

УДК 621.3

## РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ С УВЕЛИЧЕННЫМ ОТНОШЕНИЕМ ЕМКОСТЕЙ

© 2020 г. И. В. Уваров<sup>а</sup>, \*, Н. В. Марухин<sup>б</sup>, П. С. Шлепаков<sup>а</sup>, В. Ф. Лукичев<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Ярославский филиал Физико-технологического института им. К.А. Валиева Российской АН,  
ул. Университетская, 21, Ярославль, 150007 Россия

<sup>б</sup>Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, ул. Советская, 14, Ярославль, 150003 Россия

<sup>с</sup>Физико-технологический институт им. К.А. Валиева Российской АН,  
Нахимовский пр-т, 36/1, Москва, 117218 Россия

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

Поступила в редакцию 29.12.2019 г.

После доработки 18.02.2020 г.

Принята к публикации 18.02.2020 г.

Представлен МЭМС-переключатель емкостного типа с электростатическим управлением. Подвижный электрод выполнен в форме балки, закрепленной с двух концов. Особенностью устройства является металлический электрод с плавающим потенциалом, позволяющий более чем на порядок увеличить отношение емкостей во включенном и выключенном состояниях по сравнению с классической конструкцией. Расчет рабочих характеристик переключателя выполнен методом конечных элементов. В качестве материала балки выбран алюминий, диэлектриком служит диоксид гафния. Конструкция обеспечивает сверхвысокое отношение емкостей, достигающее 7400. Напряжение срабатывания составляет от 7.5 до 58.0 В, в зависимости от выбранной геометрии. Быстродействие находится на микросекундном уровне. Недостатком переключателя является существенная деформация балки с изменением температуры. Предложены пути его преодоления.

**Ключевые слова:** МЭМС, переключатель, емкость, напряжение срабатывания, собственная частота, время срабатывания, температурная стабильность

**DOI:** 10.31857/S0544126920040110

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в мире интенсивно развивается беспроводная связь. Возрастают объем и скорость передачи данных. Разрабатываются радиолокационные системы для перспективных видов вооружений. В этих условиях приемопередающая радиоэлектронная аппаратура требует постоянной модернизации за счет использования передовых электронных компонентов. Базовыми компонентами систем связи и радиолокации являются переключатели (реле). Совершенствование традиционно используемых переключателей практически достигло своего предела. Электромеханические реле обеспечивают малые потери сигнала и хорошую изоляцию в широком диапазоне частот (от постоянного тока до СВЧ), однако имеют большие габариты, длительное время срабатывания (миллисекунды) и высокую потребляемую мощность (более 100 мВт) [1, 2]. Полупроводниковые изделия на основе рpn-диодов и полевых транзисторов имеют значительно меньшие размеры и энергопотребление, работают гораздо быстрее (время коммутации составляет наносекунды), но уступают в частотных характеристиках, особенно

на частотах выше 10 ГГц [3]. Таким образом, в настоящее время ощущается потребность в разработке переключателей нового типа, сочетающих в себе достоинства электромеханических и твердотельных реле.

Большие надежды возлагаются на переключатели, созданные по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) [4]. В таких устройствах балка микронных размеров приходит в контакт с линией передач, замыкая электрическую цепь. МЭМС-ключи обладают малыми габаритами, имеют энергопотребление на уровне 1 мВт и время срабатывания порядка 10 мкс, а по частотным характеристикам не уступают электромеханическим реле [5]. Эти изделия изготавливаются с использованием традиционных методов микроэлектроники, что дает возможность интегрировать их с другими электронными компонентами на подложках различных типов [6–8]. Благодаря выдающимся рабочим характеристикам МЭМС-ключи весьма привлекательны для использования в устройствах специального назначения, таких как адаптивные антенны [9–11] и матрицы переключателей для космической отрасли [12,

13]. Также рассматривается их применение в устройствах связи пятого поколения [14–16].

МЭМС-переключатели делятся на два основных класса: с емкостным и резистивным контактом. В устройстве емкостного типа балка контактирует с линией передач через тонкий слой диэлектрика. Такие переключатели недостаточно хорошо работают на низких частотах, но в диапазонах ВЧ и СВЧ они превосходят ключи с резистивным контактом. Поэтому емкостные устройства более предпочтительны для многих приложений. Основной характеристикой переключателя является отношение емкостей во включенном и выключенном состояниях  $C_{ON}/C_{OFF}$ . Чем выше этот параметр, тем эффективнее работает устройство. Поэтому разработчики стараются увеличить  $C_{ON}$  и уменьшить  $C_{OFF}$ . Как правило, для увеличения  $C_{ON}$  используются диэлектрики с высокой проницаемостью, такие как  $Ta_2O_5$  [17, 18] или  $HfO_2$  [19, 20]. Также положительный эффект дает уменьшение шероховатости диэлектрического слоя, позволяющее балке плотно прилегать к линии передач [21]. Уменьшить  $C_{OFF}$  можно за счет увеличения воздушного зазора между балкой и линией [22]. Однако наиболее эффективным методом увеличения отношения емкостей является использование металлического электрода с плавающим потенциалом [23–27]. В данной работе рассматривается МЭМС-переключатель, оснащенный таким электродом. Особенностью устройства является сверхвысокое отношение емкостей, превышающее 4000. По этому показателю предлагаемый ключ в несколько раз превосходит устройства, представленные в литературе. Моделирование переключателя выполняется методом конечных элементов. Исследуются CV-характеристика, напряжение срабатывания, время переключения, а также температурная стабильность рабочих характеристик.

## ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

Емкостной переключатель классической конфигурации схематично изображен на рис. 1а. Подвижным электродом является металлическая балка, закрепленная с помощью анкеров над линией передач. Балка заземлена. По обе стороны от линии передач располагаются управляющие электроды. Линия и электроды покрыты тонким слоем диэлектрика толщиной  $d$ , предотвращающим короткое замыкание. Эквивалентная схема устройства представлена на рис. 1б. Балка и линия передач образуют конденсатор, емкость которого зависит от положения балки. В выключенном состоянии обкладки разделены воздушным зазором  $g$ . Емкость  $C_{OFF}$  можно оценить следующим образом:

$$C_{OFF} = \epsilon_0 \frac{w_B w_L}{g + \frac{d}{\epsilon_r}} \approx \epsilon_0 \frac{w_B w_L}{g}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $\epsilon_r$  — диэлектрическая проницаемость изолятора,  $w_B$  и  $w_L$  — ширина балки и линии передач соответственно. Полагается, что емкость  $C_{OFF}$  мала, поэтому сигнал проходит по линии передач с минимальными потерями.

Подача напряжения на электроды управления создает электростатическую силу, притягивающую балку к электродам. При некотором значении напряжения, называемом напряжением срабатывания (pull-in voltage,  $V_{PI}$ ), балка приходит в контакт с линией передач, как это показано на рис. 1в. Во включенном состоянии емкость задается выражением:

$$C_{ON} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{w_B w_L}{d}. \quad (2)$$

Если емкость  $C_{ON}$  велика, сигнал проходит по балке на землю. Таким образом, переключатель имеет шунтирующую конфигурацию. При отключении напряжения балка возвращается в исходное состояние под действием силы упругости, и прохождение сигнала по линии передач восстанавливается.

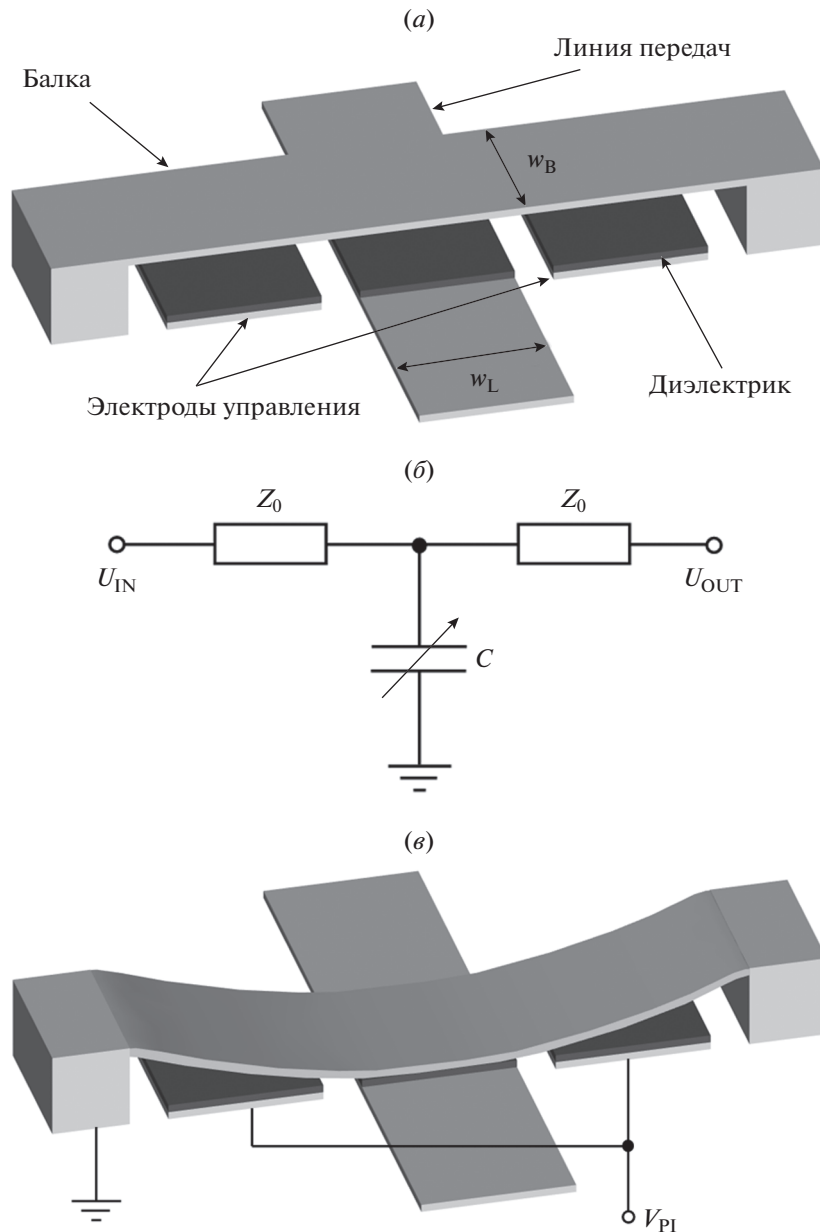
Используя выражения (1) и (2), найдем отношение емкостей:

$$\frac{C_{ON}}{C_{OFF}} = \epsilon_r \frac{g}{d}. \quad (3)$$

Для классического переключателя величина  $C_{ON}/C_{OFF}$  определяется свойствами диэлектрика и отношением толщин воздушного и диэлектрического слоев. Используя диэлектрики с высокой проницаемостью и конструкцию с увеличенным воздушным зазором, можно добиться отношения емкостей порядка 100. Однако в реальном устройстве площадь контакта балки с диэлектриком оказывается меньше расчетной вследствие шероховатости поверхностей. В результате величина  $C_{ON}/C_{OFF}$  снижается. Причем измеряемое значение может быть в несколько раз ниже расчетного [21].

