

СВЧ-переключатели с использованием MEMS технологий

Н.А. Васильев, С.В. Костарев, В.П. Панчак

Военная академия связи им. С.М. Буденного

Аннотация: с увеличением частоты и мощности сигналов, применение стандартных СВЧ-компонентов, вроде PIN-диодов и полевых транзисторов, начинает становиться проблематичным. Решением этой проблемы может стать использование МЭМС-переключателей, которые значительно усовершенствовали свои технологии и стали достаточно надежными для применения не только в коммерческих, но и в критически важных отраслях.

Ключевые слова: СВЧ-компоненты, MEMS, частота и мощность сигнала

СВЧ переключатели широко используются в системах навигации, радиолокации, связи, а также в других радиотехнических применениях. В приборах, требующих высокую скорость коммутации сигнала, традиционно используются полупроводниковые переключатели [1]. В технических решениях, не требующих высокой скорости переключения, всё большее распространение получают микроэлектромеханические (МЭМС) СВЧ переключатели [2]. Это обусловлено тем, что по ряду технических характеристик (динамический диапазон, потребляемая мощность и др.) они превосходят полупроводниковые переключатели.

Электромагнитные реле были первыми переключателями, которые фактически отвечали всем этим требованиям, но с течением времени современные высокочастотные реле заменили старые модели. Они имеют низкие потери сигнала во включенном и высокую изоляцию в выключенном состоянии, но они также имеют недостатки, такие как большой размер, высокая стоимость и ограниченный срок службы (от нескольких сотен тысяч до десятков миллионов циклов).

Переключатели на основе PIN-диодов и полевых транзисторов из GaAs (арсенид галлия) обладают несколькими преимуществами перед высокочастотными реле, такими как высокая скорость реакции, компактность, низкая мощность управления. Однако они также имеют более высокие потери, что может ограничивать их использование в некоторых сферах. Поэтому были разработаны высокочастотные переключатели на основе МЭМС, которые объединили достоинства полупроводниковых и электромеханических систем.

В 1970-е годы была изобретена технология МЭМС, позволяющая создавать датчики давления, акселерометры, газовые хроматографы и другие приборы путем локального вытравливания кремниевой подложки и нанесения проводящих и диэлектрических материалов. Современные технологии позволяют формировать размеры механических конструкций в единицы или десятки микрон и создавать различные электромеханические компоненты, включая резонаторы, фильтры, переключатели, управляемые конденсаторы, катушки индуктивности и многие другие. В начале 1990-х годов были разработаны МЭМС-переключатели специально для СВЧ-приложений.

Актуатор в МЭМС-переключателе может выполняться двумя способами: соединенный с одной из сторон кантилевером (рисунок 1а) или закрепленный к краям мембраны (рисунок 1б). Актуатор может использовать электростатический (емкостной), пьезоэлектрический, электромагнитный или термоэлектрический тип

привода. Электростатический привод является наиболее распространенным.

В МЭМС-переключателях с использованием электромагнитного привода, актуатор перемещается благодаря магнитному полю, которое возникает при прохождении тока через управляющий элемент переключателя, который, как правило, выступает в роли нанесенной на подложку планарной катушки индуктивности. В свою очередь, термоэлектрический привод предполагает использование теплового расширения актуатора при подаче электрического тока через управляющий элемент или различных коэффициентов теплового расширения входных материалов актуатора. Оба вида приводов способны генерировать значительные механические силы на контактах МЭМС-переключателя, что позволяет переключать высокоомощные сигналы. Однако, они имеют необходимость в большом времени срабатывания и энергопотреблении во включенном состоянии. В отличие от этого, электростатический и пьезоэлектрический приводы более распространены в применении.

