

# Антенные переключатели

## Часть 1

В. Кочемасов, к. т. н.<sup>1</sup>, А. Сафин, к. т. н.<sup>2</sup>, С. Дингес, к. т. н.<sup>3</sup>

УДК 621.389 | ВАК 2.2.2

СВЧ-переключатели – один из наиболее массовых радиокомпонентов, применяемых в радиоэлектронной аппаратуре. Они используются в переключаемых аттенюаторах, фазовращателях и фильтрах, в антенных приемопередающих модулях, в том числе входящих в состав активных фазированных решеток, применяемых в радиолокационных станциях [1] и средствах мобильной связи, включая поколения 5G/6G [2]. Все перечисленные изделия востребованы в волноводном (относительно редко), модульном (достаточно часто) и интегральном (массово) исполнениях. В статье рассказывается об антенных переключателях различных типов.

**А**нтенные переключатели могут быть выполнены по различным технологиям [3–9]. Допустимые уровни мощности в этих устройствах лежат в пределах от долей ватта до сотен киловатт.

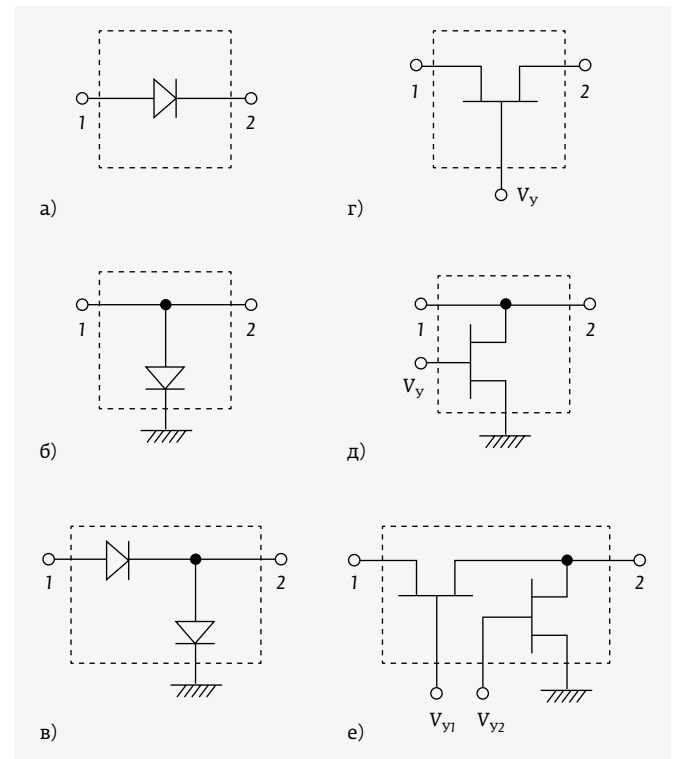
В твердотельных изделиях допустимая непрерывная входная мощность может достигать единиц киловатт в переключателях на дискретных рpn-диодах (в модульном исполнении) и сотен ватт в интегральных переключателях на кремниевых рpn-диодах и нитрид-галлиевых полевых транзисторах. Арсенид-галлиевые и КМОП переключатели в основном применяются в интегральном исполнении. Первые из них по сравнению с рpn-диодными переключателями имеют более высокую степень интеграции, устойчивы к радиации, имеют на два порядка меньшие токи смещения и управления. КМОП-переключатели по сравнению с арсенид-галлиевыми имеют несомненные преимущества по допустимой входной мощности, степени интеграции в том числе с аналоговыми и цифровыми узлами, защищенности от статического электричества, а также примерно на порядок меньшие токи потребления и управления.

Известны три канонические структуры твердотельных переключателей: последовательная (рис. 1а, г), параллельная (рис. 1б, д) и последовательно-параллельная (рис. 1в, е). На их основе и реализуются SPST- (рис. 2а), SPDT- (рис. 2б), многопозиционные SPMT- (рис. 2в) и DPDT-переключатели (рис. 2г). По сути дела, каждый канал DPDT- или SPMT-переключателя представляет собой SPST-переключатель. На четырех SPST-структурах

может быть реализован и DPDT-переключатель (рис. 2г). Практические схемы могут быть более сложными.

Антенные переключатели можно разделить на два класса:

- мощные изделия на основе DPDT-переключателей, выполненных на кремниевых рpn-диодах или

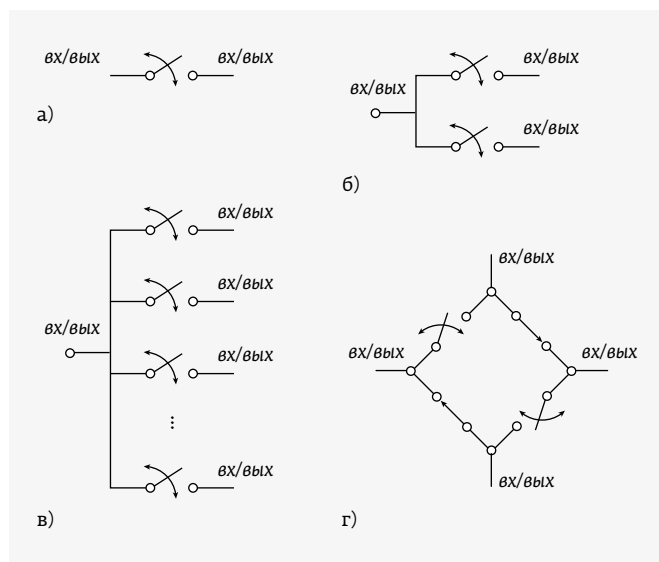


**Рис. 1.** Базовые структуры переключателей на рpn-диодах (а, б, в) и полевых транзисторах (г, д, е): а, г – последовательная; б, д – параллельная; в, е – последовательно-параллельная.  $V_y$  – управляющее напряжение

<sup>1</sup> ООО «Радиокомп», генеральный директор, vkochemasov@radiocomp.ru.

<sup>2</sup> НИУ «МЭИ», заведующий кафедрой формирования и обработки радиосигналов, arsaafin@gmail.com.

<sup>3</sup> МТУСИ, доцент кафедры радиооборудования и схемотехники.



**Рис. 2.** Типы переключателей: а – SPST; б – SPDT; в – SPMT; г – DPDT

нитрид-галлиевых полевых транзисторах, обеспечивающие подключение к антенному порту выхода передатчика  $T_x$  или входа приемника  $R_x$ ;

- относительно маломощные изделия на основе DPDT-или многопозиционных переключателей, обеспечивающие подключение нескольких передатчиков и приемников к двум и более антеннам.

Арсенид-галлиевые и особенно КМОП технологии получили широкое распространение в системах мобильной связи вследствие постоянного увеличения количества абонентов и числа используемых стандартов. Соответственно увеличивается и количество антенных переключателей, выпускаемых многочисленными производителями. Их разнообразие весьма велико и с развитием технологий габариты и потребляемая мощность этих изделий постоянно снижаются, а функциональные возможности возрастают.

## РІN-ДИОДНЫЕ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

### Модульные $R_x / T_x$ -переключатели

Обычные SPDT-переключатели вполне могут быть использованы для обеспечения работы передатчика  $T_x$  и приемника  $R_x$  на одну антенну. Однако такое решение неэффективно и более целесообразно использовать специализированные переключатели «прием-передача» ( $R_x / T_x$  switches) с существенно различающимися характеристиками в передающем и приемном каналах, которые должны удовлетворять ряду требований:

- вносимые потери и интермодуляционные искажения в передающем канале должны быть предельно низкими;

- допустимая входная мощность в приемном канале должна быть существенно меньше допустимой мощности передающего канала;
- в приемном канале должны быть приняты меры по уменьшению мощности радиочастотного сигнала, просачивающейся из передающего канала, что обеспечивает высокую степень развязки между  $T_x$  и  $R_x$ , а также уменьшение видеискажений VT (video through), возникающих при коммутации диодов;
- КСВ  $R_x / T_x$ -переключателя должно быть близким к 1, то есть согласование выходов передатчиков и входов антенн должно быть идеальным;
- желательно, чтобы в схеме  $R_x / T_x$ -переключателя отсутствовали разделительные конденсаторы, приводящие к дополнительным потерям и увеличению его стоимости;
- желательно, чтобы в схеме  $R_x / T_x$ -переключателя был лишь один источник питания;
- ток потребления в приемном канале должен быть близким к нулевым значениям;
- время переключения должно быть минимальным.

