

СВЧ-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ МЭМС

С ростом рабочих частот и мощностей сигналов использование таких традиционных переключательных СВЧ-компонентов, как PIN-диоды и полевые транзисторы, становится проблематичным. Альтернативным решением проблемы может быть применение МЭМС-переключателей.

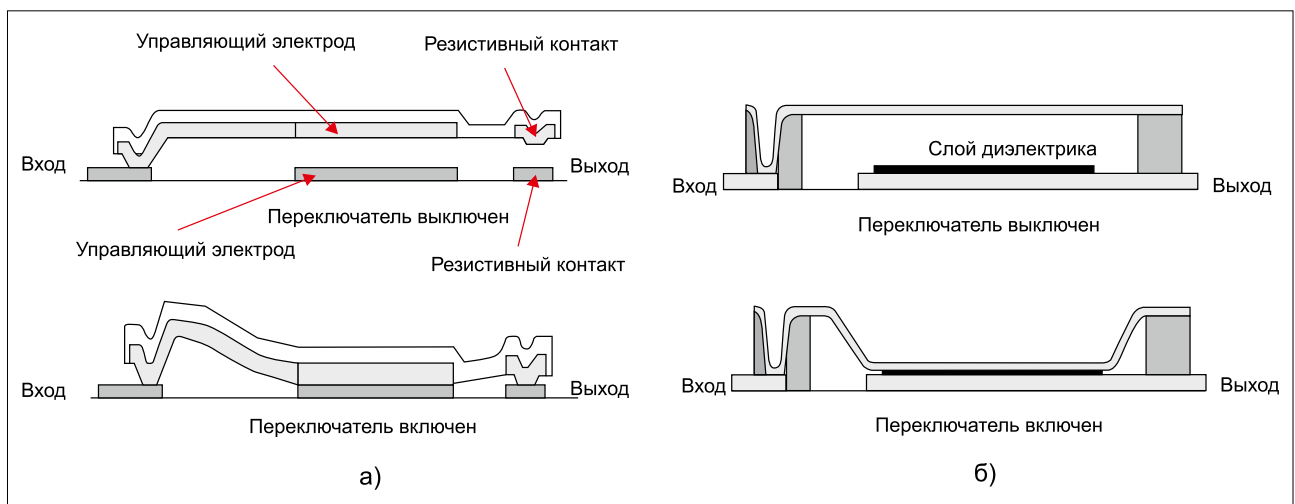
За прошедшие годы их технологии были значительно усовершенствованы, и теперь они представляют собой достаточно надежные компоненты, перспективные не только для коммерческих, но и для ответственных применений.

Работающие в сфере СВЧ-электроники инженеры всегда нуждались в переключателях, вносящих низкие потери в открытом состоянии и обеспечивающих высокую изоляцию в закрытом состоянии, с высокой допустимой мощностью сигнала и низкой мощностью управления. Первыми переключателями, наиболее полно отвечающими поставленным требованиям, стали электромагнитные реле. После долгих лет совершенствования современные высокочастотные реле обеспечивают низкие потери сигнала во включенном и высокую изоляцию в выключенном состоянии, но им присущи такие недостатки, как большие габариты, высокая стоимость и ограниченный ресурс (от сотен тысяч до десятков миллионов циклов).

Переключатели на PIN-диодах и полевых транзисторах (ПТ) на основе GaAs имеют перед высокочастотными реле

ряд преимуществ, заключающихся в высокой скорости срабатывания, малых габаритах и весе, а также низкой мощности управления. Но они вносят в тракт более высокие потери и потому в ряде приложений не могут заменить электромеханические переключатели. Дальнейшие поиски привели к разработке высокочастотных переключателей на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС), объединивших некоторые достоинства полупроводниковых и релейных устройств.

МЭМС появились в 1970-е годы как датчики давления, температуры, акселерометры, газовые хроматографы и другие аналогичные приборы. МЭМС изготавливаются методом локального вытравливания подложки (чаще всего кремниевой) и нанесением на образованные конструкции проводящих и диэлектрических материалов. Современные



▲ Рис. 1. МЭМС-переключатели: а) кантилевер с резистивным контактом; б) мембрана с емкостным контактом

технологии позволяют формировать на подложке не только достаточно сложные механические конструкции размером в единицы или десятки микрон, но и такие электромеханические компоненты, как резонаторы, фильтры, многопозиционные переключатели, управляемые конденсаторы и катушки индуктивности, и это далеко не полный перечень. Первые сообщения о МЭМС-переключателях, разработанных специально для СВЧ-приложений, относятся к началу 1990-х годов.

Подвижная часть МЭМС-переключателя — актюатор — выполняется или в виде закрепленного с одной стороны кантилевера (от англ. cantilever — «кронштейн», «консоль») (рис. 1а), или закрепленной по краям мембраны (рис. 1б). Привод актюатора может быть электростатическим (емкостным), пьезоэлектрическим, электромагнитным или термоэлектрическим. Чаще всего используется электростатический привод.

В случае электростатического привода на актюаторе и подложке располагаются электроды, на которые подается управляющее напряжение. Под его действием актюатор притягивается к подложке, что вызывает срабатывание переключателя. На актюатор с пьезоэлектрическим приводом наносятся управляющие электроды, разделенные слоем пьезоэлектрика. Подача на них управляющего напряжения вызывает изгиб актюатора и срабатывание переключателя. Оба этих привода потребляют небольшую электрическую мощность только в момент срабатывания и ничего не потребляют в стационарном режиме.

Достоинство пьезоэлектрического привода заключается в том, что реверсом управляющего напряжения можно разомкнуть «залипшие» (подвергшиеся микросварке при переключении мощного сигнала) контакты МЭМС-переключателя, а недостаток — в том, что на актюатор надо наносить дополнительное покрытие, что усложняет технологический цикл и требует дополнительного оборудования.