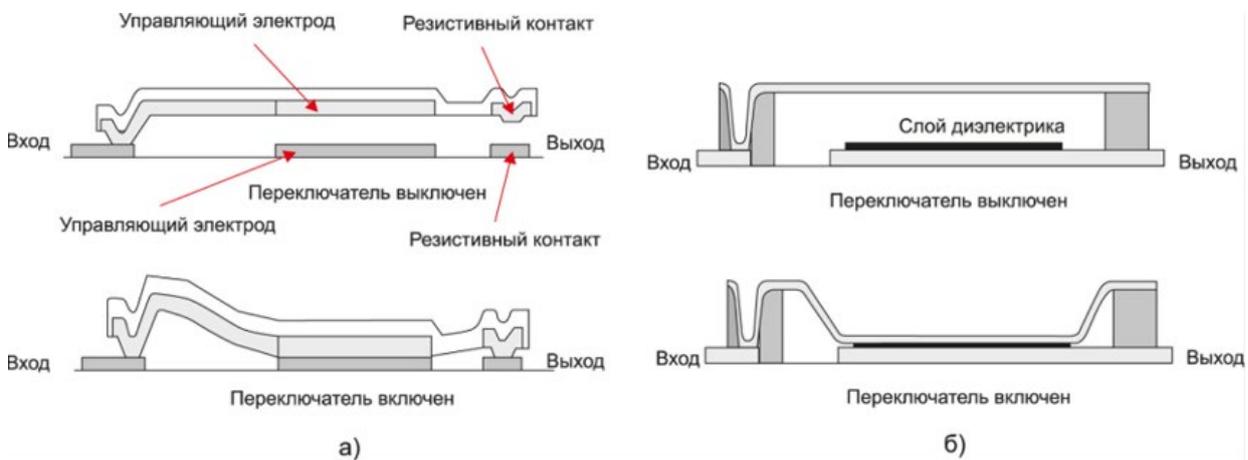


Рисунок 1. МЭМС-переключатели: а) кантилевер с резистивным контактом; б) мембрана с емкостным контактом

Существуют два вида контактов МЭМС-переключателей: резистивные «металл-металл» и емкостные «металл-диэлектрик-металл». Резистивные контакты имеют низкое сопротивление в открытом состоянии и небольшую емкость в закрытом состоянии. Емкостные контакты, в свою очередь, создают дискретно перестраиваемый конденсатор с очень высоким отношением емкостей во включенном и выключенном состояниях. Эти переключатели обладают высокими показателями линейности и малыми потерями на высоких частотах. Кроме того, управляющее напряжение может быть снижено благодаря отсутствию необходимости в большом прижимном усилии актуатора. Важно, чтобы контактные поверхности были гладкими, в противном случае, возможные зазоры между ними могут снизить отношение емкостей включенного и выключенного состояний. (сделать ссылки на рис. 1а и 1б)

Достоинства МЭМС-переключателей включают в себя:

1. Очень высокий показатель качества Q_0M , который достигает 10-20 ТГц, в отличие от полупроводниковых, где этот показатель составляет 250-500 ГГц;
2. Очень высокая линейность с $IP3$ более 75 дБм и $IP2$ более 120 дБм, а уровень интермодуляционных продуктов на 30 дБ ниже, чем у PIN-диодов или ПТ;
3. Очень малое энергопотребление, где МЭМС-переключатели потребляют 10-100 нДж энергии при срабатывании и ничего не потребляют в стационарном режиме;
4. Возможность формирования МЭМС-переключателей на различных подложках для обеспечения ультранизких емкостей, сопряжения с микросхемами и СВЧ-

транзисторами;

5. Высокая радиационная стойкость;

6. Низкая стоимость при условии массового производства.

Несмотря на их преимущества, МЭМС-переключатели также имеют несколько недостатков. Например, для их управления требуется высокое напряжение, что может быть проблематично для мобильных устройств и потребовать дополнительных устройств. Также они имеют относительно большое время срабатывания, а ограниченный ресурс и необходимость герметизации ограничивают их долгосрочную надежность и увеличивают стоимость.

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 [3]. На сегодняшний день их надежность значительно улучшилась, что позволяет им соответствовать требованиям, необходимым для использования активных фазированных антенных решеток (АФАР) в различных областях (см. таблицу 1). Долгосрочная надежность МЭМС-переключателей все еще остается препятствием для их коммерциализации, особенно в системах с «горячим» переключением в мощных приложениях [4].

Таблица 1. Требования к износостойкости и надежности электронных переключателей для АФАР

Область применения	Базирование	Число циклов переключения, млрд	Срок службы, лет
АФАР для коммутационных 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

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. 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.

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].

Увеличение площади электродов и уменьшение упругости актюатора способствуют снижению управляющего напряжения для МЭМС-переключателей с электростатическим приводом. В канадском университете University of Windsor был создан переключатель с рекордно низким напряжением управления, который может

быть интегрирован с логическими КМОП-схемами с напряжением питания 1 В. Для снижения упругости используется золотой актюатор в форме спиральной пружины, а также множество отверстий в пластине актюатора для уменьшения сопротивления газа. Переключатель обеспечивает изоляцию 27 дБ и вносит потери 0,1 дБ на частотах до 3 ГГц, но его быстродействие составляет 0,5 мс и ресурс ограничен всего 10000 циклами. Полные размеры переключателя - 1264×635 мкм, хотя информации о его герметизации не приводится.

