

УДК 621.318.51, 621.3.049.7

И.В. УВАРОВ, В.В. НАУМОВ, О.М. КОРОЛЕВА,  
Е.И. ВАГАНОВА, И.И. АМИРОВ**МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ТИПА  
С НИЗКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ СРАБАТЫВАНИЯ****Введение**

Переключатели, изготовленные по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), находят все более широкое применение в ВЧ- и СВЧ-технике [1]. Они используются как самостоятельно, так и в составе фазовращателей [2], аттенюаторов [3], фильтров [4] и других изделий. Среди МЭМС-переключателей наибольшее распространение получили устройства с электростатическим принципом управления. По сравнению с радиочастотными ключами на рпн-диодах и полевых транзисторах, МЭМС-ключи обеспечивают малую потребляемую мощность, малые потери в замкнутом состоянии, хорошую развязку в разомкнутом состоянии, низкий уровень нелинейных искажений и высокую радиационную стойкость [5]. Кроме того, электростатические МЭМС-ключи изготавливаются с помощью традиционных методов микроэлектроники, что позволяет интегрировать их в КМОП-схемы [6].

Электростатический МЭМС-переключатель классической конструкции представляет собой подвижный электрод (балку или мембрану микронных размеров), располагающийся над неподвижными электродами: управляющим и коммутируемым. Для замыкания ключа между балкой и управляющим электродом прикладывают напряжение. Балка деформируется по направлению к электроду под действием электростатической силы притяжения. При некотором значении напряжения, называемом напряжением срабатывания, балка приходит в контакт с коммутируемым электродом, ключ переходит в замкнутое состояние. Размыкание ключа

осуществляется, как правило, за счет силы упругости, возникающей в деформированной балке, то есть при отключении управляющего напряжения балка сама возвращается в исходное состояние (пассивное размыкание).

Одним из основных недостатков современных коммерчески доступных МЭМС-переключателей является высокое напряжение срабатывания, которое составляет несколько десятков вольт [7, 8]. Таким ключам для работы требуются специальные управляющие устройства и цепи высоковольтной изоляции, что ограничивает область их применения специальными приложениями (военными, космическими). Для того чтобы МЭМС-переключатели можно было широко использовать в современных электронных схемах с низким энергопотреблением, они должны обладать напряжением срабатывания менее 5 В и даже менее 3 В. Поэтому разработка МЭМС-ключа электростатического типа с низким напряжением срабатывания является весьма актуальной задачей. В настоящее время в мире активно ведутся исследования в этом направлении. В данной статье представлены результаты работы по созданию МЭМС-переключателя с низким напряжением срабатывания, полученные в Ярославском филиале Физико-технологического института РАН.

## **1. МЭМС-переключатель на основе кантилевера наноразмерной толщины**

Наиболее эффективным и широко применимым методом снижения напряжения срабатывания переключателя является уменьшение упругости подвижного электрода. Уменьшение упругости достигается, как правило, за счет использования нестандартной конструкции электрода: складчатая структура [9], торсионные подвесы [10], зигзагообразные подвесы [6] и др. В данном разделе представлен МЭМС-переключатель, подвижным электродом которого является кантилевер наноразмерной толщины (80–160 нм). Кантилевер имеет сверхвысокое отношение длины к толщине (достигающее 400) и поэтому обладает сверхмалой упругостью, что позволяет достичь низких значений напряжения срабатывания ключа [11].

### **1.1. Конструкция и технология изготовления переключателя**

Переключатель представляет собой однополюсный ключ с нормально разомкнутыми контактами. Его конструкция схематично представлена на рис. 1. Металлический кантилевер располагается над управляющим и коммутируемым электродами (также металлическими). На свободном конце кантилевера находится контактный выступ. При приложении напряжения между кантилевером и электродом управления кантилевер притягивается к электроду за счет электростатических сил, замыкая коммутируемый электрод. После отключения напряжения кантилевер возвращается в исходное состояние. В переключателе осуществляется контакт металл-металл.

Для обеспечения малого напряжения срабатывания в переключателе применяются кантилеверы, обладающие низкими значениями упругости (от 0,012 до 0,38 Н/м). Технология изготовления кантилеверов была отработана коллективом авторов ранее [12]. Также были детально исследованы различные свойства кантилеверов, в том числе резонансные характеристики [13].

Переключатели изготавливались по технологии поверхностной микрообработки. Основные этапы процесса изготовления представлены на рис. 2. На кремниевой пластине КДБ 0.01 диаметром 100 мм формировался диэлектрический слой. Для этого пластина термически окислялась во влажном кислороде до толщины слоя  $\text{SiO}_2$  1 мкм. Далее на слое  $\text{SiO}_2$  выполнялись управляющий и коммутируемый электроды переключателя. Для этого пластина покрывалась слоем позитивного фоторезиста толщиной 1,5 мкм и выполнялась контактная фотолитография. После проявления фоторезиста на пластину методом магнетронного распыления наносился адгезионный слой хрома толщиной 10 нм и слой платины толщиной 50 нм (рис. 2, а). После нанесения слоев металла выполнялось «взрывное» удаление фоторезиста (lift-off, рис. 2б).