Добиться выполнения этих требований можно при использовании симметричных (рис. 3) и в большей степени несимметричных (рис. 4) структур SPDT-переключателей, представленных на этих рисунках без цепей смещения, управления и четвертьволновых микрополосковых линий.

Каждый из портов симметричного SPDT-переключателя может быть как входным, так и выходным. При прямом включении сигнал с порта *Ант* может поступать на порты  $T_x$  и  $R_x$ . При обратном включении сигналы с портов  $T_x$  и  $R_x$  поступают на порт *Ант*. И при прямом, и при обратном включении прохождение сигналов с  $T_x$  на  $R_x$  и обратно невозможно.

Такой переключатель работает только в двух режимах. В передающем режиме сигнал проходит с выхода передатчика  $T_x$  на антенну *Ант*. В приемном режиме сигнал с антенны *Ант* поступает на вход приемника  $R_x$ . Все другие пути прохождения сигналов между портами невозможны. Pin-диодные  $R_x / T_x$ -переключатели могут быть выполнены как в модульном, так и в интегральном исполнениях.

Модульные приемопередающие переключатели реализуются на дискретных pin-диодах или сборках на их основе (рис. 5). Эти сборки (табл. 1) выпускаются рядом производителей (MACOM, Aeroflex Metelics, Infineon, Skyworks Solutions и др.) специально для использования в модульных переключателях (табл. 2).

Непрерывная излучаемая мощность в модульных переключателях может достигать нескольких сотен ватт. При этом импульсная мощность ( $P_{imp}$ ) в отдельных изделиях может доходить до 5 кВт (см. табл. 2). Так, широкую линейку мощных pin-диодных переключателей PIN1001, PIN1002, ..., PIN1014 с допустимой импульсной

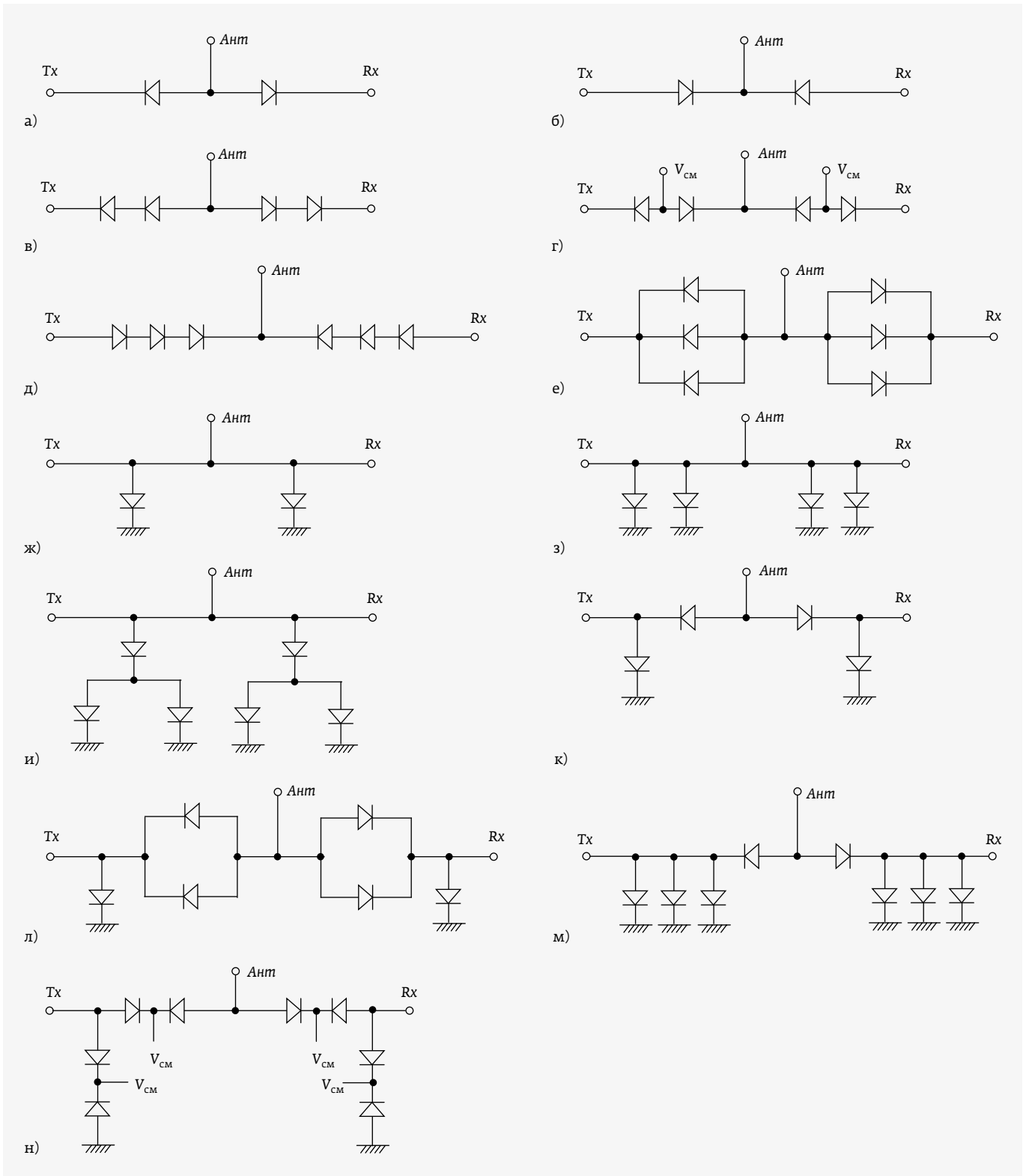
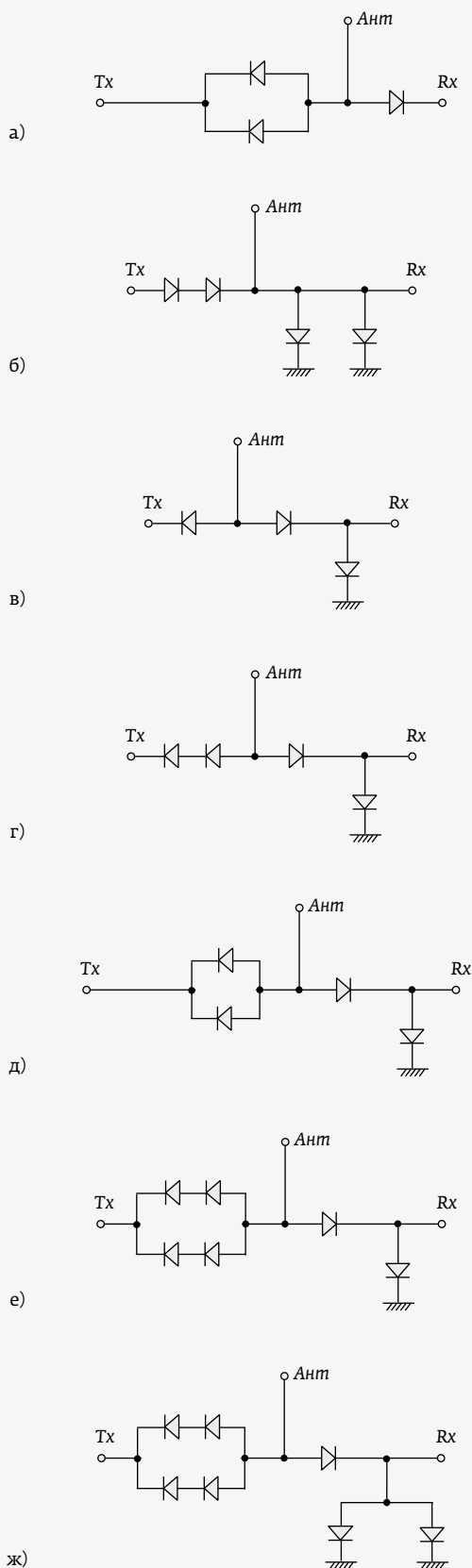


