

Антенные переключатели

Часть 1

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

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.

Антенные 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

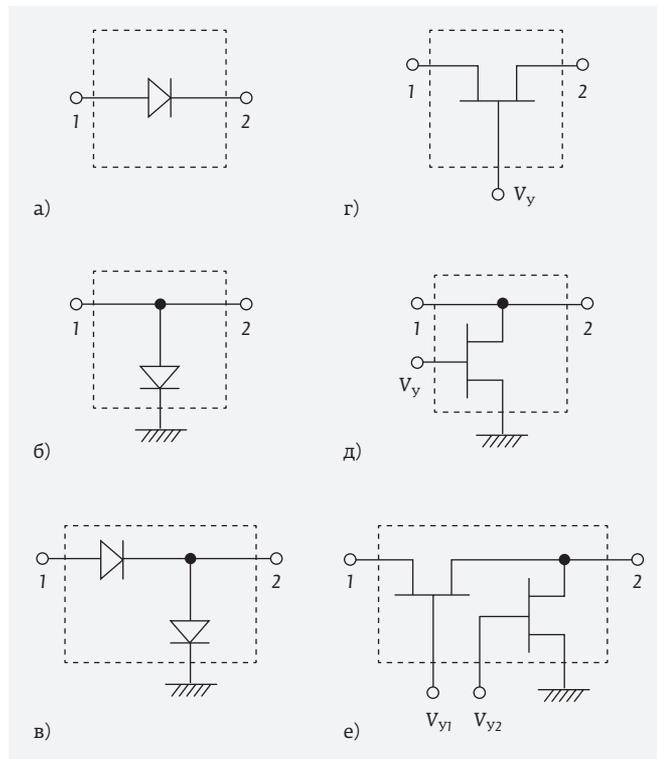


Рис. 1. Базовые структуры переключателей на рpn-диодах (а, б, в) и полевых транзисторах (г, д, е): а, г – последовательная; б, д – параллельная; в, е – последовательно-параллельная. V_y – управляющее напряжение

¹ ООО «Радиокомп», генеральный директор, vkochemasov@radiocomp.ru.

² НИУ «МЭИ», заведующий кафедрой формирования и обработки радиосигналов, arsaфин@gmail.com.

³ МТУСИ, доцент кафедры радиооборудования и схемотехники.

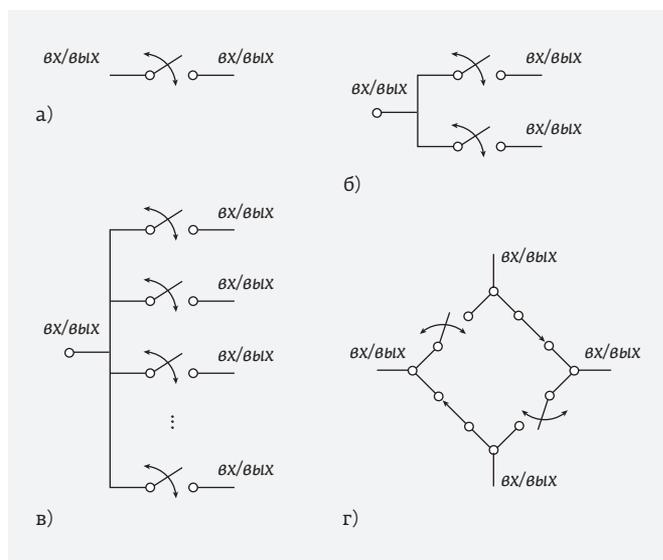


Рис. 2. Типы переключателей: а – SPST; б – SPDT; в – SPMT; г – DPDT

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.

PIN-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 ($P_{и}$) в отдельных изделиях может доходить до 5 кВт (см. табл. 2). Так, широкую линейку мощных pin-диодных переключателей PIN1001, PIN1002, ..., PIN1014 с допустимой импульсной