В МЭМС-переключателях с электромагнитным приводом актюатор перемещается за счет магнитного поля, возникающего при протекании тока через управляющий элемент переключателя. Часто таким элементом является нанесенная на подложку планарная катушка индуктивности. Термоэлектрические приводы МЭМС-переключателей используют или просто тепловое расширение актюатора при прохождении управляющего электрического тока, или различие коэффициентов теплового расширения входящих в актюатор материалов. Эти типы приводов могут создавать значительные механические усилия на контактах МЭМС-переключателя, что позволяет переключать сигналы более высокой мощности, но имеют большое время срабатывания и потребляют энергию во включенном состоянии. Электромагнитный и термоэлектрический приводы не получили такого широкого распространения, как электростатический и пьезоэлектрический.

Контакты МЭМС-переключателей бывают двух видов: резистивные «металл–металл» (рис. 1а) и емкостные «металл–диэлектрик–металл» (рис. 1б). Резистивные контакты характеризуются сопротивлением в открытом состоянии $R_{\text{вкл}}$, которое обычно составляет доли ома, и емкостью в закрытом состоянии $C_{\text{выкл}}$, типовое значение которой — единицы фемтофарад. Переключатель с емкостными контактами представляет собой дискретно перестраиваемый конденсатор, причем отношение емкостей во включенном и выключенном состоянии $C_{\text{вкл}}/C_{\text{выкл}}$ может достигать 100 [1]. Эти переключатели имеют очень малые потери на высоких частотах (0,1 дБ на 40 ГГц) и высокую линейность (более 66 дБм). Их управляющее напряжение может быть снижено, поскольку нет необходимости в большом прижимном усилии актюатора для обеспечения низкого сопротивления

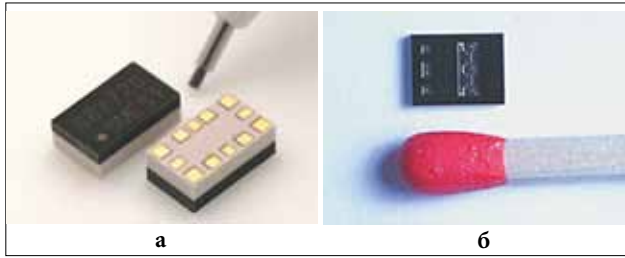
контакта. Контактные поверхности должны быть гладкими, т. к. возможные зазоры между ними значительно снижают отношение емкостей $C_{\text{вкл}}/C_{\text{выкл}}$.

К достоинствам МЭМС-переключателей относятся:

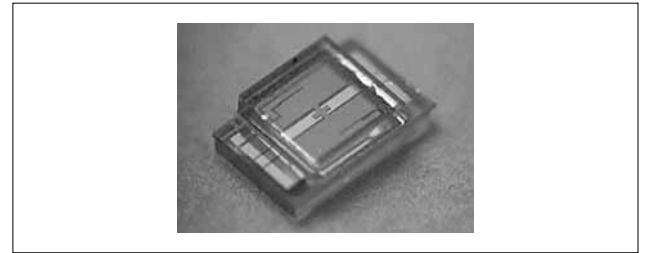
- Очень высокий показатель качества FoM (Figure of Merit). Он рассчитывается по формуле $\text{FoM} = 1/2\pi R_{\text{вкл}} C_{\text{выкл}}$, где $R_{\text{вкл}}$ — сопротивление замкнутых контактов, а $C_{\text{выкл}}$ — емкость разомкнутых. Он соответствует частоте, на которой реактивное сопротивление емкости разомкнутых контактов становится равным активному сопротивлению замкнутых и переключатель перестает управлять уровнем сигнала. Для МЭМС-переключателей FoM составляет 10–20 ТГц, в то время как для полупроводниковых — 250–500 ГГц.
 - Очень высокая линейность. Типичный уровень IP_3 для контакта «металл–металл» у МЭМС-переключателей более 75 дБм, а IP_2 более 120 дБм. Уровень второй и третьей гармоник при мощности сигнала 20 дБм обычно — 90 дБн. Уровень интермодуляционных продуктов МЭМС-переключателей примерно на 30 дБ ниже, чем у PIN-диодов или ПТ.
 - Очень малое энергопотребление. МЭМС-переключатели с электростатическим или пьезоэлектрическим приводами потребляют энергию 10–100 нДж при срабатывании и ничего не потребляют в стационарном режиме.
 - МЭМС-переключатели могут формироваться на различных подложках, например на кварцевых или стеклянных — для обеспечения ультранизких емкостей, на кремниевых — для сопряжения с микросхемами, на подложках из GaAs или GaN — для сопряжения с СВЧ-транзисторами.
 - Высокая радиационная стойкость.
 - Низкая стоимость при условии массового производства.
- Вместе с тем МЭМС-переключатели имеют ряд недостатков:
- Высокое напряжение управления, составляющее иногда десятки вольт. Такое напряжение не проблема для стационарной аппаратуры, но для мобильной может потребоваться DC/DC-преобразователь, потребляющий 50–200 мкВт.
 - По сравнению с полупроводниковыми переключателями, у них относительно большое время срабатывания, обычно до 100 нс. Чем ниже управляющее напряжение, тем больше время срабатывания.
 - Ограниченный ресурс. МЭМС-переключатели выдерживают до 100 млрд циклов переключения, но ограничение принципиально остается, поскольку в них есть движущиеся механические детали. Нет данных о долгосрочной (в течение нескольких лет) надежности МЭМС.