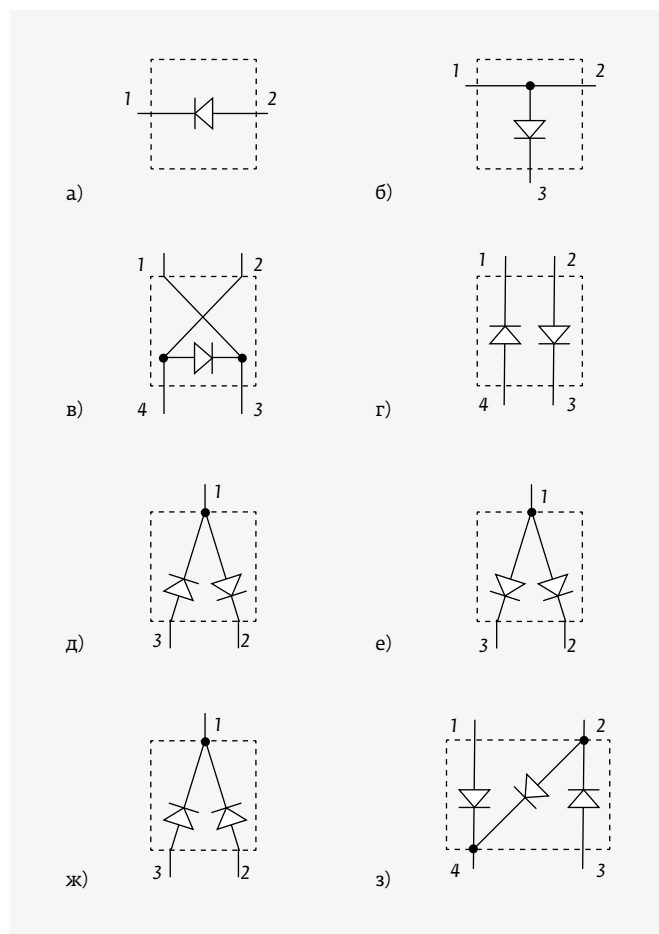
Рис. 3. Примеры реализации симметричных Rx/Tx-переключателей на кремниевых pin-диодах:

а - MASW-000822-1270T (MACOM); б - KS03R2-22 (KCB Solutions); в - TOSW-425 (Mini-Circuits);  
 г - TOSW-230 (Mini-Circuits); д - [10]; е - MSW2T-02052-232 (Wei Bo Associates); ж - MSW2T-8512-740 (Wei Bo Associates);  
 з - MASW-011071 (MACOM); и - AP640R7 (Alpha Industries); к - MPS2R10-606 (Microsemi);  
 л - MSW2T-2040-193 (Wei Bo Associates); м - HMC975 (Analog Devices); н - [11].  $V_{см}$  - напряжение смещения



**Рис. 4.** Примеры реализации асимметричных Rx/Tx-переключателей на кремниевых рpn-диодах: а – MSW2T-0025-195 (Wei Bo Associates); б – [12]; в – MASW-000936 (MACOM); г – SKY12212-478 LF (Skyworks Solutions); д – MSW2022-202 (MACOM); е – SKY12213-478LF (Skyworks Solutions); ж – MSW2T-2735-196 (Wei Bo Associates)

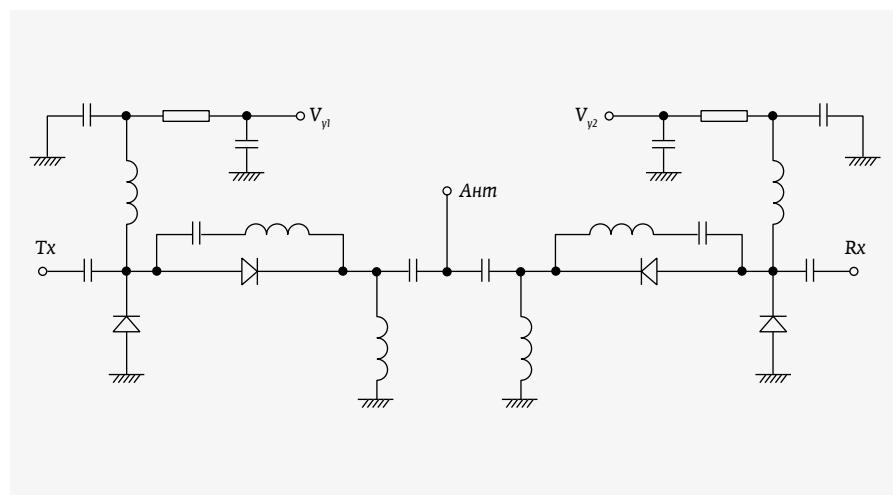
мощностью от 1000 до 5000 Вт производит компания Exodus Advanced Communications. Время переключения в этих изделиях находится в пределах от 1 до 20 мкс. Широкую полосу (1,5–1000,0 МГц) в сочетании с высокой входной импульсной мощностью (1000 Вт) и относительно небольшим временем переключения (50 мкс) обеспечивает приемопередающий переключатель TRS 02-1000-1000,



**Рис. 5.** рpn-диодные сборки компаний Infineon (а, в, г, д, е, ж, з); Aeroflex Metelics, MACOM (а, б, д, е); Skyworks Solutions (а, б, д): а – последовательная; б, в – параллельная; г – антипараллельная пара; д – последовательная пара; е – общий анод; ж – общий катод; з – P-элемент

Таблица 1. Характеристики pin-диодных сборок, используемых в модульных переключателях

Компания, модель	Тип сборки	Диапазон частот, ГГц	$P_{вх}$ , Вт	$V_{бр}$ , В	$IL$ , дБ	$Iso$ , дБ	$LT$ , нс	$IW^*$ , мкм
MACOM, MASW-001150-1316	Последовательно-параллельная	0,045–2,5	50	180	0,07–0,60	63–33	8 500	–
MACOM, MSWSH-100-30	Параллельная	0–2,7	300	700	0,15–0,35	31–26	3 400	–
Aeroflex Metelics, MSWSE-040-10	Последовательная	0,1–3,0	40	300	0,12–0,25	14–11	700	40
Infineon, BAR63-06	Общий анод	0–3,0	–	50	0,15–0,10	17,9–10	75	4,5
Infineon, BAR63-05	Общий катод	0–3,0	–	50	0,15–0,10	17,9–10	75	4,5
Aeroflex Metelics, MSWSH-020-30	Параллельная	0,1–6,0	20	100	0,25–0,35	31–27	600	15
Aeroflex Metelics, MSWSS-020-40	Последовательно-параллельная	0,1–6,0	20	100	0,3–0,6	50–35	200–450	15
Aeroflex Metelics, MSW2T-1001	Общий анод	0,1–6,0	20	125	0,2–0,3	30–23	90	8
Skyworks Solutions, SMP1302-085LF	Параллельная	0,01–6,0	140	200	–	–	700	50
Infineon, BAR50-02V	Последовательная	0,01–6,0	–	50	0,56–0,27	24,5–12	1 100	56
Skyworks Solutions, SMP1345-087LF	Последовательная	0–6,0	40	50	–	–	100	10
Infineon, BAR64-04	Последовательная пара	0–6,0	–	150	0,99–0,24	17,5–10,4	1 550	50
Skyworks Solutions, SMP1322-005LF	Последовательная пара	0,01–10,0	–	50	–	–	400	7

\*  $IW$  – толщина I-слоя.