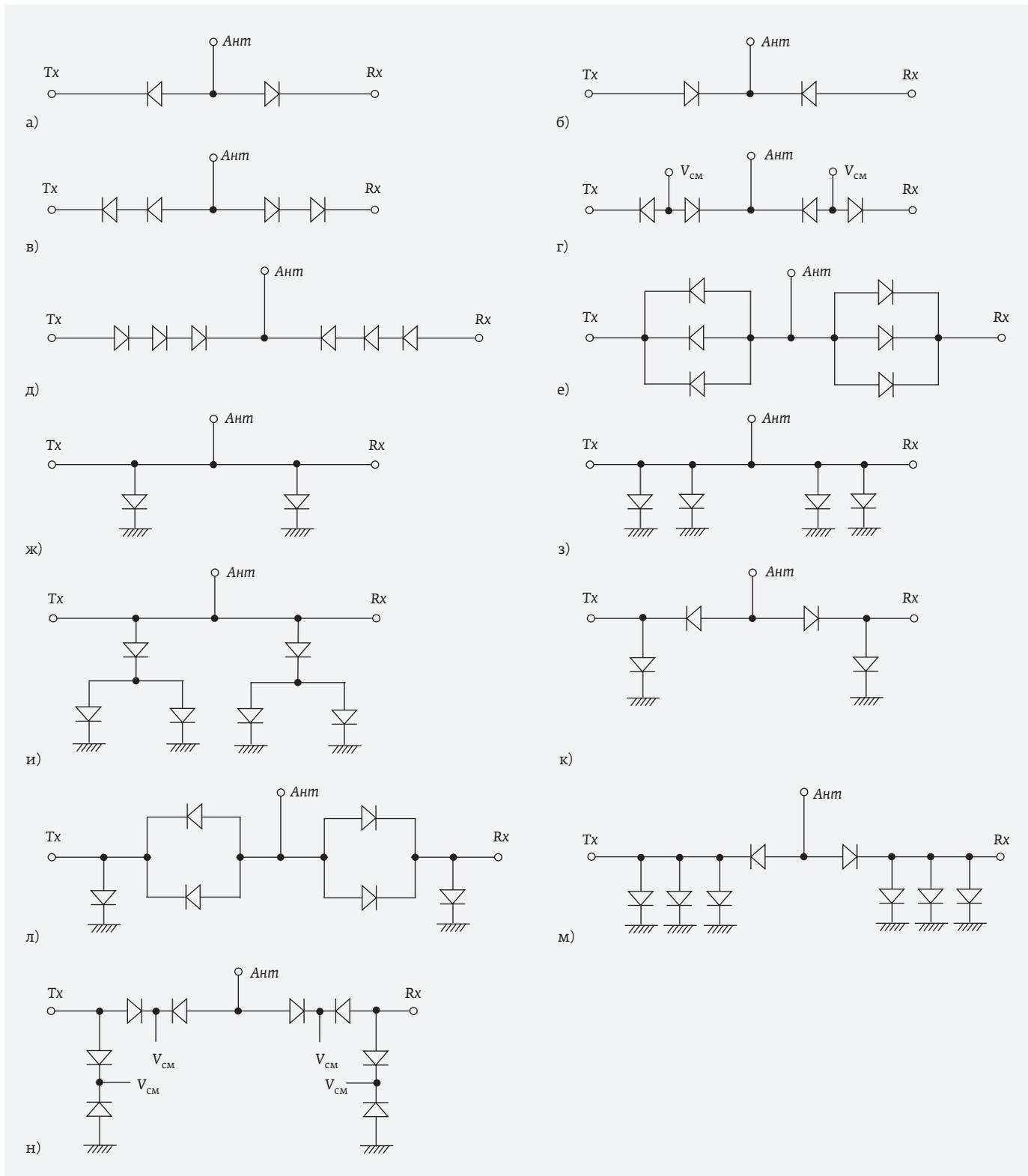


Рис. 3. Примеры реализации симметричных Rx/Tx-переключателей на кремниевых рin-диодах:

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

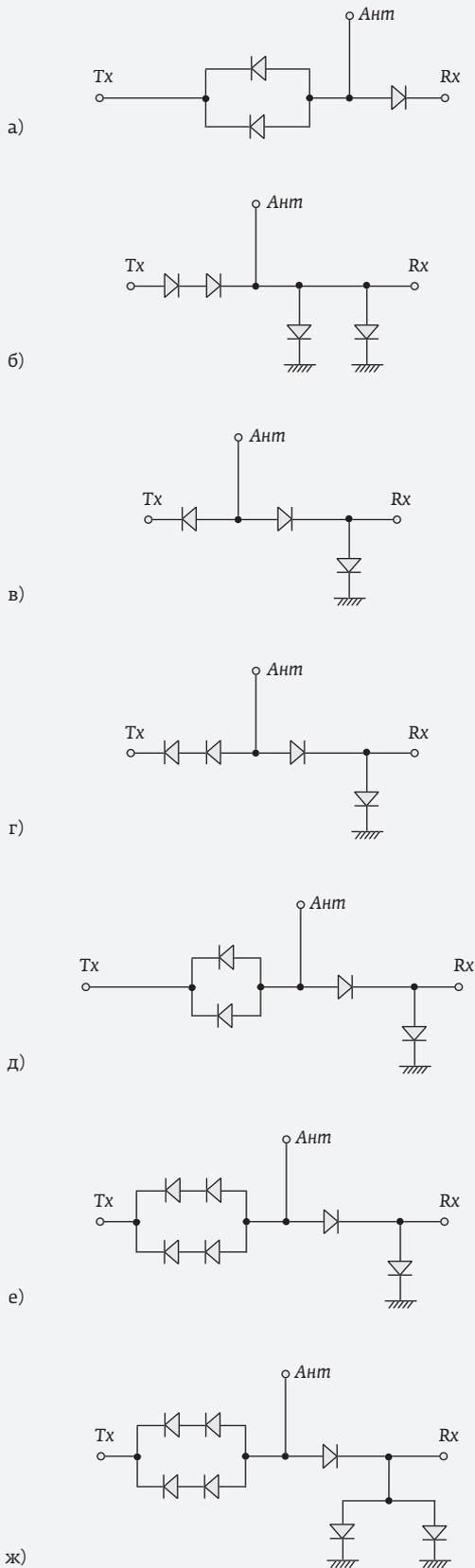


Рис. 4. Примеры реализации асимметричных Rx/Tx-переключателей на кремниевых pin-диодах:

- 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,

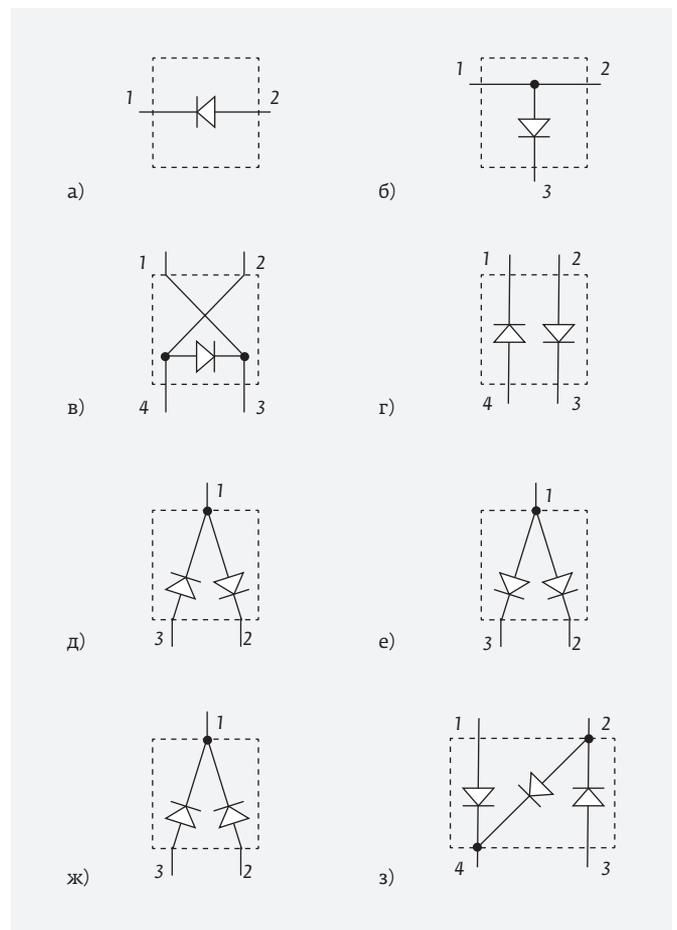
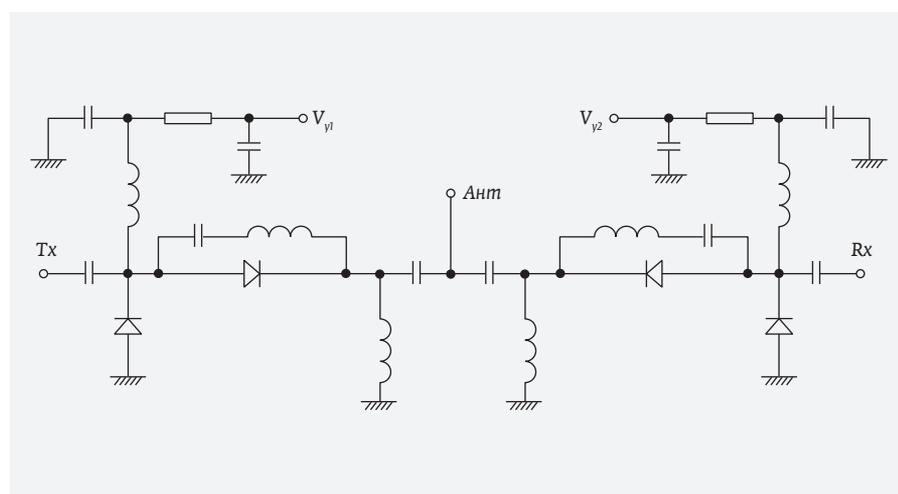


Рис. 5. pin-диодные сборки компаний Infineon (а, в, г, д, е, ж, з); Aeroflex Metelics, MACOM (а, б, д, е); Skyworks Solutions (а, б, д): а – последовательная; б, в – параллельная; г – антипараллельная пара; д – последовательная пара; е – общий анод; ж – общий катод; з – PI-элемент

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

| Компания, модель | Тип сборки | Диапазон частот, ГГц | $P_{вх}$, Вт | $V_{бр}$, В | I_L , дБ | I_{so} , 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
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»