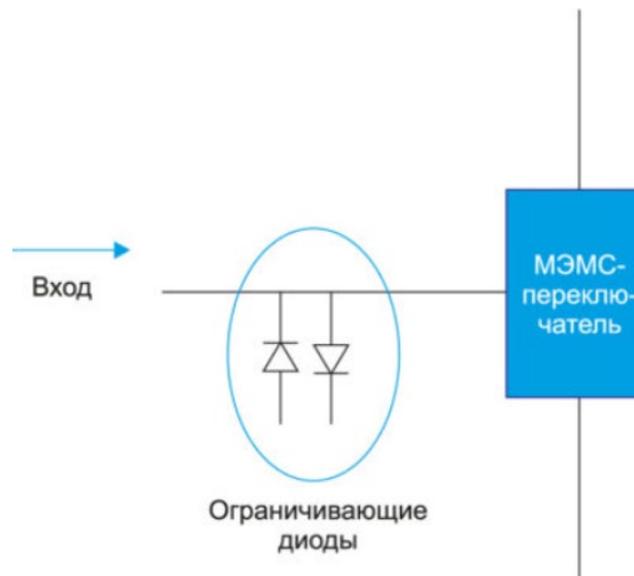


Рисунок 2. Схема ограничения сигнала в момент срабатывания МЭМС-переключателя

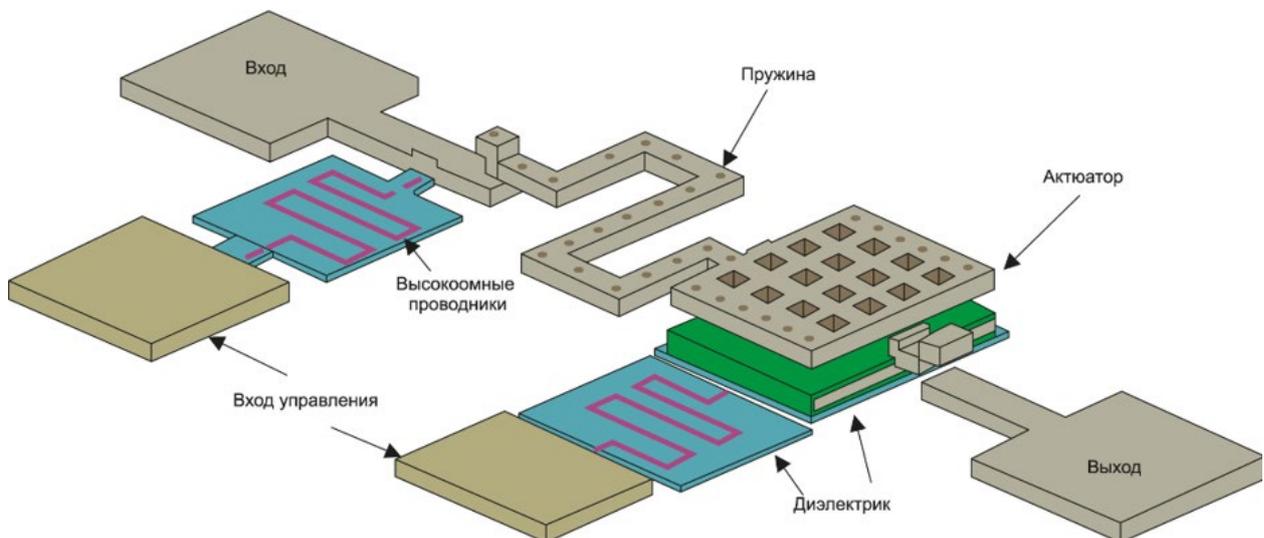


Рисунок 3. Устройство МЭМС-переключателя с низким напряжением управления

МЭМС-переключатели проявляют большой потенциал в мобильной связи, особенно при переключении антенных цепей 4G LTE в диапазоне частот 0,7-2,7 ГГц. По данным компании CavendishKinetics, они могут снизить потери мощности до 1 дБ. Тем не менее, успешное внедрение данных переключателей связано с повышением надежности и снижением стоимости за счет производства на более крупных пластинах. В автомобильной и военной отраслях тоже видят перспективу для МЭМС-переключателей в различных приложениях, но технологии типа SiGe и CMOS постепенно вытесняют их из рынка, оставляя помещения для космических Satcom-систем, антенных решеток и других схем с низким уровнем мощности.

Ученые из Луизианского государственного университета (США) выдвинули идею создания электромагнитного МЭМС-переключателя с низким напряжением управления, способного манипулировать мощными сигналами в бистабильном режиме. Это устройство является копланарным волноводом, но земляные линии не закреплены жестко на стеклянной подложке и могут гнуться (рисунок 4). Постоянный магнит, расположенный под подложкой, используется для создания магнитного поля. Применением постоянного тока к актуаторам можно изменять направление силы Лоренца, действующей на них.