выпускаемый компанией Empower RF Systems (см. табл. 2).

Примеры реализации Rx/Tx-переключателей приведены в ряде публикаций. Так, поглощающий симметричный SPDT-переключатель для WiMax базовых станций реализован в диапазоне 2,3–2,7 ГГц [10]. Основной упор в этой разработке

Рис. 6. Упрощенная принципиальная схема SPDT-переключателя на pin-диодах с последовательными резонансными контурами



## 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](mailto:mwsystems@mwsystems.ru)  
[www.mwsystems.ru](http://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 2. Характеристики Rx/Тх-переключателей на кремниевых рpn-диодах в модульном исполнении

Компания, модель	Диапазон частот, ГГц	$P_n^*$ , Вт	$P_{in}$ , Вт	$T_n^{**}$ , мкс	$Q^{***}$ , %	IL, дБ	Iso, дБ	$T_n$ , мкс
ООО «Радиокомп», РКК-4-500	0,55-0,90	160	500	-	-	0,5	66	-
AA MCS, AAMCS-SWT-SPDT-20M-1000M-52dBm	0,02-1,00	160	-	-	-	0,8	45	10
Empower RF Systems, TRS 02-1000-1000	0,0015-1,0000	100	-	-	-	-	-	-
Exodus Advanced Communications, PIN1008	1,025-1,035	-	5000	-	-	-	-	-
ОКБ Микроэлектроники, МК-01-10	1,030-1,09	10	300	-	-	0,3	30	1
Corry Micronics, CMSW-SPDTR-1G-5K	1,0-1,1	100	5000	17	<2	<0,8	>40	0,25
RF-Lambda, RFSP2TR0102GH	1,0-2,0	70	600	30	12	0,8	42	1
Comtech PST, H22-103 T/R	0,5-2,0	80	1000	10	-	0,5	53	<1,5
AA MCS, AAMCS-SWT-SPDT-400M-4000M-52dBm	0,4-4,0	160	-	-	-	1,0	30	5
CPI, VLC1599	5,25-5,75	-	2000	640	20	1,2	30	10
Aethercomm, SSHPS-25-6.0-150	2,5-6,0	150	-	-	-	0,6-1,3	53	5
AA MCS, AAMCS-SWT-SPDT-1000M-6000M-50dBm	1,0-6,0	100	-	-	-	1,5	30	5
RFcore, RCS001070D50A	0,1-7,0	100	-	-	-	1,0	-	-
CPI, BLP2084	9,2-9,8	-	3000	40	10	1,0	40	-
Linwave, -	X-band, 10%	50	-	-	-	1,2	30	1
Exodus Advanced Communications, PIN1014	9,0-10,0	-	1000	-	-	-	-	-
PMI, P2T-6G18C-40-R-570-TFF-1D6KW	6-18	126	1600	-	-	2,2	40	1,1

\*  $P_n$  – непрерывная мощность,\*\*  $T_n$  – длительность импульса,\*\*\*  $Q$  – скважность.

был сделан на создании экономичного изделия на коммерческих диодах. В разработке использовался дешевый ламинат RO4003C компании Rogers с диэлектрической постоянной 3,38, предназначенный для работы на частоте 10 ГГц. В этом переключателе, реализованном по схеме рис. 3д, увеличение развязки достигается за счет последовательного включения трех диодов как в передающем, так и в приемном каналах. Платой за увеличение развязки является 3-кратный рост вносимых потерь. Во втором из рассмотренных в работе [10] изделий для увеличения развязки до 40 дБ используются последовательные резонансные цепи (рис. 6) [10].

Еще одним примером Rx/Tx-изделий является ВЧ-переключатель MA8306-2W3XD [11], рассчитанный на работу в диапазоне 20–80 МГц. Этот переключатель (рис. 7) [11], работающий при входной мощности 1500 Вт, обеспечивает вносимые потери  $IL(Tx - Ant) = 0,07$  дБ,  $IL(Ant - Rx) = 0,25$  дБ, развязку  $Iso(Tx - Rx) = 90$  дБ и время переключения  $T_n = 30$  мкс. При тестировании переключателя его работоспособность была подтверждена и при  $P_{вх} = 2000$  Вт. В переключателе использовались pin-диоды с размерами  $0,110'' \times 0,110'' \times 0,015''$ . Использование таких диодов позволило обеспечить напряжение пробоя  $V_{бр} = 1800$  В, сопротивление включения  $R_{он} = 0,2$  Ом, предельную частоту  $F_{пр} = 250$  ГГц и время жизни носителей  $LT = 15$  мкс.

Модуль переключателя выполнен на восьми pin-диодах, включенных попарно навстречу друг другу (см. рис. 7). Использование диодных пар позволило обеспечить подачу смещения между встречно включенными диодами и в значительной степени подавить четные гармоники. Последовательные диоды объединены в диодную сборку CR-1.

Асимметричные Rx/Tx-переключатели во многих случаях могут быть более предпочтительными. В асимметричном Rx/Tx-переключателе (рис. 8) [12] в передающем канале два диода включены последовательно, а в приемном канале – параллельно [12]. При этом в приемном канале используются две четвертьволновые микрополосковые линии (МПЛ),

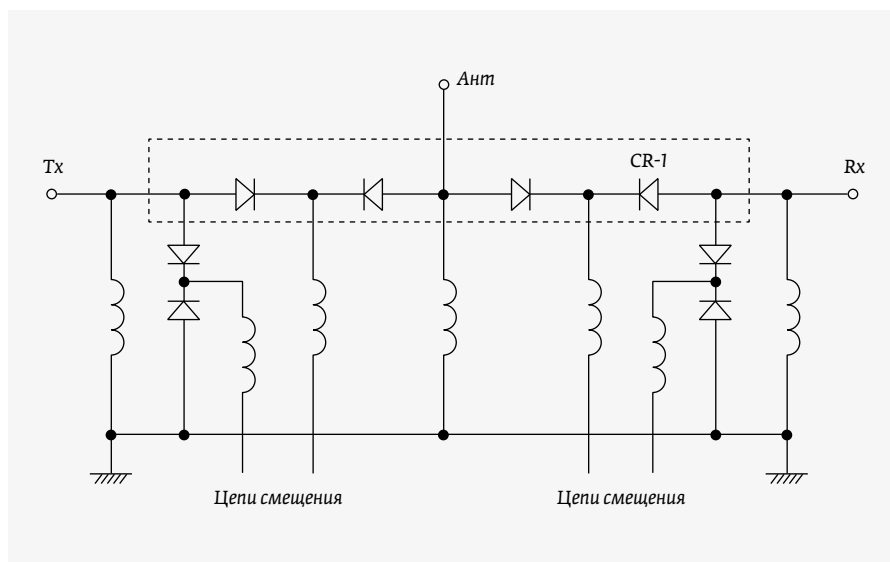


Рис. 7. Упрощенная принципиальная схема сверхмощного SPDT-переключателя на кремниевых pin-диодах

разделяющие шунтирующие диоды. Дополнительно включенные последовательный и шунтирующий диоды обеспечивают более высокую степень развязки между передатчиком и приемником в передающем режиме. При подаче в передающем режиме положительного смещения на все диоды они открываются, обеспечивая низкие вносимые потери между передатчиком и антенной и высокую развязку между передатчиком и приемником. При нулевом смещении все четыре диода находятся в закрытом состоянии и ток в приемном канале практически обнуляется. При этом приемник находится в спящем режиме (stand by) и сигнал с антенны поступает на его вход практически без потерь. Вследствие того,