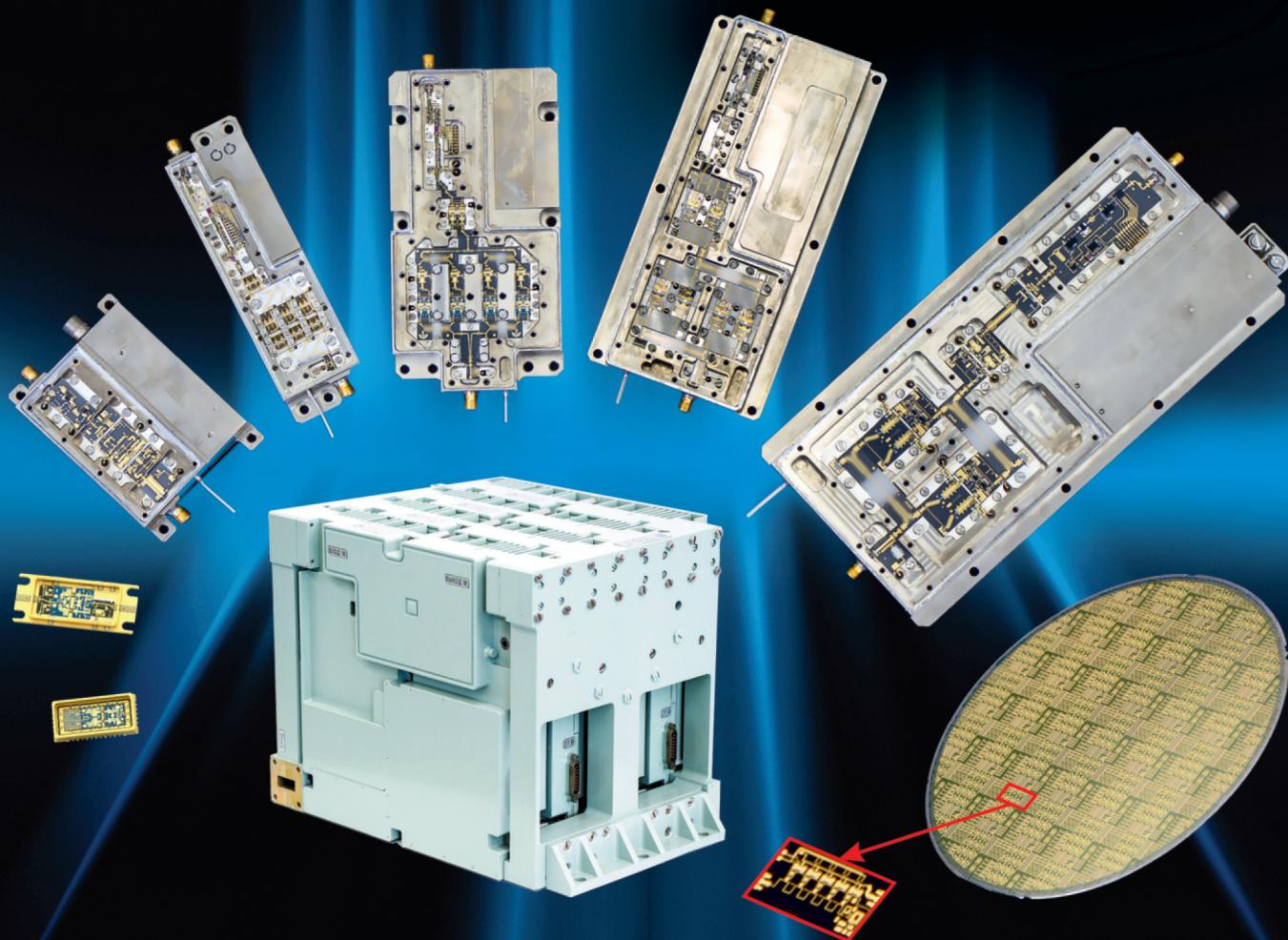


Таблица 2. Характеристики Rx/Tx-переключателей на кремниевых pin-диодах в модульном исполнении

| Компания, модель | Диапазон частот, ГГц | P_n^* , Вт | P_n , 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-6G18G-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 $I_{iso}(Tx - Rx) = 90$ 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 $V_{br} = 1800$ В, сопротивление включения $R_{on} = 0,2$ Ом, предельную частоту $F_{np} = 250$ 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),

