

Твердотельные СВЧ-переключатели с высокой скоростью коммутации

Часть 2

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 первой части статьи, опубликованной в десятом номере журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2020 год, было рассказано о pin-диодных переключателях в модульном исполнении. В данном номере рассматриваются pin-диодные переключатели в интегральном и волноводном исполнениях.

pin-диодные переключатели в интегральном исполнении

Развитие новых технологий и появление требований заказчиков коммерческих, военных и космических систем связи, радиолокационных систем с АФАР различного назначения, автомобильных радаров, разведывательных приемников, разнообразных тестовых комплексов способствовали приходу на рынок надежных СВЧ-переключателей в монолитном исполнении с использованием кремниевой и арсенид-галлиевой подложек. В разработке таких микросхем участвовали компании Microsemi, Skyworks Solutions, Alpha Industries, Qorvo (панее – TriQuint Semiconductor), Analog Devices (панее – Hittite Microwave), API Technologies, MACOM, KCB Solutions. Позднее к производству арсенид-галлиевых переключателей подключились и российские производители АО «Светлана-Электронприбор», АО «НПФ «Микран» и др. Монолитные pin-диодные переключатели на кремниевых подложках появились в 70–80-х годах прошлого столетия.

Вследствие высокой проводимости кремниевых подложек на поверхности кристаллов обычно размещались лишь активные элементы (pin-диоды), дополненные в отдельных случаях некоторым количеством разделительных и / или блокировочных

конденсаторов. Все остальные дискретные элементы, обеспечивающие подачу питающих напряжений и управляющих сигналов, устанавливались за пределами кристалла. Мощные pin-диодные переключатели на кремниевых подложках продвигаются на рынок компаниями Aeroflex / Metelics, Skyworks Solutions и KCB Solutions. Наибольшее число моделей подобных переключателей выпустила компания Skyworks Solutions. Одно из таких изделий SKY12208-306LF, выполненное по несимметричной схеме, обеспечивает переключение 60 Вт непрерывной мощности с временем коммутации 85 нс.

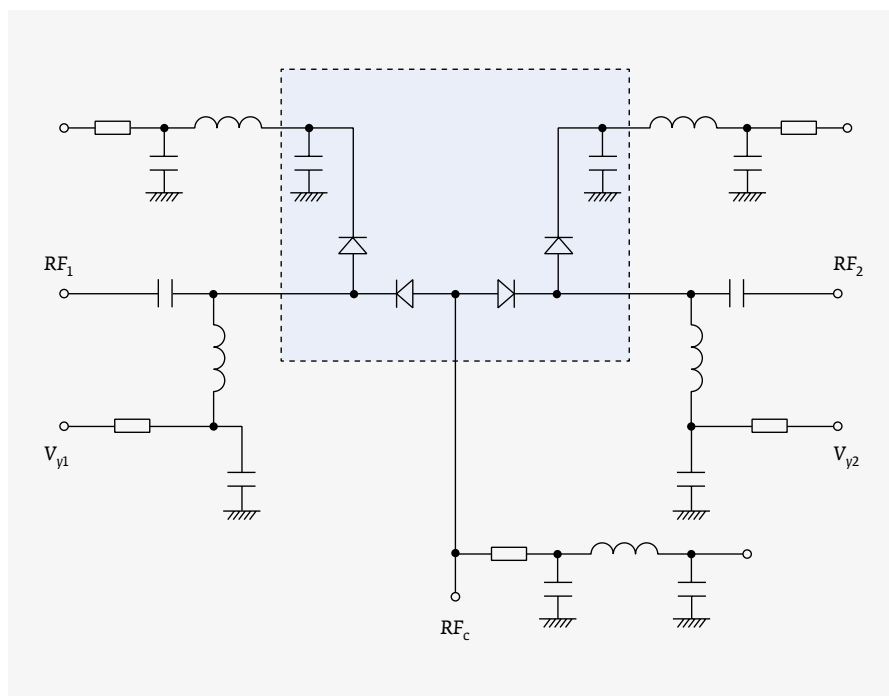


Рис. 13. Принципиальная схема интегрального SPDT-переключателя KS102-55 компании KCB Solutions. Фоном выделена интегральная часть переключателей

¹ ООО «Радиокомп», генеральный директор.

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

³ МТУСИ, доцент кафедры радиооборудования и схемотехники.

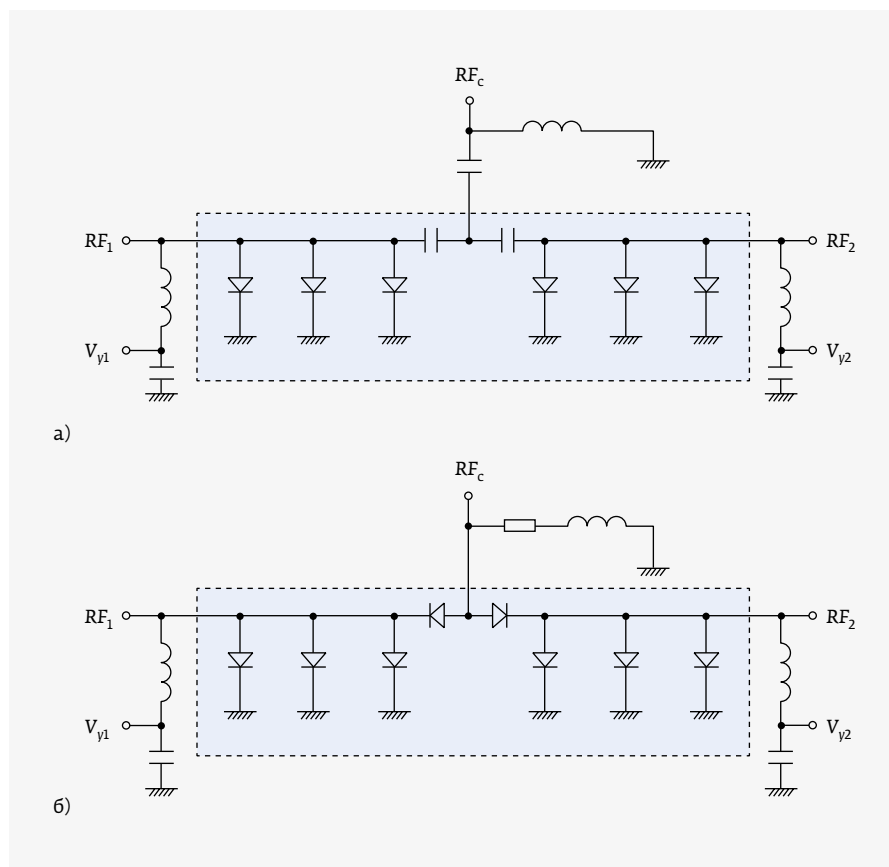


Рис. 14. Принципиальные схемы интегральных pin-диодных переключателей: а – параллельная структура, модель HMC970, компания Analog Devices; б – последовательно-параллельная структура, модель HMC975, компания Analog Devices. Фоном выделена интегральная часть переключателей

Другой SPDT-переключатель (с симметричной структурой) SKY12211-478LF позволяет коммутировать непрерывную мощность 40 Вт за время 32 нс. Оба изделия выполнены в безвыводных QFN-корпусах размером 4 × 4 мм.