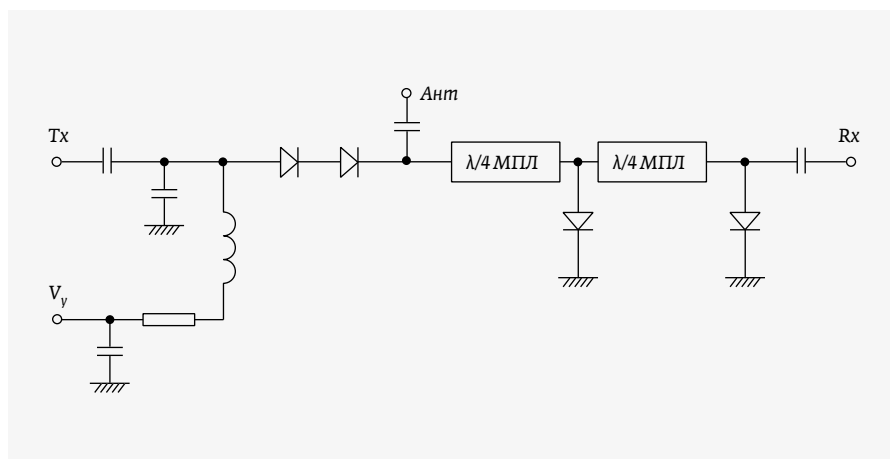
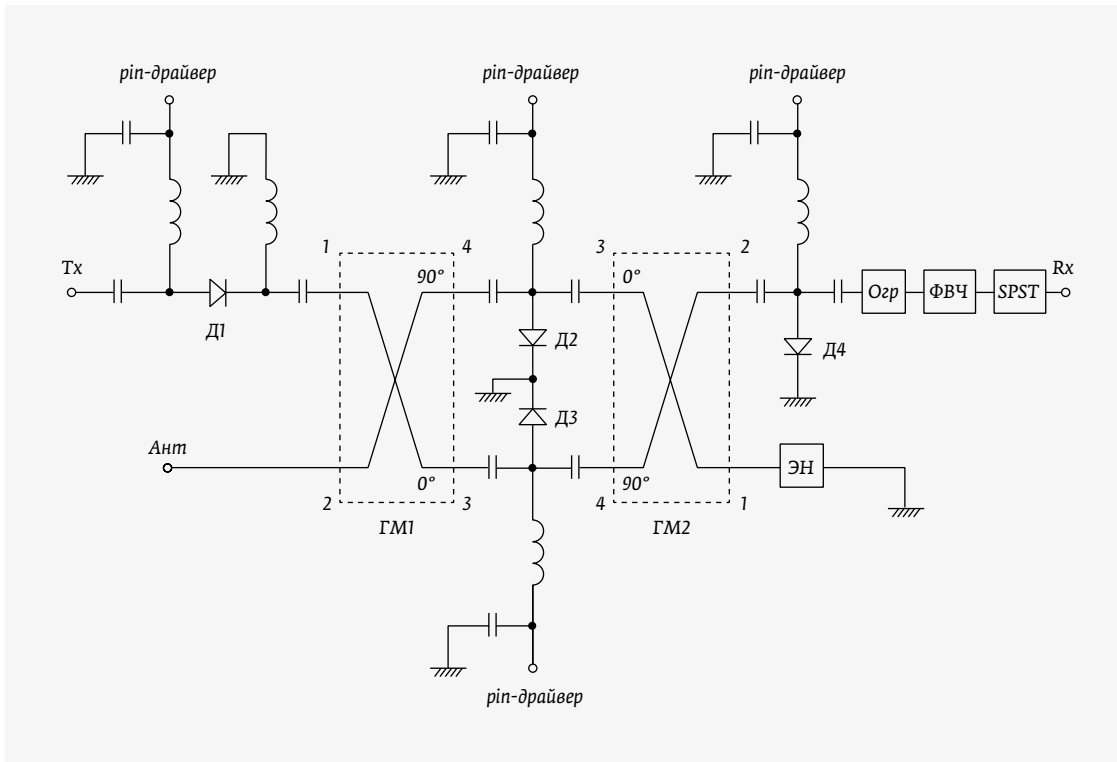


Рис. 8. Асимметричный Rx/Tx-переключатель с двумя последовательными диодами в передающем канале и двумя параллельными диодами в приемном канале





**Рис. 9.** Принципиальная схема мощного Rх/Tх-переключателя на кремниевых рип-диодах с встречным включением гибридных мостов. ЭН – эквивалент нагрузки

что в спящем режиме токи в приемном канале практически отсутствуют, Rх/Tх-переключатель становится более экономичным.

Проведенные измерения Rх/Tх-переключателя показали, что вносимые потери в передающем режиме равны 1,2 дБ, а в приемном – 1,3 дБ. Измеренная развязка между передатчиком и приемником в передающем режиме составила 44 дБ. В приемном режиме развязка существенно меньше (24 дБ). Однако, вследствие того, что сигнал приемника весьма мал, он никакого отрицательного влияния на передатчик не оказывает.

Определенных преимуществ при разработке Rх/Tх-переключателей можно добиться, применив в них четырехпортовые гибридные мосты (ГМ), в которых мощность входного сигнала делится между двумя его выходными портами пополам. При этом фазовый сдвиг между поделенными сигналами составляет 90°. Мосты могут включаться встречно [13] и последовательно [14, 15].

Вариант построения Rх/Tх-переключателя со встречным включением гибридных мостов (рис. 9) рассматривался в [13] применительно к диапазонам частот 100–350 МГц и 150–600 МГц. В обоих случаях использовались мосты компании Werlatone. Для первого диапазона – модель QH8100, а для второго – модель QH8840. В передающем канале этого асимметричного Rх/Tх-переключателя (см. рис. 9) в качестве последовательного диода использовалась сборка MEST2G-150-20, а в приемном – три шунтирующих диода D2 – D4, каждый из которых

был выполнен на сборке MSWSH-100-30. Последовательная сборка была рассчитана на входную мощность 150 Вт, а шунтирующие сборки – на 300 Вт. Смещение на каждую из этих сборок обеспечивалось от драйверов через дроссели.

В передающем режиме на все диоды подается высокое напряжение, обеспечивающее ток смещения около 100 мА. Мощный сигнал с передатчика поступает на 1-й порт ГМ1 через последовательный диод D1, разделяется поровну между портами 3 и 4 с нулевым и 90°-ным фазовыми сдвигами соответственно. Далее сигналы поступают на диоды D3 и D2, которые являются отражательными. В результате этого отраженные сигналы оказываются на 3-м и 4-м портах ГМ1, а результат их синфазного суммирования на 2-м порту ГМ1, то есть проходит на антенну. Вносимые потери от выхода передатчика до антенны оказываются минимальными.