Существенно увеличить отношение емкостей позволяет электрод с плавающим потенциалом. Переключатель, оснащенный таким электродом, представлен на рис. 2а. На линии передач поверх диэлектрика формируется тонкая металлическая пластина, потенциал которой в выключенном состоянии является плавающим. Эквивалентная схема переключателя в этом состоянии показана на рис. 2б. Система балка-линия представляет собой два последовательно соединенных конденсатора. Первый образуется линией передач и “плавающим” электродом. Он имеет емкость:

$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{w_E w_L}{d}, \quad (4)$$



**Рис. 1.** МЭМС-переключатель классической конфигурации: *а* – схематичное изображение в выключенном состоянии; *б* – эквивалентная схема ключа, где  $U_{IN}$  и  $U_{OUT}$  – уровни сигнала на входе и выходе линии передач,  $Z_0$  – ее волновое сопротивление,  $C$  – емкость системы балка/линия; *в* – устройство во включенном состоянии.

где  $w_E$  – продольный размер электрода. Электрод и балка служат обкладками второго конденсатора:

$$C_2 = \epsilon_0 \frac{w_B w_L}{g - d}. \quad (5)$$

Полагая  $C_1 \gg C_2$ , результирующую емкость можно оценить следующим образом:

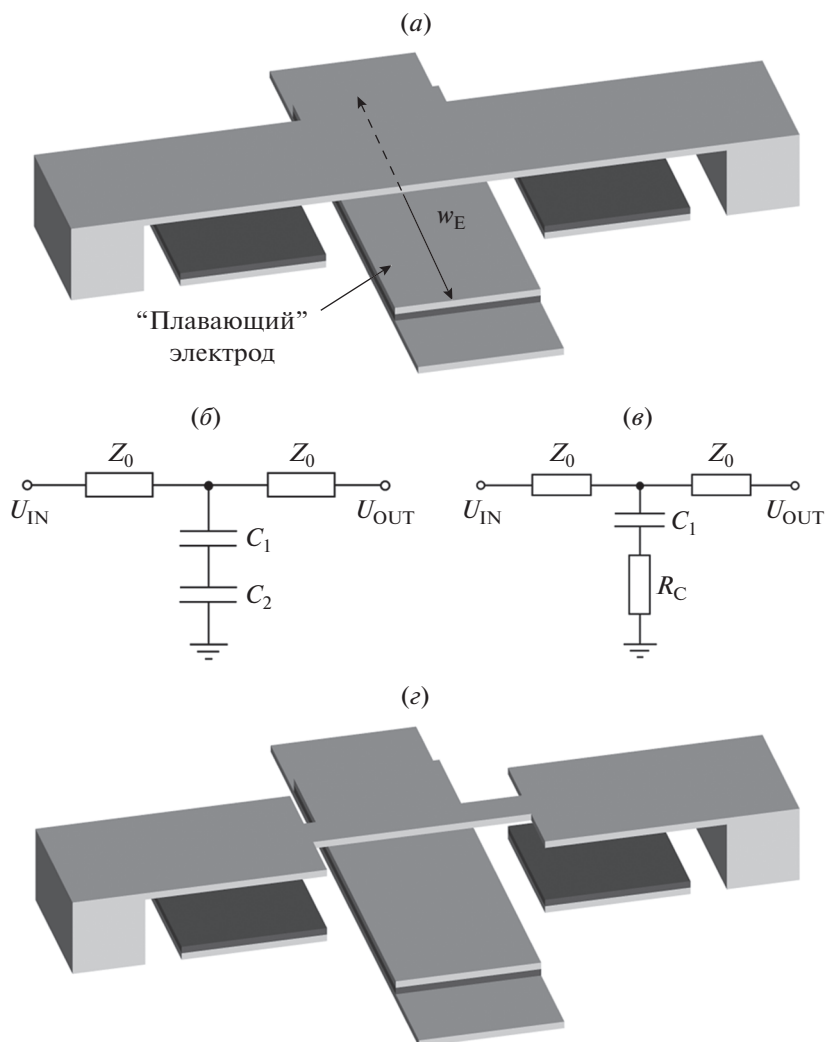
$$C_{OFF} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \approx C_2. \quad (6)$$

Во включенном состоянии балка соприкасается с электродом, формируется контакт металл-металл. При этом электрод заземляется, а емкость

$C_2$  заменяется на контактное сопротивление  $R_C$ , как это показано на эквивалентной схеме (рис. 2в). Емкость системы  $C_{ON}$  становится равной  $C_1$ . Следовательно, отношение емкостей может быть записано в виде:

$$\frac{C_{ON}}{C_{OFF}} = \epsilon_r \frac{g - d}{d} \frac{w_E}{w_B} \approx \epsilon_r \frac{g}{d} \frac{w_E}{w_B}. \quad (7)$$

Таким образом, величина  $C_{ON}/C_{OFF}$  определяется не только свойствами диэлектрика и толщинами слоев, но также латеральными размерами электрода и балки. По сравнению с классическим переключателем, устройство с “плавающим” электродом име-



**Рис. 2.** МЭМС-переключатель с “плавающим” электродом: *а* — схематичное изображение конструкции; *б* — эквивалентная схема в выключенном состоянии; *в* — эквивалентная схема во включенном состоянии; *г* — модифицированная конструкция с зауженной балкой.

ет дополнительные возможности для увеличения отношения емкостей. Так, длина электрода может быть увеличена в достаточно широких пределах. В то же время, ширину балки можно уменьшить. Однако это стоит делать лишь в области перекрытия балки с электродом, чтобы избежать повышения напряжения срабатывания. Переключатель с зауженной балкой представлен на рис. 2г. Именно такая конфигурация была выбрана для последующего анализа.

Стоит отметить, что переключатель с “плавающим” электродом не является емкостным в чистом виде. Он представляет собой гибридный элемент емкостного и резистивного ключей. Для его корректного функционирования необходимо, чтобы сопротивление контакта балка-электрод  $R_C$  было мало. В данной работе контактное сопротивление не рассматривается.

