

# НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЕМКОСТНОГО МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ С КОНТАКТАМИ ИЗ МЕТАМАТЕРИАЛА

В статье, подготовленной на основании патента [1]<sup>1</sup> и предложенной в виде авторского перевода [2] одной из частей публикации [3], описывается новое решение микроэлектромеханического (МЭМС) переключателя для приложений из области высокочастотной электроники и систем радиосвязи. Новые МЭМС-переключатели отличаются улучшенной изоляцией и более низкими вносимыми потерями, кроме того, они меньше подвержены залипанию. Такие переключатели подходят для маршрутизации сигналов в каскадах приемопередающих устройств, в фазовращателях с коммутацией, предназначенных для фазированных антенных решеток, в схемах широкополосных настроек и могут использоваться в высокоточных измерительных приборах. С развитием систем сотовой связи пятого поколения (5G) данные устройства становятся актуальными и в области миллиметровых волн.

МЭМС-устройства, в том числе и переключатели, как правило, являются продуктом технологии интегральных схем на основе кремния с движущимися механическими частями, которые формируются путем травления слоев диоксида кремния. Подвижная часть МЭМС-переключателя — актуатор — выполняется или в виде закрепленного с одной стороны кантилевера (от англ. cantilever — «кронштейн», «консоль»), или закрепленной с двух сторон мембраны. Привод актуатора может быть электростатическим (емкостным), пьезоэлектрическим, электромагнитным или термоэлектрическим. Чаще всего используется электростатический привод.

МЭМС-переключатели содержат сигнальную цепь, имеющую порт ввода и порт вывода, расположенный между первой и второй плоскостями заземления, а также элемент для управления его активацией. В статье рассматривается вариант архитектуры переключателя, имеющего одну или несколько микрополосковых структур с измененной формой слоя металлизации в виде дефектной структуры заземления (Defected Ground Structure, DGS), сформированных в первой и второй плоскостях заземления, и соответствующую им вторичную отклоняемую структуру, расположенную над каждой DGS. Структуры DGS хорошо известны и применяются, например, в микрополосковых полосовых фильтрах для получения характеристики с низкими вносимыми потерями, высокой

избирательностью, расширенным диапазоном полосы пропускания и малой групповой задержкой [13].

Для снижения отказов, связанных с прилипанием, переключатель содержит искусственную конструкцию, известную как метаматериал, необходимую для создания отталкивающих сил Казимира. Последнее и необходимо для смягчения проблем в переключателях, связанных с залипанием [4–9]<sup>2</sup>.

По сравнению с PIN-диодами или переключателями на полевых транзисторах, МЭМС-переключатели предлагают более низкую стоимость и улучшенные характеристики. Такие переключатели отличаются очень малыми потерями на высоких частотах (0,1 дБ на 40 ГГц) и высокой линейностью (более 66 дБм).

МЭМС-переключатели с электростатическим или пьезоэлектрическим приводами потребляют энергию 10–100 нДж при срабатывании и ничего не потребляют в стационарном режиме. Сравнение характеристики переключателей МЭМС-технологии с PIN-диодами или переключателями на полевых транзисторах приведено в таблице 1 [12].

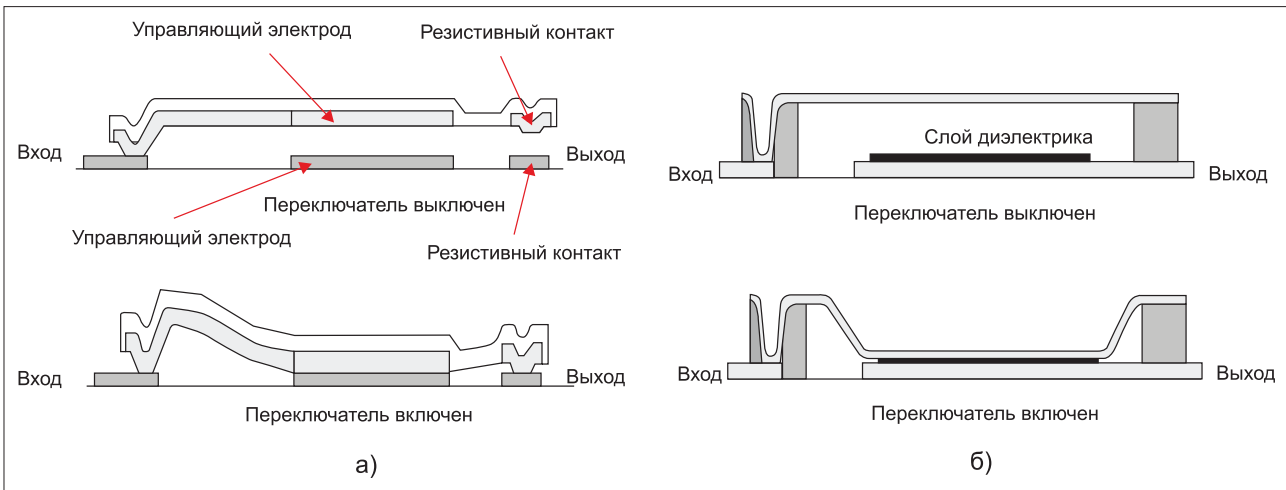
Однако, с другой стороны, МЭМС-переключатели могут иметь несколько недостатков: высокое напряжение срабатывания, статическое трение способно привести к заеданию переключателя и его неработоспособности. Для преодоления силы трения может потребоваться высокое напряжение, поскольку при низком напряжении переключатель остается в состоянии включения. Что касается

Таблица 1. Основные параметры СВЧ-переключателей разных технологий

Параметр	МЭМС	PIN-диод	Полевой транзистор
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

<sup>1</sup> В сборнике [3] указан номер заявки на патент США № 62/469752 от 10 марта 2017 года, эта информация устарела.

<sup>2</sup> Эффект был предсказан голландским физиком Хендриком Казимиром (Hendrik Casimir) в 1948 году, а позднее в 1957 году был подтвержден экспериментально и назван его именем. Он заключается во взаимном притяжении проводящих незаряженных тел под действием квантовых флуктуаций в вакууме. Отдельно он рассматривается во второй статье сборника [3].



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

СВЧ-приложений, то первые сообщения о МЭМС-переключателях, разработанных специально для СВЧ-техники, относятся к началу 1990-х годов.

### МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

МЭМС-переключатели (рис. 1) обычно различают по способам контакта: емкостные (металл-изолятор-металл) и резистивные (металл-металл) [12].

В емкостных переключателях используется тонкий слой диэлектрического материала для разделения двух проводящих электродов при срабатывании. Диэлектрический слой предотвращает прямой контакт металла с металлом. Следовательно, прилипание контактов из-за тепловой энергии вызывает здесь меньшую озабоченность. В таких переключателях тонкий слой диэлектрического материала будет проводить сигналы с приемлемыми вносимыми потерями только тогда, когда частота коммутируемого сигнала превышает определенное значение. Более того, полосы излучения (отсутствия проводимости сигнала) емкостных переключателей ограничена соотношением емкостей включения и выключения.

В переключателях типа «металл-металл» для достижения низких вносимых потерь при срабатывании используется физический контакт металлов с низким контактным сопротивлением. Следовательно, МЭМС-переключатели «металл-металл» могут работать в полосе от напряжения постоянного тока до сиг-

нала с частотой, определяемой емкостью связи электродов, когда переключатель разомкнут. Здесь также необходимо учитывать, что контакт «металл-металл» образован неровностями поверхности и истинная площадь контакта намного меньше его видимой площади. Чтобы контакт «металл-металл» имел низкое контактное сопротивление, требуется некоторая пластическая деформация неровностей.

