

УДК 621.3

РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ С “ПЛАВАЮЩИМ” ЭЛЕКТРОДОМ

© 2023 г. М. О. Морозов^{1, 2, *}, И. В. Уваров^{1, **}¹Ярославский филиал Физико-технологического института имени К.А. Валиева РАН,
ул. Университетская, 21, Ярославль, 150007 Россия²Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова,
ул. Советская, 14, Ярославль, 150003 Россия

*E-mail: matvey19991@mail.ru

**E-mail: i.v.uvarov@bk.ru

Поступила в редакцию 28.07.2023 г.

После доработки 10.09.2023 г.

Принята к публикации 10.09.2023 г.

Переключатели, изготовленные по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), рассматриваются в качестве перспективной элементной базы радиоэлектроники. Основной характеристикой МЭМС-переключателя является отношение емкостей в замкнутом и разомкнутом состоянии. В изделиях стандартной конфигурации оно составляет несколько единиц, но может быть существенно увеличено за счет оригинальных конструкторских решений. Работа посвящена переключателю, представляющему собой комбинацию устройств емкостного и резистивного типа. Рассматриваются его рабочие характеристики в зависимости от свойств подложки и контактного сопротивления. Ключ обеспечивает отношение емкостей 27.7 и 46.1 при использовании подложек из сапфира и боросиликатного стекла, в то время как высокоомный кремний не позволяет достичь значений выше 7.4 вследствие большой паразитной емкости. Изоляция и вносимые потери составляют 14.7–19.4 и 0.8–1.1 дБ в диапазоне частот 4–10 ГГц на сапфировой подложке. Приемлемые S-параметры достигаются при сопротивлении контакта балки с электродом не более 1 Ом.

Ключевые слова: МЭМС-переключатель, плавающий потенциал, отношение емкостей, паразитная емкость, изоляция, вносимые потери, контактное сопротивление

DOI: 10.31857/S0544126923600239, **EDN:** RBDGZW

1. ВВЕДЕНИЕ

МЭМС-переключатель представляет собой электромеханическое реле, уменьшенное до микронных размеров за счет применения технологий микроэлектроники [1]. Он способен обеспечить низкие вносимые потери и высокую изоляцию в сочетании с малыми габаритами, высокой скоростью переключения и низким энергопотреблением [2]. Выдающиеся рабочие характеристики позволяют рассматривать МЭМС-ключи в качестве альтернативы традиционно применяемым электромагнитным и полупроводниковым реле и создают широкую перспективу использования в передовых системах связи [3–5], радиолокации [6–8] и других областях радиоэлектроники. МЭМС-переключатели делятся на два класса, отличающиеся типом контакта. Резистивные устройства формируют контакт металл–металл, в то время как в емкостных ключах образуется контакт металл–диэлектрик–металл. Второй класс более предпочи-

телен для многих приложений, поскольку имеет лучшие характеристики на высоких частотах коммутируемого сигнала [9].

Емкостной МЭМС-переключатель представляет собой подвижную балку микронного размера, расположенную над линией передач. В исходном состоянии между ними имеется воздушный зазор. Емкость C_{up} такой системы мала, поэтому сигнал проходит по линии с минимальными потерями. Подача напряжения на управляющие электроды создает электростатическую силу, под действием которой балка изгибается и приходит в контакт с диэлектрическим покрытием линии. Образуется конденсатор относительно большой емкости C_{down} , шунтирующий линию и препятствующий прохождению сигнала. Основной характеристикой ключа является отношение емкостей в нижнем и верхнем положениях C_{down}/C_{up} , которое должно иметь максимально возможную

величину. В изделиях стандартной конфигурации оно составляет несколько единиц [10–12] и не обеспечивает требуемый эффект переключения. Множество работ направлено на увеличение отношения емкостей путем увеличения C_{down} и уменьшения C_{up} . Как правило, для поднятия C_{down} применяются диэлектрики с высокой проницаемостью, такие как Ta_2O_5 ($\epsilon = 32$) [13, 14] или HfO_2 ($\epsilon = 20$) [15, 16]. Дополнительный эффект дает уменьшение шероховатости диэлектрического слоя, позволяющее балке плотнее прилегать к линии передач [17]. Недостатком этих методов является усложнение технологии изготовления ключа и увеличение адгезионных сил, приводящее к залипанию. Снижение C_{down} достигается за счет увеличения зазора между балкой и линией [18, 19], но негативным последствием такого подхода является рост напряжения срабатывания.

Указанные методы увеличивают отношение емкостей до нескольких десятков, существенно улучшая характеристики ключа. Тем не менее, существует более эффективный способ, заключающийся в использовании электрода с плавающим потенциалом. Этот подход рассматривается в нескольких работах и обещает рост $C_{\text{down}}/C_{\text{up}}$ до нескольких сотен [20–26]. Однако в большинстве случаев приводимые оценки получены при весьма низком значении C_{up} порядка 10 фФ и не учитывают паразитную емкость линии передач, контактных площадок и других элементов изделия. В настоящей работе рассматривается МЭМС-переключатель, оснащенный “плавающим” электродом. Целью является оценка эффективности указанного метода с учетом реальной конструкции чипа. Анализируются емкостные характеристики, изоляция и вносимые потери в зависимости от свойств материала подложки. Выявляется оптимальный материал и исследуется влияние контактного сопротивления на работу изделия.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

МЭМС-переключатель схематично изображен на рис. 1. Он был спроектирован на основе резистивного ключа, оснащенного механизмом активного размыкания контактов [27]. Подвижным электродом служила алюминиевая балка длиной 100 мкм, закрепленная на торсионных подвесах. На нижней стороне балки располагались контактные выступы. Под каждым ее плечом находились управляющие и коммутируемые электроды. Балка и один из коммутируемых электродов были заземлены. Другой электрод представлял собой линию передач, на которой поверх диэлектрического слоя была сформирована тон-

кая металлическая пластина. В исходном состоянии балка располагалась горизонтально, как показано на рис. 1а. Потенциал пластины являлся плавающим. Емкость системы балка-линия была мала, поэтому сигнал проходил с входа на выход переключателя с минимальными потерями (ключ открыт). Подача напряжения $V_{\text{pull-in}}$ на электрод управления приводила балку в контакт с пластиной, как показано на рис. 1б, и их потенциалы выравнивались. Емкость между балкой и линией существенно возрастала и шунтировала линию передач, препятствуя прохождению сигнала (ключ закрыт). При отключении напряжения балка возвращалась в исходное положение под действием силы упругости подвесов. В случае залипания напряжение подавалось на противоположный электрод управления, создавая дополнительную размыкающую силу.