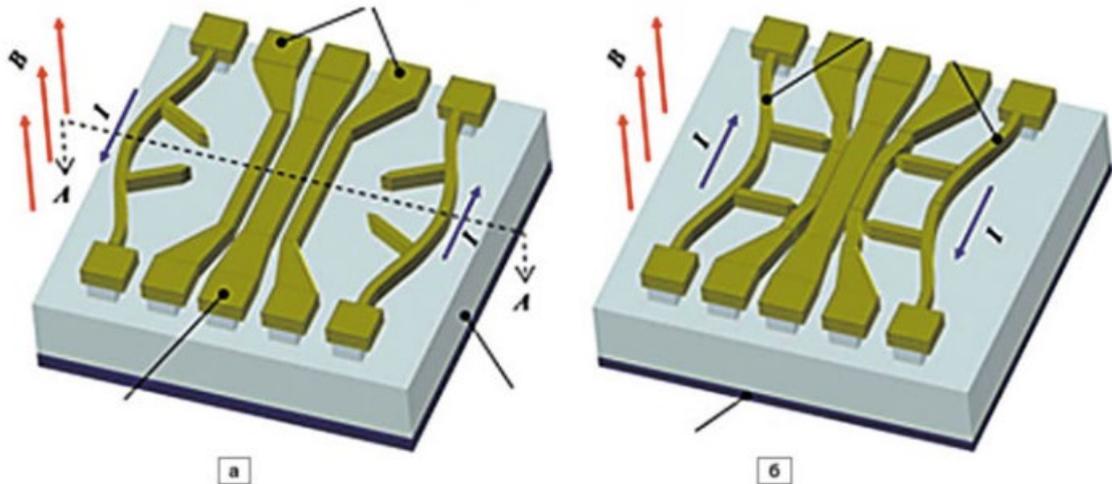


Рисунок 4. МЭМС-переключатель с электромагнитным приводом и низким управляющим напряжением: а) включен; б) выключен

На рисунке 4а выключатель находится в состоянии включено, что позволяет сигналу беспрепятственно проходить через волновод. Если ток изменяет направление, как показано на рисунке 4б, то актуаторы приводят в движение земляные линии, приближая их к волноводу. Как следствие, из-за изменения его волнового сопротивления большая часть высокочастотного сигнала отражается обратно на вход переключателя. После активации актуаторов они могут быть выключены, и их положение будет сохранено за счет упругих сил. Чтобы избежать короткого замыкания между волноводом и земляными линиями актуаторов, на боковую поверхность всех компонентов переключателя наносится слой изолирующего материала.

Разработчики утверждают, что переключатель обладает рядом преимуществ:

1. Для управления переключателем необходимо всего лишь напряжение менее 1В;
2. Благодаря своей бистабильности, переключатель не потребляет энергию в стационарном состоянии;
3. Большая мощность сигнала допустима благодаря использованию емкостных контактов в переключателе;
4. Не возникает проблема накопления паразитного заряда на элементах переключателя, что исключает возможность появления неконтролируемых электростатических сил, нарушающих его работу;
5. Воздействие паразитной индуктивности актуаторов на сигнальный тракт исключено;
6. Процесс производства может быть упрощен и существенно удешевлен, так как в нем используется только одна маска.

Микромеханические переключатели находятся в лучшем положении, чем

традиционные компоненты, такие как PIN-диоды и полевые транзисторы, в диапазоне СВЧ. Это связано с меньшими потерями в открытом положении, отличной изоляцией в закрытом и возможностью коммутирования высокой мощности сигнала, а также экономической стоимостью при массовом производстве. В современных условиях, также возможно преодолеть проблему ограниченной надежности при их использовании в радиационных условиях, и поставить переключатель на миллиарды циклов в режиме работы. Уникальные свойства МЭМС-переключателей делают их очень перспективными для коммерческого и специального использования в СВЧ-аппаратуре.

Список литературы

1. «Microwave switches». Micro-waves-101 Microwave Encyclopedia
2. Переключатели сверхвысокочастотных сигналов/ Белов Л. - Электроника: Наука, Технология, Бизнес. No1/2006 М.: Техносфера, 2006.
3. Majumder S., Lampen J., Morrison R., Maciel J. MEMS Switches//IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2003. March.
4. Medium Power Phase Shifters. Microwave Symposium Digest, 2009. MTT '09. IEEE MTT-S International. Chon-Min Kuing. Nano Devices and Circuit Techniques for Low-Energy Applications and Energy Harvesting. Springer Science & Business Media. 2016.
5. Maury F., Pothier A., Orlianges J. C., Mardivirin D., Reveyrand T., Conseil F., Blondy P. Ku Band DMTL