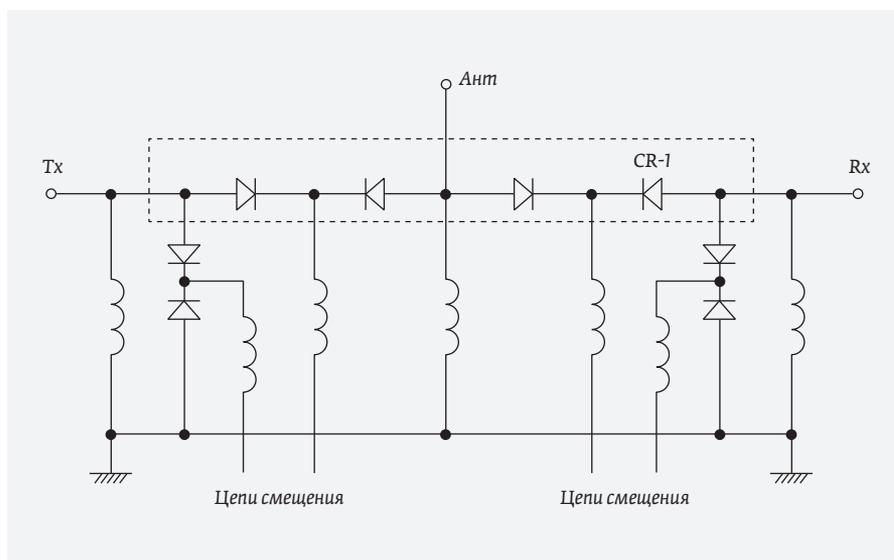


Рис. 7. Упрощенная принципиальная схема сверхмощного SPDT-переключателя на кремниевых pin-диодах

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,

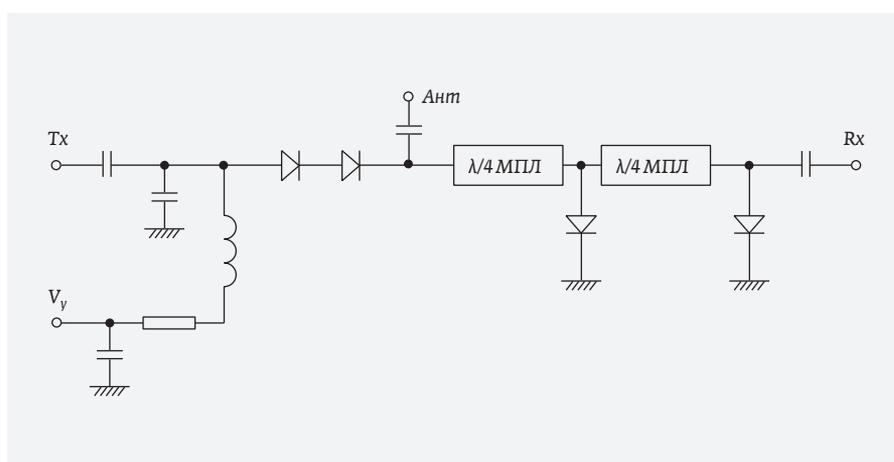


Рис. 8. Асимметричный Rx/Tx-переключатель с двумя последовательными диодами в передающем канале и двумя параллельными диодами в приемном канале

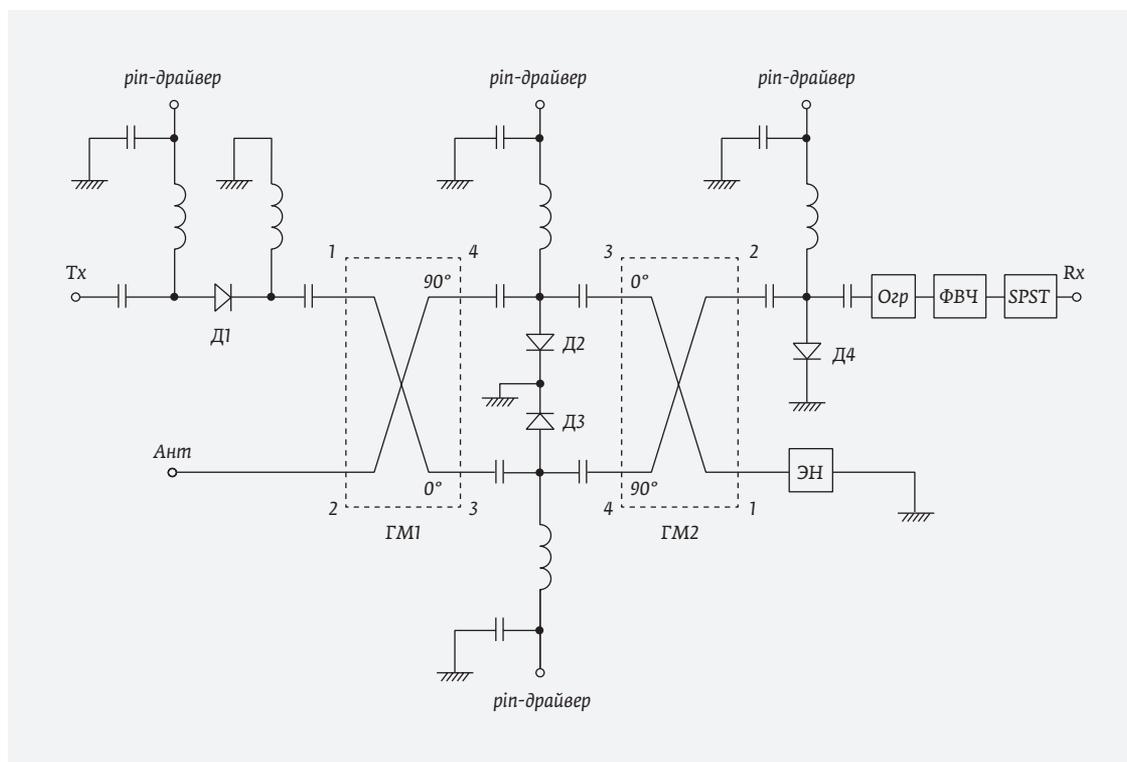


Рис. 9. Принципиальная схема мощного Rx/Tx-переключателя на кремниевых рип-диодах с встречным включением гибридных мостов. ЭН – эквивалент нагрузки

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

Проведенные измерения Rx/Tx-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.