Широкую линейку SPST-SP6T pin-диодных переключателей с входной мощностью 50–200 Вт производит компания KCB Solutions. Изделия доступны в стандартных QFN-корпусах и в герметичном исполнении. Схемотехника этих переключателей мало отличается от решений, используемых, например, компанией Skyworks Solutions. Отличие состоит в том, что изделия этой компанией реализуются на AlN-подложках, обладающих повышенной теплопроводностью. Один из таких SPDT-переключателей KS102-55, выполненный по схеме, показанной на рис. 13, обеспечивает коммутацию непрерывной

мощности 100 Вт за время 50 нс. Эта микросхема размещена в безвыводном QFN-корпусе размером 7 × 8 мм. Вследствие малых вносимых потерь и большой развязки эти pin-диодные переключатели идеально подходят как для коммерческих, так и для военных применений. Более высокие входные частоты обеспечиваются в изделиях HMC971 (до 40 ГГц) и HMC975 (до 50 ГГц) компании Analog Devices, реализованных на параллельной (рис. 14а) и последовательно-параллельной (рис. 14б) структурах соответственно.

Рабочий диапазон температур pin-диодных интегральных переключателей на кремниевых подложках весьма широк: –55...85 °С для изделий Hittite Microwave, API Technologies, KCB Solutions и –65...125 °С для переключателей, производимых компанией MACOM.

Невозможность размещения на кремниевой подложке дискретных элементов сказывается на характеристиках переключателей, увеличивает их габариты и стоимость. Выход из этого положения был найден компанией MACOM [14], которая запатентовала технологию Heterolithic Microwave Integrated Circuit (HMIC).

Эта технология предполагает реализацию монолитной подложки с использованием кремния и стекла (рис. 15) [14]. Технология интегрирует в себе лучшие свойства обоих материалов и позволяет получить монолитное решение,

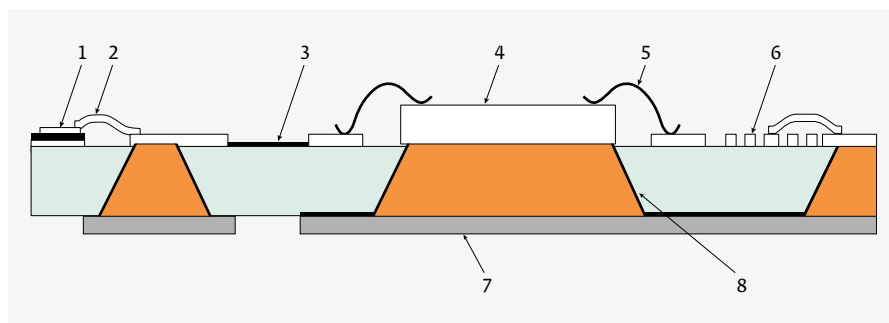


Рис. 15. Конструкция кремниевого pin-диодного переключателя, выполненного по HMIC-технологии: 1 – MIM-конденсатор; 2 – воздушный мост; 3 – тонкопленочный резистор; 4 – СВЧ МИС (Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC); 5 – проволоочная перемычка; 6 – спиральная индуктивность; 7 – металлическое основание; 8 – земляная шина

обеспечивающее уменьшение размера и стоимости. Монолитный характер этой технологии позволяет применить автоматическое тестирование кристаллов на пластинах, что существенно снижает их стоимость. НМІС-чип состоит из кремниевых пьедесталов, внедренных в стеклянную среду. По сравнению с переключателями на полевых транзисторах в этих изделиях удастся получить более высокие входную мощность и мощность рассеяния, а также меньшие потери, искажения и стоимость.

Входящее в состав такой монолитной подложки стекло обеспечивает высокую развязку, механическую прочность, малую диэлектрическую постоянную и низкий (0,002 на частоте 10 ГГц) тангенс угла диэлектрических потерь. Тонкопленочная технология, используемая для размещения на подложке спиральных индуктивностей, конденсаторов и резисторов, гарантирует высокие характеристики, включая надежность и низкую стоимость.

Характеристики четырех микросхем, реализованных по этой технологии, представлены в табл. 6. Все они независимо от типа переключателя (SPST, SPDT, SP3T, SP4T) работают в диапазоне частот 0,05–20 ГГц при входных мощностях менее 2 Вт и временах коммутации 20 нс. Эти переключатели выполнены по последовательно-параллельной схеме (рис. 16), причем диоды располагаются на кремниевых пьедесталах (выделено фоном), а пассивные компоненты – на стекле.

Дальнейшее совершенствование рпн-технологий было связано с использованием арсенид-галлиевых подложек. Замена кремния на арсенид галлия обеспечила более высокую подвижность и меньшее время жизни неосновных носителей. В полной мере достоинства GaAs-диодов проявляются при монолитном изготовлении переключателей, когда на одной подложке размещаются рпн-диоды и пассивные компоненты. Важным преимуществом арсенид-галлиевых рпн-диодных переключателей является их широкополосность (табл. 7) и существенно меньший, чем у кремниевых переключателей, ток управления.

При разработке рпн-диодных арсенид-галлиевых переключателей используются три технологических процесса: собственно GaAs PIN, GaAs VPIN и AlGaAs PIN. Первый из них был использован в изделиях, выпускаемых компаниями Alpha Industries, Analog Devices (Hittite Microwave), Microsemi, Qorvo (TriQuint Semiconductor), Bowei Integrated Circuits и Silins Electronics. Одной из первых, разработавших