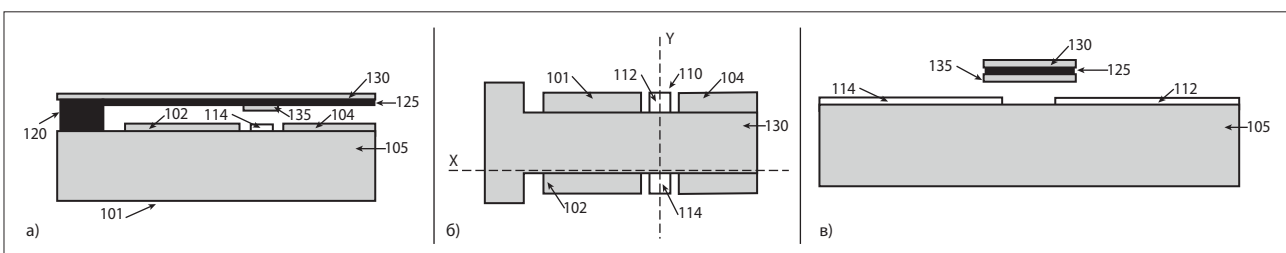
Как правило, по мере увеличения тянущего усилия деформация неровностей увеличивается, а сопротивление контакта уменьшается. Однако прочность сцепления точки контакта пропорциональна площади контакта и температуре, связанной со степенью деформации, поэтому меньшее контактное сопротивление часто сопровождается более сильной прочностью сцепления. Радиочастотные переключатели передают радиочастотные сигналы, поэтому в определенных условиях эксплуатации, таких как несоответствие импеданса, через переключатели будет проходить более высокий уровень радиочастотной мощности. В подобных случаях тепло, выделяемое высокочастотной мощностью, может вызвать микроплавление неровностей и потенциально приводит к короткому замыканию в точках контакта.

Как известно, технология 5G при ее переходе в область миллиметровых волн потребует коммутируемых антенных решеток с высокой точностью и надежностью формирования луча диаграммы направленности [10, 11]. И здесь именно

МЭМС-переключатели оказываются наиболее перспективным решением с точки зрения потерь. Однако прежде чем интеграция переключателей «металл-металл» в системы связи 5G станет реальностью, необходимо решить проблему слипания (заедания) и общей надежности контактов МЭМС-переключателей. Возможные методы снижения поверхностного залипания — это либо выбор контактных материалов с меньшей склонностью к залипанию путем применения химической обработки поверхности, либо устранение загрязнения с помощью плазменной очистки.

На рис. 2 показан типичный пример консольного внеплоскостного МЭМС-переключателя MEMS. Так, на рис. 2а представлен вид переключателя в разрезе по оси X; на рис. 2б — вид переключателя сверху; на рис. 2в — вид переключателя в разрезе по оси Y. Здесь и далее позиционные обозначения соответствуют патенту [1].

Такой типичный МЭМС-переключатель сформирован над копланарным волноводом (101), в котором сигнальная линия (110) сформирована между плоскостями заземления (102), (104) на подложке (105). Сигнальная линия (110) включает входной (112) и выходной (114) порт, сформированный на противоположных концах подложки (105). Консольный переключатель включает стойку (120) или анкер, прикрепленный к подложке (105), и выступ, проходящий по подложке в направлении,



▲ Рис. 2. Типичный переключатель MEMS: а) вид в разрезе по оси X; б) вид сверху; в) вид в разрезе по оси Y

перпендикулярном сигнальной линии (110). Продолжение кантилевера включает нижний слой (125) из диэлектрического материала, такого как силикат, и верхнего слоя (130) из проводящего материала, такого как золото. Кантилевер дополнительно имеет контактный выступ или выемку (135), расположенную под нижним диэлектрическим слоем (120) и совмещенную с портами (112), (114) сигнальной линии. Таким образом, когда кантилевер изгибается вниз, выемка (135) контактирует с сигнальной линией (110), тем самым соединяя входные и выходные порты (112), (114).

В дополнение к сказанному МЭМС-переключатель, представленный на рис. 2, имеет в своем составе электростатический привод (не показан). Он, как уже было сказано, предназначен для

приведения в действие кантилевера путем приложения или снятия напряжения смещения постоянного тока между кантилевером и «землей» (102), (104) копланарного волновода (101). Кантилевер изгибается, соответственно, вниз и вверх, по направлению к сигнальной линии и от нее в ответ на приложенное напряжение от исполнительного механизма. Другие типы высокочастотных МЭМС-переключателей, для того чтобы привести подвижную часть консольного переключателя к контакту или от него, могут использовать боковое перемещение. Каждая движущаяся часть и контакт могут быть металлическими (резистивный переключатель), или одна может быть металлической, а другая — диэлектрической (емкостной переключатель).

### НОВЫЙ МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ НА ЕМКСТНЫХ КОНТАКТАХ (МЕТАЛЛ-ИЗОЛЯТОР-МЕТАЛЛ)

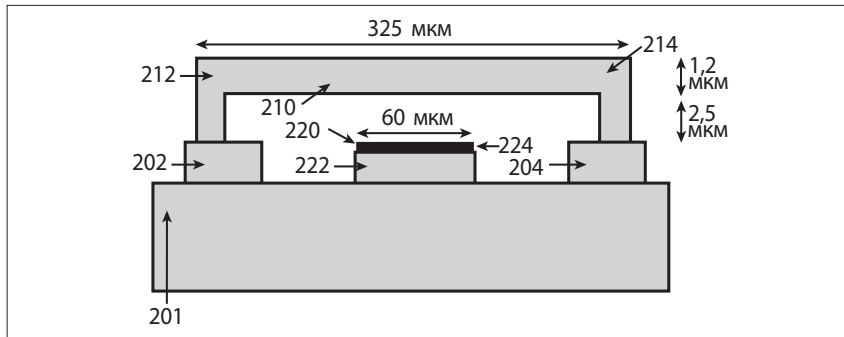
На рис. 3 и 4 показаны вид сбоку и сверху замыкающего МЭМС-переключателя на основе емкостных контактов с консольной балкой (элемент (210), выполненный в виде мембраны) с двумя опорами, сформированной над копланарным волноводом, который в свою очередь сформирован на подложке 201.

Как показано на рис. 3, первый конец (212) и второй конец (214), а также элемент (210) поддерживается соответствующими плоскостями (202) и (204) заземления, сформированными в копланарном волноводом. Середина элемента (210) подвешена над сигнальной линией (220), сформированной в копланарном волноводом. Этот элемент соединен с приводом (он не показан), сконфигурированным для подачи напряжения смещения постоянного тока непосредственно на него и плоскости заземления (202), (204). Напряжение смещения постоянного тока заставляет этот элемент отклоняться вниз. Сигнальная линия (220) содержит проводящий слой (222), покрытый тонким диэлектрическим слоем (224), например, нитридом кремния.

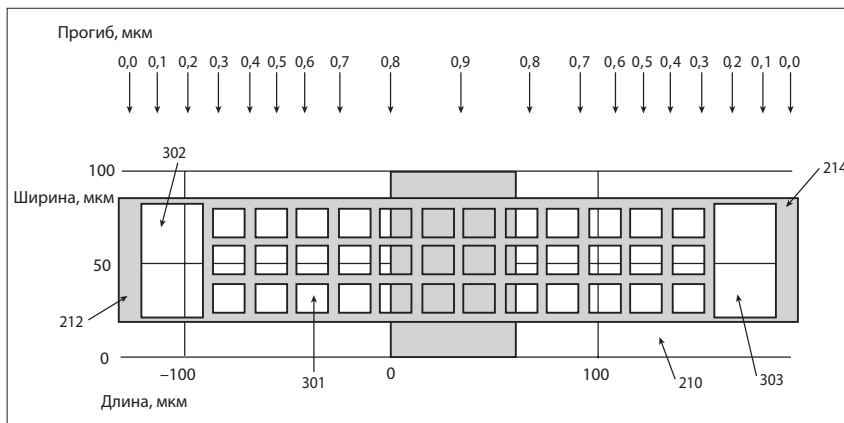
Толщина диэлектрического слоя составляет примерно 0,2 мкм. Когда элемент (210) отклоняется вниз и контактирует с сигнальной линией (220), емкость резко увеличивается. Большая емкость блокирует (шунтирует) распространение радиочастотных сигналов по сигнальной линии (220) копланарного волновода (состояние включено). Когда смещение постоянного тока устраняется, то элемент (210) отклоняется вверх и возвращается в свое исходное положение (выключенное состояние), емкость падает и РЧ-сигнал уже не шунтируется.