Затем формировался кантилевер с контактным выступом на его нижней поверхности. Для этого на пластину магнетронным методом наносился жертвенный слой аморфного кремния (a-Si) толщиной 1 мкм (рис. 2, в). Пластина снова покрывалась слоем фоторезиста, выполнялась контактная фотолитография. При этом в слое резиста формировалось круглое окно диаметром 2 мкм. Через окно методом травления в плазме  $\text{SF}_6$  в слое a-Si формировалась ямка глубиной около 100 нм (рис. 2, г). Далее на пластину напылялся слой Pt толщиной 100 нм (рис. 2, д), и удалялись остатки фоторезиста (рис. 2, е). Затем пластина снова покрывалась слоем фоторезиста, и выполнялась литография – формировался рисунок кантилевера. На пластину напылялись слои металла Cr/Al/Cr толщинами 10/60/10, 15/90/15 и 20/120/20 нм (рис. 2, ж), выполнялось взрывное удаление фоторезиста (рис. 2, з).

Заключительным этапом изготовления являлось удаление жертвенного слоя a-Si из-под кантилевера (освобождение кантилевера) методом травления в плазме  $\text{SF}_6$  (рис. 2, и).

Были изготовлены переключатели с различными размерами кантилевера и электродов. Кантилевер имел длину от 14 до 32 мкм, ширину от 2 до 6 мкм и толщину от 80 до 160 нм. Управляющий электрод имел ширину от 4 до 16 мкм. Ширина коммутируемого электрода составляла 4–6 мкм. Зазор между кантилевером и электродами составлял 1 мкм. Выступ на нижней поверхности кантилевера имел форму цилиндра диаметром 2 мкм и высотой около 100 нм. В качестве материала контактного выступа и коммутируемого электрода была