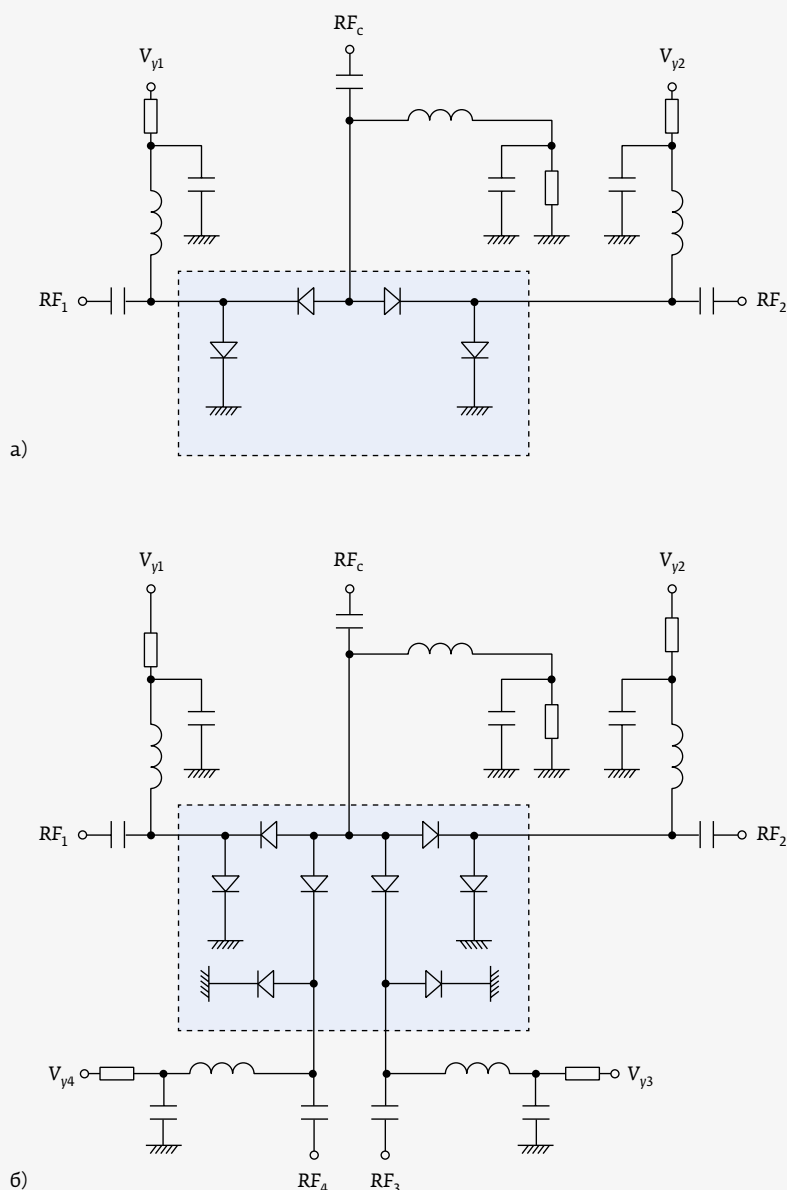


Рис. 16. Принципиальные схемы переключателей, выполненных по НМІС-технологии, компании MACOM: а – SPDT, модель MASW-002103-1363; б – SP4T, модель MASW-004103-1365. Фоном выделена интегральная часть переключателей

Таблица 6. Кремниевые pin-диодные переключатели в интегральном исполнении

Фирма	Модель	Тип	Диапазон частот, ГГц	$P_{вх.}$, Вт	IL , дБ	I_{so} , дБ	$T_{п.}$, нс	T_r , нс	$T_{оп.}$, нс	$F_{ком.}$, МГц
MACOM	MASW-001100-1190	SPST	0,05–20,0	<2	0,4–0,7	55–42	20	–	–	–
Skyworks Solutions	SKY12211-478LF	SPDT	0,05–2,7	40	0,22–0,53	50–32	–	32	–	0,1
Skyworks Solutions	SKY12208-806LF	SPDT	0,02–2,7	50	0,1–0,4	58–29	–	–	85	0,5
KCB Solutions	KS102-55	SPDT	0,225–3,5	100	0,25–1,20	45–23	50	–	–	–
Aeroflex/Metelics	MSW2T-1001	SPDT	0,1–6,0	20	0,2–0,3	24	90	–	–	–
MACOM	MASW-002102-13580	SPDT	2,0–18,0	<2	0,7–1,5	60–40	50	–	–	–
MACOM	MASW-002100-1191	SPDT	0,05–20,0	<2	0,4–0,7	63–42	20	–	–	–
MACOM	MASW-003102-13590	SP3T	2,0–18,0	<2	0,8–1,6	59–40	50	–	–	–
MACOM	MASW-003103-1364	SP3T	0,05–20,0	<2	0,5–1,2	54–31	20	–	–	–
MACOM	MASW-004103-1365	SP4T	0,05–20,0	<2	0,5–1,2	51–32	20	–	–	–

Таблица 7. Арсенид-галлиевые pin-диодные переключатели в интегральном исполнении

Фирма	Модель	Технология	Тип	Диапазон частот, ГГц	$P_{вх.}$, Вт	IL , дБ	I_{so} , дБ	$T_{п.}$, нс	T_r , нс	T_f , нс	$T_{он.}$, нс	$T_{off.}$, нс
Silins Electronic	PMM13006X	GaAs	SPST	20,0–38,0	1,0 ($P_{1дБ}$)	1,2	30	–	–	–	20	20
Alpha Industries	AR640R1-00	GaAs	SPST	18,0–40,0	2,0 ($P_{1дБ}$)	1,0–1,3	42–36	4,0	–	–	–	–
MACOM	MA4AGSW1	AlGaAs	SPST	0,05–50,0	<1,0	0,2–0,3	22–46	–	10	–	–	–
Silins Electronic	PMM13004X	GaAs	SPDT	34,0–36,0	2,5 ($P_{1дБ}$)	1,1	34	50	–	–	–	–
MACOM	MASW-011094	AlGaAs	SPDT	24,0–37,0	<50	0,6–1,0	26–29	–	16	34	42	65
Qorvo	TGS4304	GaAs VPIN	SPDT	32,0–40,0	<2,5	0,9–1,3	–	4,0	–	–	–	–
MACOM	MASW-011036	AlGaAs	SPDT	26,0–40,0	<20,0	0,7–1,5	38–40	–	10	8	30	21
Alpha Industries	AR640R5-00	GaAs	SPDT	24,0–40,0	2,0 ($P_{1дБ}$)	0,8–1,8	34	2,0	–	–	–	–
Qorvo	TGS4302	GaAs VPIN	SPDT	27,0–46,0	<5,0	0,9–1,3	–	<4,0	–	–	–	–
MACOM	MA4AGSW2	AlGaAs	SPDT	0,05–50,0	<0,2	0,5–0,7	47–33	–	20	–	–	–
MACOM	MA4AGSW3	AlGaAs	SP3T	0,05–50,0	<0,2	0,6–0,8	45–31	–	20	–	–	–
Qorvo	TGS4305-FC	GaAs VPIN	SP3T	60,0–90,0	<0,5	1,6	20	<5,0	–	–	–	–
MACOM	MA4AGSW4	AlGaAs	SP4T	0,05–50,0	<0,2	0,7–1,0	41–32	20	–	–	–	–
Qorvo	TGS4306-FC	GaAs VPIN	SP4T	70,0–90,0	<0,5	2,5	20	<5,0	–	–	–	–

SPST-, SPDT-переключатели (рис. 17) с использованием процесса GaAs PIN была компания Alpha Industries. Все эти отражательные переключатели выполнены по параллельной схеме и отличаются лишь числом и схемой включения pin-диодов (см. рис. 17). Первый из них SPST-типа (рис. 17а), а остальные три SPDT-типа (рис. 17б, в, г). Время коммутации во всех переключателях не превышает 2–4 нс. Рабочий диапазон температур находится в пределах $-55...125^{\circ}\text{C}$.

Компания Hittite Microwave выпустила на рынок переключатель HMC-SDD112 (55–86 ГГц), обладающий относительно низкими потерями, высокой развязкой и временем переключения менее 4 нс. Несколько моделей отражательных SPST-, SPDT-, SP3T- и SP4T-переключателей с максимальными значениями частот 18–30 ГГц разработала компания Bower Integrated Circuits.

Арсенид-галлиевые SPST-, SPDT-переключатели, работающие в диапазонах частот 20–38, 22–36, 34–36 и 34–37 ГГц, разработала и недавно появившаяся на рынке компания

Silins Electronics. Выпускаемые этой компанией переключатели, предназначенные для использования в автомобильных радарах, доступны в различном конструктивном исполнении (корпуса H63-1, H63-2, H-102-6, H127-3). Размеры кристаллов находятся в пределах от $2,50 \times 1,08 \times 0,10$ мм (модель PMM 13003X) до $1,22 \times 0,87 \times 0,10$ мм (модель PMM 13006X). Времена переключения T_{on} и T_{off} в SPST-переключателе PMM13006X равны 20 нс, а в SPDT-переключателях – 50 нс.