Линия передач схематично показана на рис. 2. Она представляла собой симметричную копланарную структуру с центральным проводником шириной $w_l = 150$ мкм и двумя заземленными проводниками шириной $w_g = 100$ мкм, расположенными на расстоянии $w_d = 90$ мкм от центрального проводника. Материалом линии служил рутений толщиной 100 нм, покрытый слоем алюминия толщиной 1 мкм. Алюминий отсутствовал лишь в месте расположения плавающего электрода, который также изготавливался из рутения и имел толщину $t_e = 100$ нм. Ширина электрода совпадала с шириной проводника, а длина составляла $l_e = 400$ мкм. Диэлектрический слой был выполнен из оксида кремния с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3.9$ и имел толщину $t_d = 50$ нм. Характеристический импеданс линии составлял 50 Ом. Балка встраивалась в один из заземленных проводников и замыкала его на центральный проводник при срабатывании. Однако сигнал мог частично проходить через линию, образованную центральным и противоположным заземленным проводником. С целью улучшения изоляции в конструкцию были добавлены две рутениевые перемычки, соединяющие боковые проводники вблизи переключателя. Алюминиевая металлизация проходила над перемычками на расстоянии 1.5 мкм. В такой конфигурации сигнальный проводник симметрично замыкался на оба заземленных проводника.

Рабочие характеристики переключателя рассчитывались методом конечных элементов. Модель изображена на рис. 3а. Она представляла собой подложку латеральным размером 9.6×4.3 мм и толщиной 460 мкм, покрытую изолирующим слоем SiO_2 толщиной 1 мкм. Материалом подложки служил кремний, сапфир или боросили-

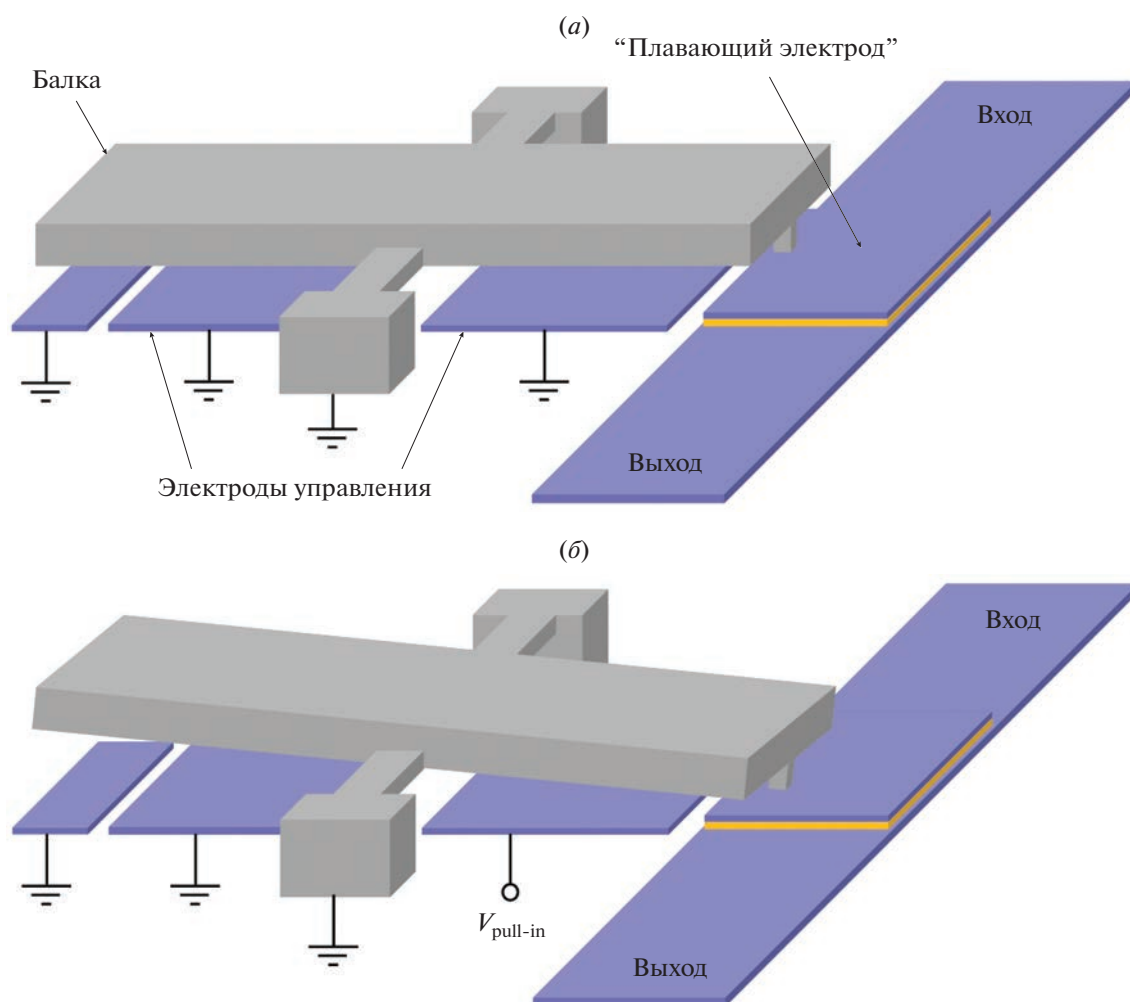


Рис. 1. Переключателя в открытом (а) и закрытом (б) состоянии.

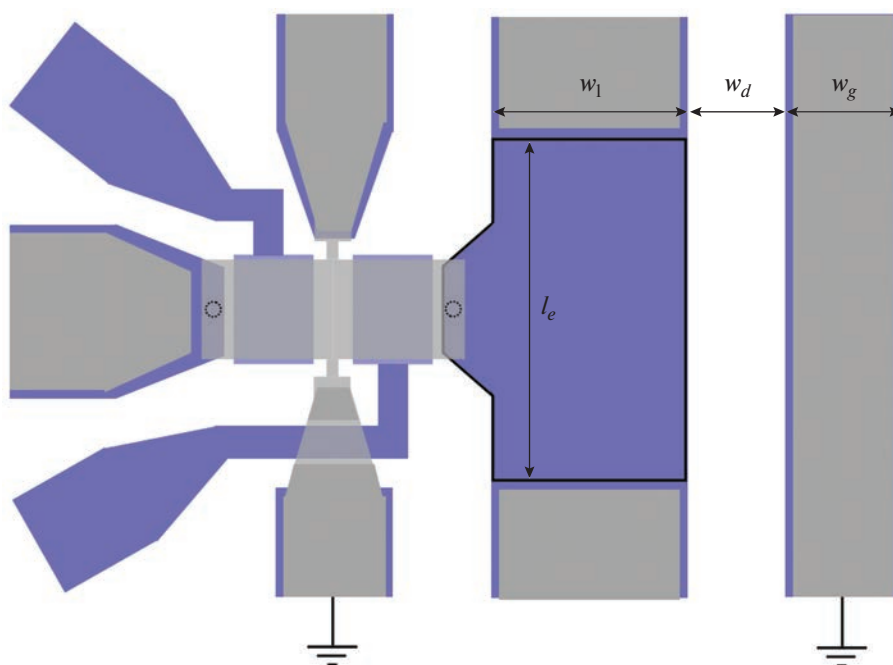


Рис. 2. Переключатель, встроенный в линию передач, вид сверху.