Таблица 1. Основные параметры различных электронных переключателей

Параметр	МЭМС	PIN-диод	ПТ
Статическое напряжение управления, В	5–80	3–5	3–5
Статический ток управления, мА	0	3–20	0
Динамическая мощность управления, мВт	0,05–0,1	5–100	0,05–0,1
Время переключения, нс	1000–300 000	1–100	1–100
Емкость, фФ	1–6	40–80	70–140
Сопротивление, Ом	0,3–2	2–4	4–6
Отношение емкостей вкл./выкл.	20–100	10	—
Предельная частота, ТГц	20–80	1–4	0,5–2
Изоляция на частоте 1–10 ГГц	Очень высокая	Высокая	Средняя
Изоляция на частоте 10–40 ГГц	Очень высокая	Средняя	Низкая
Изоляция на частоте 60–100 ГГц	Высокая	Средняя	Плохая



▲ **Рис. 2.** Корпусированные МЭМС-переключатели: а) 2SMES-01 с электростатическим приводом фирмы Omgon; б) с пьезоэлектрическим приводом фирмы Advantest



▲ **Рис. 3.** МЭМС-переключатель фирмы Omgon, герметизированный стеклянной пластиной

- Необходимость герметизации. МЭМС-переключатели должны быть загерметизированы в атмосфере инертного газа. Герметизация технологически сложна, она существенно влияет на надежность и стоимость переключателя.

Сравнение основных технических параметров МЭМС-переключателей с параметрами полупроводниковых переключателей на PIN-диодах и ПТ приведено в табл. 1.

При кажущейся простоте устройства МЭМС-переключатель очень сложен в разработке и изготовлении. Пионерами работ по созданию МЭМС-переключателей стали такие фирмы, как Analog Devices, Radant MEMS, Teledyne Scientific, HRL, Motorola, IBM и Teravicta. Всего до 2010-х гг. в работе над МЭМС-переключателями приняли участие около 25 фирм и лабораторий со всего мира, но их попытки создать коммерческие МЭМС-переключатели оказались тщетными по ряду причин, в частности из-за того, что переключатели не были корпусированы. Первой успешной компанией оказалась японская Omgon, выпустившая в 2009 г. корпусированный переключатель 2SMES-01 (рис. 2а), на практике показавший высокие параметры. Второй стала в 2012 г. также японская компания Advantest, которая разработала МЭМС-переключатель с пьезоэлектрическим приводом и управляющим напряжением 12 В (рис. 2б) [2].

Однако довести свои проекты до коммерциализации удалось лишь немногим фирмам из-за ряда возникающих при разработке проблем:

- Механические напряжения в конструкции. Актуатор должен передавать на контакты усилие 100–1000 мкН, преодолевая как остаточные производственные, так и возникающие при эксплуатации переключателя в широком диапазоне температур механические напряжения элементов конструкции.
- Герметизация. Надежно работать может только правильно герметизированный МЭМС-переключатель. Герметизация проводится при относительно высоких температурах (+280...+500 °С) после чистки и заполнения объема переключателя азотом или аргоном. Переключатель должен выдерживать эти температуры без деформации или размягчения корпуса.
- Выбор материалов. Для контактов предпочтительны материалы с высоким коэффициентом жесткости, поскольку у них низкая адгезия. Но жесткие материалы требуют довольно большого усилия (более 400 мкН) для обеспечения низкого сопротивления контакта. Для контактов широко используется рутений и такие сплавы золота, как AuNi и AuCo. Чистое золото, обеспечивающее низкое сопротивление при малом усилии на контактах, практически не используется, т. к. оно слишком мягкое, имеет высокую адгезию и низкую температуру плавления.
- Неконтролируемые электростатические заряды. В конструкции актуатора диэлектрические материалы должны использоваться в минимальном объеме для снижения неконтролируемых электростатических сил.
- Эффект ползучести. Металлические актуаторы подвержены деформации из-за ползучести материала. При длительном

включении снижается жесткость пружины актуатора, в результате переключатель может отказаться.

- Обеспечение высокочастотных свойств. Подложка, корпус, контакты проектируются так, чтобы обеспечить минимальные потери СВЧ-сигнала и максимальную изоляцию, для этого необходимо компьютерное моделирование.

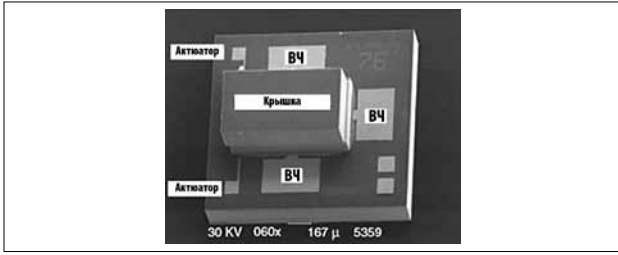
Для успешного завершения проекта МЭМС-переключателя от разработчиков требуется компетентность в таких областях знаний, как микроэлектронные технологии, теоретическая механика, физика, материаловедение и электродинамика. Но успешные проекты были реализованы, и информация о них может быть полезной.

В качестве примера можно привести уже упоминавшийся МЭМС-переключатель 2SMES-01 фирмы Omgon. Мембрана этого переключателя выполнялась по технологии «кремний на изоляторе» (SoI) и не имела характерной для металлов ползучести. Герметизация на уровне пластины проводилась при температуре +500 °С по технологии спекания стекла (рис. 3). Для формирования SPDT-переключателя в керамическом SMD-корпусе размещались два МЭМС-переключателя. На частоте 10 ГГц вносимые потери составляли менее 1 дБ, а изоляция — более 40 дБ.

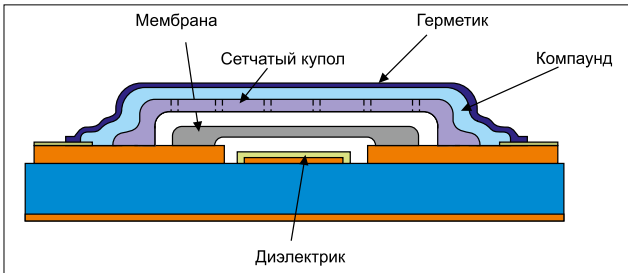
Ресурс переключателя проверялся в режиме «холодной» коммутации, когда сигнал во время переключения отсутствует, и в режиме «горячей» коммутации — без отключения сигнала во время срабатывания переключателя. В режиме «холодной» коммутации 2SMES-01 выдерживали 1 млрд циклов при уровне сигнала 10 мВт и 100 млн циклов при уровне сигнала до 5 Вт с сохранением сопротивления замкнутых контактов на уровне не более 1 Ом. В режиме «горячей» коммутации переключатели выдерживали 100 млн циклов при мощности сигнала до 300 мВт. Они выходили из строя после 50 млн циклов при мощности сигнала 500 мВт и после 5 млн циклов при мощности 1 Вт. Все испытания проводились на частоте сигнала 2 ГГц. Эти переключатели продемонстрировали также очень высокую линейность. Измеренные значения IP_3 и IP_2 составили более 72 и 120 дБм соответственно и ограничивались условиями испытаний. По результатам измерений вторая и третья гармоники были менее –100 дБн и –90 дБн соответственно при мощности сигнала 20 дБм на частоте 2 ГГц [2].