Важный вклад в совершенствование характеристик арсенид-галлиевых переключателей внесла компания TriQuint Semiconductor (ныне Qorvo), предложившая технологию vertical pin (VPIN) [15], суть которой поясняется на рис. 18 [16]. Переключатели, изготовленные на основе этой технологии (см. табл. 7), обеспечивают время коммутации менее 4–5 нс в достаточно широкой полосе частот. Например, VPIN SPDT-переключатель TGS2302 выполнен по последовательно-параллельной схеме (рис. 19а) и работает в диапазоне частот 4–20 ГГц. Все pin-диоды

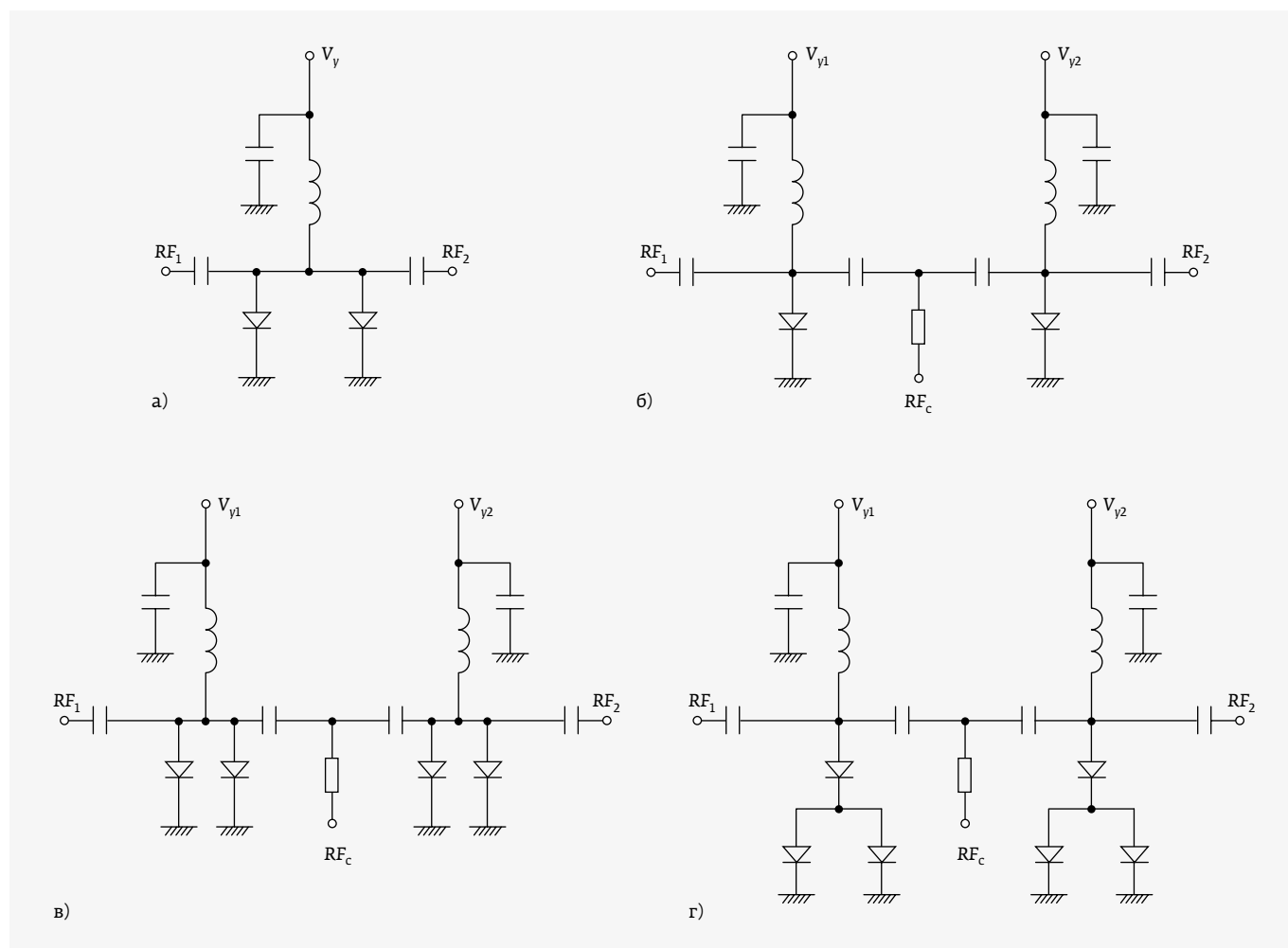


Рис. 17. Принципиальные схемы переключателей на арсенид-галлиевых pin-диодах компании Alpha Industries: а – SPST, модель AP640R1-00; б – SPDT, модель AP640R2-00; в – SPDT, модель AP640R6-00; г – SPDT, модель AP640R7-00

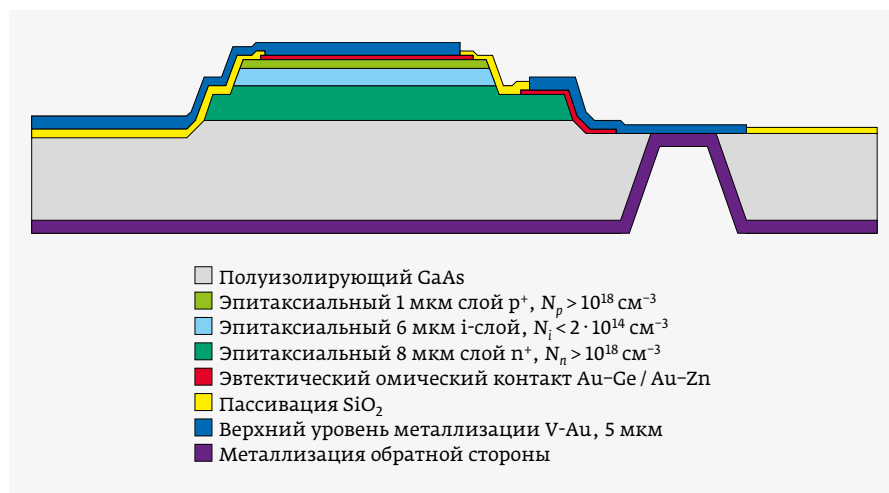


Рис. 18. Фрагмент конструкции переключателя, выполненного по арсенид-галлиевой VPIN-технологии

и пассивные компоненты размещаются на подложке размером $2,24 \times 1,63$ мм (рис. 19б). По параллельной схеме с одним диодом в каждом канале реализованы многопозиционные SP3T- и SP4T-переключатели TGS4305-FC и TGS4306-FC, работающие в диапазонах частот 60–90 и 70–90 ГГц соответственно, которые обеспечивают время коммутации менее 5 нс. Поставляются VPIN-переключатели как в QFN-корпусах, так и в виде кристаллов. Основной областью применения этих устройств являются автомобильные радары.

Наиболее широкополосные pin-диодные СВЧ-переключатели были разработаны с использованием гетероструктур AlGaAs/GaAs. Наряду с апробированной технологией AlGaAs/GaAs PIN (модели MASW-011036, MASW-011094) компания MACOM использует также свое запатентованное решение, позволившее ей выпускать переключатели с рабочей полосой от 50 МГц до 70 ГГц.