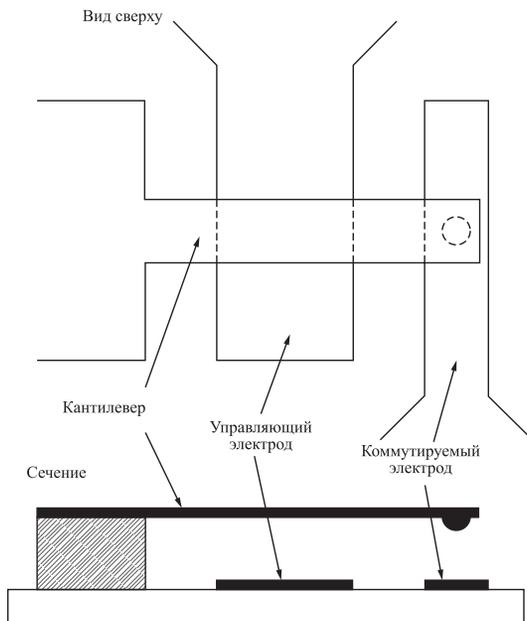


Рис. 1. Конструкция МЭМС-переключателя на основе кантилевера

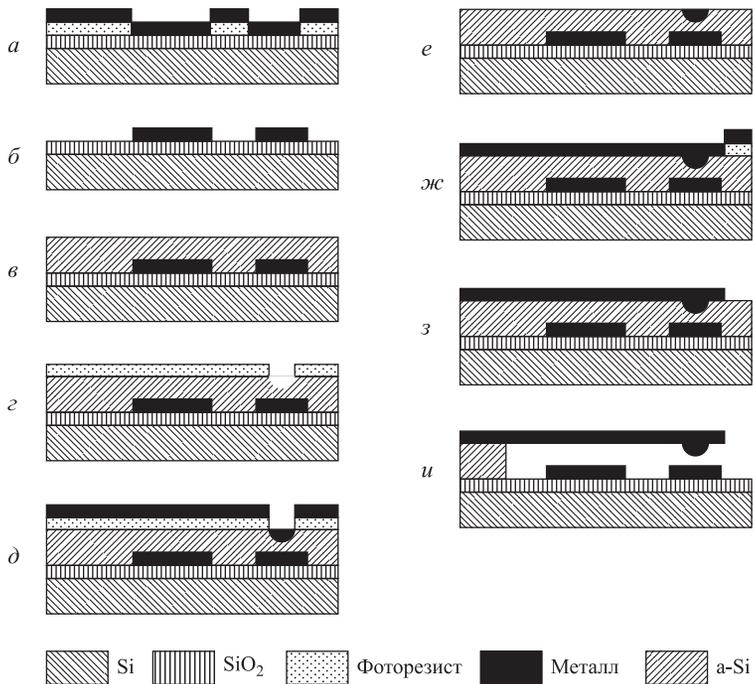


Рис. 2. Этапы процедуры изготовления переключателя

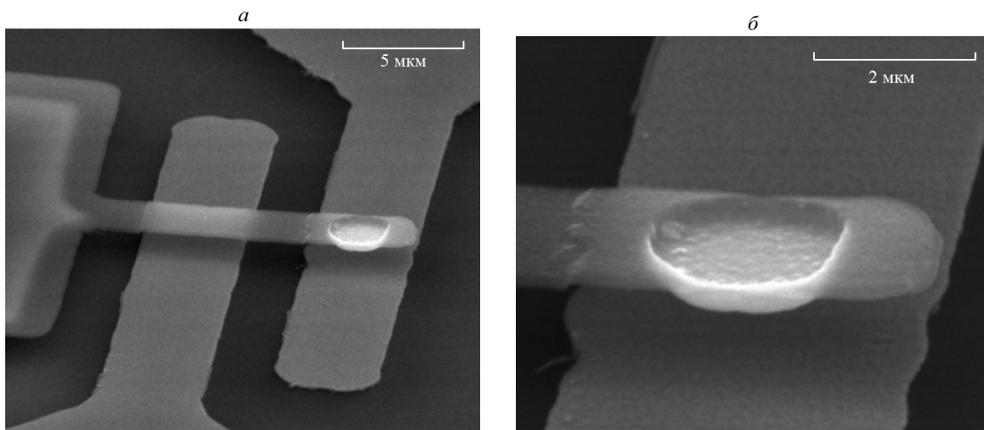


Рис. 3. РЭМ-изображение переключателя: (а) – общий вид; (б) – свободный конец кантилевера (длина кантилевера 14 мкм, ширина 2 мкм, толщина 120 нм)

выбрана платина благодаря химической инертности, относительно высокой твердости и проводимости [14]. Изображение переключателя, полученное с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ), представлено на рис. 3, а. На рис. 3, б крупным планом показан свободный конец кантилевера с контактным выступом.

## 1.2. Расчет электромеханических характеристик переключателя

На рис. 4 схематично изображен кантилевер и управляющий электрод переключателя с указанием основных геометрических размеров. Пусть на кантилевер действует распределенная нагрузка  $q(x)$ , имеющая размерность силы, деленной на единицу площади. На малый элемент кантилевера длиной  $dx$  с координатой  $x$  будет действовать сила  $F(x) = q(x) \cdot w \cdot dx$ , где  $w$  – ширина кантилевера. Обусловленное действием этой силы вертикальное отклонение свободного конца кантилевера от начального положения задается выражением [15]

$$d\delta_{\text{tip}} = \frac{x^2}{6(EI)_{\text{eff}}} (3L - x) q(x) w dx, \quad (1)$$

где  $(EI)_{\text{eff}}$  – эффективная жесткость кантилевера на изгиб,  $L$  – его длина. Эффективная жесткость трехслойного кантилевера, рассчитанная методом эквивалентного поперечного сечения [16], задается выражением

$$(EI)_{\text{eff}} = E_{\text{Cr}} \frac{74wt_{\text{Cr}}^3}{3} + E_{\text{Al}} \frac{wt_{\text{Al}}^3}{12}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{Cr}}$ ,  $E_{\text{Al}}$ ,  $t_{\text{Cr}}$ ,  $t_{\text{Al}}$  – модули Юнга и толщины слоев хрома и алюминия соответственно.

Если нагрузка  $q(x)$  действует по всей длине кантилевера, то для нахождения отклонения свободного конца от начального положения необходимо проинтегрировать выражение (1):

$$\delta_{\text{tip}} = \frac{w}{6(EI)_{\text{eff}}} \int_0^L x^2 (3L - x) q(x) dx. \quad (3)$$

Под кантилевером на расстоянии  $g$  находится управляющий электрод, границы которого ( $a$  и  $b$ ) отмечены на рис. 4. Между кантилевером и электродом прикладывается напряжение  $V$ . Пренебрегая краевыми полями, электростатическую силу, действующую на единицу площади кантилевера, можно записать в виде [17]:

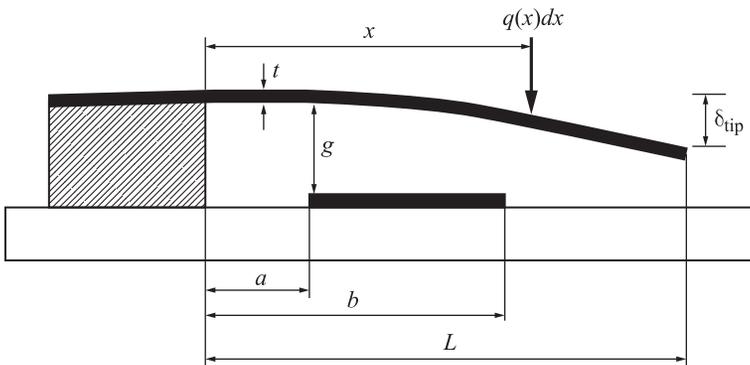


Рис. 4. Кантилевер и управляющий электрод переключателя с указанием параметров, используемых при расчете напряжения срабатывания

$$q(x) = \frac{\varepsilon_0 V^2 [\sigma(x-a) - \sigma(x-b)]}{2(g - \delta(x))^2}, \quad (4)$$