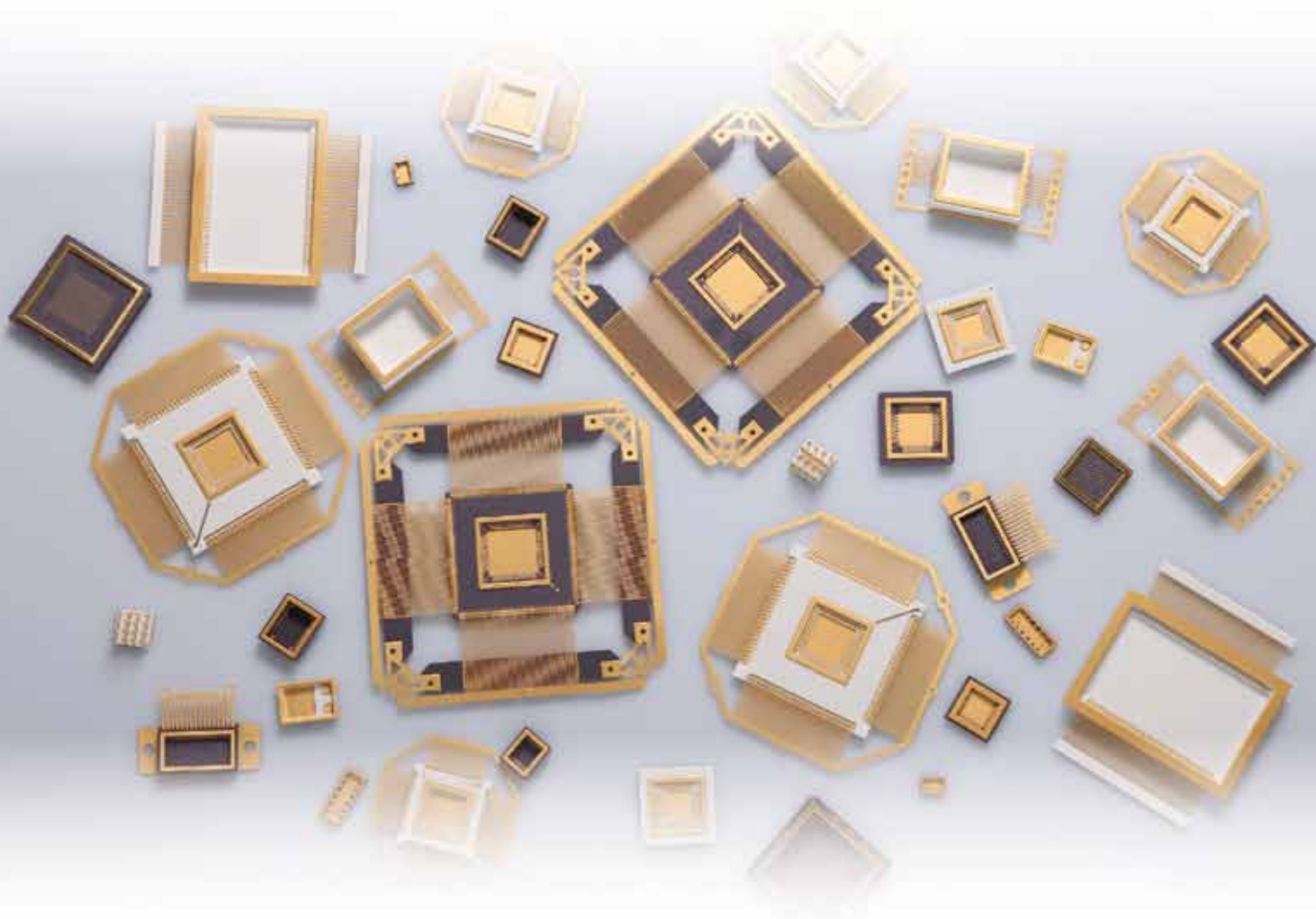
В приемном режиме все диоды закрыты. При этом сигнал от антенны разделяется поровну между портами 3 и 4 ГМ1, поступает далее на 4-й и 3-й порты ГМ2 и после суммирования на втором порте ГМ2 проходит на вход приемника. В этом режиме диод D1 обеспечивает дополнительную развязку между передатчиком и приемником. Кроме того, вход приемника защищен последовательно включенными ограничителем Огр, фильтром высоких частот ФВЧ и дополнительным SPST-переключателем, который открыт в приемном и закрыт в передающем режимах. Ограничитель Огр и SPST-переключатель обеспечивают защиту от просачивающейся мощности



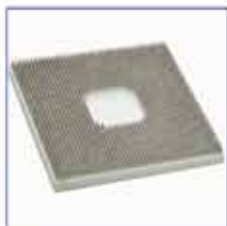
**ЗАВОД  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ПРИБОРОВ**

ЙОШКАР-ОЛА, РЕСПУБЛИКА МАРИЙ ЭЛ

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ЗАВОД ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ»**



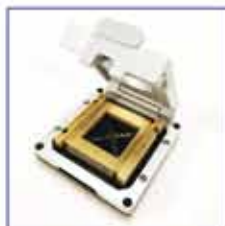
Выводные рамки



Металлокерамические  
корпуса



Нагревательные  
элементы



Контактные  
устройства



Графитовая  
оснастка

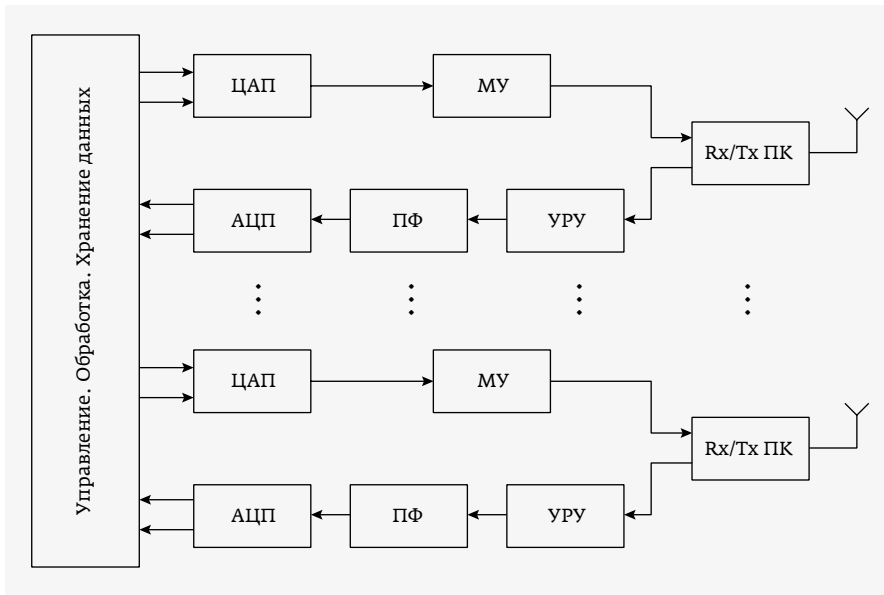


Оптоэлектронные  
корпуса



424003, Россия, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 26  
Тел.: +7-8362-45-70-09, 45-67-68.  
info@zpp12.ru marketing@zpp12.ru

