенные принципиальные схемы AlCaN/GaN-переключателей с использованием четверть-волновых микрополосковых линий (1/4 МПЛ): а - SPST; б - SPDT

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 кремниевую подложку доведена в этих транзисторах до 30 мкм, что исключает возможность деформаций.

В СВЧ-изделиях чаще всего применяются гетероструктуры GaN on SiC [22] и AlGaN/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 повышенные 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	$P_{\text{вх.}}$, Вт	IL, дБ	Iso, дБ	T_{π} , нс	T_r , нс	T_f , нс	T_{on} , 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 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	0,3–0,7	57–29	30	–	–	–	–
Qorvo	TGS2355-SM	SPDT	0,5–6,0	100 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	0,7–1,1	40	–	<50	50	–	–
Qorvo	RFSW2100	SPDT	0,03–6,0	40 ($P_{0,1\text{дБ}}$)	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 ($P_{1\text{дБ}}$)	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 четвертьвольновых микрополосковых линий ($\lambda/4$ МПЛ).

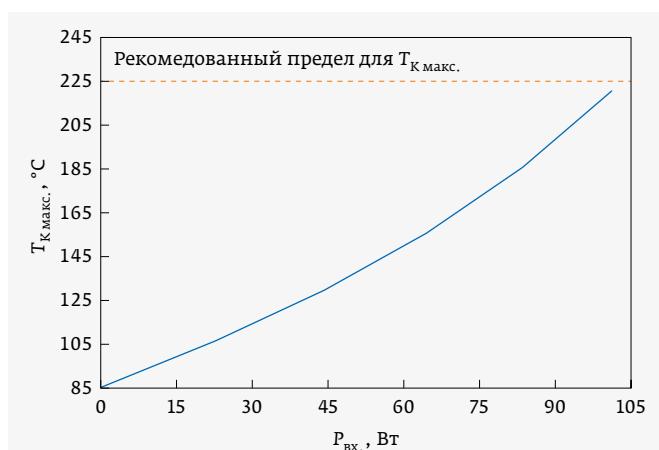


Рис. 29. Зависимость максимальной температуры канала $T_{\text{к макс.}}$ от уровня непрерывной входной мощности $P_{\text{вх.}}$ в GaN-переключателе TGS2355 (компания Qorvo)

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.