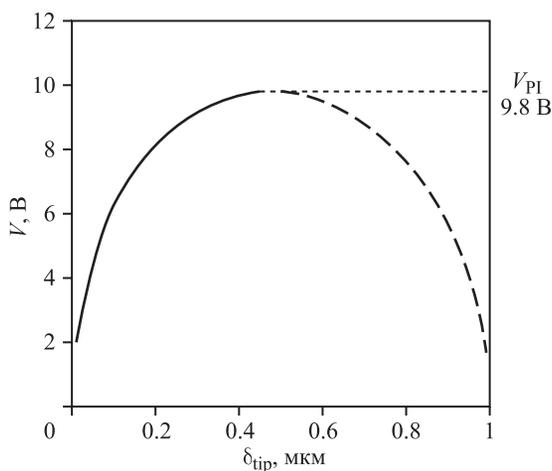
где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\sigma(x)$  – функция Хевисайда;  $\delta(x)$  – отклонение точки кантилевера с координатой  $x$  от начального положения. Профиль деформированного под действием электростатической силы кантилевера можно положить квадратичным [17]:

$$\delta(x) = \left(\frac{x}{L}\right)^2 \delta_{\text{tip}}. \quad (5)$$

Подставив выражения (4) и (5) в интеграл (3) и выполнив преобразования, получим:

$$V^2 = \frac{12(EI)_{\text{eff}} \delta_{\text{tip}}^3}{\varepsilon_0 w L^4} \left[ \int_a^b x^2 (3L-x) \left( \frac{gL^2}{\delta_{\text{tip}}} - x^2 \right)^{-2} dx \right]^{-1}. \quad (6)$$

Выражение (6) представляет собой связь отклонения свободного конца кантилевера  $\delta_{\text{tip}}$  с приложенным напряжением  $V$ . График, иллюстрирующий эту связь, приведен на рис. 5. При некотором значении напряжения (напряжение срабатывания, pull-in voltage) положение кантилевера становится неустойчивым, его свободный конец падает на подложку. Напряжение срабатывания определялось как максимальное значение функции  $V(\delta_{\text{tip}})$  (выражение (6)) [17]. Расчетные значения напряжения срабатывания переключателей с кантилевером шириной 2 мкм и различным положением управляющего электрода представлены в табл. 1. Значения находятся в диапазоне от 9,8 до 105,1 В. Чем шире электрод управления и чем ближе он расположен к свободному концу кантилевера, тем ниже напряжение срабатывания. При расчетах использовались вели-



**Рис. 5.** Связь отклонения свободного конца кантилевера с приложенным напряжением, рассчитанная для переключателя с  $L = 20$  мкм,  $a = 4$  мкм,  $b = 12$  мкм (табл. 1, тип 4)

чины модуля Юнга объемного материала:  $E_{Cr} = 279$  ГПа,  $E_{Al} = 70$  ГПа.

Контактное сопротивление переключателя оценивалось с использованием модели, в которой шероховатая поверхность приходит в контакт с плоскостью [1]. Исходя из параметров конструкции переключателя, была рассчитана сила, с которой контактный выступ кантилевера давит на коммутируемый электрод. Величина этой силы зависит от геометрии кантилевера и составляет от 0,01 до 1 мН. При таких контактных усилиях происходит пластическая деформация неровностей поверхности, и площадь контакта выступа

**Таблица 1.** Расчетные и экспериментальные значения напряжения срабатывания переключателей (ширина кантилевера 2 мкм)

Тип образца	$L$ , мкм	$a$ , мкм	$b$ , мкм	Напряжение срабатывания, В					
				$t = 80$ нм		$t = 120$ нм		$t = 160$ нм	
				Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.
1	14	3	7	37.1	$19.4 \pm 3.1$	68.2	$27.0 \pm 8.3$	105.1	$49.1 \pm 13.6$
2	20	4	8	28.4	$20.7 \pm 4.9$	52.2	$36.7 \pm 11.8$	80.4	$63.2 \pm 12.8$
3	20	8	12	12.6	$15.1 \pm 5.2$	23.2	$33.6 \pm 10.2$	35.8	$54.6 \pm 10.3$
4	20	4	12	9.8	$12.5 \pm 4.4$	18.2	$36.1 \pm 9.9$	29.1	$49.3 \pm 11.5$

с электродом определяется выражением  $A = F_c / H$ , где  $F_c$  – сила прижатия выступа к электроду,  $H$  – твердость материала контактов (твердость платины полагалась равной 450 ГПа). Контактное сопротивление переключателя определяется выражением  $R_c = \rho / \sqrt{\pi A}$ , где  $\rho$  – удельное сопротивление материала (для платины  $\rho = 10.6 \cdot 10^{-6}$  Ом·см при температуре 293 К) [1]. При контактных усилиях 0.01–1 мН площадь контакта не превышает  $2.4 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>. Согласно расчетам, переключатели должны иметь контактное сопротивление 1–10 Ом.