Расчет рабочих характеристик переключателя выполнялся методом конечных элементов. Метод заключается в разбиении структуры на элемен-

ты, поведение каждого из которых описывается с помощью отдельного уравнения, учитывающего его свойства, условия закрепления и внешнее воздействие [28]. Для расчета использовалось широко известное программное обеспечение. Модель переключателя, состоящая из  $1.2 \times 10^5$  элементов тетраэдрической формы, представлена на рис. 3а. Латеральные размеры модели показаны на рис. 3б. В предлагаемой конструкции величина  $w_E/w_B$  составляло 10, что обеспечивало десятикратное увеличение отношения емкостей по сравнению с классической конфигурацией. Толщина электродов управления и линии передач составляла 100 нм. Диэлектрическое покрытие и “плавающий” электрод имели толщину 50 нм. Толщина балки и начальный зазор между балкой и электродом принимали значения 1.0, 1.5 и 2.0 мкм. В качестве материала балки, электродов и линии передач был выбран алюминий (модуль Юнга 70 ГПа, ко-

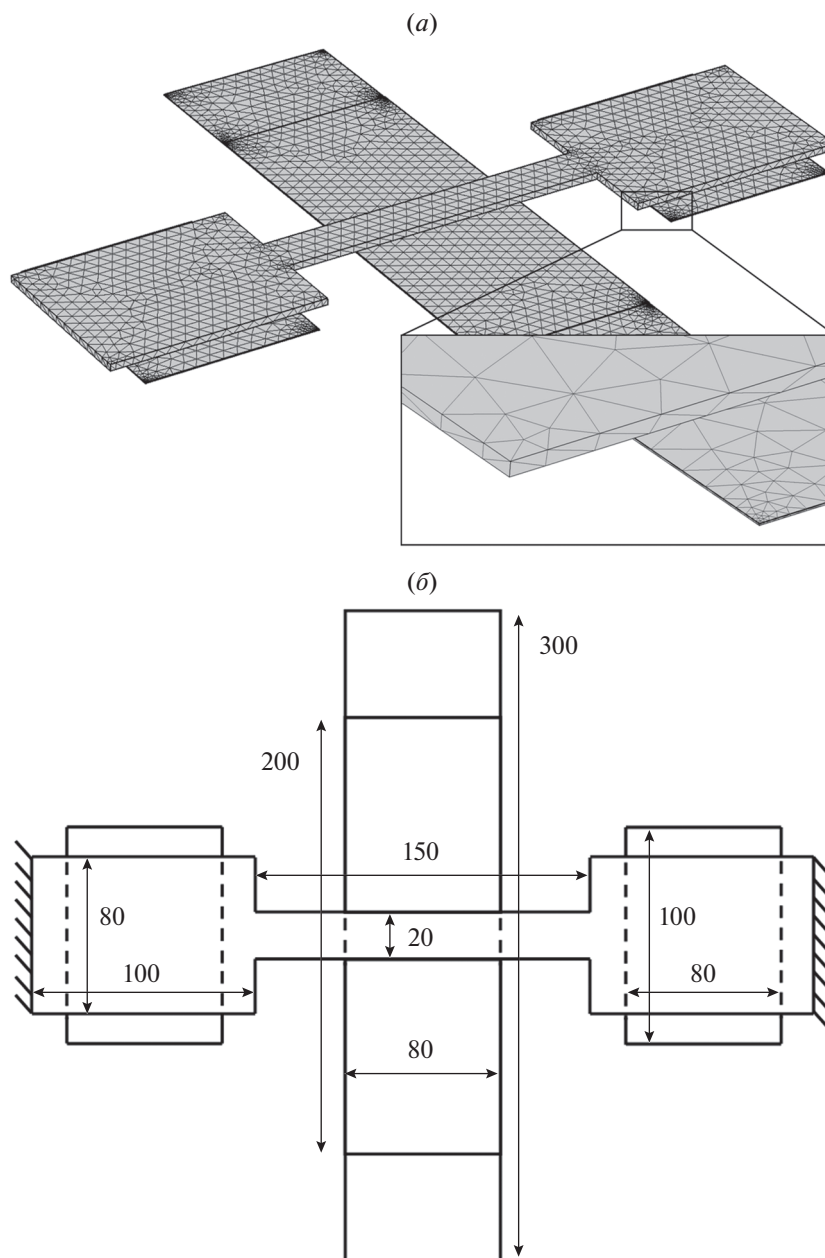


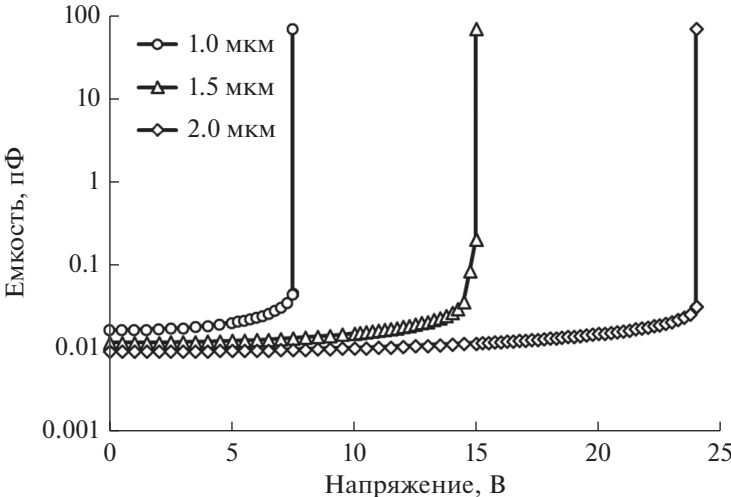
Рис. 3. Модель переключателя: *a* — разбиение на конечные элементы; *б* — схематичное изображение с указанием размеров в микрометрах.

эффицент Пуассона 0.35, плотность 2700 кг/м<sup>3</sup> [29]). Диэлектриком служил диоксида гафния с проницаемостью  $\epsilon_r = 25$  [30]. Анкеры полагались недеформируемыми и не были включены в модель. Сопротивление воздуха и влияние подложки на характеристики переключателя и не учитывались.