Отметим, что упомянутые микросхемы серии MASW обеспечивают в диапазонах 24–37 ГГц (MASW-011094) и 26–40 ГГц (MASW-011036) допустимые мощности 50 и 20 Вт соответственно при временах переключения менее 65 нс. В свою очередь переключатели MA4AGSW1, MA4AGSW1A, MA4AGSW2, MA4AGSW3 и MA4AGSW4 обладают вносимыми потерями 0,3–0,8 дБ при временах переключения 10–20 нс. Допустимая входная мощность в первом из этих изделий не превосходит 1 Вт, а во всех остальных – 0,2 Вт.

Рабочий диапазон температур в переключателях серии MASW составляет $-40 \dots 85^\circ\text{C}$, а в выполненных по запатентованной технологии AlGaAs/GaAs PIN – от -55 до 125°C .

Стоит также упомянуть, что разработанная в АО «НПФ «Микран» по технологии AlGaAs/GaAs PIN линейка SPST-, SPDT-, SP3T-, SP4T-, SP5T-переключателей работает на частотах от 0,2 до 40 ГГц. В моделях с интегрированными

цепями управления MD215 (SP2T) и MD216 (SP3T) диапазон рабочих частот составляет от 4 до 27 ГГц.

Оценивая в целом модульные и интегральные переключатели на pin-диодах, можно отметить, что основной их недостаток – это большие токи смещения (от 10 до 100 мА) и управления. Его не удастся полностью преодолеть и в pin-диодных арсенид-галлиевых переключателях.

Помимо кремниевых и арсенид-галлиевых подложек, при создании pin-диодных переключателей могут использоваться и другие технологии. За редким исключением в промышленном производстве эти изделия

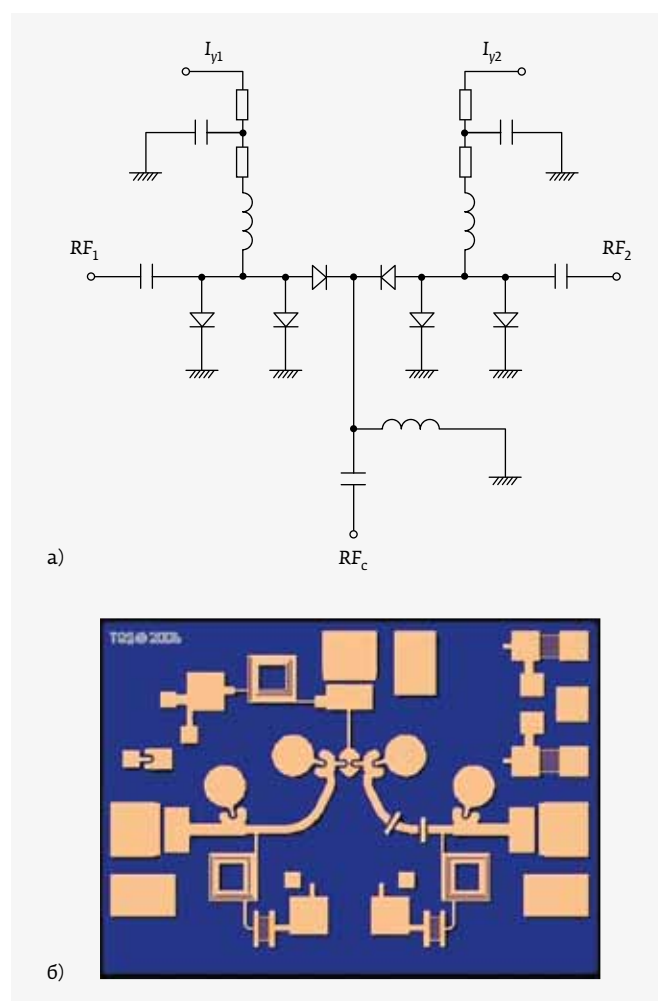


Рис. 19. Переключатель TGS2302 компании Qorvo, выполненный на pin-диодах по VPIN-технологии: а – принципиальная схема, б – топология

широкого распространения не получили, но результаты исследования экспериментальных образцов обсуждаются в ряде публикаций.

Так, фосфид-индиевые InGaAs/InP pin-диоды [17] были разработаны применительно к задаче создания приемо-передающих СВЧ-переключателей, используемых в автомобильных радарх. В диапазоне 74,2–78,2 ГГц эти переключатели обеспечили вносимые потери менее 1,35 дБ и развязку более 43 дБ при входных мощностях до 11 дБм.

В [18] для создания pin-диодного SPDT-переключателя использована 0,13-мкм SiGe-технология компании IBM. В диапазоне частот 51–78 ГГц вносимые потери составили 2,0–2,7 дБ, а развязка 25–35 дБ. 90-нм SiGe-технология была применена при создании pin-диодного SPDT-переключателя с параллельной структурой, работающего в диапазоне частот 73–133 ГГц [19]. При этом были достигнуты следующие результаты: вносимые потери 1,4–2,0 дБ, развязка 19–22 дБ и мощность $P_{1\text{дБ}} > 24$ дБм. Площадь изготовленного кристалла составила 0,14 мм². В [20] приводятся результаты экспериментального исследования нитрид-галлиевого pin-диодного SPDT-переключателя, выполненного по параллельной схеме и работающего в диапазоне частот 20–27 ГГц. Вносимые потери при этом не превосходили 3,4 дБ, а развязка была больше 12,5 дБ. Размеры кристалла составили 2,57 × 1,03 мм.

Во всех этих научных публикациях, посвященных созданию pin-диодных переключателей на основе нетрадиционных технологий, сведения о временах переключения отсутствуют.

ВОЛНОВОДНЫЕ PIN-ДИОДНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

Волноводные переключатели находят широкое применение в космических, военных и коммерческих радиолокационных и связных комплексах, средствах радиоэлектронной борьбы, при тестировании и измерении характеристик различного рода радиокомпонентов и систем. Они используются при переключении антенн и частотных каналов, входят в состав переключаемых аттенюаторов, обеспечивают защиту входных цепей приемников, применяются в амплитудных модуляторах, обеспечивая в том числе и формирование импульсов различной длительности.

Наряду с переключателями большой (до 1 кВт средней и до нескольких киловатт импульсной мощности [6])

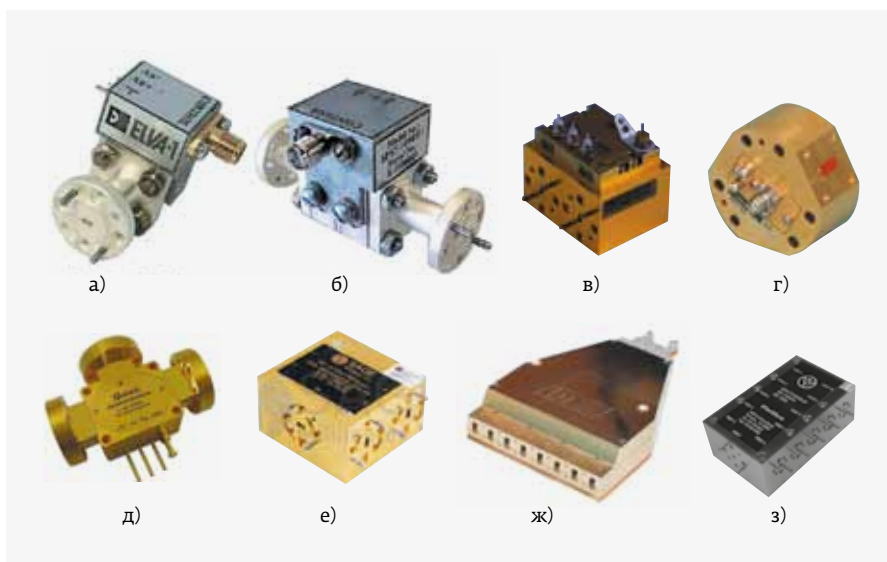


Рис. 20. Конструкции волноводных переключателей: а, б – SPST-серия, компания ELVA-1; в, г – PDT-серия (I-тип, Y-тип), компания Smiths Microwave; д – модель DBSR0250009000A, SPDT, компания Qotana; е – модель SK4-5536536535-1515-R1, SP4T, компания Sage Millimeter; ж – ZPIN-серия, SP8T, компания ZAX Millimeter Wave Corporation; з – модель CP10-77308030-D2, SP10T, компания Ducommun