Однако переключатель оказался неустойчивым, возможно, из-за неудобств, связанных с относительно высоким напряжением управления, составлявшим 34 В.

Фирма Radant MEMS выпускает несколько моделей МЭМС-переключателей структуры SPST: RMSW200HP и RMSW201 для диапазона частот 0–40 ГГц и RMSW100HP для диапазона 0–12 ГГц. Переключатели изготавливаются на подложке из высокоомного кремния (рис. 4) и герметизируются спеканием стекла при температуре +500 °С. Они не имеют SMD-корпуса и предназначены для монтажа на плату разваркой микропроводников. Сопротивление замкнутых контактов составляет не более 1 Ом, емкость разомкнутых — около 20 фФ, управляющее напряжение 40–90 В. В «холодном» режиме переключатели выдерживают 100 млрд циклов при мощности сигнала 500 мВт. У RMSW200HP



▲ **Рис. 4.** МЭМС-переключатель фирмы Radant MEMS, герметизированный пластиной



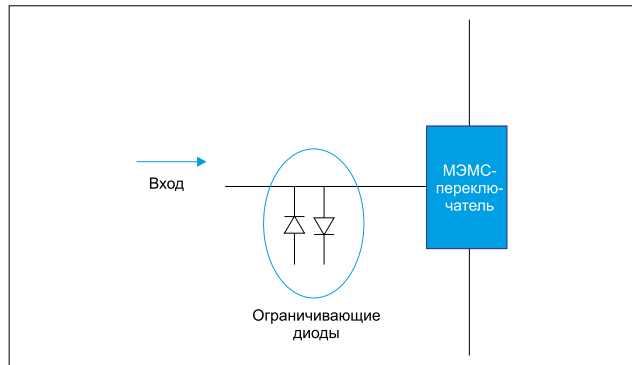
▲ **Рис. 5.** Герметизация МЭМС защитным куполом

вносимые потери составляют не более 0,2 дБ на частоте 2 ГГц и 0,5 дБ на частоте до 38 ГГц, изоляция не менее 20 дБ на частоте 10 ГГц и не менее 13 дБ на 40 ГГц. Переключатель RMSW201 имеет более высокую изоляцию: 23 дБ на 10 ГГц и 18 дБ на 36 ГГц. Предназначенный для более низких частот переключатель RMSW100HP вносит потери 0,15 дБ на 2 ГГц, 0,18 дБ на 4 ГГц и 0,24 дБ на 10 ГГц, он обеспечивает изоляцию 25 дБ на частоте 2 ГГц и 20 дБ на 10 ГГц [3]. Фирма отмечает высокую надежность своих МЭМС-переключателей: достигнут ресурс, превосходящий 1,5 трлн циклов.

Как видно из рассмотрения рис. 3 и 4, переключатели фирм Omron и Radant MEMS герметизируются наложением пластин одна на другую (wafer-to-wafer): сначала на несущей подложке изготавливается сам переключатель, а затем на него накладывается герметизирующая пластина. Позже была разработана технология герметизации на уровне пластины (wafer-level), заключающаяся в формировании над переключателем герметичного купола нанесением слоев металла или диэлектрика (рис. 5). Эта технология позволяет снизить габариты и стоимость МЭМС-переключателя, поскольку герметизация выпол-

Таблица 2. Требования к износостойкости и надежности электронных переключателей для АФАР

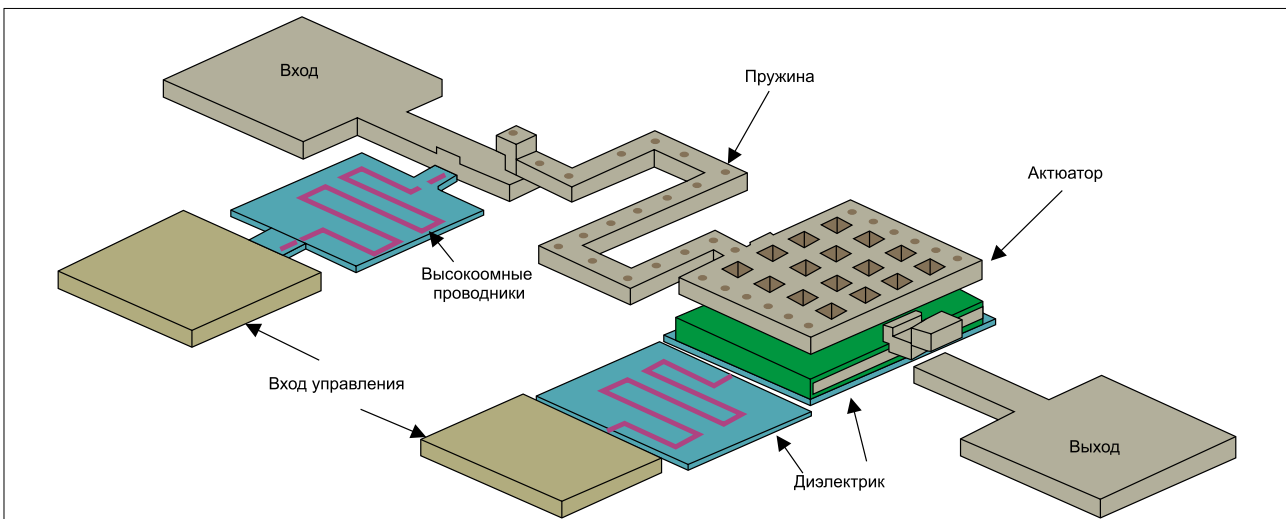
Область применения	Базирование	Число циклов переключения, млрд	Срок службы, лет
АФАР для коммуникационных систем	Наземное	1–10	2–10
	Космическое	10–100	2–10
	Авиационное	10–100	2–10
АФАР для радиолокационных систем	Наземное	10–100	5–10
	Космическое	10–100	5–10
	Ракетное	0,2–10	1–5
	Авиационное	1–100	5–10
	Автомобильное	1–10	5–10