#### CV-ХАРАКТЕРИСТИКА И НАПРЯЖЕНИЕ СРАБАТЫВАНИЯ

Важной характеристикой емкостного переключателя является зависимость емкости между

балкой и линией передач от управляющего напряжения (CV-характеристика). Ее расчет выполнялся следующим образом. Балка заземлялась, а на линии устанавливался малый пробный потенциал. Напряжение на управляющих электродах постепенно увеличивалось с некоторым шагом, и для каждого значения напряжения выполнялся расчет емкости. Увеличение происходило до момента электростатического схлопывания балки с электродами. При этом емкость резко возрастала, достигая значения  $C_{ON}$ . CV-характеристика переключателей с толщиной балки 1 мкм представлена на рис. 4. Емкость  $C_{ON}$  была одинакова для всех



**Рис. 4.** Зависимость емкости между балкой и линией передач от управляющего напряжения, полученная для различных значений воздушного зазора. Толщина балки составляет 1 мкм.

устройств и составляла 70.8 пФ. Емкость  $C_{OFF}$  уменьшалось 17.0 до 9.6 фФ с увеличением воздушного зазора от 1 до 2 мкм. Отношение емкостей составляло 4161, 5916 и 7408 для  $g = 1.0, 1.5$  и 2.0 мкм соответственно. Эти значения более чем на порядок превосходили типовые величины  $C_{ON}/C_{OFF}$ , характерные для переключателей классической конфигурации. Насколько известно авторам, среди конструкций с “плавающим” электродом наибольшим отношением емкостей  $C_{ON}/C_{OFF} = 1755$  обладает ключ, представленный в работе [25]. По сравнению с ним, предлагаемое изделие обеспечивает более чем двукратное увеличение  $C_{ON}/C_{OFF}$ .

Отношение емкостей слабо зависело от толщины балки (см. табл. 1). Однако, с увеличением

$t$  возрастало напряжение срабатывания, поскольку увеличивалась размыкающая сила упругости. Также  $V_{PI}$  возрастало с увеличением  $g$ . Полученные значения напряжения срабатывания представлены в табл. 2. Согласно результатам моделирования, оно составляло от 7.5 до 58.0 В. Устройство с малым  $V_{PI}$  более удобно в управлении, поскольку не требует схемотехнических решений для подачи высоковольтных сигналов. Переключатели с большим напряжением срабатывания обладают большей силой упругости, размыкающей контакт. Поэтому они менее подвержены выходу из строя вследствие залипания балки. Предлагаемая конфигурация позволяет реализовать оба варианта с сохранением сверхвысокого отношения емкостей.

**Таблица 1.** Отношение емкостей  $C_{ON}/C_{OFF}$ , рассчитанное для различных значений толщины балки  $t$  и воздушного зазора  $g$

| $t$ , мкм | $g$ , мкм |      |      |
|-----------|-----------|------|------|
|           | 1.0       | 1.5  | 2.0  |
| 1.0       | 4161      | 5916 | 7408 |
| 1.5       | 4147      | 5814 | 7234 |
| 2.0       | 4038      | 5742 | 7203 |

**Таблица 2.** Напряжение срабатывания  $V_{PI}$  (В), рассчитанное для различных значений толщины балки  $t$  и воздушного зазора  $g$

| $t$ , мкм | $g$ , мкм |      |      |
|-----------|-----------|------|------|
|           | 1.0       | 1.5  | 2.0  |
| 1.0       | 7.5       | 15.0 | 24.0 |
| 1.5       | 13.5      | 25.5 | 39.8 |
| 2.0       | 20.5      | 37.3 | 58.0 |

СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ И ВРЕМЯ СРАБАТЫВАНИЯ

Первые три колебательные моды балки изображены на рис. 5. Все они соответствовали изгибным колебаниям. Собственные частоты, рассчитанные для разных значений толщины балки, представлены в табл. 3. Частоты находились в диапазоне от 59.4 до 437.5 кГц. Вторая мода превышала по частоте первую примерно в два раза, а третья – в 4 раза. С увеличением  $t$  от 1 до 2 мкм собственные частоты всех мод возрастали вдвое.

Первая собственная частота балки  $f_1$  определяет время срабатывания переключателя. В условиях малого демпфирования (добротность превышает 2) время включения  $\tau_{ON}$  может быть рассчитано с использованием следующего выражения [4]:

$$\tau_{ON} = \frac{3.67 V_{PI}}{2\pi f_1 V}, \tag{8}$$

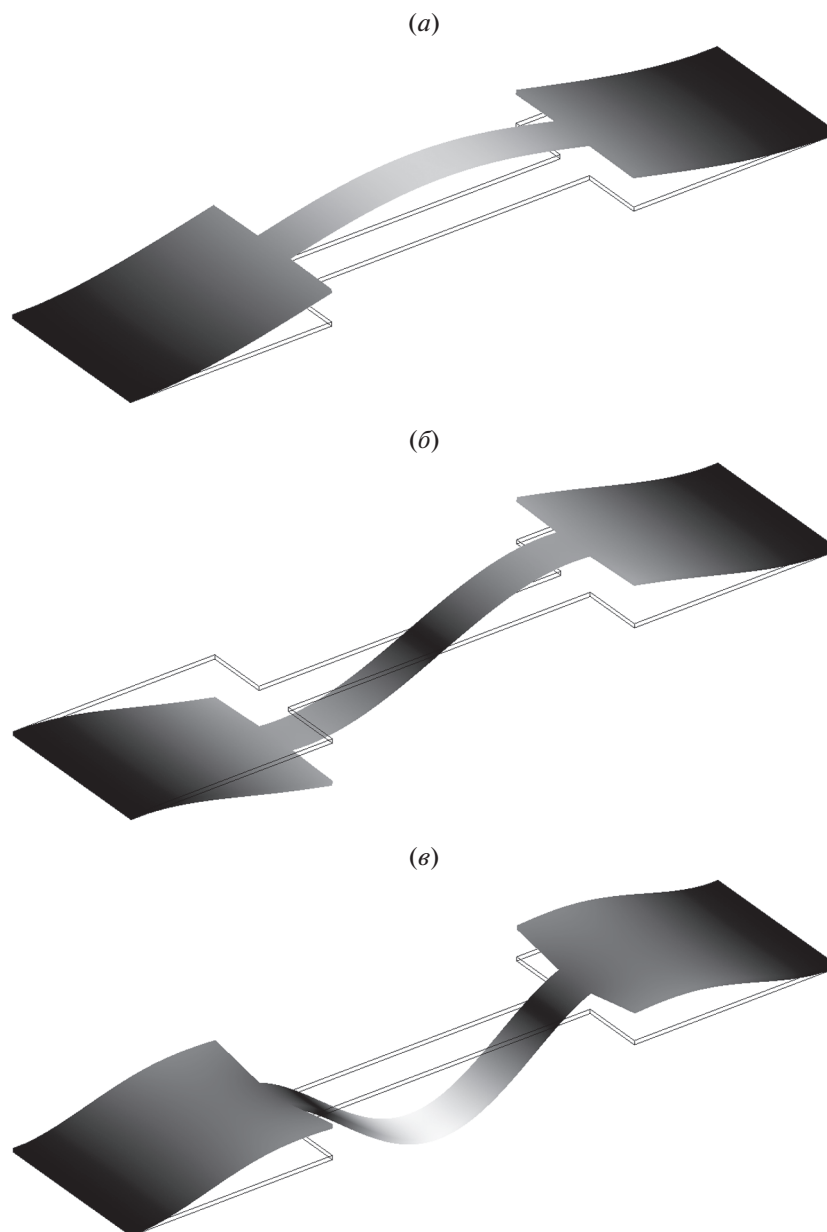


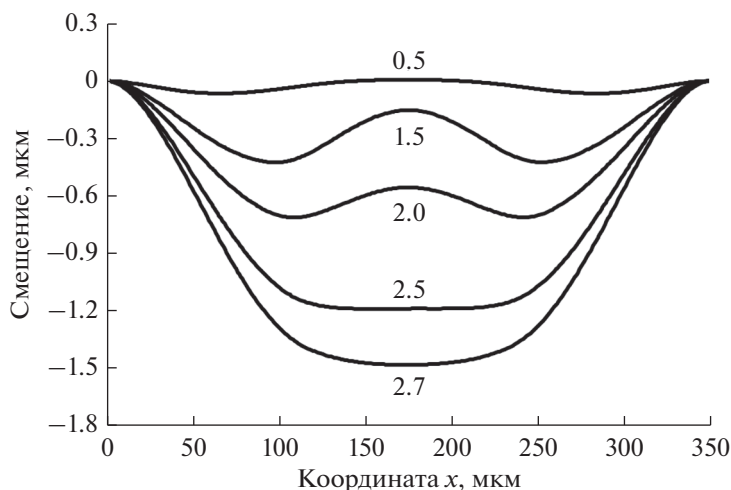
Рис. 5. Колебательные моды балки: *a* — первая мода; *б* — вторая мода; *в* — третья мода.

где  $V$  — напряжение, используемое для переключения. Как правило, в качестве управляющего напряжения выбирают значение  $1.3\text{--}1.4 V_{PI}$ , чтобы обеспечить уверенное срабатывание. При  $V = 1.4V_{PI}$  переключатель с балкой толщиной  $1\text{ мкм}$  должен переходить во включенное состояние за  $7\text{ мкс}$ . Для  $t = 2\text{ мкм}$  время срабатывания будет в два раза меньше. Время выключения также определяется первой собственной частотой и задается выражением  $t_{ON} = 1/4f_1$  [31]. Согласно расчетам, переключатель должен переходить в выключенное состояние за время от  $2.1$  до  $4.2\text{ мкс}$ , в зависимости от толщины балки.

Процесс перехода во включенное состояние был смоделирован во времени. Толщина балки и воздушный зазор составляли  $1.5\text{ мкм}$ . В началь-

Таблица 3. Собственные частоты колебательных мод балки (кГц), рассчитанные для разных значений толщины  $t$

| Мода | $t$ , мкм |       |       |
|------|-----------|-------|-------|
|      | 1.0       | 1.5   | 2.0   |
| 1-я  | 59.4      | 89.3  | 119.1 |
| 2-я  | 111.7     | 167.7 | 223.7 |
| 3-я  | 218.5     | 327.9 | 437.5 |



**Рис. 6.** Поперечное сечение балки в различные моменты времени (в микросекундах) после подачи управляющего напряжения ( $\tau = 0$  мкс). Ось  $x$  направлена вдоль балки и имеет начало координат в одном из ее концов. Ось  $y$  показывает смещение структуры в направлении, перпендикулярном подложке.

ный момент  $\tau = 0$  мкс на управляющие электроды подавалось напряжение. Расчетное значение  $V_{PI}$  для этой конструкции составляло 25.5 В (табл. 2), поэтому подаваемое напряжение составляло 36 В. Далее в определенные моменты времени рассчитывалось положение балки. Ее поперечное сечение представлено на рис. 6. Отрицательное смещение соответствовало движению вниз, по направлению к электродам. Центральная часть балки достигала “плавающего” электрода за 2.7 мкс. Значение  $\tau_{ON}$ , рассчитанное по формуле (8), составляло 4.7 мкс. Таким образом, моделирование предсказывало несколько меньшее время срабатывания. Вероятной причиной являлся учет деформации балки и краевых полей при расчете электростатической силы. Тем не менее, оба подхода давали  $\tau_{ON}$  на уровне нескольких микросекунд. Этот показатель является типовым для МЭМС-переключателя подобных размеров.