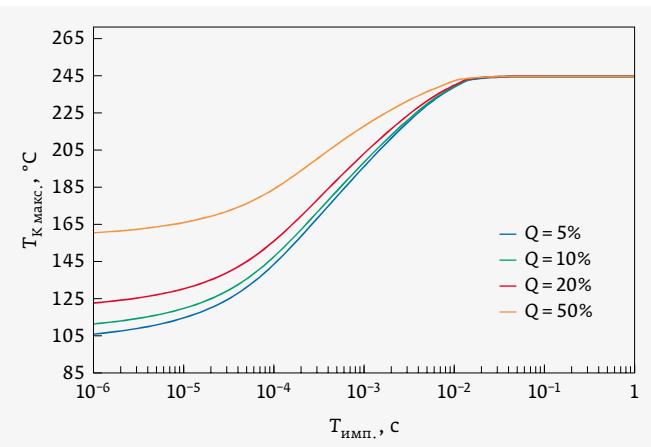
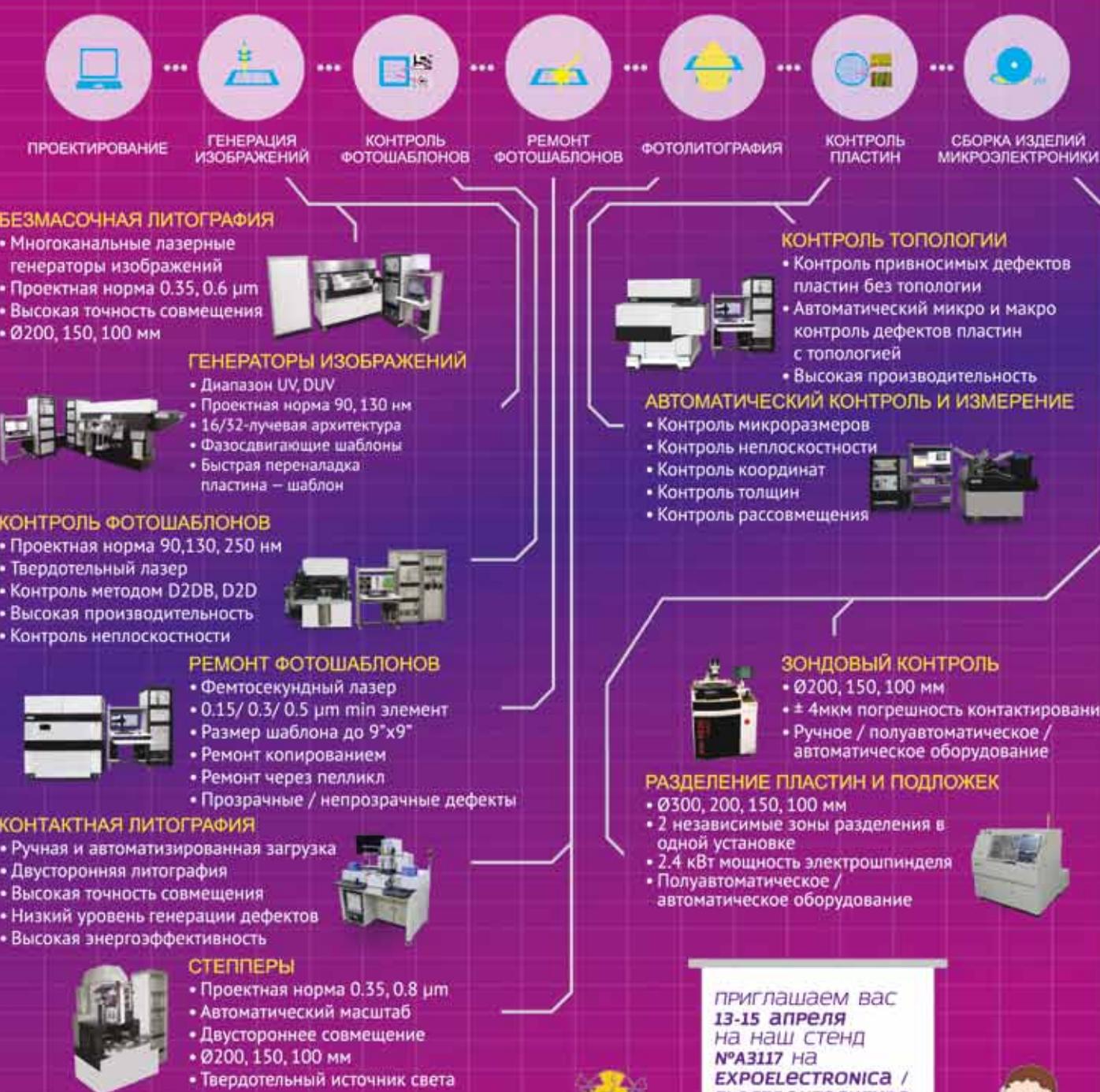


Рис. 30. Зависимость максимальной температуры канала $T_{\text{к макс.}}$ от длительности $T_{\text{имп.}}$ сигналов с импульсной мощностью $P_{\text{имп.}} = 100$ Вт при различных значениях скважности Q (модель TGS2355, компания Qorvo)



Создаем традиции будущего!



- 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)