zpp12.ru

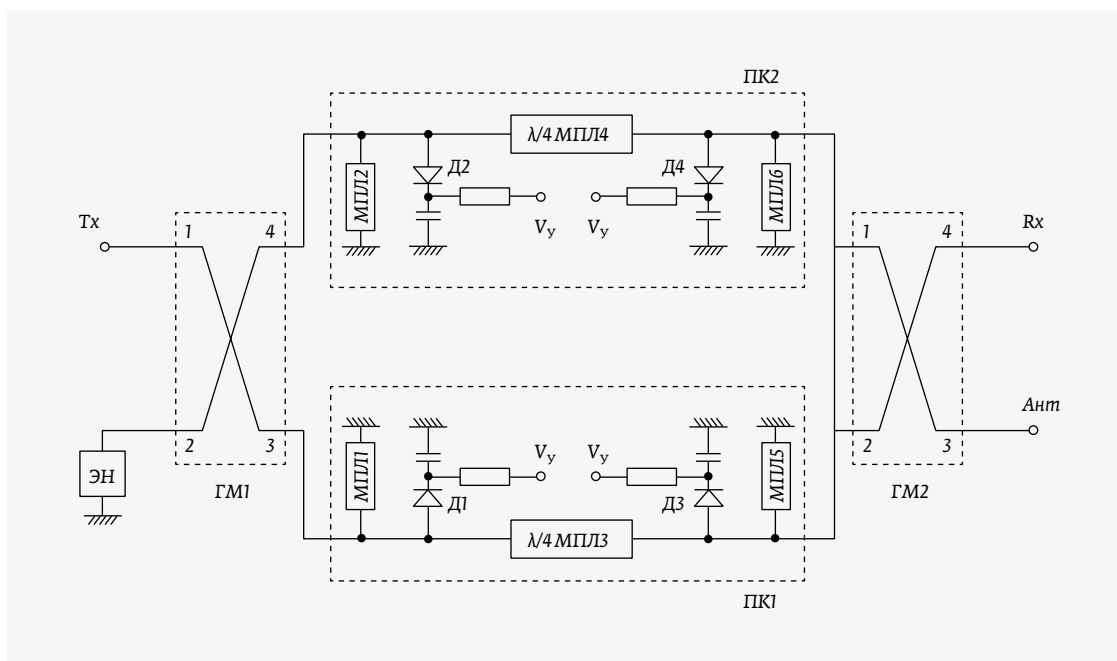


**Рис. 10.** Упрощенная структурная схема когерентного многоканального радиолокатора ледовой обстановки. МУ – мощный усилитель, ПК – переключатель, ПФ – полосовой фильтр, УРУ – усилитель с регулируемым усилением

передатчика, а фильтр ФВЧ – от видеоискажений, возникающих при коммутации диодов. Проведенное исследование изготовленных Рх/Тх-переключателей показало, что в диапазоне частот 100–350 МГц вносимые потери в передающем канале (между выходом передатчика и антенной) составили 0,7–0,9 дБ, а развязка между передатчиком и приемником была равна 70 дБ. В приемном режиме вносимые потери между антенной и приемником были равны 1,3 дБ, а развязка снизилась до 57 дБ.

Сходные результаты были получены и в Рх/Тх-переключателях, изготовленных для диапазона частот 150–600 МГц. Приемопередающие модули с входящими в них Рх/Тх-переключателями были использованы в фазированных антенных решетках радиолокаторов (рис. 10) [13], предназначенных для исследования ледовой обстановки. В радиолокаторах, работающих в диапазоне частот 100–350 МГц, фазированную решетку образуют шесть приемопередающих модулей. В радиолокаторах на 150–600 МГц в фазированную решетку входят только два приемопередающих модуля. Излучаемые фазированными решетками мощности равны 6 и 2 кВт соответственно [13].

Рх/Тх-переключатель [15] с последовательным включением гибридных мостов (рис. 11) [14, 15] реализован, по сути дела, с использованием двух переключателей ПК1 и ПК2, на входы которых с портов 3 и 4 гибридного моста ГМ1 поступают сигналы с уменьшенной вдвое мощностью передатчика. Оба переключателя выполнены по параллельной схеме на двух шунтирующих диодах, аноды которых разделены четвертьволновыми микрополосковыми линиями  $\lambda/4$  МПЛ3 и  $\lambda/4$  МПЛ4. Первый переключатель реализован на диодах Д1, Д3 и микрополосковых линиях МПЛ1,  $\lambda/4$  МПЛ3,



**Рис. 11.** Принципиальная схема мощного Рх/Тх-переключателя на кремниевых рпн-диодах с последовательно включенными гибридными мостами

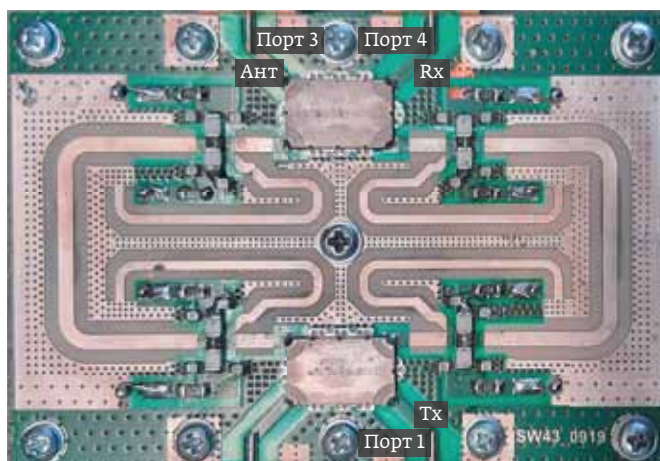


Рис. 12. Печатная плата антенного переключателя, выполненный по схеме рис. 11

МПЛ5. Второй выполнен на диодах  $D2$ ,  $D4$  и микрополосковых линиях МПЛ2,  $\lambda/4$  МПЛ4, МПЛ6. Реально каждый из этих четырех диодов  $D1$ – $D4$  с целью уменьшения вносимых потерь в передающем режиме был заменен двумя параллельно включенными диодами. Длины МПЛ и их волновые сопротивления выбраны такими, чтобы образовать на них и емкостях закрытых

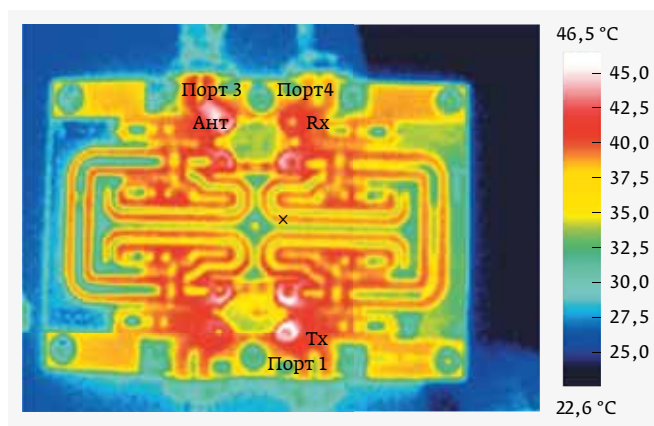


Рис. 13. Инфракрасное изображение распределения температуры на верхней поверхности антенного переключателя в режиме передачи

диодов, в каждом из двух переключателей, фильтры Чебышёва с рабочей полосой частот 150 МГц. Используемые в схеме (рис. 11) трехдецибелльные гибридные мосты  $ГМ1$  и  $ГМ2$  выполнены на связанных линиях.

В передающем режиме на все рpн-диоды поступает высокое положительное напряжение (+100 В), обеспечивающее их надежное закрытие и низкий уровень гармоник.

**Фильтры ВЧ/СВЧ, устройства на их основе, а также компоненты ВЧ/СВЧ трактов для частот до 26,5 ГГц и выше**

- Диплексеры
- Мультиплексеры
- Переключаемые и перестраиваемые фильтры
- Делители/сумматоры мощности
- Направленные ответвители
- Квадратурные мосты
- Коаксиально-волноводные переходы
- Антенны

**Любые виды заказов:**

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



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

- Устройства на сосредоточенных элементах
- Фильтры на коаксиально-керамических резонаторах
- Гребенчатые и встречно-стержневые фильтры
- Моноблочные керамические фильтры
- Фильтры на объемных резонаторах
- Устройства на микрополосковых линиях
- Волноводные устройства
- Устройства по технологии LTCC
- Трубочатые фильтры
- Фильтры на плоских волноводах

109316, Москва, Волгоградский проспект, 42 +7 495 020 4000 / +7 495 95 777 45

**Таблица 3.** Модульные переключатели «прием-передача», реализованные на кремниевых рpn-диодах, с различными характеристиками приемного и передающего каналов

Компания, модель	Диапазон частот, ГГц	$P_n$ , Вт		$IL$ , дБ		Iso, дБ		$T_n$ , мкс
		Tx	Rx	Tx-Ант	Ант-Rx	Tx-Rx	Rx-Tx	
CPI, VDL 1584	0,225-0,400	200	2	0,5	1,0	75	50	20
Comtech PST, M21-043	0,42-0,45	80	5	0,50	0,60	50	40	1
Comtech PST, UH20-443	0,5-1,0	1300	-	0,35	0,65	60	30	40
Comtech PST, H21-102	0,1-1,0	100	2	0,70	0,70	50	20	7
CPI, -	L-band	200	20	0,5	1,0	50	-	20
CPI, -	C-band	100	20	0,5	1,2	30	-	20
CPI, -	X-band	50	10	0,5	1,5	30	-	20
CPI, -	Ku-band	20	10	0,5	2,0	30	-	20

Сигнал передатчика, поступающий на 1-й порт ГМ1, делится поровну между 3-м и 4-м портами ГМ1. При этом на входы первого и второго переключателей поступают сигналы с уменьшенной вдвое мощностью передатчика, сдвинутые между собой по фазе на 90°. Далее сигналы с выходов переключателей ПК1 и ПК2 проходят на 2-й и 1-й входы ГМ2 и складываются в фазе на 3-м порте ГМ2, являющемся антенным портом.