На рис. 3 мембрана (элемент (210)) изготовлена из молибдена и имеет длину около 325 мкм, ширину около 60 мкм и толщину около 1,2 мкм. Сигнальная линия (220) проходит через копланарный волновод и имеет ширину (в направлении длины элемента (210)) около 60 мкм. Мембрана (210) подвешена примерно на уровне 2,5 мкм над сигнальной линией (220), образуя воздушный зазор толщиной 2,5 мкм, при этом толщина диэлектрического слоя составляет около 0,2 мкм.

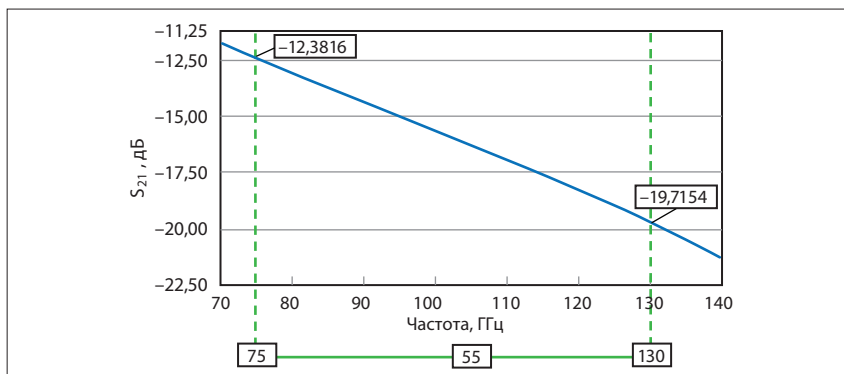
Как видно на рис. 4, мембрана (210) перфорирована и имеет посередине сетку из небольших (301) и больших отверстий (302), (303) на каждом конце. Перфорация обеспечивает улучшенное отклонение (прогиб) элемента (210). Можно заметить, что вертикальное смещение мембраны при приложении напряжения смещения постоянного тока находится в пределах от нуля при отсутствии смещения на соответствующую



▲ Рис. 3. Вид сбоку МЭМС-переключателя, использующего консольную балку в виде мембраны, выполненной над копланарным волноводом



▲ Рис. 4. Вид сверху емкостного шунтирующего МЭМС-переключателя с двойным элементом поддержки консольной балки над копланарным волноводом



▲ Рис. 5. Зависимость характеристики изоляции выключенного МЭМС-переключателя, предоставленного на рис. 3 и 4, от частоты

щих концах (212), (214) мембраны (210) примерно до 0,91 мкм в ее середине. Прикладываемое для этого напряжение постоянного тока для перевода переключателя в состояние «включено» составляет около 37 В.

На рис. 5 дается график зависимости изоляции (коэффициента передачи прямой волны  $S_{21}$ ) в диапазоне сигналов миллиметрового диапазона 75–130 ГГц приведенного ранее на рис. 3 МЭМС-переключателя в выключенном состоянии.

Как можно видеть, типичная изоляция переключателя составляет около –12,4 дБ на частоте 75 ГГц и около –19,7 дБ на частоте 130 ГГц. Типичные вносимые потери переключателя в замкнутом состоянии составляют около 0,74 дБ, а возвратные потери — около 10,04 дБ. Напряжение срабатывания, необходимое для переключателя, может быть дополнительно уменьшено за счет использования иного решения перфорации.

В примере, представленном на рис. 6, МЭМС-переключатель содержит прямоугольную, имеющую перфорированную структуру мембрану (элемент (510)), изготовленную из золота. Средняя часть (516) мембраны (510) образует перфорированную решетку. Затем каждый элемент этой решетчатой мембраны подключен через змееобразную структуру, выполняющую роль пружинного элемента, для ее возврата в исходное положение при снятии напряжения активации выключателя.

Змеевидная структура позволяет отклонять мембрану с более низким напряжением смещения. Размеры переключателя, показанного на рис. 6, в значительной степени сопоставимы с размерами переключателя, приведенного на рис. 4, за исключением того, что мембрана выполнена немного длиннее, около 345 мкм, и немного шире, около 65 мкм. Она по-прежнему отклоняется вниз до 0,9 мкм, но при напряжении активации всего в 17 В. Такой МЭМС-переключатель демонстрирует улучшенные характеристики изоляции.

На рис. 7 даются характеристики изоляции в диапазоне 75–130 ГГц для МЭМС-переключателя, показанного на рис. 6. В случае, когда переключатель разомкнут, изоляция составляет около –22 дБ на частоте 75 ГГц и около –14,7 дБ на частоте 130 ГГц и падает примерно до –24,8 дБ на частоте 86 ГГц. Вносимые потери переключателя в замкнутом состоянии составляют всего около 0,6 дБ, а обратные потери — около 15,15 дБ.

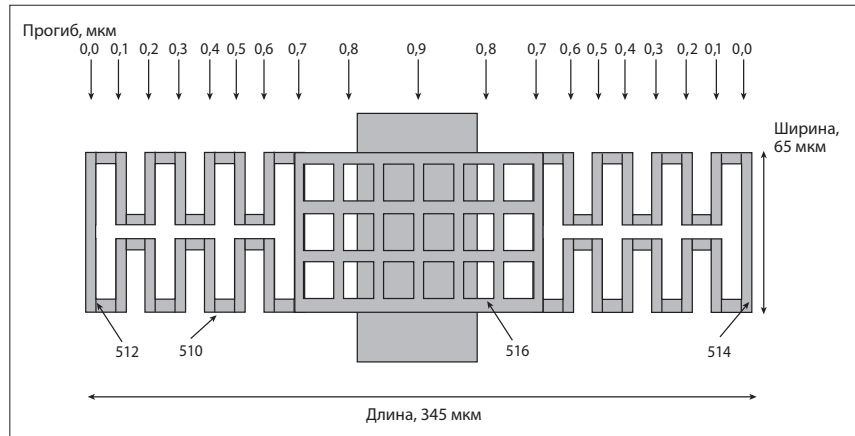
### ЭФФЕКТ ОТ ВКЛЮЧЕНИЯ DGS В СТРУКТУРУ НОВОГО ЕМКОСТНОГО МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

Характеристики изоляции предлагаемых новых емкостных шунтирующих МЭМС-переключателей могут быть дополнительно улучшены за счет включения в них DGS. Особенно это

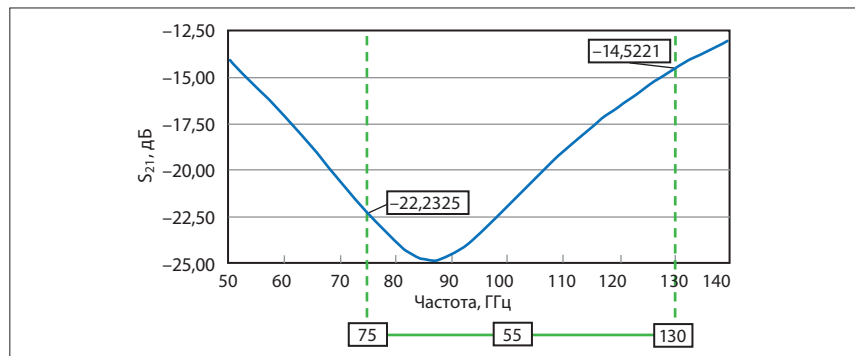
заметно в полосе частот миллиметрового диапазона 75–130 ГГц. Двумерная DGS формируется в каждой из плоскостей (702) и (704) заземления МЭМС-переключателя, как показано на рис. 8.