Время срабатывания переключателя обратно пропорционально резонансной частоте кантилевера  $f_0$  и может быть оценено с помощью выражения  $\tau_s \approx 0,58 f_0^{-1}$  [1]. Это выражение справедливо в случае малого демпфирования, то есть когда добротность кантилевера превышает 2. Резонансная частота кантилеверов Cr/Al/Cr была измерена методом «светового рычага» [13]. У кантилеверов с толщинами слоев 10/60/10 нм она составляла от 89 до 466 кГц в зависимости от длины кантилевера, у кантилеверов толщиной 15/90/15 нм – от 134 до 699 кГц, 20/120/20 нм – от 178 до 932 кГц. Добротность кантилеверов в воздухе при нормальных условиях составляла 5–10. Согласно расчетам, время срабатывания переключателей должно составлять около 1–10 мкс.

### 1.3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Фотография изготовленного образца представлена на рис. 6. На чипе располагались три контактные площадки размером  $1.5 \times 1.5$  мм, которые с помощью металлических дорожек шириной 200 мкм соединялись с кантилевером и электродами переключателя. На площадки устанавливались вольфрамовые иглы. К иглам подключались измерительные приборы, схема подключения приборов показана на рис. 7. Тестирование переключателей проводилось в воздухе при нормальных условиях.

Для определения напряжения срабатывания ключа между кантилевером и управляющим электродом прикладывалось постоянное напряжение от стабилизатора напряжения постоянного тока П4105. Подаваемое напряжение постепенно увеличивалось до тех пор, пока не происходило касание кантилевера с коммутируемым электродом. Момент срабатывания фиксировался мультиметром Mastech M9803R в режиме омметра. В табл. 1 приведены средние

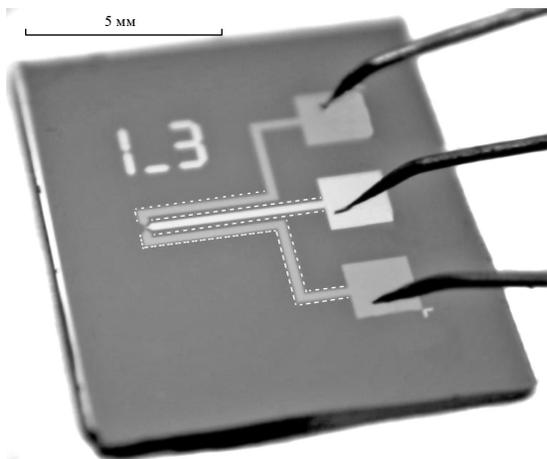


Рис. 6. Чип с иглами на контактных площадках

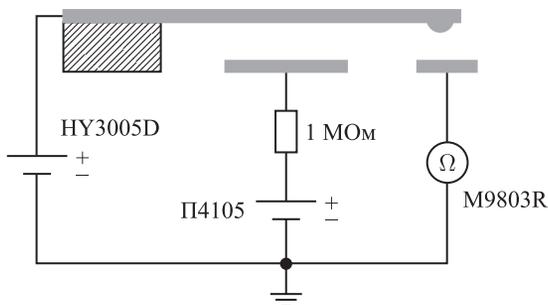


Рис. 7. Схема подключения приборов к переключателю

и коммутируемый электроды «отпечатывались» на верхней поверхности жертвенного слоя. Следствием этого являлись «ступеньки» на кантилевере (можно наблюдать на рис. 3), снижающие его упругость. В-третьих, в процессе освобождения кантилеверов жертвенный слой удалялся не только из-под кантилевера, но и из-под его опорной площадки [12], что увеличивало эффективную длину кантилевера и также снижало упругость. Первое обстоятельство могло как увеличить, так и уменьшить напряжение срабатывания, в зависимости от направления изгиба кантилевера (в эксперименте наблюдались обе ситуации). Два других обстоятельства снижали напряжение срабатывания. Учет одновременного влияния всех трех факторов на свойства переключателя является отдельной задачей, для ее решения требуется тщательное численное моделирование.

Сопротивление переключателя в замкнутом состоянии составляло от 200 до 500 Ом. Экспериментально полученные значения сопротивления ( $R$ ) представлены в табл. 2. Измеряемое сопротивление представляло собой сумму сопротивлений трех участков переключателя: 1) дорожка  $\text{Cr}/\text{Al}/\text{Cr}$

значения напряжения срабатывания переключателей различной геометрии и максимальные отклонения от среднего. Наименьшее значение напряжения срабатывания составляло 8.1 В (переключатель типа 4, толщина кантилевера 80 нм). Наблюдалось значительное расхождение экспериментальных данных с результатами расчетов. Измеренные значения напряжения срабатывания ключей типа 1 были в 2–2.5 раза ниже расчетных, независимо от толщины кантилевера. В то же время у переключателей типа 4 средние значения напряжения срабатывания в 1.3–2 раза превышали теоретические.