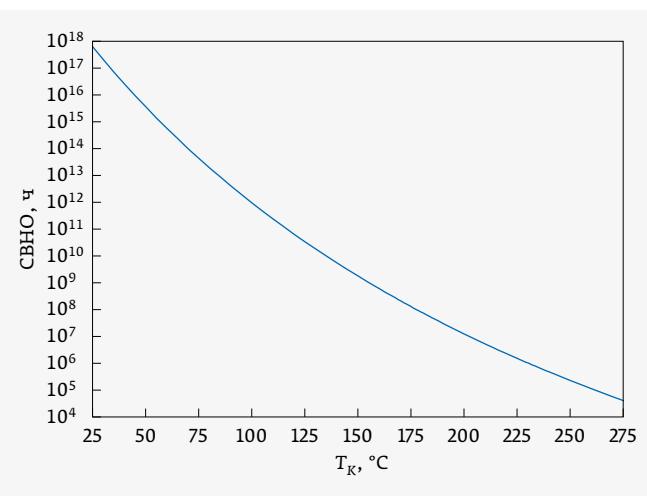


Рис. 31. Зависимость среднего времени наработки на отказ (СВНО) от максимальной температуры канала (модель TGS2355, компания Qorvo)

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 (IIP3=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,

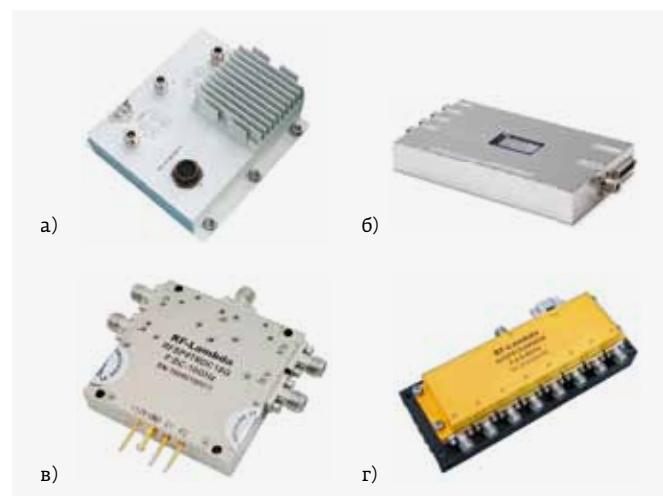


Рис. 32. Конструкции нитрид-галлиевых переключателей в модульном исполнении: а - модель VLC1599, SPDT, компания CPI; б - модель RS-104L, SP4T, компания MPI; в - модель RFSP4TRDC18G, SP4T, компания RF-Lambda; г - модель RFSP8TR5M06GA, SP8T, компания RF-Lambda

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 коoperation с японским министерством обороны для радиолокатора L-диапазона [28]. С большой вероятностью изделия, выполненные по этой технологии, заменят переключатели на дискретных p-i-n-диодах. Предельные возможности

Таблица 16. Нитрид-галлиевые переключатели в модульном исполнении

Фирма	Модель	Тип	Диапазон частот, ГГц	P_{ax} , Вт	IL, дБ	I_{so} , дБ	T_p , нс
RFcore	RSPW1020H54D	SPDT	1,0–2,0	200	0,5	>40	$2 \cdot 10^3$
RFcore	RSPW2030H54D	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



Минцифры
России



ТПП РФ



UFI



АВО



Expo Rating

СВЯЗЬ

«Информационные и коммуникационные
технологии»

15–18 июня 2021

33-я международная
выставка

Организатор



12+

Реклама



При поддержке:

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

Россия, Москва, ЦВК «Экспоцентр»
www.sviaz-expo.ru

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

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 испытуемых изделий обнаружено не было.

Нитрид-галлиевые переключатели выпускаются и в модульном исполнении (рис. 32). Производят эти изделия компании: RF-Lambda, RFcore, CPI и MPI (табл. 16). В модульных переключателях напряжение питания обычно равно +28 В (RFcore, CPI, MPI). Но есть исключение. В GaN-переключателях 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 компаний RFcore могут достигать 1 кВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геворкян В., Кочемасов В. Ферритовые переключатели // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 6. С. 90–94; № 9. С. 122–131.
2. Кочемасов В. Электромеханические переключатели 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-переключатели на основе МЭМС // СВЧ-электроника. 2016. № 1. С. 36–42.
4. Кочемасов В., Кирпиченков А. Твердотельные СВЧ-переключатели // 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-переключатели // 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-переключатели 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 AlGaN/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., Theeuwes S. et al. The New Power Brokers: High Voltage RF Device // Microwave Journal. June 2009. PP. 22–40.
26. GaN Swicthes 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.