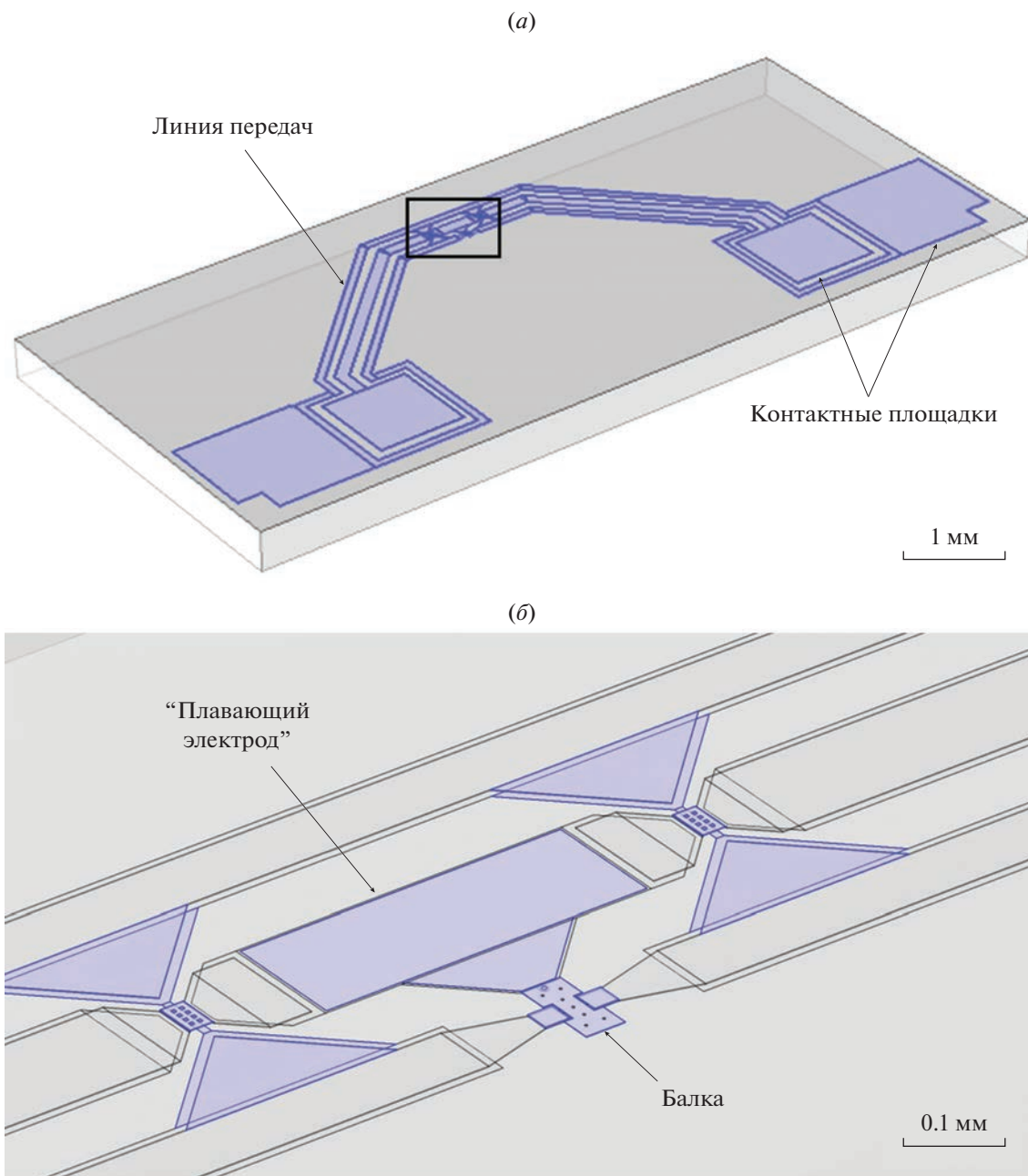


Рис. 3. Модель чипа: (а) общий вид; (б) крупный план участка с балкой и электродом.

катное стекло. На изолирующем слое была сформирована линия передач длиной 7.2 мм с контактными площадками размером 1×1 мм для центрального проводника и 1.4×1.4 мм для заземленных проводников. Относительно большой размер площадок был обусловлен необходимостью приварки электрических выводов. “Плавающий” электрод, балка и перемычки показаны на рис. 3б. Контакт балки с электродом создавался путем увеличения высоты контактного выступа.

Важно отметить, что управляющие электроды и заземленный коммутируемый электрод не были включены в модель с целью сокращения времени расчетов.

Модель была разбита на 7×10^5 конечных элементов тетраэдрической формы. Расчет емкости между сигнальным проводником и землей осуществлялся путем подачи переменного напряжения амплитудой 1 В и частотой 300 кГц на сигнальный проводник. Емкость вычислялась из