▲ **Рис. 6.** Схема ограничения уровня сигнала в момент срабатывания МЭМС-переключателя

няется одновременно с его изготовлением и не требует дополнительной пластины. Сегодня эта технология успешно применяется рядом фирм, в частности RFMD и MEMtronics. Надежность МЭМС-переключателей этих фирм составляет 500–600 млн циклов при низком уровне сигнала.

Одной из проблем МЭМС-переключателей был и отчасти остается их ресурс, зависящий от переключаемой мощности. В начале 2000-х гг. ресурс МЭМС-переключателей составлял 10 млрд циклов при токе 2 мА, 1000 циклов при токе 20 мА и всего лишь 10 циклов при токе 300 мА [4]. Сегодня их надежность существенно повысилась, и они могут удовлетворять требованиям, необходимым для активных фазированных антенных решеток (АФАР) в различных областях применения (табл. 2). Ведущие производители этих компонентов гарантируют 100 млрд циклов в «холодном» режи-



▲ **Рис. 7.** Устройство МЭМС-переключателя с низким напряжением управления

ме и 1 млрд циклов при коммутируемом токе 500 мА [3]. В МЭМС-переключателях с емкостными контактами не возникает микросварки при срабатывании, и это обеспечивает их более высокую, по сравнению с резистивными, износостойкость и стабильность параметров в течение длительного срока эксплуатации. Они могут выдерживать миллиард циклов срабатывания в «горячем» режиме коммутации при мощности сигнала 5 Вт [5]. Агентство по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам Министерства обороны США (Defense Advanced Research Project Agency, DARPA) проводит программу по созданию МЭМС-переключателей с ресурсом триллион (10^{12}) циклов [6]. Тем не менее долгосрочная надежность МЭМС-переключателей все еще остается препятствием для их коммерциализации, особенно в системах с «горячим» переключением в мощных приложениях [7, 8].

Надежность МЭМС-переключателей существенно зависит от мощности коммутируемого сигнала. При коммутации в «холодном» режиме ресурс МЭМС-переключателя соответствует заявленному производителем. Но при «горячей» коммутации ресурс МЭМС-переключателя существенно сокращается из-за микросварки контактов в момент их неплотного соединения. В результате микросварки контакты «слипаются» и переключатель не может их разомкнуть. Для управления уровнем сигнала можно использовать схему ограничения на двух диодах (рис. 6). В момент срабатывания МЭМС-переключателя на диоды подается нулевое напряжение, в этом случае они ограничивают сигнал на уровне $\pm 0,5$ В. В остальное время для предотвращения ограничения сигнала диоды надо запереть напряжениями, превосходящими его максимальное и минимальное значения.

Существенным препятствием для интеграции МЭМС-переключателей с низковольтной электроникой является высокое напряжение управления. Его снижение особенно актуально для мобильных устройств, поскольку высоковольтный DC/DC-преобразователь не только занимает площадь на плате, но и снижает энергетический ресурс источника питания.

Для МЭМС-переключателей с электростатическим приводом снижение управляющего напряжения достигается увеличением площади электродов и снижением упругости актюатора. В канадском университете University of Windsor создан МЭМС-переключатель с рекордно низким напряжением управления: напряжение срабатывания составляет 0,5 В, а отпущения — 0,3 В [9]. Этот переключатель может интегрироваться с логическими КМОП-схемами с напряжением питания 1 В. Для снижения упругости золотой актюатор толщиной 2 мкм формируется в виде спиральной пружины длиной 700 мкм и шириной 30 мкм (рис. 7). В пластине актюатора размером 190×220 мкм создано множество отверстий, они позволяют уменьшить сопротивление газа при движении актюатора и тем самым уве-

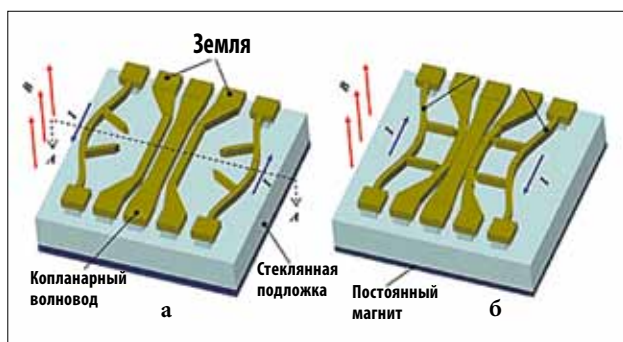
личить быстродействие переключателя. Зазор между актюатором и выходной линией уменьшен до 1,5 мкм. На частотах до 3 ГГц переключатель обеспечивает изоляцию 27 дБ и вносит потери 0,1 дБ. Полные размеры переключателя составляют 1264×635 мкм, о его герметизации сведения не приводятся. Платой за рекордно низкое управляющее напряжение стало низкое быстродействие, составляющее 0,5 мс, и ресурс, ограниченный на уровне всего лишь 10 000 циклов.