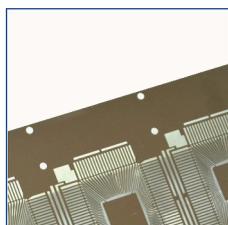
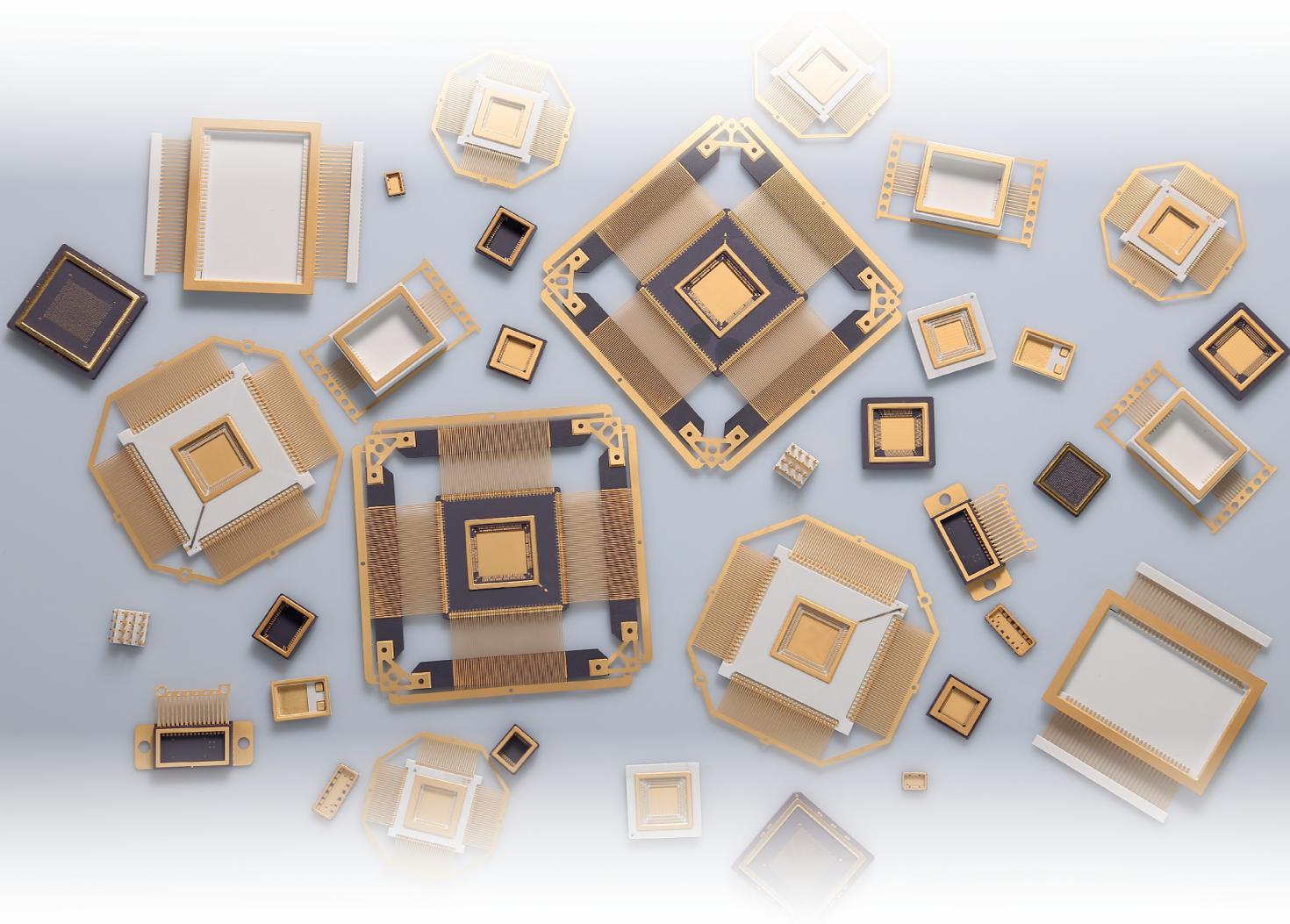
Определенных преимуществ при разработке Rx/Tx-переключателей можно добиться, применив в них четырехпортовые гибридные мосты (ГМ), в которых мощность входного сигнала делится между двумя его выходными портами пополам. При этом фазовый сдвиг между поделенными сигналами составляет 90°. Мосты могут включаться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

Вариант построения Rx/Tx-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 QN8100, а для второго – модель QN8840. В передающем канале этого асимметричного Rx/Tx-переключателя (см. рис. 9) в качестве последовательного диода использовалась сборка MEST2G-150-20, а в приемном – три шунтирующих диода Д2 – Д4, каждый из которых

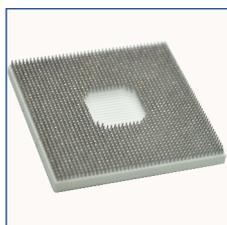
был выполнен на сборке MSWSH-100-30. Последовательная сборка была рассчитана на входную мощность 150 Вт, а шунтирующие сборки – на 300 Вт. Смещение на каждую из этихборок обеспечивалось от драйверов через дроссели.