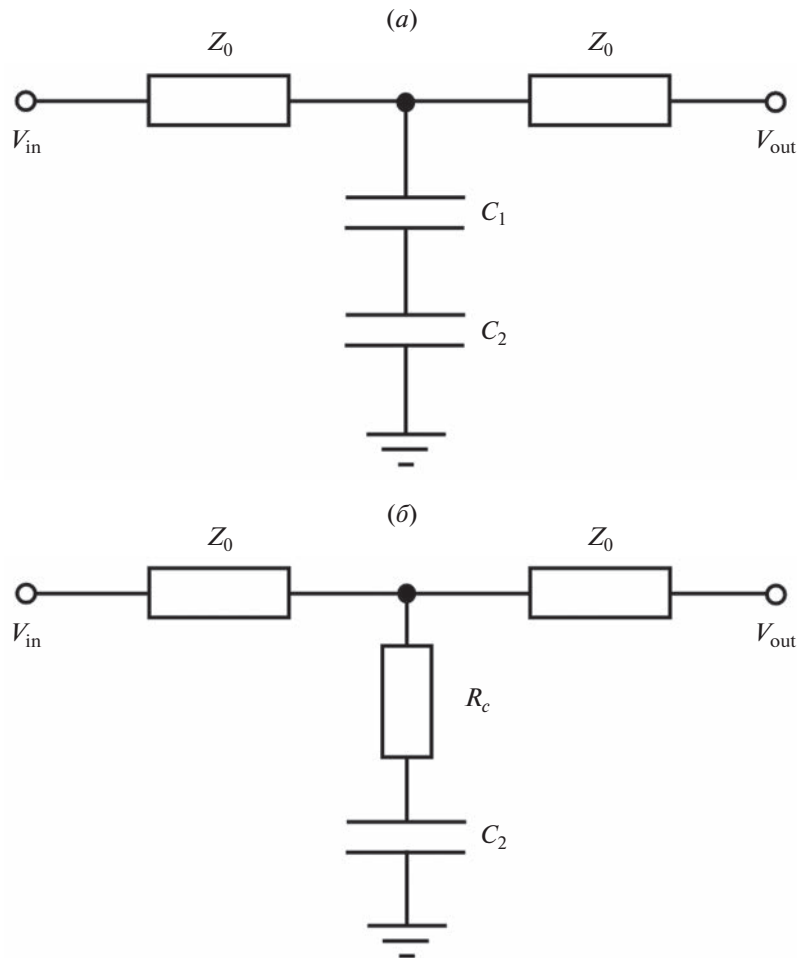


Рис. 4. Эквивалентная схема переключателя в открытом (а) и закрытом (б) состоянии.

комплексной проводимости двухполюсника для гармонического сигнала. Расчет изоляции и вносимых потерь осуществлялся с помощью упрощенной модели, в которой отсутствовали контактные площадки, а поперечная электромагнитная волна подавалась на торцы проводников.

3. ОТНОШЕНИЕ ЕМКОСТЕЙ

Эквивалентная схема переключателя в открытом состоянии представлена на рис. 4а. Ключ был эквивалентен двум последовательно соединенным конденсаторам. Первый был образован балкой и “плавающим” электродом и имел емкость:

$$C_1 = \epsilon_0 \frac{S}{g - t_d - t_e} = 0.3 \text{ фФ}, \quad (1)$$

где $S = 40 \text{ мкм}^2$ — площадь перекрытия балки с электродом, $g = 1.5 \text{ мкм}$ — расстояние между балкой и нижним слоем рутения. Электрод и линия

передач служили обкладками второго конденсатора:

$$C_2 = \epsilon_0 \epsilon \frac{l_e w_l}{t_d} = 40.4 \text{ пФ}. \quad (2)$$

Поскольку $C_1 \ll C_2$, результирующую емкость можно было оценить следующим образом:

$$C_{\text{уп}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \approx C_1. \quad (3)$$

В закрытом состоянии балка соприкасалась с электродом, формируя контакт металл—металл. Электрод заземлялся, а емкость C_1 менялась на контактное сопротивление R_c , как показано на эквивалентной схеме (рис. 4б). Следовательно, емкость C_{down} равнялась C_2 . Отношение емкостей можно было записать в виде:

$$\frac{C_{\text{down}}}{C_{\text{уп}}} = \frac{C_2}{C_1} = \epsilon \frac{l_e w_l}{S} \frac{g - t_d - t_e}{t_d} = 1.5 \times 10^5. \quad (4)$$

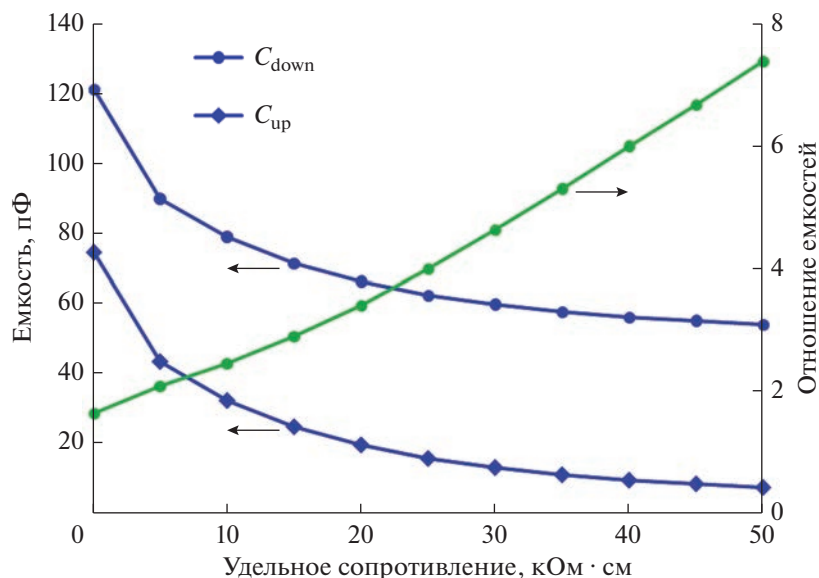


Рис. 5. Зависимость емкостных характеристик переключателя от удельного сопротивления кремниевой подложки.

Таким образом, величина C_{down}/C_{up} определялась не только свойствами диэлектрика и толщинами слоев, но также латеральными размерами ключа. По сравнению с классическим изделием, устройство с “плавающим” электродом имело дополнительные возможности для увеличения отношения емкостей. Так, протяженность электрода l_e вдоль линии передач могла быть увеличена в широких пределах. Однако стоит отметить, что исследуемый ключ не являлся емкостным в чистом виде, а представлял собой комбинацию емкостного и резистивного устройств. Для корректного функционирования контактное сопротивление должно быть мало и не препятствовать прохождению сигнала на землю.

Согласно выражению (4), отношение емкостей было весьма велико и на несколько порядков превышало C_{down}/C_{up} для переключателей стандартной конфигурации. Однако формулы (1) и (2) не учитывали паразитную емкость, обусловленную реальной конструкцией чипа и способную существенно повлиять на функционирование изделия. Зависимость емкостных характеристик от удельного сопротивления ρ кремниевой подложки, рассчитанная методом конечных элементов, представлена на рис. 5. Легированный Si с относительно низким $\rho = 12 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ обеспечивал $C_{down} = 120.9 \text{ пФ}$ и $C_{up} = 74.2 \text{ пФ}$. Эти значения существенно превышали результат аналитических расчетов благодаря значительному вкладу паразитной составляющей. Следствием большой величины C_{up} было весьма низкое отношение емко-

стей 1.6. С ростом ρ паразитная емкость снижалась. Для высокоомного Si сопротивлением $50 \text{ кОм} \cdot \text{см}$ C_{down} и C_{up} составляли 53.9 и 7.3 пФ. При этом отношение емкостей увеличилось до 7.4. Важно отметить, пластины со столь высоким сопротивлением являются достаточно редкими и имеют высокую стоимость. Более доступная высокоомная подложка с $\rho = 5 \text{ кОм} \cdot \text{см}$ обеспечивала $C_{down} = 89.4 \text{ пФ}$, $C_{up} = 43.2 \text{ пФ}$ и $C_{down}/C_{up} = 2.1$. Таким образом, кремниевые пластины не позволяли добиться сверхвысокого отношения емкостей.