широко применяются маломощные (до 10 Вт) изделия, обеспечивающие малые (2–300 нс) времена коммутации на частотах до 110 ГГц и более. Например, до 150 ГГц в изделиях компании ELVA-1 и до 210 ГГц в изделиях компании ZAX Millimeter Wave Corporation.

Практически все волноводные переключатели (рис. 20) реализуются на кремниевых и арсенид-галлиевых pin-диодах в различных конфигурациях. Специализируются на производстве этих изделий более десятка компаний (табл. 8). Одним из крупнейших производителей является компания Millitech (ныне – Smiths Microwave), выпускающая несколько серий волноводных переключателей.

SPST-переключатели серии PSP этой компании доступны для частот от 18 до 110 ГГц. Они рассчитаны на работу в полных волноводных диапазонах K (18–26,5 ГГц), Ka (26,5–40 ГГц), Q (33–50 ГГц), U (40–60 ГГц), V (50–75 ГГц) и в полосе до 10 ГГц в E (60–90 ГГц) и W (75–100 ГГц) диапазонах. Времена нарастания T_r и спада T_f в изделиях этой серии равны 20 нс и 150 нс соответственно и могут меняться в зависимости от исполнения драйвера. Подобные переключатели могут использоваться для амплитудной модуляции и защиты входных цепей приемников в импульсных РЛС. Кроме того, они могут применяться в управляемых напряжением аттенюаторах.

В серии PSN представлены отражательные SPST-переключатели для частотного диапазона 18–95 ГГц. Изделия этой серии поставляются как с драйверами, так и без них. Стандартные модели имеют развязку 30 дБ

Таблица 8. Волноводные переключатели

Фирма	Модель	Тип	Диапазон частот, ГГц	ΔF , ГГц	$P_{\text{вк.н.}} (P_{\text{вк.имп.}})$, Вт	IL , дБ	I_{50} , дБ	$T_{\text{п.нс}}$	$T_{\text{г.нс}}$	$T_{\text{г.нс}}$
CPI	MA32032	SPST	10,25–10,50	0,25	<0,35	<1,2	70	<250	–	–
HXI	HSWM24201	SPST	18,0–26,5	8,5	1,0	1,5	30	–	3	3
Smiths Microwave	PSH-42	SPST	18,0–26,5	8,5	0,25 (5,0)	<2,0	>30	2	–	–
MRI	SPSTK	SPST	18,0–26,5	8,5	–	<1,0	>20	250	–	–
QuinStar Technology	QSS-Series	SPST	33,0–50,0	17,0	<0,5	<1,5	>26	250	–	–
Ducommun	CPS-63253025-01	SPST	50,0–75,0	25,0	<0,5	3,0	25	<100	–	–
Pasternack	PE71S9001	SPST	60,0–90,0	30,0	–	<4,5	>20	<300	–	–
Sage Millimeter	SKS-9031042825-1010-R1	SPST	90,0–100,0	10,0	0,25	2,8	25	100	–	–
Smiths Microwave	PSP-10	SPST	75,0–110,0	10,0	0,25 (4,0)	<2,2	>20	–	20	150
ELVA-1	SPST-06	SPST	110,0–150,0	>10%	(<0,8)	1,5	>30	4–6	–	–
Smiths Microwave	PDT-22-037B0	SPDT	33,0–40,0	7,0	12,5 (12,5)	<1,0	30	–	10	10
HXI	HSWM22801	SPDT	26,5–40,0	13,5	<1,0	2,0	28	–	3	3
Sage Millimeter	SKD-4535532525-1919-R1	SPDT	45,0–55,0	10,0	0,25	2,5	25	100	–	–
Smiths Microwave	PDT-12-075B0	SPDT	60,0–89,0	29,0	–	2,5	30	–	10	10
Qotana	DBSR0250009000A	SPDT	60,0–90,0	30	<0,2	3,5–5,5	35–27	100	–	–
CERNEX	C2TR901003525S	SPDT	90,0–100,0	10	0,25	2,5–3,0	>20	<100	–	–
Pasternack	PE71S9004	SPDT	75,0–110,0	35,0	–	5,5	>20	<300	–	–
QuinStar Technology	QSD-Series	SPDT	75,0–110,0	10,0	<0,5	<2,8	>20	250	–	–
Ducommun	CPD-93355025-01	SPDT	75,0–110,0	35,0	<0,5	5,0	25	<100	–	–
HXI	HSW21001	SPDT	75,0–110,0	10,0	–	3,0	20	–	150	25
MRI	SPDTW	SPDT	75,0–110,0	15%	–	<3,5	>19	250	–	–
CERNEX	C3TR74805024TY	SP3T	74,0–90,0	16,0	0,2	2,5–3,0	20	100–250	–	–
Smiths Microwave	PS3-12	SP3T	60,0–90,0	6,0	0,5 (10,0)	2,5	20	–	20	300
CERNEX	C4TR33505030S	SP4T	33,0–50,0	17,0	0,25	1,8–2,2	20	100–250	–	–
Smiths Microwave	PS4-19	SP4T	40,0–60,0	10,0	0,5 (10,0)	2,4	20	–	20	300
Sage Millimeter	SK4-5536536535-1515-R1	SP4T	55,0–65,0	10,0	0,1	6,5	35	100	–	–
Ducommun	CP4-77305030-D2	SP4T	75,0–78,0	3,0	–	<6,5	>30	<150	–	–
Ducommun	CP10-77308030-D2	SP10T	75,0–78,0	3,0	–	<10,0	>30	<150	–	–

Примечание. ΔF – полоса (часть диапазона частот), в которой функционирует устройство.

на 18 ГГц и 20 дБ на частоте 50 ГГц. Лучшая развязка может быть получена за счет использования в схеме переключателя большего числа pin-диодов. Дополнительное увеличение развязки до 40–60 дБ может быть достигнуто при последовательном включении двух разделенных вентилем переключателей. Время переключения в изделиях этой серии равно 2 нс, а при использовании драйверов не превосходит 8 нс. Эти переключатели используются для получения импульсов переменной длительности и защиты входных цепей приемников в импульсных РЛС.

SPDT-переключатели PDT-серии доступны для частот от 18 до 100 ГГц в семи диапазонах: K, Ka, Q, U, V, E, W. Полоса рабочих частот во всех диапазонах в изделиях Y-типа (рис. 20г) не превосходит 10 ГГц. При этом лучшая развязка и меньшие вносимые потери достигаются в более узкополосных переключателях. Времена нарастания и спада в подобных переключателях составляют соответственно 20 и 300 нс. Лучшие результаты по скорости переключения ($T_r = T_f = 10$ нс) достигаются в изделиях I-типа (рис. 20в).