Специалисты университета Louisiana State University (США) предложили концепцию бистабильного электромагнитного МЭМС-переключателя мощных сигналов с низким напряжением управления [10]. Его устройство представляет собой копланарный волновод, но земляные линии не жестко закреплены на стеклянной подложке, а «подвешены» над ней и могут изгибаться (рис. 8). Для создания магнитного поля служит постоянный магнит, расположенный под подложкой. При пропускании через актюаторы постоянного тока на них действует сила Лоренца, направление которой можно менять, реверсируя ток. На рис. 8а переключатель находится во включенном состоянии, сигнал беспрепятственно проходит по волноводу. При реверсе тока, как показано на рис. 8б, актюаторы толкают земляные линии к волноводу. Из-за изменения его волнового сопротивления большая часть высокочастотного сигнала отражается обратно к входу, что соответствует выключенному состоянию переключателя. После срабатывания актюаторов можно обесточить, их положение фиксируется за счет сил упругости. Для предотвращения замыкания волновода и актюаторов с земляными линиями на боковую поверхность всех элементов переключателя наносится изолирующий материал.

Разработчики указывают ряд достоинств переключателя:

- для управления переключателем достаточно напряжения менее 1 В;
- благодаря бистабильности переключатель не потребляет энергию в стационарном состоянии;
- в переключателе используется емкостной контакт, поэтому допустима большая мощность сигнала;
- нет проблемы накопления паразитного заряда на элементах переключателя и поэтому не возникают неконтролируемые электростатические силы, нарушающие его работу;
- актюаторы не входят в сигнальный тракт, поэтому влияние их паразитной индуктивности исключается;
- процесс производства может быть существенно упрощен и удешевлен, поскольку в нем используется только одна маска.

Перспективным и емким для МЭМС-переключателей является рынок мобильной связи. При переключении антенных цепей и их согласовании с выходным усилителем мощности в диапазоне частот 0,7–2,7 ГГц в смартфонах поколения 4G LTE эти переключатели обеспечивают более низкие потери, чем полупроводниковые. По оценке фирмы Cavendish Kinetics, применение МЭМС-переключателей позволяет снизить потери мощности в антенных цепях смартфонов до 1 дБ. Успех коммерциализации МЭМС-переключателей в этой области связывается с повышением их надежности и снижением стоимости за счет герметизации на уровне пластины и перехода на пластины диаметром 200 мм и более [11]. Автомобильная индустрия поддерживает разработки МЭМС-переключателей для антенных систем диапазона 77 ГГц. Военные увидели перспективу создания на основе МЭМС-переключателей более дешевых и высококачественных фазовращателей для АФАР, чем на основе GaAs-транзисторов. Однако успехи SiGe- и CMOS-технологий потеснили МЭМС-переключатели, оставив им такие ниши, как космические системы связи с ультранизкой мощностью (SATCOM), схемы реального времени задержки

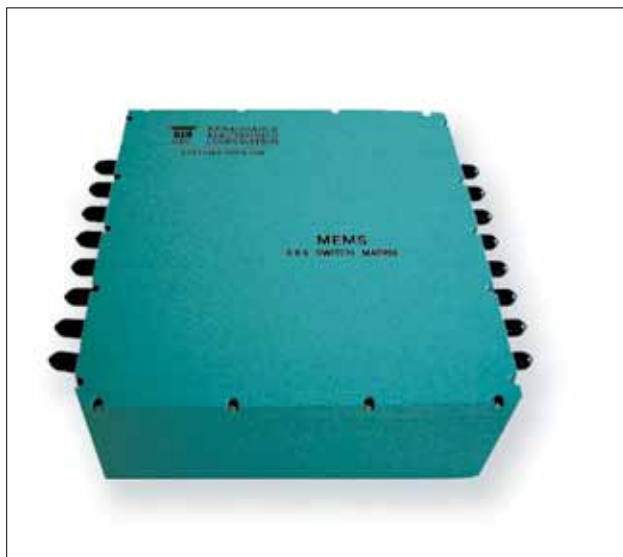


▲ Рис. 8. МЭМС-переключатель с электромагнитным приводом и низким управляющим напряжением: а) включен; б) выключен

и мощные антенные решетки. Есть такие области применения МЭМС-переключателей, где другие технологии не конкурентны:

- Автоматизированное тестовое оборудование (Automated Test Equipment, АТЕ). Оно предъявляет к переключателям требования очень низких потерь сигнала и очень высокой изоляции. Эти требования настолько высоки, что могут использоваться только электромеханические реле с ресурсом до 10 млн циклов. МЭМС-переключатели с ресурсом до 100 млн циклов и диапазоном частот до 26 ГГц представляются единственной заменой реле.
- Широкополосные измерительные приборы. В анализаторах спектра и анализаторах широкополосных сигналов для расширения динамического диапазона используются аттенюаторы и наборы фильтров, коммутируемые высоколинейными переключателями. Высокие требования предъявляются и к переключателям анализаторов цепей.
- Переключательные матрицы и многопозиционные переключатели. МЭМС-переключатели позволяют создавать переключательные матрицы достаточно больших порядков как коммерческого, так и военного применения. Переключательные изделия составляют значительную часть веса спутника, они используются для распределения сигналов, управления антенной и подключения резервных блоков. МЭМС-переключатели могут работать как со слабым сигналом в приемной части, так и с мощным сигналом передатчика, их применение существенно снижает выводимый на орбиту вес.
- Переключательные элементы фазовращателей. Фазовращатели на основе коммутируемых линий задержки широко используются в АФАР для управления диаграммой направленности. МЭМС-переключатели обеспечивают более низкие потери сигнала, чем PIN-диоды или GaAs-транзисторы.