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 Д1, разделяется поровну между портами 3 и 4 с нулевым и 90°-ным фазовыми сдвигами соответственно. Далее сигналы поступают на диоды Д3 и Д2, которые являются отражателями. 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.

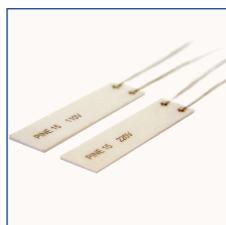
В приемном режиме все диоды закрыты. При этом сигнал от антенны разделяется поровну между портами 3 и 4 ГМ1, поступает далее на 4-й и 3-й порты ГМ2 и после суммирования на втором порте ГМ2 проходит на вход приемника. В этом режиме диод Д1 обеспечивает дополнительную развязку между передатчиком и приемником. 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



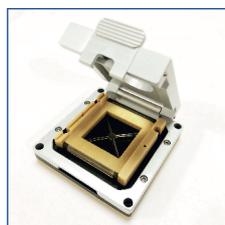
Выводные рамки



Металлокерамические
корпуса



Нагревательные
элементы



Контактные
устройства



Графитовая
оснастка



Оптоэлектронные
корпуса



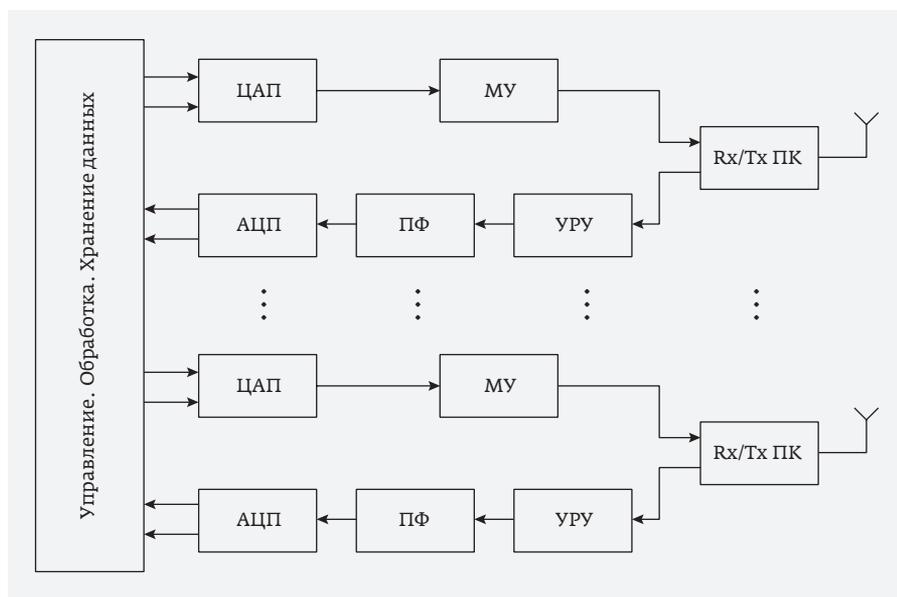


Рис. 10. Упрощенная структурная схема когерентного многоканального радиолокатора ледовой обстановки. МУ – мощный усилитель, ПК – переключатель, ПФ – полосовой фильтр, УРУ – усилитель с регулируемым усилением

передатчика, а фильтр ФВЧ – от видеискажений, возникающих при коммутации диодов. Проведенное исследование изготовленных Rx/Tx-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 Rx/Tx-переключателях, изготовленных для диапазона частот 150–600 МГц. Приемопередающие модули с входящими в них Rx/Tx-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].