Можно выделить несколько причин расхождения экспериментальных данных с теорией. Во-первых, кантилеверы изначально были изогнуты под действием остаточных напряжений в трехслойной металлической пленке [12]. Поэтому расстояние между кантилевером и электродами отличалось от номинальной величины. Во-вторых, технология изготовления переключателей была такова, что управляющий

**Таблица 2.** Экспериментальные значения сопротивления переключателя в замкнутом состоянии и максимального допустимого тока

w, мкм	t = 80 нм		t = 120 нм		t = 160 нм	
	R, Ом	I <sub>max</sub> , mA	R, Ом	I <sub>max</sub> , mA	R, Ом	I <sub>max</sub> , mA
2	417 ± 53	10 ± 1	287 ± 54	9 ± 3	262 ± 44	8 ± 1
4	408 ± 43	16 ± 5	240 ± 35	20 ± 2	276 ± 45	13 ± 3
6	436 ± 73	15 ± 5	242 ± 33	24 ± 6	309 ± 45	13 ± 2

толщиной 80–160 нм, идущая от иглы к кантилеверу; 2) контакт кантилевера с коммутируемым электродом; 3) дорожка Cr/Pt толщиной 60 нм, идущая от электрода к игле. Расчетное значение сопротивления дорожки Cr/Al/Cr составляло 7–15 Ом и зависело от ее толщины, экспериментальные значения составляли 8–40 Ом. Согласно расчетам, дорожка Cr/Pt должна обладать сопротивлением около 80 Ом. Измеренные значения составляли 100–300 Ом. Таким образом, существенный вклад в сопротивления переключателя вносили дорожки, и выделить сопротивление контакта кантилевера с электродом (расчетное значение 1–10 Ом) из суммарного сопротивления было затруднительно. На основании экспериментальных данных можно утверждать, что сопротивление контакта, как правило, находилось в диапазоне 10–100 Ом и значительно превышало расчетное значение. Причиной превышения могло являться загрязнение контактирующих поверхностей при нахождении переключателя в воздухе при нормальных условиях [14].

Был измерен максимально допустимый ток, протекающий через переключатель в замкнутом состоянии и не приводящий к выходу его из строя. После срабатывания переключателя между кантилевером и коммутируемым электродом прикладывалось постоянное напряжение от источника питания Mastech NY3005D (рис. 6). Ток, протекающий при этом через переключатель, измерялся мультиметром M9803R. Напряжение постепенно повышалось, и при некотором значении тока происходило плавление кантилевера в месте контакта с электродом. Значения допустимого тока ( $I_{max}$ ) приведены в табл. 2. Минимальным значением (около 10 мА) обладали переключатели с кантилевером шириной 2 мкм. Ключи с более широким кантилевером выдерживали ток до 30 мА. Допустимый ток не зависел от толщины кантилевера, вероятно, потому, что плотность тока достигала максимальной величины в области контактного выступа, который у всех переключателей имел одинаковую геометрию.

Основной проблемой переключателей являлось прилипание кантилевера к коммутируемому электроду при срабатывании. Этот эффект был особенно характерен для кантилеверов толщиной 80 и 120 нм. Возвращающей силы упругости было недостаточно для преодоления адгезионных сил, действующих между контактным выступом кантилевера и электродом. Адгезия в МЭМС/НЭМС-устройствах зачастую обусловлена капиллярными силами и силами Ван-дер-Ваальса [18]. Одним из наиболее эффективных методов уменьшения адгезионных сил является сокращение площади контакта, поэтому в дальнейшем планируется уменьшать диаметр контактного выступа на нижней поверхности кантилевера, повышать шероховатость

контактирующих поверхностей, а также использовать более твердые, чем платина, материалы (хром, вольфрам).

## **2. Бистабильный МЭМС-переключатель с механизмом активного размыкания электродов**

Работа с переключателем на основе кантилевера наноразмерной толщины показала, что уменьшение упругости подвижного электрода позволяет снизить напряжение срабатывания до уровня 10 В [11]. Однако с уменьшением упругости уменьшается возвращающая сила, размыкающая электроды переключателя. Возрастает вероятность прилипания подвижного электрода к коммутируемому под действием адгезионных сил, а также явлений, происходящих при «горячем» переключении (плавление контактов, их приварка друг к другу). Слипание кантилевера с коммутируемым электродом являлось главным ограничивающим фактором на пути дальнейшего снижения напряжения срабатывания, а также одной из главных причин выхода МЭМС-переключателей из строя [11]. Но слипание электродов имеет и положительную сторону: для нахождения переключателя в замкнутом состоянии не требуется подача управляющего напряжения, то есть замкнутое состояние является стабильным. При этом в конструкцию ключа должны быть заложены механизмы, позволяющие при необходимости преодолевать силы, действующие между электродами, и размыкать контакт (активное размыкание).