Здесь DGS по существу ведет себя как полосовой заградительный фильтр, тем самым влияя на характеристики передачи переключателя. Конструкция МЭМС-переключателя, представленная на рис. 8, содержит мембрану (710), имеющую такую же конструкцию, что и мембрана (510)

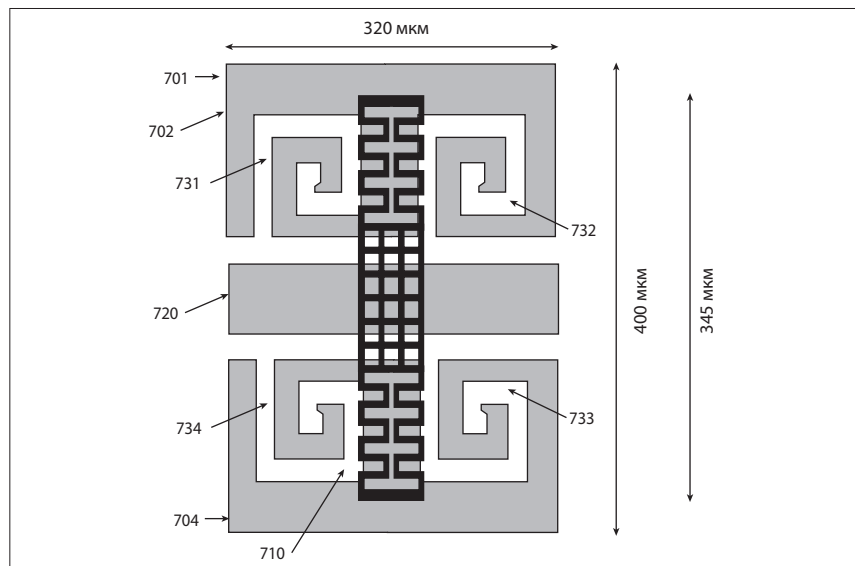
на рис. 6, и сформированная на структуре (701) плоскости заземления, длиной около 320 мкм и шириной около 400 мкм. В структуре заземляющей плоскости (701) предусмотрена сигнальная линия (720) между двумя заземляющими плоскостями (702) и (704). В примере, представленном на рис. 8, DGS формирует четыре спиральных паза (731), (732), (733), (734) в сетке 2×2 и имеет зеркало симметрии вдоль продольной оси сигнальной линии (720). Каждая из спиральных прорезей имеет



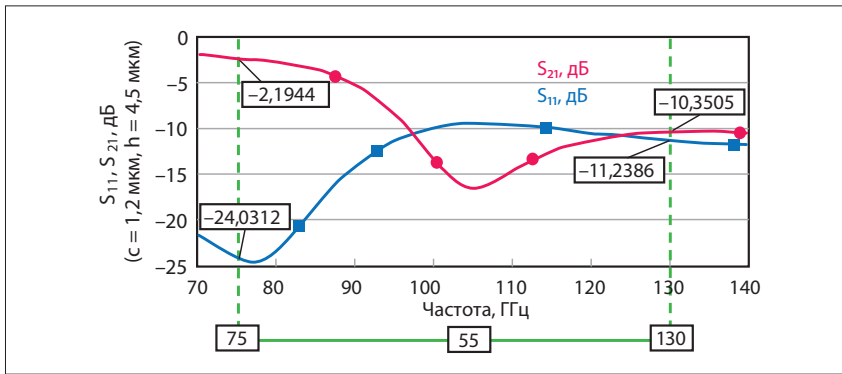
▲ Рис. 6. Вид сверху емкостного шунтирующего емкостного МЭМС-переключателя, использующего змееобразную структуру для подключения мембраны



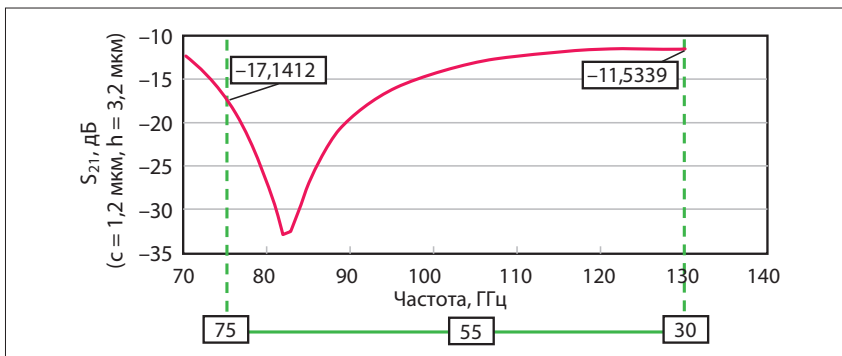
▲ Рис. 7. Зависимость характеристики изоляции от частоты предоставленного на рис. 6 МЭМС-переключателя



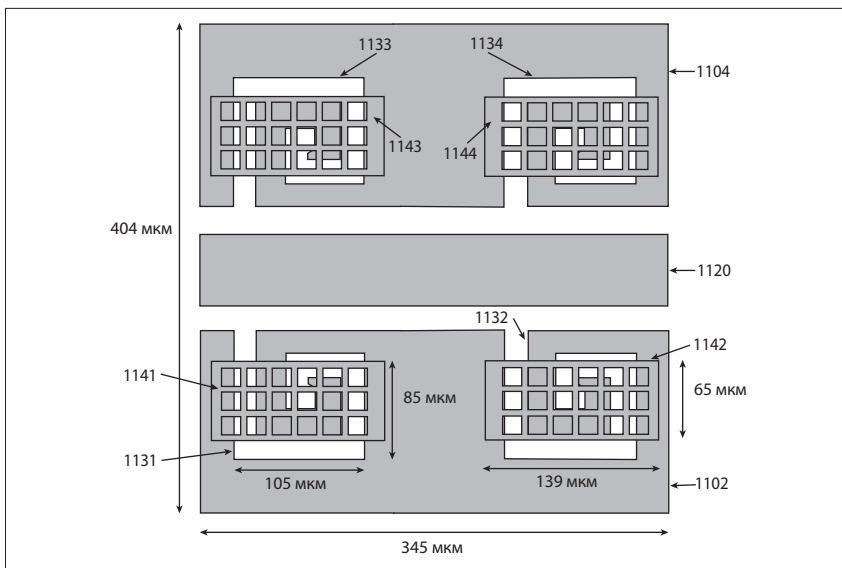
▲ Рис. 8. Вид сверху MEMS-переключателя с включением в его структуру DGS



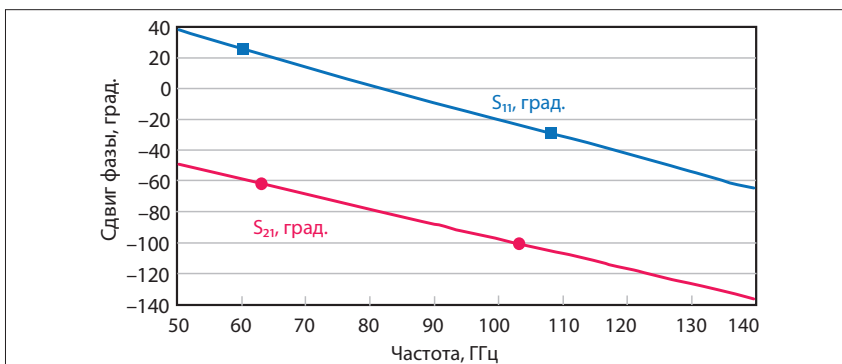
▲ Рис. 9. Зависимость вносимых и обратных потерь от частоты активированного МЭМС-переключателя, показанного на рис. 8



▲ Рис. 10. Зависимость характеристики изоляции МЭМС-переключателя, предоставленного на рис. 8



▲ Рис. 11. Вид сверху вариантов MEMS-переключателей с включением в их структуру DGS вторичных MEMS-переключателей



▲ Рис. 12. Зависимость сдвига фазы для прямой и отраженной волны от частоты для копланарной линии МЭМС-переключателя без DGS

одинаковую ширину. Вносимые и обратные потери переключателя, изображенно на рис. 8, в случае, когда переключатель замкнут, показаны на рис. 9.

Типичные вносимые потери составляют 2,2 дБ на частоте 75 ГГц и 10,4 дБ на частоте 130 ГГц, но падают до 16,6 дБ на частоте 105 ГГц. Обратные потери составляют около 24 дБ на 75 ГГц и около 11,2 дБ на 130 ГГц, но возрастают примерно до 9,5 дБ на 105 ГГц. На рис. 10 дана зависимость изоляции МЭМС-переключателя на основе DGS, показанного на рис. 7. Изоляция составляет около -17,1 дБ на 75 ГГц и около -11,5 на 130 ГГц и имеет пик примерно до -32,5 дБ на частоте 82 ГГц.

Хотя характеристики изоляции переключателя на рис. 8 демонстрируют улучшение, более высокие вносимые потери ограничивают возможности применения этого решения. Чтобы уменьшить вносимые потери, на рис. 11 представлены варианты структур DGS.