Многопозиционные переключатели, а также переключательные матрицы, компании Smiths Microwave доступны для частот от 18 до 110 ГГц. Стандартные SP3T-изделия выпускаются для диапазонов Ka, V, E и W, а SP4T-переключатели – для диапазонов Ka, Q и U. Эти изделия выполняются в компактных корпусах вместе с интегрированными в них драйверами. Стандартные переключатели с низкими вносимыми потерями обеспечивают время переключения $T_r = 20$ нс и $T_f = 150$ –300 нс. В моделях с увеличенными вносимыми потерями может быть достигнуто время переключения 2 нс.

Компания Sage Millimeter представлена на рынке широкой номенклатурой выпускаемых изделий, в том числе и СВЧ-переключателями поглощающего и отражательного типа. Среди стандартных моделей имеются волноводные отражательные переключатели для диапазонов частот 45–55, 55–65, 75–85 и 90–100 ГГц. Для всех этих диапазонов выпускаются SPST (серия SKS) и SPDT (серия SKD) переключатели. Многопозиционные переключатели (серия SK4) представлены стандартными моделями для диапазонов 45–55, 55–65, 50–75 и 72–81 ГГц. Примером многопозиционного отражательного SP4T-переключателя может служить изделие SK4-5536536535-1515-R1, реализованное вместе с драйвером в одном компактном корпусе (рис. 20е). Все три серии переключателей этой компании обеспечивают достаточно малое время переключения $T_n = 100$ нс. В волноводных переключателях Sage Millimeter используются как дискретные, так и интегральные pin-диоды. Волноводные изделия выпускаются только с внешними драйверами.

Помимо стандартных моделей, компания Sage Millimeter выпускает заказные изделия. При заказе SPST-,

SPDT- и SP4T-моделей используются следующие обозначения:

SKS – FIN F2N IL IS – CI CO – XY,

SKD – FIN F2N IL IS – CI CO – XY,

SK4 – FIN F2N IL IS – CI CO – XY,

где

FIN – начальная частота в МГц, например:

2 ГГц = $2 \cdot 10^3$ МГц → 023 (F1=02, N=3);

90 ГГц = $90 \cdot 10^3$ МГц → 903 (F1=90, N=3);

F2N – конечная частота в МГц, например:

18 ГГц = $18 \cdot 10^3$ МГц → 183 (F2=18, N=3);

100 ГГц = $10 \cdot 10^4$ МГц → 104 (F2=10, N=4);

IL – вносимые потери ×10. Например 2,0 дБ = 20;

IS – развязка в дБ. Например, 35 дБ = 35;

CI – тип входного соединителя. Например K(F) = KF;

CO – тип выходного соединителя. Например K(M) = KM;

X – тип переключателя:

«A» – поглощающий, «R» – отражательный,

Y – резерв производителя.

Поглощающие переключатели по сравнению с отражательными имеют большие обратные потери во включенном и выключенном состояниях, однако, вносимые потери и стоимость выше, чем у отражательных. С другой стороны отражательные переключатели имеют худший КСВН в выключенном состоянии. При этом отражательные изделия работают при больших входных мощностях и имеют меньшую стоимость. При необходимости отражательные переключатели могут быть трансформированы в поглощающие включением вентилей.

Две серии волноводных переключателей на кремниевых и арсенид-галлиевых pin-диодах с балочными выводами продвигает на рынок компания HXI. В серии HSW представлены восемь моделей SPST-переключателей и одна модель SPDT-переключателя. SPST-переключатели этой серии реализуются для диапазонов частот 18,0–26,5; 22,0–33,0; 26,5–40,0 и 33,0–50,0 ГГц и обладают весьма низкими временами переключения ($T_r = 15$ –20 нс, $T_f = 7$ –8 нс). Единственный SPDT-переключатель этой серии (модель HSWM22801), работающий в диапазоне 26,5–40,0 ГГц, также имеет малые времена нарастания и спада (15 и 7 нс). Серия HSWM представлена шестью коаксиальными и шестью волноводными переключателями, рассчитанными на входную мощность 1 Вт. Три из этих волноводных переключателей SPST-типа и три SPDT-типа. Переключатели этой серии имеют очень малое время переключения ($T_r = T_f = 3$ нс). Помимо стандартных моделей, производитель предлагает опциональные модели с временем переключения менее 2 нс.

Компания Discontin наряду с коаксиальными переключателями выпускает волноводные SPST- и SPDT-изделия для V-, E- и W-диапазонов. При этом уровень вносимых потерь по мере увеличения частоты меняется от 3 до 5 дБ, а развязка, допустимая входная мощность

и время переключения (100 нс) остаются неизменными. В SPST (CPS-63253025-01) и SPDT (CPD-63254025-01) переключателях V-диапазона наряду с дискретными pin-диодами применяются и диоды Шоттки. С использованием pin-диодов выпускаются также многопозиционные (SP4T и SP10T) переключатели, рассчитанные на диапазон частот 75–78 ГГц. Вносимые потери в первом из них (CP4-77305030-D2) не превышают 6,5 дБ, а в изделии CP10-77308030-D2 (рис. 20з) равны 10 дБ. Развязка в обоих случаях превосходит 30 дБ, а время переключения не выше 150 нс. Многопозиционный SP4T-переключатель CP4-60086030-02 рассчитан на диапазон частот 56–64 ГГц. Время переключения в нем не превосходит 200 нс. Модель CPS-96043020-D1 SPST-переключателя выпускается с подключенным к нему драйвером.

Одним из крупных производителей является компания QuinStar Technology, продвигающая на рынок три серии изделий. SPST- и SPDT-переключатели серий QSS и QSD производятся для семи диапазонов частот в пределах от 18 до 110 ГГц. Полоса рабочих частот в диапазонах K, Ka, Q и U совпадает с их границами, а в диапазонах V, E и W не превышает 10 ГГц. Время переключения в стандартных моделях равно 250 нс, но в случае необходимости поставляются изделия с временем переключения менее 10 нс. Эта же компания поставляет и многопозиционные переключатели различных (SP3T...SP8T) конфигураций на частотах до 100 ГГц. В зависимости от частотного диапазона и схемотехники драйвера время переключения в этих изделиях может варьироваться от 10 до 200 нс. Такие многопозиционные изделия идеально подходят для ослабления сигналов, защиты входных цепей приемников, могут быть использованы в антенных переключателях, при различного рода измерениях и в трансиверах для обеспечения режимов прием / передача.

В семи волноводных диапазонах (18–110 ГГц) выпускает SPST- и SPDT-переключатели компания MRI (Microwave Resources Inc.). В пяти из них продукция поставляется для полных волноводных диапазонов, а в диапазонах 60–90

и 75–110 ГГц полоса рабочих частот не превышает 15% от ширины диапазона. Изделия компании MRI отличаются малыми вносимыми ослаблениями от 1,0 до 3,5 дБ. Время переключения во всех моделях составляет 250 нс.