Альтернативой кремнию являлись диэлектрические подложки, среди которых для рассмотрения были выбраны сапфир и боросиликатное стекло Borofloat 33. Свойства материалов и емкостные характеристики переключателя представлены в табл. 1. Сапфир увеличивал C_{down}/C_{up} до 27.7 за счет уменьшения C_{up} до 1.8 пФ. Паразитная емкость снижалась на несколько пикофарад по сравнению с кремнием благодаря увеличению ρ на несколько порядков и некоторому снижению ϵ . Стекло Borofloat 33 давало лучший результат, несмотря на существенно меньшее удельное сопротивление. Емкость в открытом состоянии составляла 1.0 пФ, а отношение емкостей достигало 46.1. Причиной улучшения характеристик являлась вдвое меньшая диэлектрическая проницаемость стекла по сравнению с сапфиром. Разность емкостей в закрытом и открытом состоянии составляла 46.7 пФ. Эта величина не зависела от типа подложки и определялась размерами “плавающего” электрода. Она

Таблица 1. Свойства подложек и емкостные характеристики переключателя

Материал	ϵ	ρ , Ом · см	C_{down} , пФ	C_{up} , пФ	$C_{\text{down}}/C_{\text{up}}$
Низкоомный Si	11.7	12	120.9	74.2	1.6
Высокоомный Si	11.7	5×10^3	89.4	43.2	2.1
Высокоомный Si	11.7	50×10^3	53.9	7.3	7.4
Сапфир	9.3	10^{16}	48.4	1.8	27.7
Borofloat 33	4.6	10^8	47.7	1.0	46.1

превышала аналитическое значение на несколько пикофард вследствие наличия дополнительного геометрического элемента трапецевидной формы, подводящего электрод под балку.

Диэлектрические подложки увеличивали $C_{\text{down}}/C_{\text{up}}$ до нескольких десятков, что заметно превышало этот показатель для стандартных ключей [10–12]. Однако сверхвысокое значение в несколько сотен не достигалось, поскольку паразитная емкость чипа не позволяла снизить C_{up} . Дальнейший рост отношения емкостей требовал изменения размеров изделия, в частности, уменьшения длины линии передач, сокращения площади контактных площадок и корректировки расстояния между проводниками. Можно также было увеличить размер “плавающего” электрода с целью наращивания C_{down} . Однако изменение размеров чипа находилось за рамками настоящей работы.

4. ИЗОЛЯЦИЯ И ВНОСИМЫЕ ПОТЕРИ

Следующим этапом выполнялось моделирование параметра S_{21} в открытом и закрытом состоянии переключателя. Исследуемый диапазон частот коммутируемого сигнала f составлял от 1 до 20 ГГц. Расчет проводился для всех материалов подложки, представленных в табл. 1, за исключением кремния с удельным сопротивлением 50 кОм · см. Этот материал был исключен из рассмотрения в виду труднодоступности. Вносимые потери описывают ослабление сигнала при прохождении через открытый ключ. Выраженная в децибелах, эта величина должна быть максимально близка к нулю. Низкоомный кремний обеспечивал наибольшие вносимые потери среди исследуемых подложек, см. рис. 6а. Затухание превышало 7.5 дБ и возрастало с частотой сигнала, достигая 24.3 дБ при $f = 20$ ГГц. Высокоомный Si обеспечивал существенно меньшее затухание. На нижней границе диапазона оно составляло 0.7 дБ и монотонно увеличивалось с частотой, достигая 2.2 дБ при $f = 20$ ГГц. Для подложки из сапфира наблюдалась схожая зависимость S_{21} от f . Вносимые по-

тери не превышали 2.2 дБ во всем диапазоне. Стекло обеспечивало несколько лучший результат, максимальное затухание составляло 2.0 дБ на частотах 14–15 ГГц. В диапазоне 4–10 ГГц, используемом радиолокационными системами, вносимые потери составляли 0.7–1.2 дБ.

Изоляция описывает затухание сигнала в закрытом переключателе и должна иметь максимально большую величину. Низкоомный Si обеспечивал наилучшую изоляцию среди исследуемых подложек на всем частотном диапазоне, за исключением начального участка, см. рис. 6б. Однако большие вносимые потери делали этот материал непригодным для переключателя. Как и в случае вносимых потерь, высокоомный Si и сапфир имели схожую зависимость S_{21} от f . Для этих подложек было характерно ухудшение изоляции с частотой, но сапфир имел небольшое преимущество. В диапазоне 4–10 ГГц затухание убывало с 19.4 до 14.7 дБ для сапфира и с 18.5 до 14.6 дБ для кремния. Боросиликатное стекло обеспечивало заметно лучшую изоляцию, уменьшающуюся с 21.4 до 18.9 дБ. Однако на высоких частотах затухание приближалось к таковому для сапфира и составляло 10–11 дБ. Таким образом, в целевом диапазоне 4–10 ГГц все исследуемые подложки, за исключением низкоомного Si, обеспечивали изоляцию выше минимально допустимого значения, равного 14 дБ.

Высокоомный кремний и сапфир обеспечивали близкие значения изоляции и вносимых потерь, несмотря на существенное различие в отношении емкостей. Стекло Borofloat 33 давало несколько лучшие значения S-параметров в целевом диапазоне 4–10 ГГц, но, в целом, все три материала обеспечивали приемлемый результат и подходили для МЭМС-переключателя. Следовательно, выбор подложки мог осуществляться из соображений технологии и доступности на рынке. Стекло Borofloat 33 производится за рубежом, поэтому кремний и сапфир более предпочтительны.

Выше было отмечено, что переключатель с “плавающим” электродом представлял собой со-