МЭМС-переключатель на рис. 11 аналогичен по структуре переключателю, который мы видим на рис. 8. Но в отличие от последнего, модифицированный МЭМС-переключатель имеет две заземляющие поверхности (1102), (1104), разделенные пополам сигнальной линией (1120), и содержит четыре DGS-структуры (1131), (1132), (1133) и (1134), сформированные в заземляющих плоскостях. Длина заземляющих поверхностей и сигнальной линии составляет около 340 мкм, а общая ширина переключателя — около 404 мкм. Кроме того, новый переключатель отличается от показанного на рис. 8 тем, что каждая из структур DGS имеет вторичный МЭМС-переключатель (1141), (1142), (1143), (1144), расположенный над структурой DGS. Форма вторичного переключателя и DGS может быть прямоугольной, но вторичный переключатель может быть длиннее, а структура DGS — шире.

В приведенном примере каждая структура DGS представляет собой перфорированную решетку длиной около 105 мкм и шириной около 85 мкм, на которую накладывается вторичный переключатель длиной около 139 мкм и шириной 65 мкм. Кроме того, модифицированный МЭМС-переключатель имеет подложку (1101), на которой сформирована заземляющая пластина. Заземляющий слой имеет толщину или высоту около 2 мкм. Хотя это не показано, в структуре (1131) DGS в плоскости заземления сформированы прорези, которые могут иметь глубину, равную высоте плоскости заземления (1102). Между мембраной и расположенным ниже DGS есть воздушный зазор размером около 1 мкм, а толщина мембраны (1151) может составлять около 1,2 мкм.

Мембрана (1151) на рис. 11 активируется исполнительным механизмом (не показан), напряжение активации

подаются к плоскости (1102) заземления через элементы (1162) и (1164). Величина напряжения, приложенного к переключателю (1101), может плавно изменяться. Таким образом, емкостные характеристики структуры DGS и, соответственно, ее влияние на основной МЭМС-переключатель устройства, можно изменять или настраивать.

В ходе исследований было обнаружено, что компоненты такого МЭМС-переключателя ведут себя как метаматериал (искусственный материал). Это можно увидеть, проанализировав фазы передачи и отражения сигнальной линии, сформированной в компланарном волноводе без структуры DGS, показанной на рис. 11, а затем проанализировать уже фазы передачи и отражения той же сигнальной линии со структурой DGS.

Результаты оценки зависимости фазового сдвига прямой и отраженной волны, передаваемой по копланарному волноводу без структуры DGS в полосе частот миллиметрового диапазона 50–140 ГГц, показаны на рис. 12. Как можно видеть, сдвиг фазы прямой и обратной волны имеет, в общем, одинаковый характер.

На рис. 13 мы видим графики, описывающие сдвиги фазы для прямой и отраженной волны в той же полосе частот, что и ранее, для МЭМС-переключателя, показанного на рис. 11, в случае когда переключатель замкнут. Но здесь дается фазовая характеристика для того же копланарного волновода, но уже со структурой DGS, встроенной в волновод на высоте 2,2 мкм (обратите внимание, что в [1–3] здесь и далее имеются разночтения, часть графиков, описывающих фазовые характеристики, указана не в градусах, а в дБ).

Как можно видеть на рис. 13, фазы для прямой и отраженной волны от частоты МЭМС-переключателя не смещаются одинаково в полосе частот и даже в некоторой области меняют направления, в конечном итоге пересекая друг друга на частоте 85 ГГц, а затем вновь пересекаясь на частоте 96 ГГц. На рис. 14 отображена зависимость сдвига фазы для прямой и отраженной волны от частоты МЭМС-переключателя от частоты для копланарной линии МЭМС-переключателя с DGS-структурой на высоте 2,8 мкм.

Изменение в поведении вносимых и обратных потерь МЭМС-переключателя с DGS-структурой на высоте 2,8 мкм по существу одинаково до частоты примерно 110 ГГц, но затем на частотах выше 115 ГГц графики начинают сдвигаться в противоположных направлениях и пересекаются между собой на частоте примерно 128 ГГц. Таким образом, можно сделать вывод, что резонансная частота структуры DGS изменяется в зависимости от высоты воздушного зазора между заземляющим слоем и мембраной.

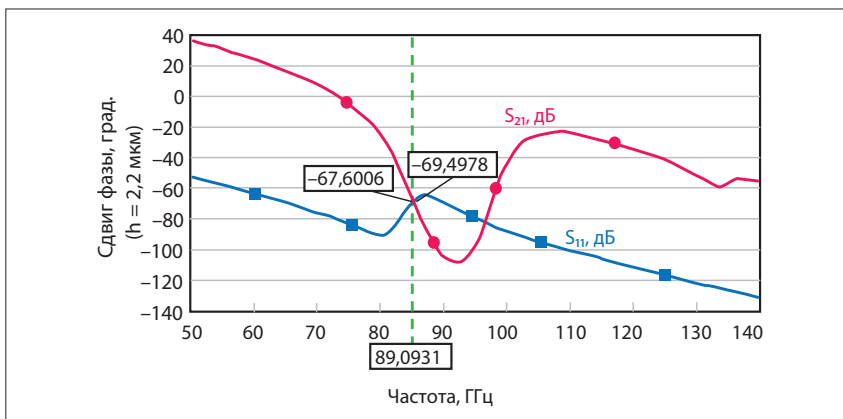
На рис. 15 показан график характеристики изоляции для пяти вторичных переключателей, расположенных над структурами DGS на разной высоте. Из графиков видно, что резонансная частота конструкции сдвигается в сторону более высоких частот по мере увеличения воздушного зазора между заземляющим слоем и мембраной.

В качестве примера на рис. 16 и 17 показан шунтирующий емкостной МЭМС-переключатель со структурами DGS и наложенными вторичными переключателями. Первичный шунтирующий переключатель (1710) расположен сверху, соединен с первой и второй плоскостями (1702), (1704) заземления и соединяет их

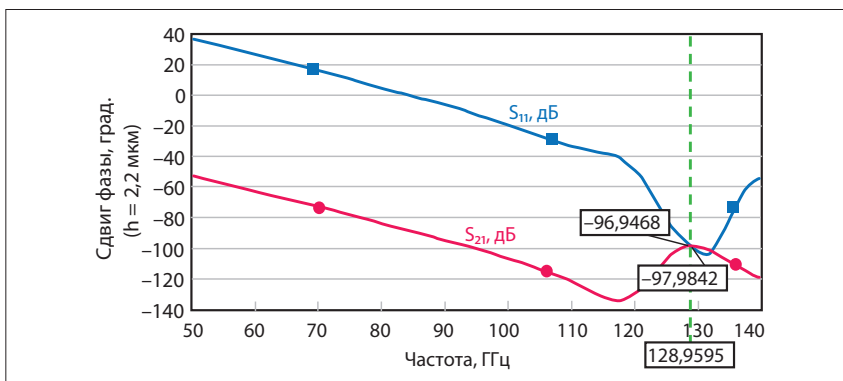
между собой. Перпендикулярный шунтирующий переключатель (1710) проходит перпендикулярно сигнальной линии (1720) и подвешен над ней.