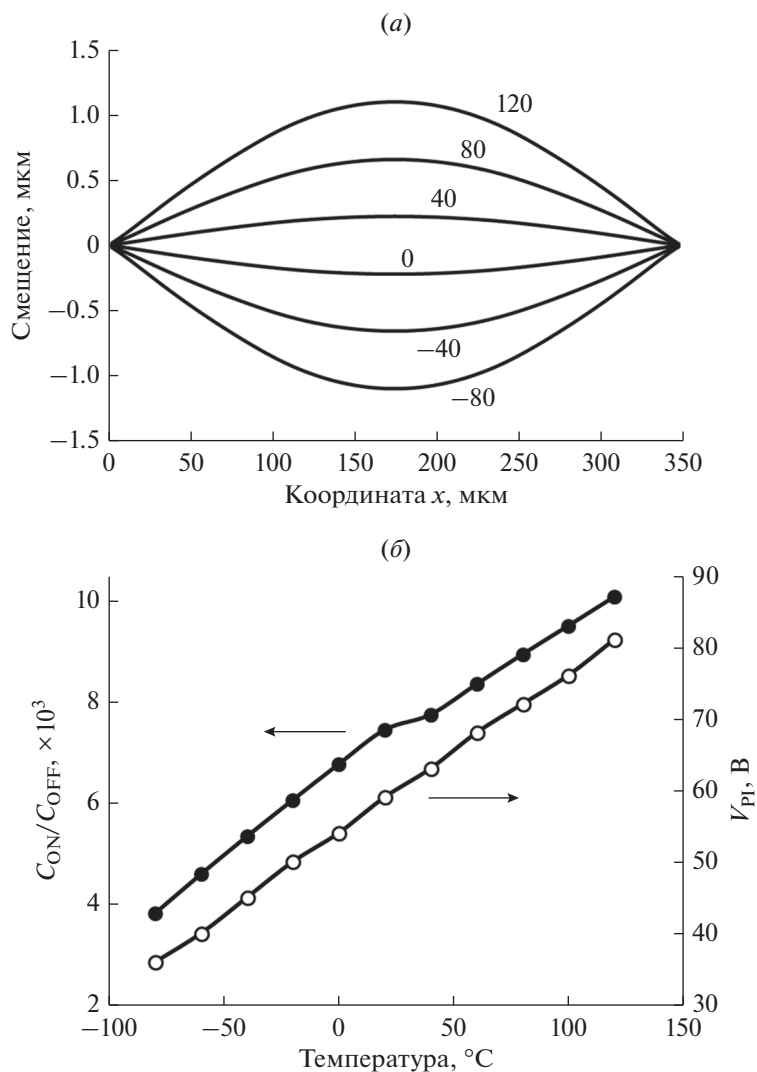
### ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

МЭМС-переключатель должен сохранять работоспособность в широком диапазоне температур. Это обеспечит возможность его применения в различных отраслях, в т. ч. в военно-космической технике. Изменение температуры вызывает растяжение/сжатие балки и подложки. Различие в коэффициентах температурного расширения материалов  $\alpha$  приводит к деформации балки. При этом изменяются зазоры между балкой и электродами и, как следствие, рабочие характеристики переключателя. Балка толщиной 2 мкм была протестирована на предмет деформации в диапазоне температур от  $-80$  до  $120^\circ\text{C}$ . Тепловым расширением подложки пренебрегали, поскольку у Si и  $\text{SiO}_2$  коэффициент  $\alpha$  ( $2.6 \times 10^{-6}$  и  $0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  соответ-

ственно) значительно меньше, чем у алюминия ( $23.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [29]). Характер деформации балки во многом зависит от условий закрепления ее торцов. В изготовленном переключателе, как правило, идеальная фиксация не достигается. Ограничивается лишь латеральное перемещение, но не исключается наклон. Чтобы реализовать такое граничное условие, в модели была зафиксирована только нижняя половина торцевых граней.

Поперечное сечение балки для разных значений температуры показано на рис. 7а. Полагалось, что при  $20^\circ\text{C}$  деформация отсутствует. С увеличением температуры балка изгибалась вверх, от подложки. При  $120^\circ\text{C}$  ее центральная часть смещалась на 1.1 мкм от начального положения. Понижение температуры вызывало изгиб вниз. При  $-80^\circ\text{C}$  отклонение центральной части составляло  $-1.1$  мкм, т.е. в случае  $g = 1$  мкм произошло бы касание подложки с выходом переключателя из строя. Таким образом, воздушный зазор в 1.5 или 2.0 мкм более предпочтителен для переключателя, предназначенного для работы в широком температурном диапазоне.

Деформация балки приводила к изменению емкости в выключенном состоянии. Зависимость величины  $C_{ON}/C_{OFF}$  от температуры представлена на рис. 7б. Отношение емкостей увеличивалось практически линейно, достигая  $10^4$  при  $120^\circ\text{C}$ . Однако даже при наименьшей температуре конструкция демонстрировала сверхвысокое отношение емкостей. Вместе с  $C_{ON}/C_{OFF}$  изменялось и напряжение срабатывания, см. рис. 7б. Величина  $V_{PI}$  возрастала от 36 В при  $-80^\circ\text{C}$  до 81 В при  $120^\circ\text{C}$ , т.е. наблюдался более чем двукратный рост. Таким образом, изменение температуры достаточно сильно влияло на рабочие характеристики ключа. Такая особенность присуща большинству устройств с подвижным электродом в форме моста. Высокое



**Рис. 7.** МЭМС-переключатель при разных значениях температуры (в градусах Цельсия): *a* — поперечное сечение балки; *б* — отношение емкостей и напряжение срабатывания.