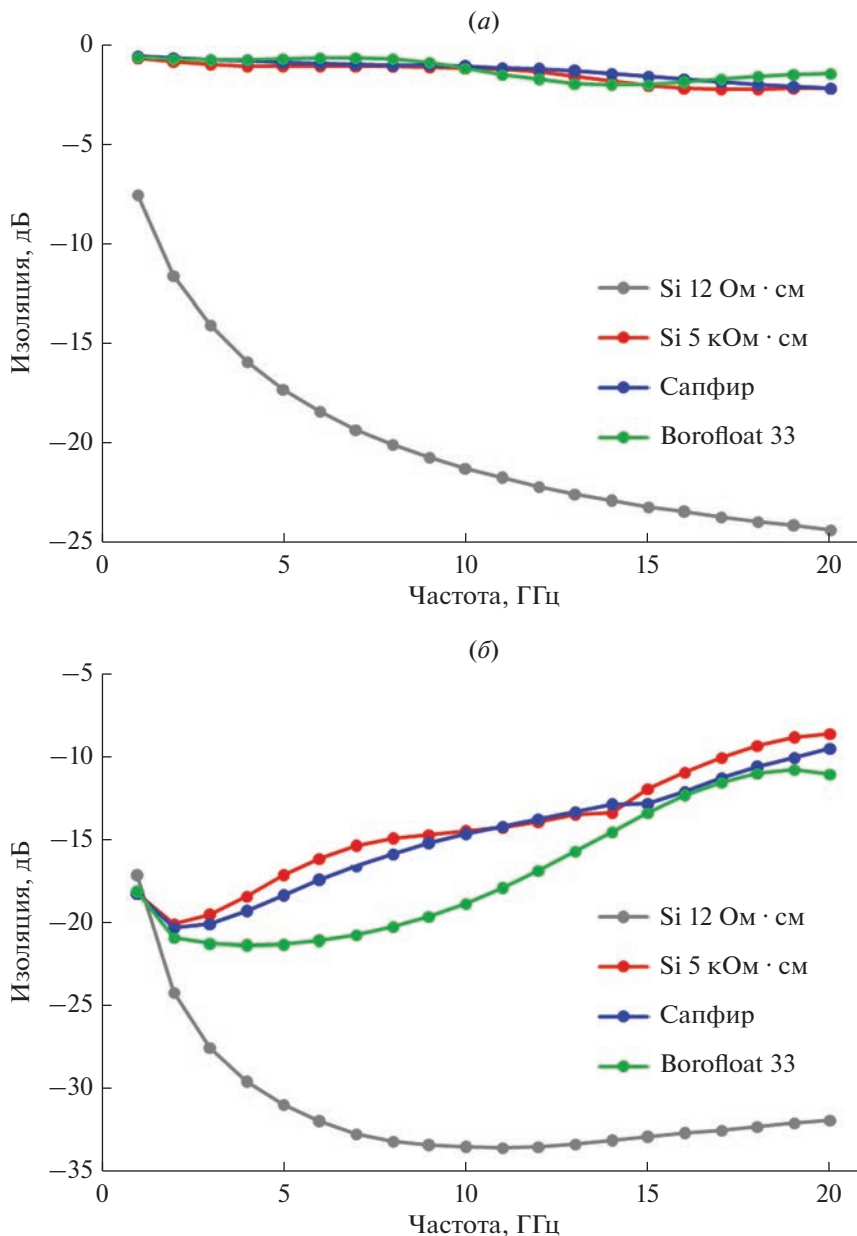


Рис. 6. Зависимость вносимых потерь (а) и изоляции (б) от частоты коммутируемого сигнала.

четание емкостного и резистивного устройств. В закрытом состоянии его шунтирующая способность определялась не только емкостью C_{down} , но и сопротивлением контакта балки с электродом R_c , что иллюстрируется эквивалентной схемой на рис. 4б. Представленные выше S-параметры были получены для случая, когда балка и электрод соединялись между собой цилиндрическим контактным выступом, изображенным на рис. 7. Он был выполнен из алюминия и имел радиус $r_c = 1.35$ мкм и высоту $h_c = g - t_d - t_e = 1.35$ мкм.

Электрическое сопротивление выступа играло роль сопротивления контакта балки с “плавающим” электродом R_c . При удельном сопротивлении алюминия $\rho = 2.6 \times 10^{-6}$ Ом·см [28] оно составляло $R_c = (\rho h_c)/(\pi r_c^2) = 6$ мОм. Столь малое сопротивление развивают МЭМС-переключатели относительно больших габаритов благодаря увеличенной силе прижима [29–31]. В устройствах, схожих с представленным ключом по размеру подвижного электрода, сопротивление обычно составляет порядка 1 Ом [32–36] и может

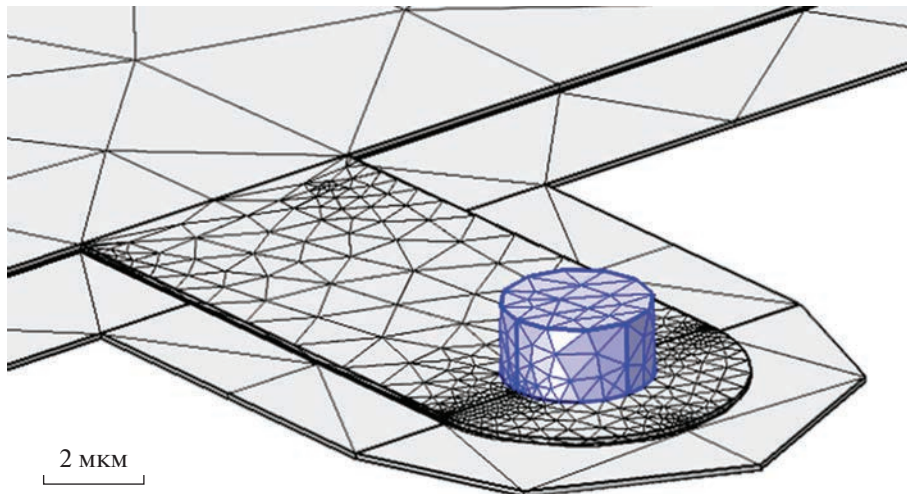


Рис. 7. Сетка конечных элементов в области контакта балки с электродом. Выступ обозначен синим цветом.

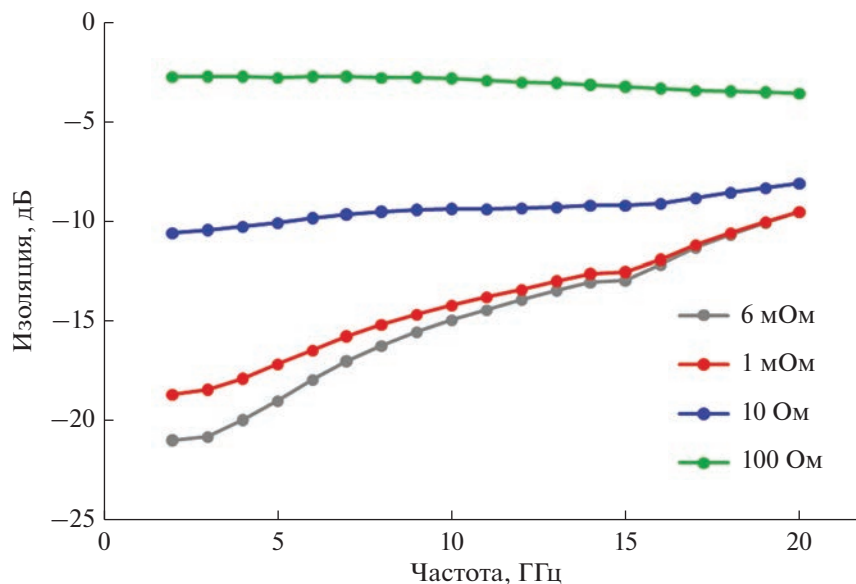


Рис. 8. Зависимость изоляции от частоты коммутируемого сигнала для разных значений контактного сопротивления.