### НОВЫЙ МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛА

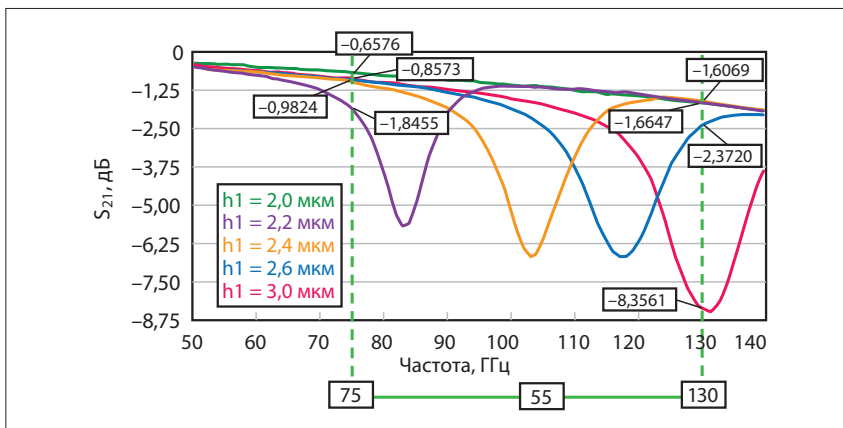
На рис. 18 приведен пример компоновки МЭМС-переключателя на основе метаматериалов, показывающий соединения между первичным переключателем (1910) и вторичными переключателями (1941–1944), первым исполнительным механизмом (1962) и вторым исполнительным механизмом (1964). Первый исполнительный механизм (1962) соединен с первичным переключателем (1910)



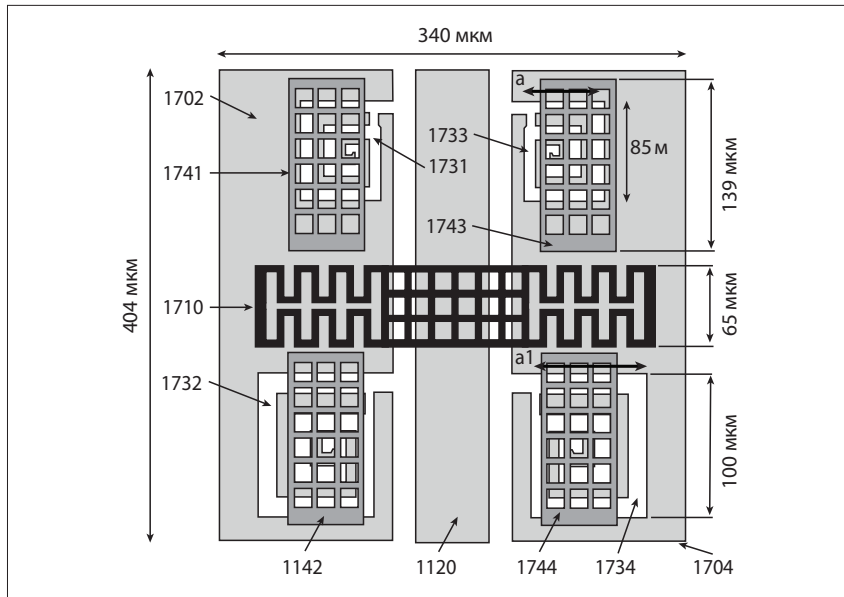
▲ Рис. 13. Зависимость сдвига фазы для прямой и отраженной волны от частоты МЭМС-переключателя для копланарного волновода с DGS, показанного на рис. 11, в зависимости от частоты



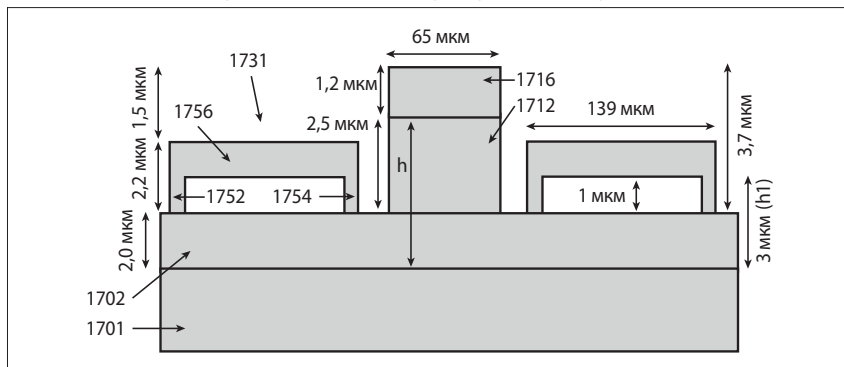
▲ Рис. 14. Зависимость сдвига фазы для прямой и отраженной волны от частоты МЭМС-переключателя для копланарного волновода с DGS, показанного на рис. 11, для высоты 2,8 мкм, в зависимости от частоты



▲ Рис. 15. Зависимость характеристики изоляции МЭМС-переключателя, предоставленного на рис. 11, для разных значений высоты размещения мембраны над слоем заземления



▲ Рис. 16. Вид сверху МЭМС-переключателя, выполненного в соответствии с идеей новой конструкции с использованием метаматериала, имеющего DGS и четыре вторичных МЭМС-переключателя



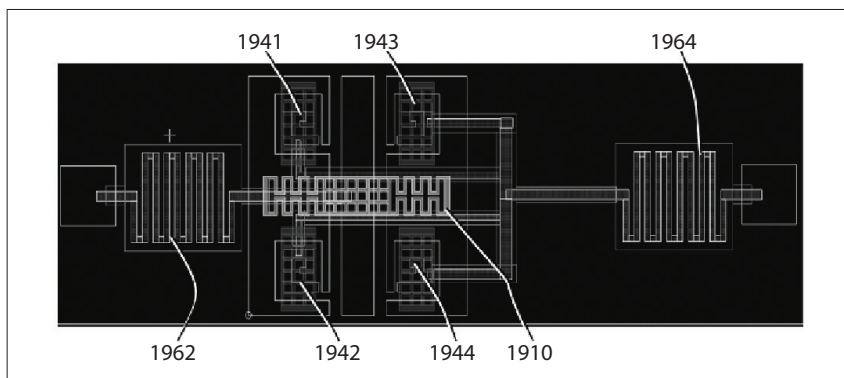
▲ Рис. 17. Вид сбоку МЭМС-переключателя, выполненного в соответствии с идеей новой конструкции с использованием метаматериала, имеющего DGS и четыре вторичных МЭМС-переключателя

и сконфигурирован для подачи напряжения смещения на первичный переключатель. Второй привод (1964) подключен к каждому из вторичных переключателей (1941–1944) и сконфигурирован для подачи напряжения смещения на вторичные переключатели [4].

Первичный переключатель, показанный на рис. 18, может быть включен, когда напряжение смещения подается от первого исполнительного механизма (1962), или отключен, если напряжение не подается.

Когда первичный переключатель включен, мембрана первичного переключателя отклоняется вниз, что приводит к увеличению шунтирующей емкости, которая блокирует распространение радиочастотных сигналов по сигнальной линии (1920). Когда первичный переключатель выключен, шунтирующая емкость резко уменьшается, позволяя РЧ-сигналам распространяться по сигнальной линии (1920).

Когда первичный переключатель (1910) выключен, то для того чтобы све-



▲ Рис. 18. Пример внутренней структуры МЭМС-переключателя, выполненного с использованием метаматериала

сти на нет влияние структур DGS на вносимые и возвратные потери, вторичные переключатели (1941–1944) могут быть включены. Напряжение смещения подается от второго исполнительного механизма (1964) к каждому из вторичных переключателей (1941–1944), тем самым заставляя переключатели отклоняться вниз к структурам DGS и создавать шунтирующую емкость, блокирующую эффекты структуры DGS.

На рис. 19 показаны характеристики обратных потерь и вносимых потерь для МЭМС-переключателя, изображенного на рис. 18, в случае, когда первичный переключатель находится в выключенном положении, а вторичные переключатели включены.

Как можно видеть, на частоте 75 ГГц вносимые потери составляют всего около 0,6 дБ, а возвратные потери — около 21,1 дБ. На частоте 130 ГГц вносимые потери все еще относительно низки и составляют около 1,5 дБ, а возвратные потери также относительно низки и составляют 14,5 дБ. Возвращаясь к рис. 18, для случая, когда первичный переключатель (1910) включен, вторичные переключатели (1941–1944) могут быть выключены, чтобы воспользоваться преимуществами структур DGS для изоляции. Поскольку напряжение смещения не подается от второго исполнительного механизма на вторичные переключатели (1941–1944), переключатели остаются отделенными от структур DGS под ними воздушным зазором.

На рис. 20 показаны характеристики изоляции для МЭМС-переключателя, представленного на рис. 18, для случая, когда первичный переключатель включен, а вторичные выключены и используется та же структура DGS. Это приводит к значительному улучшению изоляции в относительно узком диапазоне, например менее 10 дБ, между 90 и 100 ГГц. На частоте 75 ГГц изоляция составляет около  $-23,1$  дБ, а на частоте 130 ГГц — около  $-23,9$  дБ и примерно на частоте 95 ГГц изоляция улучшается почти до  $-52$  дБ.