Широкую линейку отражательных и поглощающих волноводных переключателей различных конфигураций (SPDT, SP3T,..., SP8T и других), работающих на частотах от 18 до 110 ГГц, производит компания CERNEX. В K- и Ka-диапазонах рабочая полоса частот совпадает с границами этих диапазонов, а в Q-, U-, V-, E- и W-диапазонах не превосходит 10 ГГц. Вносимое ослабление меняется от 1,2 до 2,5 дБ в SPST-переключателях и от 1,8 до 3,0 дБ в SPDT-изделиях. Стандартное значение развязки равно 20 дБ, но при заказе могут быть поставлены изделия с развязкой до 100 дБ. Время переключения составляет 100–250 нс.

Несколько серий (910, 911, 912, 915) волноводных переключателей на pin-диодах выпускает компания Millimeter Wave Products Inc. (Mi-Wave). Все переключатели включают в себя интегральные драйверы, хотя могут поставляться и без них. Полоса рабочих частот до 6% (серии 910, 911, 912) и до 10% (серия 915). Серии 910, 911, 915 – это SPST-переключатели, серия 912 – SPDT-переключатели. Наименьшее время переключения 10 нс обеспечивается в SPST-переключателях 911-серии. Развязка в переключателях разных серий может меняться от 25 до 45 дБ. Однако, заказные изделия в сериях 910, 911, 915 могут обеспечить развязку до 60 дБ.

Компания Pasternack выпускает четыре волноводных отражательных переключателя: PE7IS9001 (SPST), PE7IS9002 (SPDT), PE7IS9003 (SPST) и PE7IS9004 (SPDT), работающих в диапазонах частот 60–90 ГГц и 75–100 ГГц. Время переключения во всех этих изделиях не превышает 300 нс (рис. 21). Отметим, что точно такие же переключатели, но с другими названиями FMSW9001, FMSW9002, FMSW9003 и FMSW9004 продвигает на рынок компания Fairview Microwave.

Китайская компания Qotana в основном производит коаксиальные переключатели, но не так давно в линейке



Фильтры ФИЛИН

- Фильтры ВЧ/СВЧ и устройства на их основе

Любые виды заказов:

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

Разработка, производство, испытания устройств с учетом конструктивно-технических требований заказчика

НОВЫЙ каталог 2021 по запросу

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

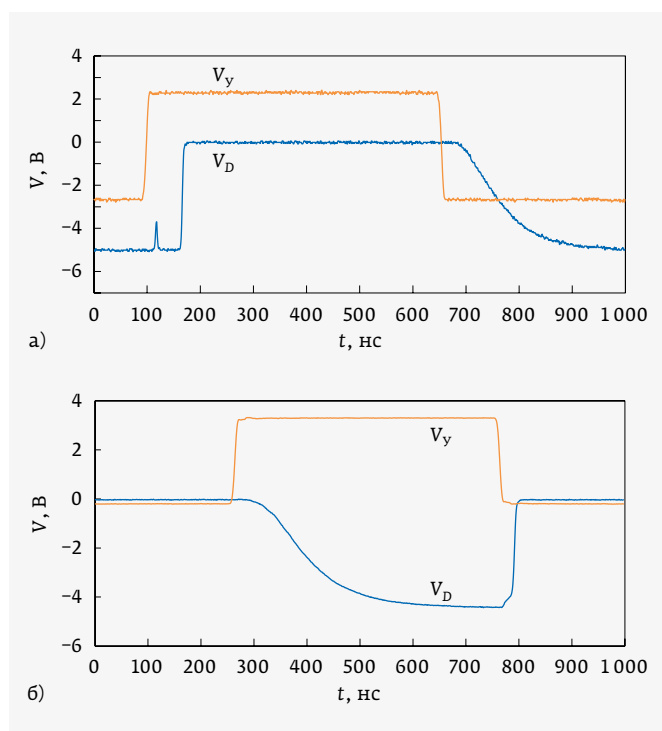


Рис. 21. Осциллограммы управляющего V_y и продетектированного выходного V_D сигналов в волноводных переключателях PE71S9001, PE71S9003 компании Pasternack

ее продукции появился и волноводный SPDT-переключатель, предназначенный для работы в диапазоне 60–90 ГГц, с временем переключения 100 нс.

Для очень широкого диапазона частот (от 18 до 150 ГГц) выпускает SPST-переключатели компания ELVA-1 (рис. 20а, б). Для каждого из девяти диапазонов частот K, Ka, Q, U, V, E, W, F и D компания производит переключатели с полосой 10% и более. При этом времена переключения равны 4–6 нс. Вносимые потери находятся в пределах от 0,7 до 1,5 дБ. Стандартная развязка равна 30 дБ, но возможна поставка изделий и с увеличенной (до 60 дБ) развязкой, за счет увеличения числа ступеней (рис. 20б).

Для более широкого диапазона частот (от 33 до 210 ГГц) производятся SPST-переключатели компаниями ZAX Millimeter Wave Corporation. Изделия выпускаются с интегрированными ТТЛ-драйверами.

Доступны для заказа и многопозиционные переключатели различных производителей (рис. 20е, ж, з). Времена коммутации волноводных переключателей обычно не превосходят 100 нс.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Геворкян В., Кочемасов В.** Ферритовые переключатели // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 6. С. 90–94; № 9. С. 122–131.

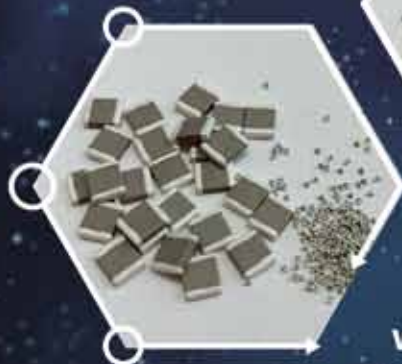
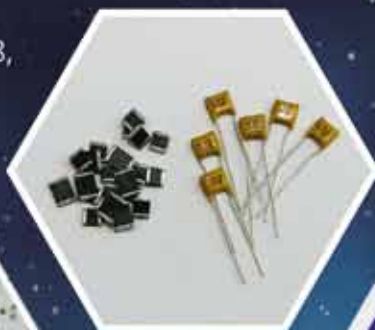
2. **Кочемасов В.** Электромеханические переключатели ВЧ/СВЧ-сигналов – основные типы и производители // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2016. № 7. С. 114–121; № 8. С. 96–106; № 9. С. 128–134.
3. **Кочемасов В., Майстренко А.** СВЧ-переключатели на основе МЭМС // СВЧ-электроника. 2016. № 1. С. 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., Гуцин 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.



РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КЕРАМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ И ПРОХОДНЫХ ФИЛЬТРОВ

СЕРИЙНАЯ ПРОДУКЦИЯ:

- многослойные конденсаторы – K10-17, K10-42, K10-47, K10-50, K10-54, K10-57, K10-79, КМК;
- трубчатые конденсаторы – ТК, K10-51К, КТП, КТ-1Е;
- фильтры – Б14, Б23А, Б23Б, Б28, Б29, Б7-2, Б24.



НОВЕЙШИЕ РАЗРАБОТКИ:

- варисторы ВР-18, ВР-19;
- фильтры Б36;
- конденсаторы K10-89, K10-90.

www.kulon.spb.ru



192019, г. Санкт-Петербург,
ул. Профессора Качалова, д. 3, литер К
Тел.: +7 (812) 317-33-04,
Факс: +7 (812) 412-61-63,
e-mail: office@kulon.spb.ru
sale@kulon.spb.ru

Официальный
поставщик



www.zolshar.ru