достигать нескольких сотен Ом в случае загрязнения контактов [27]. Изоляция переключателя для разных значений R_c представлена на рис. 8. В качестве подложки использовался сапфир. Контактное сопротивление задавалось путем изменения удельного сопротивления материала выступа. Увеличение R_c до 1 Ом приводило к некоторому ухудшению изоляции. Эффект был наиболее заметен вблизи нижней границы исследуемого диапазона, где спад изоляции составлял около 2.5 дБ. На частотах 17–20 ГГц эффект был минимален. В диапазоне 4–10 ГГц затухание составляло от

17.9 до 14.2 дБ и имело допустимую величину. Однако с ростом сопротивления до 10 Ом ухудшения изоляции становилось существенным. Затухание составляло около 10 дБ во всем диапазоне частот. При $R_c = 100$ Ом изоляция снижалась до 3 дБ.

Чтобы определить сопротивление, обеспечивающее допустимый уровень изоляции, была построена зависимость параметра S_{21} от R_c , показанная на рис. 9. Расчеты были выполнены для частот 4 и 10 ГГц. В диапазоне сопротивления от 0.001 до 0.1 Ом изоляция сохранялась на постоянном уровне около 20 и 15 дБ. С ростом сопротив-

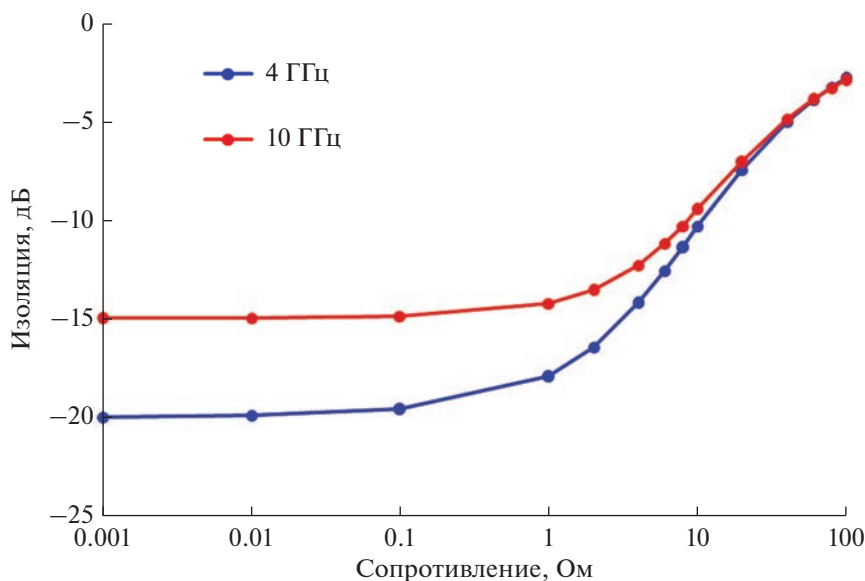


Рис. 9. Зависимость изоляции от контактного сопротивления для разных значений частоты коммутируемого сигнала.

ления выше 100 мОм затухание монотонно ослабевало. На низкой частоте оно принимало значение более 14 дБ при $R_c \leq 4$ Ом. На высокой частоте затухание было слабее и находилось на допустимом уровне при $R_c \leq 1$ Ом. Таким образом, сопротивление контакта балки с «плавающим» электродом не должно было превышать 1 Ом. Это значение является достижимым для МЭМС-переключателя с контактами из широко используемых материалов, включая золото и рутений [32–36].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен МЭМС-переключатель, представляющий собой комбинацию устройств емкостного и резистивного типа. Он был спроектирован на основе переключателя, оснащенного механизмом активного размыкания. Подвижным электродом являлась алюминиевая балка длиной 100 мкм, закрепленная на торсионных подвесах. Она встраивалась в один из заземленных проводников копланарной линии передач и приходила в контакт с электродом, расположенным на диэлектрическом покрытии сигнального проводника. Согласно аналитическим расчетам, отношение емкостей в закрытом и открытом состоянии должно было иметь сверхвысокую величину порядка 10^5 . Моделирование методом конечных элементов прогнозировало значительно меньшее значение, составляющее 1.6 для подложки из низкоомного кремния и увеличивающееся до 7.4 с ростом удельного сопротивления до 50 кОм · см. Использование диэлектрических подложек из