На рис. 21 и 22 показаны графики характеристик изоляции и вносимых потерь для МЭМС-переключателей, использующих различные структуры. Как можно видеть, конструкция из метаматериала приводит к общему улучшению изоляции в более широком диапазоне частот. Структура, представленная на рис. 15, обеспечивает улучшенную изоляцию на частоте около 84 ГГц (около  $-51$  дБ) и около 112 ГГц (около  $-59$  дБ) и не менее чем порядка  $-24$  дБ в диапазоне 75–130 ГГц. Характеристики вносимых потерь переключателя с DGS по сравнению с версиями обычного переключателя и метаматериала относительно хуже. Переключатель, обозначенный как «Тип 2» — это первая версия нового МЭМС-переключателя с емкостными контактами.

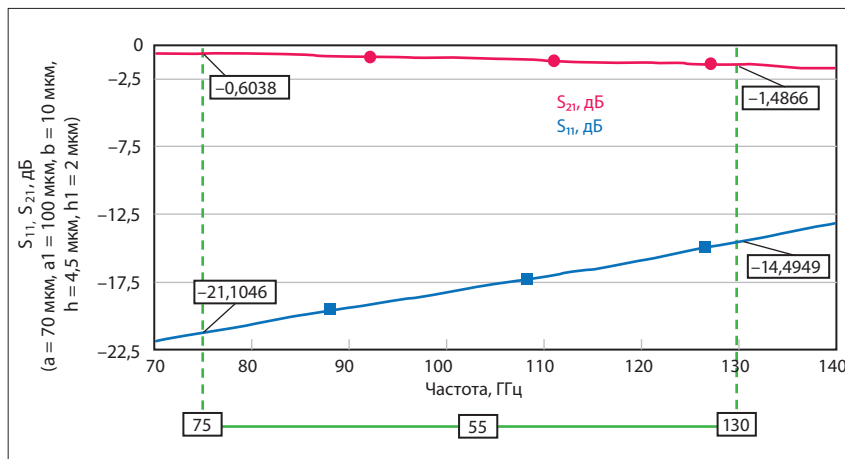
Как видно из характеристик затухания, приведенных на рис. 19 и 20, формирование структур DGS с емкостными шунтирующими МЭМС-переключателями над структурами DGS, является эффективным способом использования преимуществ DGS для улучшенной изоляции при блокировании радиочастотных сигналов, в то же время устраняя ущерб, причиненный DGS вносимым и обратным потерям при распространении радиочастотных сигналов. В этом отношении включение структур DGS и соответствующих шунтирующих переключателей приводит к улучшению эксплуатационных характеристик МЭМС-переключателей радиочастотного диапазона в области СВЧ. В таблице 2 представлены сводные характеристики напряжения срабатывания, изоляции и вносимых потерь для описанных выше конструкций переключателей с воздушными зазорами (и высотой мембраны) около 2,5 мкм [4].

На рис. 23 показаны характеристики изоляции для нескольких переключателей, имеющих разные схемы DGS, и вторичных переключателей, в которых срабатывают оба переключателя.

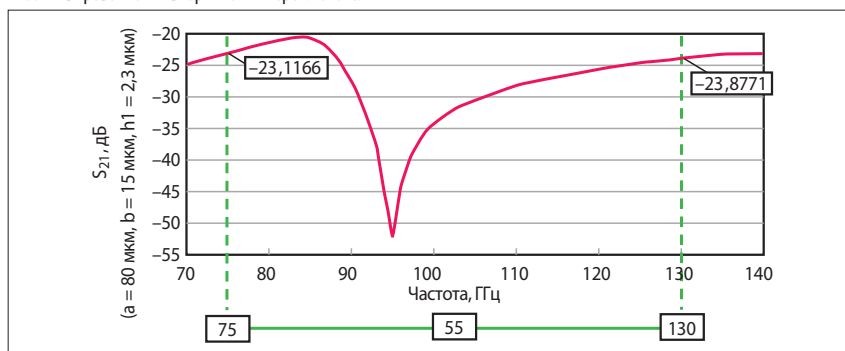
Как можно видеть, включение вторичного переключателя приводит к улучшенным характеристикам изоляции в узкой полосе частот. Полоса, в которой происходит улучшенная изоляция, изменяется в зависимости от высоты воздушного зазора между переключателями и структурами DGS. По мере увеличения воздушного зазора полоса частот, в которой достигается лучшая изоляция переключателя, смещается вверх. Для воздушного зазора 2,2 мкм изоляция около -52 дБ достигается на частоте около 85 ГГц, а для воздушного зазора 3,0 мкм изоляция около -44 дБ достигается на частоте около 122 ГГц. Это демонстрирует относительную гибкость предлагаемой комбинации структур DGS с вторичными переключателями для обеспечения улучшенной развязки в широком диапазоне высоких частот.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

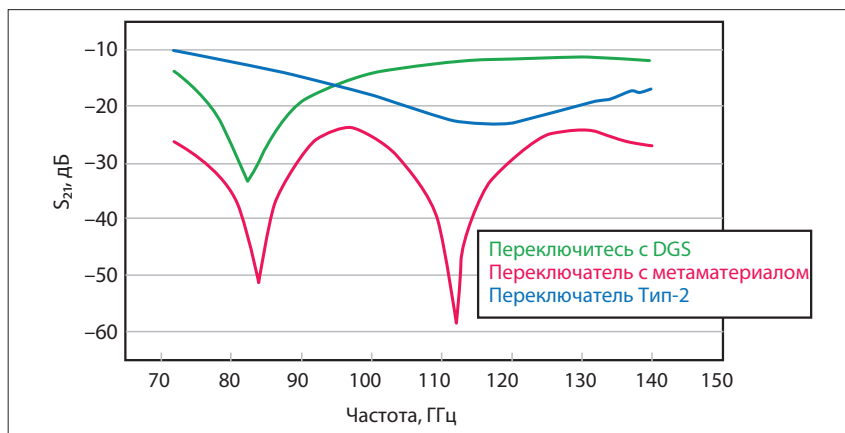
В статье на примере исследований сотрудников компании Synergy Microwave Corporation (США) [15], работающих над перспективными продуктами в области СВЧ-техники, которые пополнят портфель компании в ближайшем будущем, показано, что как структуры DGS, так и вторичные переключатели могут улучшить вносимые потери и изоляцию МЭМС-переключателей СВЧ-диапазона. Эти улучшения контрастируют с компромиссами, обычно наблюдаемыми при использовании либо только шунтирующего переключателя (хорошие вносимые потери, плохая изоляция), либо только структуры DGS (улучшенная изоляция, но худшие вносимые потери). Предлагаемая комбинация первичного шунтирующего



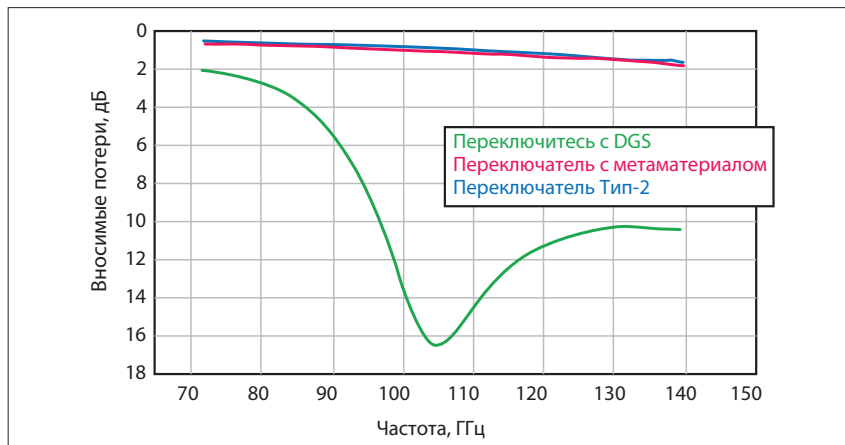
▲ Рис. 19. Зависимость характеристики изоляции МЭМС-переключателя, предоставленного на рис. 18, с активированными вторичными переключателями