В режиме приема радиосигнал от антенны поступает на 3-й порт ГМ2 и делится поровну между 1-м и 2-м портами. Подключенные к портам 2 и 1 ГМ2 диоды открыты, поэтому сигналы в обоих каналах отражаются от них и поступают обратно в ГМ2, где суммируются в 4-м порту, являющемся входом приемника.

Использование Rx/Tx-переключателя с такой структурой дает следующие преимущества:

- применение двух параллельно включенных переключателей обеспечивает удвоение максимально допустимой коммутируемой мощности;
- максимально допустимая мощность каждого из переключателей определяется мощностями используемых ГМ и МПЛ, а также мощностью, рассеиваемой на закрытых диодах;
- отсутствие в Rx/Tx-переключателе разделительных конденсаторов снижает вносимые потери в передающем режиме и делает их более экономичными;
- применение квадратурных ГМ позволяет согласовать импедансы портов, подключенных к передатчику и антенне таким образом, что их КСВ остается близким к 1 во всей полосе рабочих частот.

Последнее преимущество можно объяснить следующим образом. Радиосигнал с выхода передатчика поступает с 3-го порта ГМ1 на ПК1, а с 4-го порта на ПК2. КСВ этих двух переключателей могут существенно отличаться от 1, вследствие чего часть мощности от этих переключателей возвращается обратно на 3-й и 4-й порты ГМ1 и суммируется в порте 2, подключенном к эквиваленту нагрузки ЭН. Благодаря этому свойству входное сопротивление Rx/Tx-переключателя близко к номинальному (обычно 50 Ом) значению, а КСВ к 1. Отличие входного сопротивления и КСВ от номинальных значений обусловлено лишь разбросом параметров используемых в схеме компонентов, включая гибридные мосты.

Конструктивно антенный переключатель собран на печатной плате (рис. 12) с использованием материала RO4350 (компания Rogers). Высокая надежность переключателя обеспечивается его низкой рабочей температурой, которая даже в режиме передачи не превышает 55 °С (рис. 13). Работой Rx/Tx-переключателя управляет драйвер, обеспечивающий запирающее напряжение +100 В в режиме передачи и -4 В в режиме приема.

Большинство производителей модульных приемопередающих переключателей не приводят в data sheets принципиальных схем выпускаемых ими изделий. Тем не менее, наличие в data sheets табличных данных, свидетельствующих о различии характеристик приемного и передающего каналов (табл. 3), дают основание полагать, что эти изделия реализованы по асимметричным схемам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Gharibdoust K., Mousavi N., Kalantari M. et al.** A Fully Integrated 0.18- $\mu\text{m}$  CMOS Transceiver Chip for X-band Phased-Array Systems // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2012, V. 60. No. 7. PP. 2192–2202.
2. **Zhang J., Zhang S., Ying Z. et al.** Radiation-Pattern Reconfigurable Phased Array With p-i-n Diodes Controlled for 5G Mobile Terminals // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2020. V. 68. No. 3. PP. 1103–1117.
3. **Геворкян В., Кочемасов В.** Ферритовые переключатели // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 6. С. 90–94, № 9. С. 122–131.
4. **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.
5. **Кочемасов В. Н., Майстренко А. П.** СВЧ-переключатели на основе МЭМС. СВЧ-электроника. 2016. № 1. С. 36–42.
6. **Кочемасов В., Кирпиченков А.** Твердотельные СВЧ-переключатели // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 10. С. 92–97, 2018. № 1. С. 116–124, № 2. С. 150–163.
7. **Кочемасов В., Рауткин Ю.** Интегральные СВЧ-переключатели // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2018. № 4. С. 122–127, № 5. С. 152–163, № 6. С. 80–93.
8. **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.
9. **Кочемасов В., Сафин А., Дингес С.** Твердотельные СВЧ-переключатели с высокой скоростью коммутации // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 10. С. 70–82, 2021. № 1. С. 98–108, № 3. С. 108–122, № 4. С. 104–115.
10. **Mandeep J. S., Lim C. C.** Design A SPDT Switch for WiMAX // Microwaves & RF. December 2010. PP. 68–74.
11. **Tenenholtz R.** A 2000 watt CW MIC 20–500 MHz SPDT PIN Diode Switch Module. 1981. IEEE, 0149-645X/81/0000-0252. PP. 252–254.
12. **Fei L. F.** A T/R Diversity RF Switch Design Using PIN Diodes // Applied Microwave & Wireless. October 2000. PP. 52–60.
13. **Rodriguez-Morales F., Gogineni S., Ahmed F. et al.** T/R Switches and Modules for Ice Sounding / Imaging Radar // Microwave J., Aerospace & Defense Electronics Supplement. May 2018, pp. 6–18.
14. **Малорацкий Л. Г.** Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. М.: Советское радио, 1976.
15. **Захаров А. Е., Кочемасов В. Н., Черкашин А. А.** Антенный переключатель // СВЧ-электроника. 2020. № 4. С. 40–43.

АО «Микроволновые системы» проведет 10-11 ноября 2022 года  
II-й семинар-совещание специалистов на тему:

**«Актуальные вопросы разработки и применения СВЧ компонентов и приборов на основе технологии нитрида галлия»**

В рамках II-го семинара-совещания предполагается заслушать и обсудить доклады и сообщения по следующим направлениям:

1. **Современные технологии изготовления СВЧ транзисторов и МИС на нитриде галлия, конструкции и параметры приборов;**
2. **Схемы, конструкции и характеристики СВЧ устройств на основе нитрид-галлиевых приборов;**
3. **Методы расчета и конструирования СВЧ усилителей мощности на нитриде галлия, обеспечение теплового режима, надежности и стабильности их параметров;**
4. **Возможности и особенности применения СВЧ усилителей на нитриде галлия в системах связи, радиолокации, радиопротиводействия.**

**Приглашаем главных конструкторов и ведущих технических специалистов  
Вашего предприятия принять участие в семинаре-совещании.**

Для включения в программу докладов (до 15 минут) или сообщений (до 5 минут) Ваших специалистов необходимо в срок **до 1 августа 2022 года** направить тезисы в объеме одной страницы А4 по электронной почте [vm@mwsystems.ru](mailto:vm@mwsystems.ru) на имя заместителя генерального директора АО «Микроволновые системы» по развитию электронной компонентной базы Миннебаева Вадима Минхатовича.

Программа семинара-совещания будет направлена Вам до 15 сентября 2022 года.

**Участие в семинаре-совещании бесплатное.**

**Место проведения – г. Москва, гостиничный комплекс «Измайлово», корпус «Гамма-Дельта».**

Заявки на участие от предприятий будут приниматься **до 15 октября 2022 года**. Количество участников от одного предприятия зависит от количества включенных в программу докладов от предприятия и может быть ограничено организаторами.



+7 (499) 644-21-03  
[raikovich@mwsystems.ru](mailto:raikovich@mwsystems.ru)