Разработчики МЭМС-переключателей предлагают различные варианты реализации механизма активного размыкания: возбуждение механических колебаний подвижного электрода [19], размещение дополнительного электрода над подвижным электродом [20], применение размыкающих рычагов [21] и др. Недостатком предлагаемых решений является существенное усложнение конструкции изделия, технологии изготовления и способов управления. Кроме того, представленные в литературе ключи имеют относительно высокое управляющее напряжение (более 10 В). Поэтому важно найти такой механизм активного размыкания, который был бы максимально эффективен и прост в реализации и при этом позволял обеспечить напряжение срабатывания менее 3 В. Создание надежного МЭМС-переключателя, обладающего низким напряжением срабатывания и не имеющего проблемы слипания электродов, позволит существенно расширить область применения МЭМС-устройств данного класса. В разделе представлен бистабильный МЭМС-переключатель электростатического типа с резистивным контактом, обладающий механизмом активного размыкания электродов [22].

### **2.1. Конструкция и принцип работы переключателя**

Конструкция переключателя представлена на рис. 8. Подвижным электродом является металлическая балка, закрепленная на крутильных подвесах. Под каждым плечом балки находятся управляющий и коммутируемый электроды.

Принцип работы переключателя состоит в следующем. На один из управляющих электродов подается напряжение, под действием электростатической силы балка наклоняется и приходит в контакт с коммутируемым электродом

(рис. 9, состояние 1). Подвесы при этом испытывают кручение, в них возникает сила упругости, пытающаяся вернуть балку в горизонтальное положение. Однако упругость подвесов специально задана малой, чтобы обеспечить низкое напряжение срабатывания. Сила упругости не в состоянии преодолеть адгезионные силы и отлепить балку от коммутируемого электрода. Поэтому при отключении управляющего напряжения переключатель сохраняет свое состояние. Для размыкания контакта используется управляющий электрод, находящийся под поднятым плечом балки. При подаче напряжения на него балка наклоняется в противоположную сторону и приходит в контакт с другим коммутируемым электродом (рис. 9, состояние 2). Чтобы снова перейти в состояние 1, необходимо подать напряжение на первый управляющий электрод. Таким образом, в процессе работы ключ находится в одном из двух состояний, которые сохраняются при отключении управляющих сигналов, то есть ключ является бистабильным. Горизонтальное положение балки после первого срабатывания не достигается.

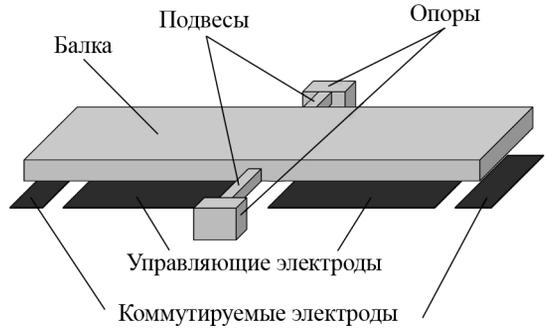


Рис. 8. Конструкция МЭМС-переключателя

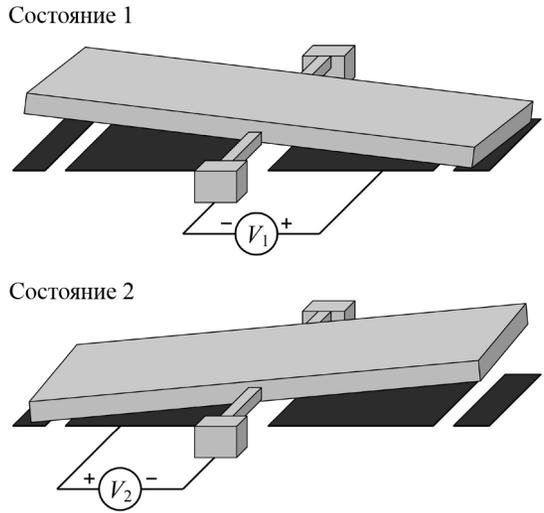


Рис. 9. Рабочие состояния переключателя

## 2.2. Расчет напряжения срабатывания

Конструкция переключателя с обозначением размеров изображена на рис. 10. Выражение для напряжения первого срабатывания ( $V_{PI}$ , pull-in voltage, напряжение перехода балки из горизонтального положения в наклонное) выводится из уравнения баланса моментов электростатической и упругой сил и имеет вид [23]