В качестве примера переключательной матрицы на основе МЭМС можно привести прибор 18A7NF-1 фирмы Renaissance Electronic Corporation, созданный в 2007 г. (рис. 9). Матрица размерностью 8×8 содержит 80 МЭМС-переключателей с ре-

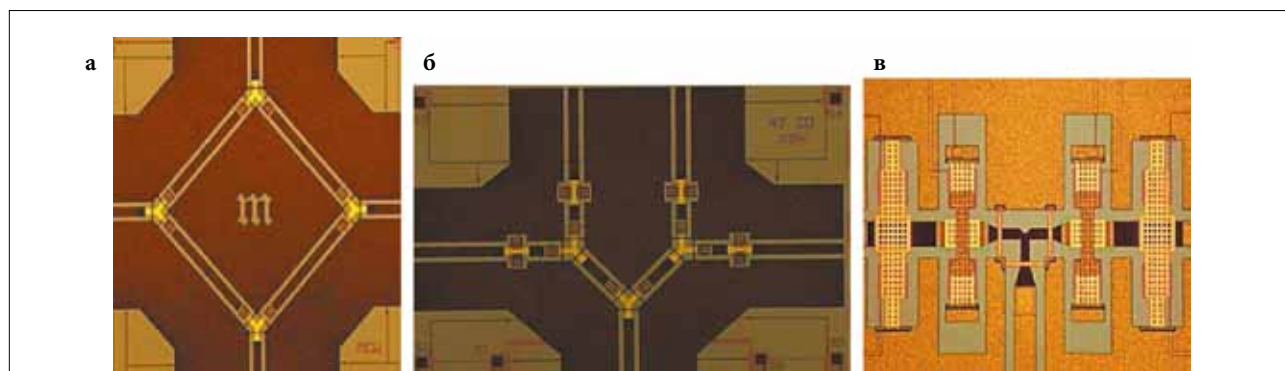


▲ Рис. 9. Матричный переключатель сигналов 18A7NF-1 производства Renaissance Electronic Corporation

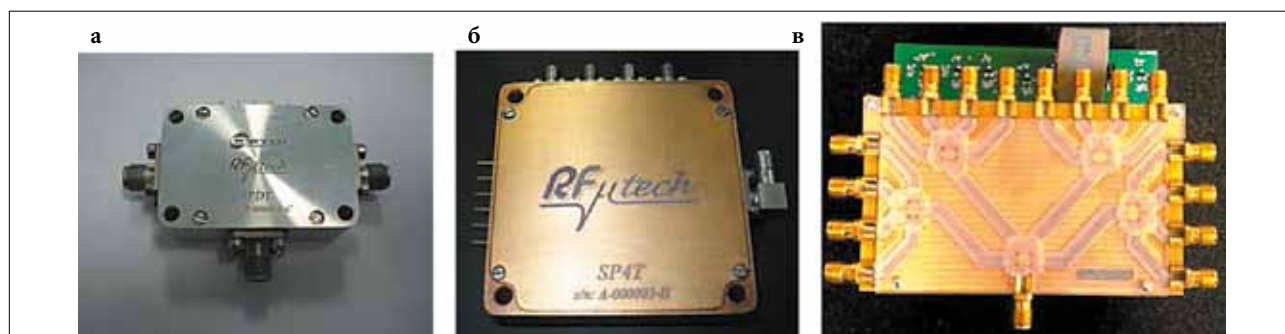
сурсом 100 млрд циклов [12]. Основные технические данные прибора:

- переключаемая мощность в «холодном» режиме 33 дБм;
- переключаемая мощность в «горячем» режиме 10 дБм;
- диапазон частот 0–2,5 ГГц;
- вносимые потери 6 дБ;
- изоляция 40 дБ;
- время переключения 50 мкс;
- напряжение управления 5 В;
- размеры 200×190×71 мм.

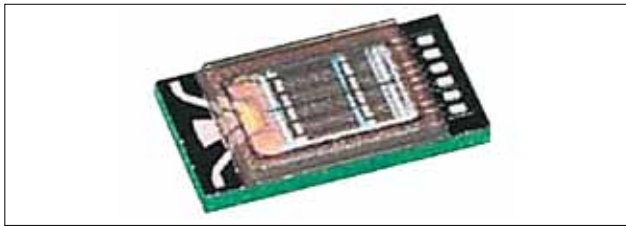
В качестве возможных областей применения производитель указывает аппаратуру для связи и промышленной автоматизации, компьютерную периферию, автоматическое испытательное оборудование, медицинские приборы, а также аппаратуру военного и аэрокосмического назначения.



▲ Рис. 10. МЭМС-переключатели фирмы RF Microtech: а) DPDT; б) SP4T; в) SPDT



▲ Рис. 11. Модульные переключатели сигналов фирмы RF Microtech: а) SPDT; б) SP4T; в) SP16T



▲ Рис. 12. МЭМС-переключатель совместной разработки «Совтест АТЕ» и РАМЭМС

Таблица 3. Параметры МЭМС-переключателей разработки «Совтест АТЕ» и РАМЭМС

Рабочая частота модели, ГГц	5	30	75
Изоляция, дБ (Частота, ГГц)	50 (1) 30 (5)	30 (10) 20 (30)	20 (75)
Потери, дБ (Частота, ГГц)	0,5 (1) 1 (5)	1 (10) 1,5 (30)	0,5 (1) 0,7 (70)

На рынке МЭМС-устройств активно работает фирма RF Microtech [13]. В ее портфеле как различные МЭМС-переключатели (рис. 10), так и приборы с их использованием. В числе МЭМС-переключателей разработаны модели конфигурации DPDT (диапазон частот 0–40 ГГц, потери до 2 дБ и изоляция до 40 дБ на частоте 33 ГГц), SP4T (диапазон частот 0–33 ГГц, потери до 1,2 дБ и изоляция до 30 дБ на частоте 33 ГГц) и SPDT (диапазон частот 0–35 ГГц, потери 1,3 дБ и изоляция до 35 дБ на частоте 35 ГГц). Все эти переключатели изготовлены и корпусированы на кварцевой пластине, у всех управляющее напряжение 50 В.