сапфира и боросиликатного стекла увеличивало C_{down}/C_{up} до 27.7 и 46.1 соответственно, благодаря большому удельному сопротивлению и низкой диэлектрической проницаемости по сравнению с Si. Переключатель значительно превосходил стандартные изделия по отношению емкостей, но сверхвысокое значение не достигалось. Причиной являлась достаточно большая паразитная емкость чипа, превышающая 1 пФ. Тем не менее, в диапазоне частот 4–10 ГГц переключатель обеспечивал приемлемые вносимые потери 0.7–1.2 дБ и изоляцию более 14 дБ. Высокоомный Si, сапфир и боросиликатное стекло давали близкие значения S-параметров, но стекло имело некоторое преимущество. Сапфир занимал промежуточное положение и был наиболее подходящим материалом подложки ввиду наличия отечественного производства. Обязательным условием функционирования ключа являлось малое сопротивление контакта балки с электродом, не превышающее 1 Ом. Рост сопротивления выше этой величины приводил к существенному ухудшению изоляции. Результаты работы могут быть использованы для создания перспективных моделей реле на основе технологии МЭМС.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме FFNN-2022-0017.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rebeiz G.M.* RF MEMS: Theory, Design, and Technology. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 512 p.
2. *Rebeiz G.M., Patel C.D., Han S.K., Ko C.-H., Ho K.M.J.* The search for a reliable MEMS switch // *IEEE Microw. Mag.* 2013. V. 14. P. 57–67.
3. *Iannacci J.* RF-MEMS for high-performance and widely reconfigurable passive components – A review with focus on future telecommunications, Internet of Things (IoT) and 5G applications // *J. King Saud Univ. Science.* 2017. V. 29. P. 436–443.
4. *Shekhar S., Vinoy K.J., Ananthasuresh G.K.* Low-voltage high-reliability MEMS switch for millimeter wave 5G applications // *J. Micromech. Microeng.* 2018. V. 28. 075012.
5. *Ma L.-Y., Soin N., Daut M.H.M., Hatta S.F.W.M.* Comprehensive study on RF-MEMS switches used for 5G scenario // *IEEE Access.* 2019. V. 7. 107506.
6. *Xu Y., Tian Y., Zhang B., Duan J., Yan L.* A novel RF MEMS switch on frequency reconfigurable antenna application // *Microsyst. Technol.* 2018. V. 24. P. 3833–3841.
7. *Haupt R.L., Lanagan M.* Reconfigurable antennas // *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2013. V. 55. P. 49–61.
8. *Haider N., Caratelli D., Yarovoy A.G.* Recent developments in reconfigurable and multiband antenna technology // *Int. J. Antennas Propag.* 2013. V. 2013. 869170.
9. *Tian W., Li P., Yuan L.* Research and analysis of MEMS switches in different frequency bands // *Micromachines.* 2018. V. 9. 185.
10. *Grichener A., Rebeiz G.M.* High-reliability RF-MEMS switched capacitors with digital and analog tuning characteristics // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2010. V. 58. P. 2692–2701.
11. *Zareie H., Rebeiz G.M.* High-power RF MEMS switched capacitors using a thick metal process // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2013. V. 61. P. 455–463.
12. *Yang H.-H., Zareie H., Rebeiz G.M.* A high power stress-gradient resilient RF MEMS capacitive switch // *J. Microelectromech. Syst.* 2015. V. 24. P. 599–607.
13. *Persano A., Quaranta F., Martucci M.C., Creti P., Siciliano P., Cola A.* Transport and charging mechanisms in Ta₂O₅ thin films for capacitive RF MEMS switches application // *J. Appl. Phys.* 2010. V. 107. 114502.
14. *Persano A., Quaranta F., Cola A., De Angelis G., Marcelli R., Siciliano P.* Development of capacitive RF MEMS switches with TaN and Ta₂O₅ thin films // *Proc. SPIE.* 2011. V. 8066. 80660V-1.
15. *He X.J., Lv Z.Q., Liu B., Li Z.H.* High-isolation lateral RF MEMS capacitive switch based on HfO₂ dielectric for high frequency applications // *Sens. Actuators A.* 2012. V. 188. P. 342–348.
16. *Tsaur J., Onodera K., Kobayashi T., Wang Z.-J., Heisig S., Maeda R., Suga T.* Broadband MEMS shunt switches using PZT/HfO₂ multi-layered high *k* dielectrics for high switching isolation // *Sens. Actuators A.* 2005. V. 121. P. 275–281.
17. *Chen Z., Tian W., Zhang X., Wang Y.* Effect of deposition parameters on surface roughness and consequent electromagnetic performance of capacitive RF MEMS switches: a review // *J. Micromech. Microeng.* 2017. V. 27. 113003.
18. *Fouladi S., Mansour R.R.* Capacitive RF MEMS switches fabricated in standard 0.35-μm CMOS technology // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2010. V. 58. P. 478–486.
19. *Maninder K., Bansal D., Soni S., Singh S., Rangra K.J.* On characterization of symmetric type capacitive RF MEMS switches // *Microsyst. Technol.* 2019. V. 25. P. 729–734.
20. *Park J.Y., Kim G.H., Chung K.W., Bu J.U.* Monolithically integrated micromachined RF MEMS capacitive switches // *Sens. Actuators A.* 2001. V. 89. P. 88–94.
21. *Bansal D., Kumar A., Sharma A., Kumar P., Rangra K.J.* Design of novel compact anti-stiction and low insertion loss RF MEMS switch // *Microsyst. Technol.* 2014. V. 20. P. 337–340.
22. *Wei H., Deng Z., Guo X., Wang Y., Yang H.* High on/off capacitance ratio RF MEMS capacitive switches // *J. Micromech. Microeng.* 2017. V. 27. 055002.
23. *Han K., Guo X., Smith S., Deng Z., Li W.* Novel high-capacitance-ratio MEMS switch: design, analysis and performance verification // *Micromachines.* 2018. V. 9. 390.
24. *Swarnkar A., DasGupta A., Nair D.R.* Design, fabrication and characterization of RF MEMS shunt switch for wideband operation of 3 to 30 GHz // *J. Micromech. Microeng.* 2019. V. 29. 115009.
25. *Uvarov I.V., Marukhin N.V., Shlepakov P.S., Lukichev V.F.* Calculation of performance of MEMS-switch with increased capacitance ratio // *Russ. Microelectron.* 2020. V. 49. P. 253–262.
26. *Deng K., Yang F., Wang Y., Lai C., Han K.* Design and fabrication of a Ka band RF MEMS switch with high capacitance ratio and low actuation voltage // *Micromachines.* 2022. V. 13. 37.
27. *Uvarov I.V., Kupriyanov A.N.* Stiction-protected MEMS switch with low actuation voltage // *Microsyst. Technol.* 2019. V. 25. P. 3243–3251.
28. *Lide D.R.* CRC handbook of chemistry and physics, 90th edn. Boca Raton: CRC Press/Taylor and Francis, 2009. 2760 p.
29. *Kim S.-B., Yoon Y.-H., Lee Y.-B., Choi K.-W., Jo M.-S., Min H.-W., Yoon J.-B.* 4 W power MEMS relay with extremely low contact resistance: theoretical analysis, design and demonstration // *J. Microelectromech. Syst.* 2020. V. 29. P. 1304–1313.

30. *Kim S.-B., Min H.-W., Lee Y.-B., Kim S.-H., Choi P.-K., Yoon J.-B.* Utilizing mechanical adhesion force as a high contact force in a MEMS relay // *Sens. Actuators A*. 2021. V. 331. 112894.
31. *Seki T., Uno Y., Narise K., Masuda T., Inoue K., Sato S., Sato F., Imanaka K., Sugiyama S.* Development of a large-force low-loss metal-contact RF MEMS switch // *Sens. Actuators A*. 2006. V. 132. P. 683–688.
32. *Zareie H., Rebeiz G.M.* Compact high-power SPST and SP4T RF MEMS metal-contact switches // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2014. V. 62. P. 297–305.
33. *Yang H.-H., Yahiaoui A., Zareie H., Blondy P., Rebeiz G.M.* Symmetric and compact single-pole multiple-throw (SP7T, SP11T) RF MEMS switches // *J. Microelectromech. Syst.* 2014. V. 24. P. 685–695.
34. *Patel C.D., Rebeiz G.M.* A high-reliability high-linearity high-power RF MEMS metal-contact switch for DC–40-GHz applications // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2012. V. 60. P. 3096–3112.
35. *Patel C.D., Rebeiz G.M.* RF MEMS metal-contact switches with mN-contact and restoring forces and low process sensitivity // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2011. V. 59. P. 1230–1237.
36. *Stefanini R., Chatras M., Blondy P., Rebeiz G.M.* Miniature MEMS switches for RF applications // *J. Microelectromech. Syst.* 2011. V. 20. P. 1324–1335.