аспектное отношение балки (отношение длины к толщине), при сравнительно малом воздушном зазоре дополнительно усиливало температурную зависимость рабочих характеристик. Решить проблему можно путем выбора формы балки, обеспечивающей компенсацию теплового расширения/сжатия [26]. Использование материала с относительно малым коэффициентом температурного расширения (например, золото или никель) также уменьшит деформацию. Стоит отметить, что концепция “плавающего” электрода может быть реализована для балки с одним закрепленным концом. Кантилевер менее подвержен деформации при нагреве/охлаждении. Однако он более склонен к изгибу под действием остаточных механических напряжений, возникающих в тонкой пленке в процессе нанесения. Поэтому выбор конструкции подвижного электрода должен учитывать особенности технологии изготовления изделия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен МЭМС-переключатель емкостного типа с электростатическим управлением. Особенностью устройства является металлический электрод, сформированный на диэлектрическом покрытии линии передач. Он позволяет значительно увеличить отношение емкостей по сравнению с классической компоновкой. Расчет рабочих характеристик переключателя выполнялся методом конечных элементов. Во включенном состоянии емкость устройства составляла 70.8 пФ, в выключенном — около 10 фФ. Величина  $C_{ON}/C_{OFF}$  достигала 7400. По этому показателю представленный ключ в несколько раз превосходил образцы, представленные в литературе. Напряжение срабатывания варьировалось от 7.5 до 58.0 В, в зависимости от толщины балки и воздушного зазора. Время срабатывания составляло несколько микросекунд и

находились на стандартном для МЭМС-переключателей уровне.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № 0066-2019-0002.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Panasonic RD Coaxial Switches. Специальные реле для использования в цепях коммутации ВЧ сигналов частотой до 26.5 ГГц. [Электронный ресурс]. URL: <http://mt-system.ru/catalog/vysokochastotnyerele> (дата обращения: 28.01.2020).
2. Omron G6K-RF high-frequency relay. [Электронный ресурс]. URL: <http://components.omron.eu/Product-details/G6K-RF> (дата обращения: 28.01.2020).
3. Nickolas C. Choosing an RF Switch. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/jul/choosing-an-rf-switch> (дата обращения: 28.01.2020).
4. Rebeiz G.M. RF MEMS: Theory, Design, and Technology. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 512 p.
5. 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.
6. Zhang X., Adelegan O.J., Yamaner F.Y., Oralkan O. A fast-switching (1.35- $\mu$ s) low-control-voltage (2.5-V) MEMS T/R switch monolithically integrated with a capacitive micromachined ultrasonic transducer // J. Microelectromech. Syst. 2018. V. 27. P. 190–200.
7. Dai C.-L., Chen J.-H. Low voltage actuated RF micro-mechanical switches fabricated using CMOS-MEMS technique // Microsyst. Technol. 2006. V. 12. P. 1143–1151.
8. Zheng W.-B., Huang Q.-A., Liao X.-P., Li F.-X. RF MEMS membrane switches on GaAs substrates for X-band applications // J. Microelectromech. Syst. 2005. V. 14. P. 464–471.
9. 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.
10. Haupt R.L., Lanagan M. Reconfigurable antennas // IEEE Antennas Propag. Mag. 2013. V. 55. P. 49–61.
11. Haider N., Caratelli D., Yarovoy A.G. Recent developments in reconfigurable and multiband antenna technology // Int. J. Antennas Propag. 2013. V. 2013. P. 869170.
12. Zhou W., Sheng W., Cui J., Han Y., Ma X., Zhang R. SR-Crossbar topology for large-scale RF MEMS switch matrices // IET Microw. Antennas Propag. 2019. V. 13. P. 231–238.
13. Daneshmand M., Mansour R.R. RF MEMS satellite switch matrices // IEEE Microw. Mag. 2011. V. 12. P. 92–109.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Persano A., Quaranta F., Martucci M.C., Creti P., Siciliano P., Cola A. Transport and charging mechanisms in Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films for capacitive RF MEMS switches application // J. Appl. Phys. 2010. V. 107. 114502.
18. Persano A., Quaranta F., Cola A., De Angelis G., Marcelli R., Siciliano P. Development of capacitive RF MEMS switches with TaN and Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films // Proc. SPIE. 2011. V. 8066. 80660V-1.
19. He X.J., Lv Z.Q., Liu B., Li Z.H. High-isolation lateral RF MEMS capacitive switch based on HfO<sub>2</sub> dielectric for high frequency applications // Sens. Actuators A. 2012. V. 188. P. 342–348.
20. Tsaor J., Onodera K., Kobayashi T., Wang Z.-J., Heisig S., Maeda R., Suga T. Broadband MEMS shunt switches using PZT/HfO<sub>2</sub> multi-layered high  $k$  dielectrics for high switching isolation // Sens. Actuators A. 2005. V. 121. P. 275–281.
21. 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.
22. 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.
23. Rottenberg X., Mertens R.P., Nauwelaers B., De Raedt W., Tilmans H.A.C. Filter-through device: A distributed RF-MEMS capacitive series switch // J. Micromech. Microeng. 2005. V. 15. P. S97–S102.
24. Papaioannou G., Giacomozzi F., Papandreou E., Margesin B. Floating electrode microelectromechanical system capacitive switches: A different actuation mechanism // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. 073501.
25. 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.
26. 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.
27. Swarnkar A., DasGupta A., Nair D.R. Design, fabrication and characterization of RF MEMS shunt switch for wideband operation of 3 GHz to 30 GHz // J. Micromech. Microeng. 2019. V. 29. 115009.
28. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир. 1984, 428 с.
29. Lide D.R. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 90th Edition. Boca Raton, Florida: CRC Press/Taylor and Francis, 2009. 2760 p.
30. Robertson J. High dielectric constant oxides // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2004. V. 28. P. 265–291.
31. Kaajakari V. Closed form expressions for RF MEMS switch actuation and release time // Electron. Lett. 2009. V. 45. P. 149–150.