На основе разработанных МЭМС-переключателей фирма RF Microtech создала несколько переключателей сигналов в приборном исполнении (рис. 11). Переключатель SPDT работает в диапазоне частот 0–10 ГГц, на высшей частоте потери сигнала составляют до 1,4 дБ, изоляция более 20 дБ, мощность сигнала до 2 Вт. Габариты прибора 40×25×35 мм, питание 5 В при токе 60 мА. Переключатель SP4T имеет диапазон рабочих частот 0–2 ГГц, потери до 2 дБ и изоляцию более 30 дБ на верхней частоте, допустимая мощность сигнала до 2,5 Вт. Напряжение питания прибора 5 В при токе 60 мА, габариты 55×55×15 мм. Многопозиционный переключатель SP16T не имеет металлического корпуса и поставляется в виде двух плат. Диапазон рабочих частот прибора 0–10 ГГц, на краю диапазона его потери менее 3,8 дБ и изоляция не менее 24 дБ. Размеры платы коммутатора 100×55 мм, питание 5 В при токе 250 мА. Все эти приборы оснащены соединителями SMA с волновым сопротивлением 50 Ом. Внешние управляющие сигналы соответствуют ТТЛ-уровню.

В России создано несколько современных производств МЭМС в Нижнем Новгороде, Санкт-Петербурге, Курске и Новосибирске. Исследовательские работы по тематике МЭМС проводятся также в некоторых вузах.

Курские предприятия «Совтест АТЕ» и РАМЭМС совместно разработали три модели электростатических МЭМС-переключателей с резистивным контактом (рис. 12) для частот 5, 30 и 75 ГГц [14, 15]. Переключатели выполнены на кремниевой подложке, герметизируются стеклянной крышечкой. В системе управления не используются диэлектрические материалы, поэтому нет неконтролируемого накопления заряда. Для достижения высокой изоляции во всем рабочем диапазоне частот в МЭМС-переключателе две пары контактов соединяются последовательно. Благодаря большой площади электродов напряжение управления составляет всего 5 В. Допустимая мощность сигнала 5 Вт, значение IP_3 составляет 65 дБм. Основные частотные параметры этих переключателей приведены в табл. 3.

Кафедрой микроэлектроники МИЭТ (г. Зеленоград) разработан МЭМС-переключатель [16] с параметрами:

- управляющее напряжение 5, 12, 27, 60 В;
- коммутируемый ток 10^{-6} –1 А;
- коммутируемое напряжение 10^{-2} –100 В;
- сопротивление контактов электрической цепи не более 0,3 Ом;
- количество циклов коммутации не менее 10^{85} ;
- время срабатывания не более 5 мс;
- сопротивление изоляции не менее 10^9 Ом.

Переключатели помещаются в металлоглазанный корпус. Серийно они не производятся, но в случае заказа предприятие может изготовить необходимую партию.

Изготовление МЭМС-переключателей на заказ предлагает также ЗАО «МЦКП» (Санкт-Петербург) [17].

Согласно данным прошедшего в 2015 г. МЭМС-форума, возможности производства значительно превышают спрос на изделия МЭМС-технологий в России. Потребность в МЭМС пока что может быть полностью удовлетворена работой даже одной из имеющихся фабрик [18].

МЭМС-переключатели имеют в диапазоне СВЧ ряд преимуществ перед такими традиционными переключательными компонентами, как PIN-диоды и полевые транзисторы. Прежде всего, это хорошая изоляция в закрытом и низкие вносимые потери в открытом состоянии, высокая мощность коммутируемого сигнала, низкое энергопотребление, устойчивость к радиационным воздействиям и невысокая стоимость в условиях массового производства. Присущая этим приборам проблема ограниченной надежности успешно преодолевается, и уже сейчас их ресурс может составлять миллиард циклов в режиме «горячей» коммутации. Удачное сочетание свойств МЭМС-переключателей не оставляет сомнений в перспективности их применения в СВЧ-аппаратуре как коммерческого, так и специального назначения. □

ЛИТЕРАТУРА

1. Sugesh M. S., Nataraj B. *Design and Modeling of RF MEMS Phase Shifters Using Various Structures of Coplanar Waveguides//International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Vol. 2. Issue 3. 2015. June.
2. Gabriel M. Rebeiz, Chirag D. Patel, Sung K. Han, Chih-Hsiang Ko, Kevin M. J. Ho. *The Search for a Reliable MEMS Switch?//IEEE Microwave Magazine*. Vol. 14. Issue 1. 2013. January/February.
3. <http://www.radantmems.com/radantmems/switchperformance.html>
4. Majumder S., Lampen J., Morrison R., Maciel J. *MEMS Switches//IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 2003. March.
5. Maury F., Pothier A., Orlianges J. C., Mardivirin D., Reveyard T., Conseil F., Blondy P. *Ku Band DMTL Medium Power Phase Shifters. Microwave Symposium Digest, 2009. MTT '09. IEEE MTT-S International*.
6. Wai Kai Chen. *The Electrical Engineering Handbook*. Elsevier Academic Press. 2005.
7. Chon-Min Kuing. *Nano Devices and Circuit Techniques for Low-Energy Applications and Energy Harvesting*. Springer Science & Business Media. 2016.
8. Allyson L. Hartzell, Mark G. da Silva, Herbert Shea. *MEMS Reliability*. Springer Science & Business Media. 2011.
9. Attaran A., Rashidzadeh R. *Ultra low actuation voltage RF MEMS switch — Micro and Nano Systems Letters*. Springer. 2015.
10. http://www.ece.lsu.edu/dyhah/RF_switch.html
11. <http://www.cavendish-kinetics.com/applications-overview/real-rf-switching/>
12. <http://www.rec-usa.com/Data%20Sheets/18A7NF-1.pdf>
13. <http://rfmicrotech.com/>
14. <http://mems-russia.ru/produktiyi/svch-mems-pereklyuchateli/>
15. <http://www.sovtest.ru/equipment/vch-mems/>
16. <http://cathedra.me/cathedra/development/2/433/>
17. <http://www.protofab.ru/uslugi/izgotovlenie-mems-na-zakaz>
18. <http://tcentr.sfedu.ru/index.php/ru/itogi-mems-foruma-2015-goda>