▲ Рис. 20. Зависимость характеристики изоляции от частоты для МЭМС-переключателя, предоставленного на рис. 18, в выключенном состоянии с активированными вторичными переключателями



▲ Рис. 21. Зависимость характеристики изоляции МЭМС-переключателей разных топологий в зависимости от частоты



▲ Рис. 22. Характеристики вносимых потерь для МЭМС-переключателей разных топологий в зависимости от частоты

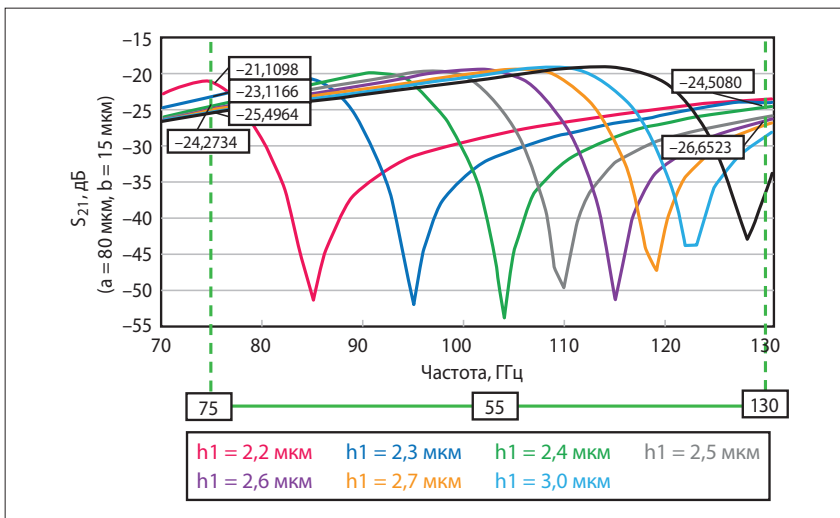
Таблица 2. Сравнение характеристик емкостных МЭМС-переключателей

Параметр	МЭМС-переключатель (рис. 3 и 4)	МЭМС-переключатель (рис. 6)	МЭМС-переключатель + DGS (рис. 8)	МЭМС-переключатель + DGS с переключателями (рис. 18)
Напряжение активации, В	37	17	17	17
Изоляция в полосе частот 75–130 ГГц, дБ	-12...-19	-15...-24	-11...-32	-24...-59
Вносимые потери, дБ	0,74	0,6	-2...-11	0,6
Материал	Молибден	Золото	Золото	Золото
Высота мембраны, мкм	2,5	2,5	2,5	2,5

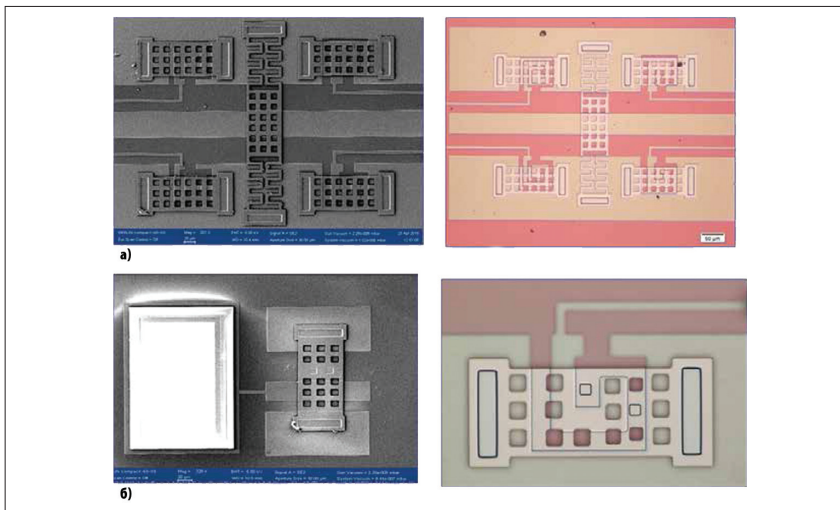
переключателя, структур DGS и вторичных шунтирующих переключателей (рис. 24), как показано, ведет себя как метаматериал. В дополнение к этому решению оно также улучшает устойчивость к залипанию

МЭМС-переключателя за счет применения слоев метаматериала в конструкции контактов переключателя. Последнее подробно рассмотрено в [3] и выходит за рамки данной статьи. Серийные варианты емкостных

МЭМС-переключателей, ведущих компаний в этой области СВЧ-техники, представлены на рис. 25. Дополнительная общая информация по МЭМС-переключателям доступна в [14].



▲ Рис. 23. Характеристики изоляции для различных вариантов конструктивного исполнения МЭМС-переключателя



▲ Рис. 24. Изображение сканирующего электронного и оптического микроскопа: а) первичного; б) вторичных шунтирующих переключателей. Завершенная практическая реализация перспективного продукта компании Synergy Microwave Corporation, США



▲ Рис. 25. Корпусированные МЭМС-переключатели: а) 2SMES-01 с электростатическим приводом фирмы Omron; б) с пьезоэлектрическим приводом фирмы Advantest; в) МЭМС-переключатель фирмы Omron, герметизированный стекляннной пластиной [12]

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. United States Patent Koul et al. Microelectromechanical Switch with Metamaterial Contacts, Patent No. US 10,784,066 B2. Date of Patent: Sep. 22, 2020. [www.patents.google.com/patent/US10784066B2/en?inventor=Shiban+K.+Koul&oq=Shiban+K.+Koul](http://www.patents.google.com/patent/US10784066B2/en?inventor=Shiban+K.+Koul&oq=Shiban+K.+Koul)
2. Koul S. K., Mahajan C. A Microelectromechanical Switch with Metamaterial Contacts, Part I: Concepts and Technology. C. A. R. E., Indian Institute of Technology, Delhi, India and Ajay K. Poddar and Ulrich L. Rohde, Synergy Microwave Corp., Paterson, N. J. [www.microwavejournal.com/articles/33940-a-microelectromechanical-switch-with-metamaterial-contacts-part-i-concepts-and-technology?v=preview](http://www.microwavejournal.com/articles/33940-a-microelectromechanical-switch-with-metamaterial-contacts-part-i-concepts-and-technology?v=preview)
3. Innovative Concepts in MEMS Switches with Metamaterial Contacts. [www.microwavejournal.com/articles/34574-innovative-concepts-in-mems-switches-with-metamaterial-contacts](http://www.microwavejournal.com/articles/34574-innovative-concepts-in-mems-switches-with-metamaterial-contacts)
4. Koul S., Poddar A., Rohde U. Microelectromechanical Switch with Metamaterial Contacts. US Patent Pub. No. 02161415A1.
5. Lambrecht A. The Casimir Effect: a Force from Nothing. Physics World, September 2002.
6. Intravaia F., Henkel C. New Frontiers of Casimir Force Conference. Santa Fe, New Mexico, 2009.
7. Leonhardt U., Philbin T. G. Quantum Levitation by Left-Handed Metamaterials//New Journal of Physics. 2007. Vol. 9.
8. Mercado L. et. al. A Mechanical Approach to Overcome RF MEMS Switch Stiction Problem. ECTC 2003.
9. Mahajan C. Design and Analysis of RF MEMS Switches (70 GHz to 130 GHz), M. Tech dissertation. CARE, IIT Delhi, May 2018.
10. Рентюк В. 5G и миллиметровые волны//СВЧ-электроника. 2019. № 4.
11. Рентюк В. От структуры сигналов к ММО: пять важных моментов для понимания проблем 5G New Radio//Беспроводные технологии. 2020. № 1.
12. Кочемасов В., Майстренко А. СВЧ-переключатели на основе МЭМС//СВЧ-электроника. 2016. № 1.
13. Khandelwal M. K., Kanaujia B. K., Kumar S. Defected Ground Structure: Fundamentals, Analysis, and Applications in Modern Wireless Trends. [www.hindawi.com/journals/ijap/2017/2018527](http://www.hindawi.com/journals/ijap/2017/2018527)
14. Сысоева Светлана. Высокочастотные МЭМС-ключи. Технологии и применения//Компоненты и технологии. 2011. № 11.
15. [www.synergymwave.com/](http://www.synergymwave.com/)