Rx/Tx-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 $\lambda/4$ МПЛЗ и $\lambda/4$ МПЛ4. Первый переключатель реализован на диодах Д1, Д3 и микрополосковых линиях МПЛ1, $\lambda/4$ МПЛЗ,

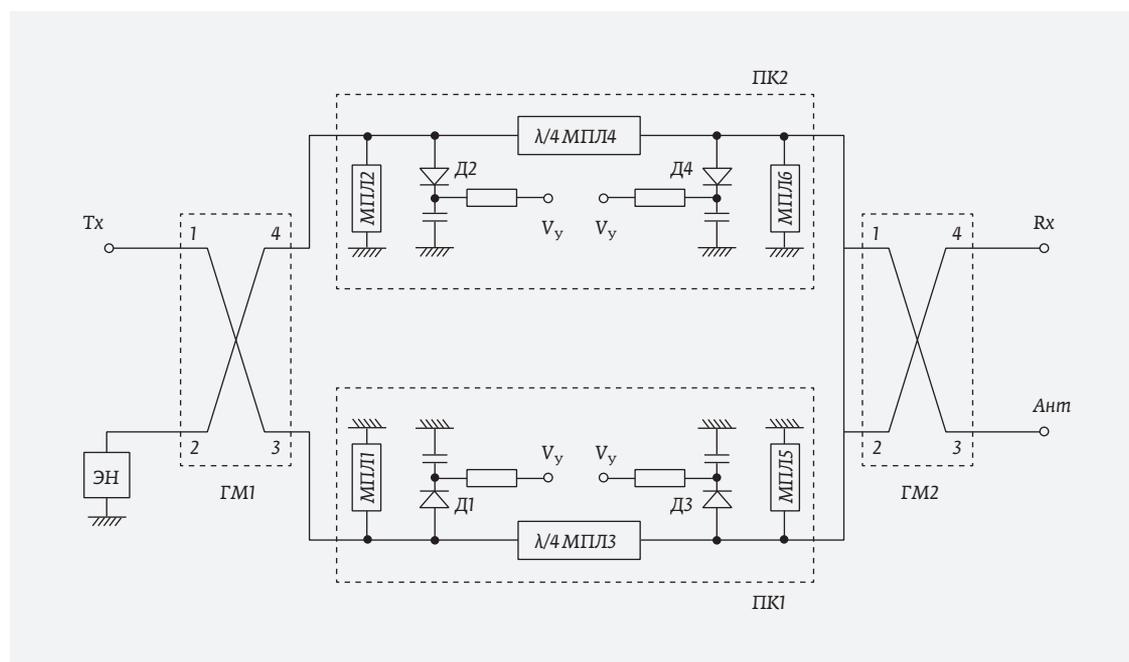


Рис. 11. Принципиальная схема мощного Rx/Tx-переключателя на кремниевых рpn-диодах с последовательно включенными гибридными мостами

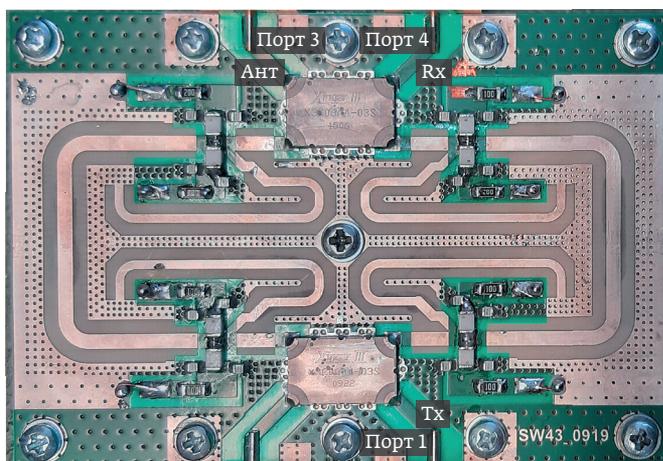


Рис. 12. Печатная плата антенного переключателя, выполненный по схеме рис. 11

МПЛ5. Второй выполнен на диодах Д2, Д4 и микрополосковых линиях МПЛ2, $\lambda/4$ МПЛ4, МПЛ6. Реально каждый из этих четырех диодов Д1–Д4 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

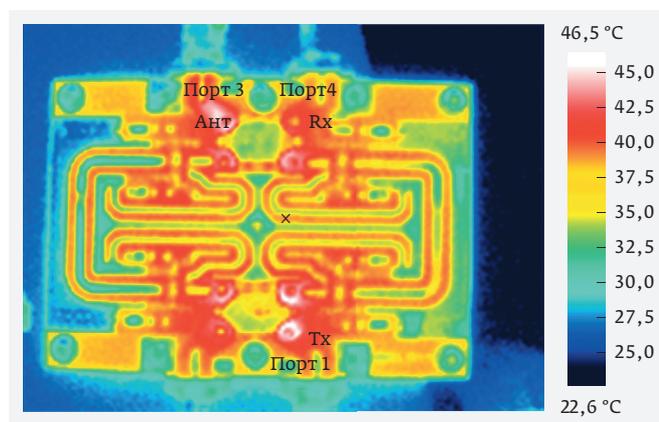


Рис. 13. Инфракрасное изображение распределения температуры на верхней поверхности антенного переключателя в режиме передачи

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 рп-диоды поступает высокое положительное напряжение (+100 В), обеспечивающее их надежное закрытие и низкий уровень гармоник.

Филлин
Filter Innovations

www.filin-rf.ru
www.radiocomp.ru
filin-rf@radiocomp.ru

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
- Трубчатые 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 | | L , дБ | | I_{so} , 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- μm 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 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
rakovich@mwsystems.ru