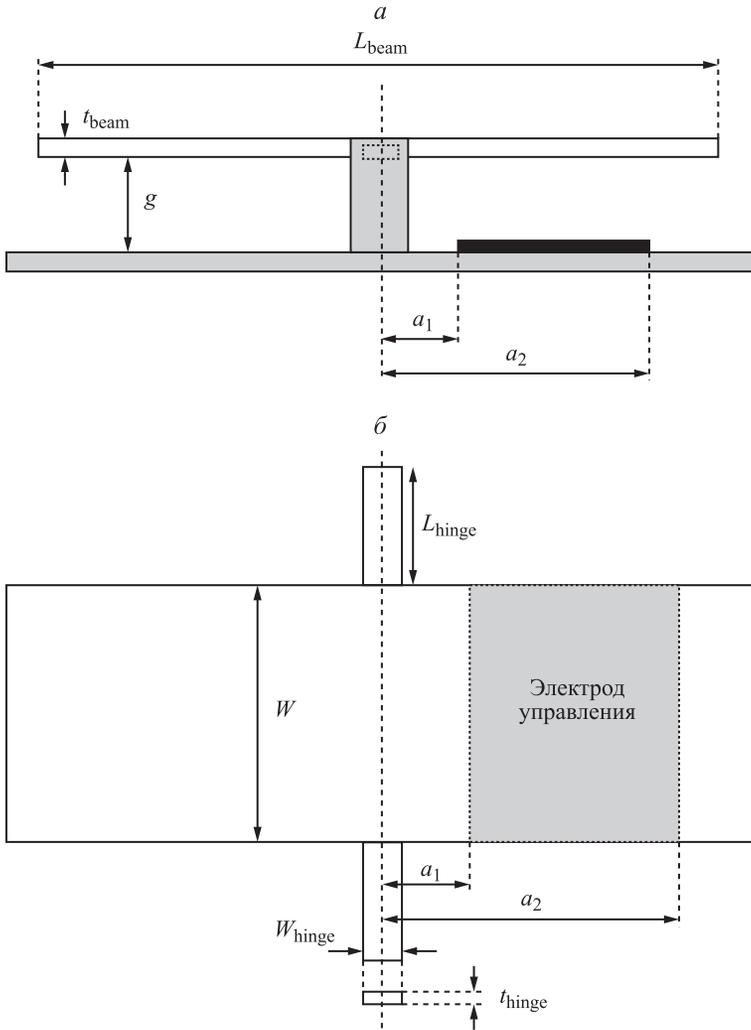
$$V_{PI} = \sqrt{\frac{0.8275 K g^3}{\epsilon_0 w a_2^3} \left( 1 - \left( \frac{a_1}{a_2} \right)^2 \right)^{-0.5} \left( 1 + 0.6735 \left( \frac{a_1}{a_2} \right)^{1.931} \right)^{-0.3244}}, \quad (7)$$

где  $K$  – константа упругости подвесов, которая задается выражением [24]:

$$K = \frac{Gw_{\text{hinge}}t_{\text{hinge}}^3}{8L_{\text{hinge}}} \left[ \frac{16}{3} - 3.36 \frac{t_{\text{hinge}}}{w_{\text{hinge}}} \left( 1 - \frac{t_{\text{hinge}}^4}{12w_{\text{hinge}}^4} \right) \right]. \quad (8)$$

В выражении (8)  $G$  – модуль сдвига материала подвесов.

В таблице 3 приведены номинальные значения размеров конструкции переключателя и результаты расчетов напряжения срабатывания с использованием выражения (7). Рассматривались четыре типа конструкции, отличающиеся шириной балки и электродов  $w$ . В качестве материала подвесов был выбран хром ( $G = 115$  ГПа). Константа упругости подвесов, в соответствии с выражением (8), составляла  $3.9 \cdot 10^{-9}$  Н·м. Согласно расчетам, напряжение первого



**Рис. 10.** Конструкция переключателя с указанием геометрических размеров:  $a$  – вид сбоку,  $б$  – вид сверху

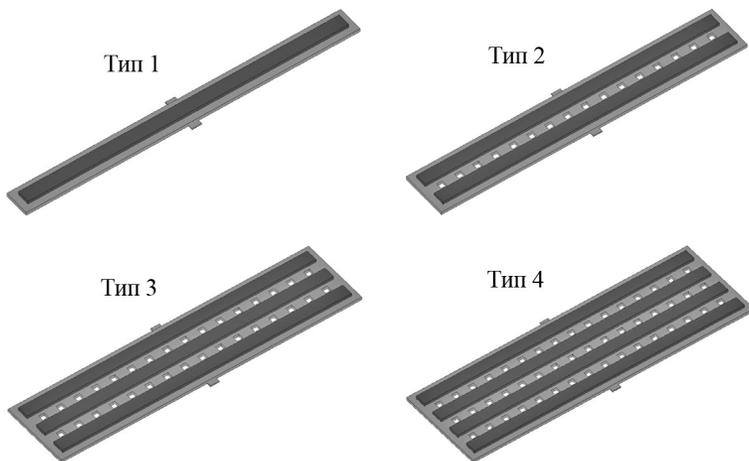
**Таблица 3.** Размеры переключателя и результаты аналитических расчетов и моделирования напряжения первого срабатывания

Тип ключа	$L_{\text{beam}}$ , мкм	$t_{\text{beam}}$ , мкм	$L_{\text{hinge}}$ , мкм	$w_{\text{hinge}}$ , мкм	$t_{\text{hinge}}$ , мкм	$a_1$ , мкм	$a_2$ , мкм	$G$ , мкм	$w$ , мкм	$V_{\text{PI}}$ , В (расчет)	$V_{\text{PI}}$ , В (COMSOL)
1	102	1	1.5	3	0.3	4	44	0.5	8	8.2	12.8
2									16	5.8	9.5
3									24	4.7	7.9
4									32	4.1	7.0

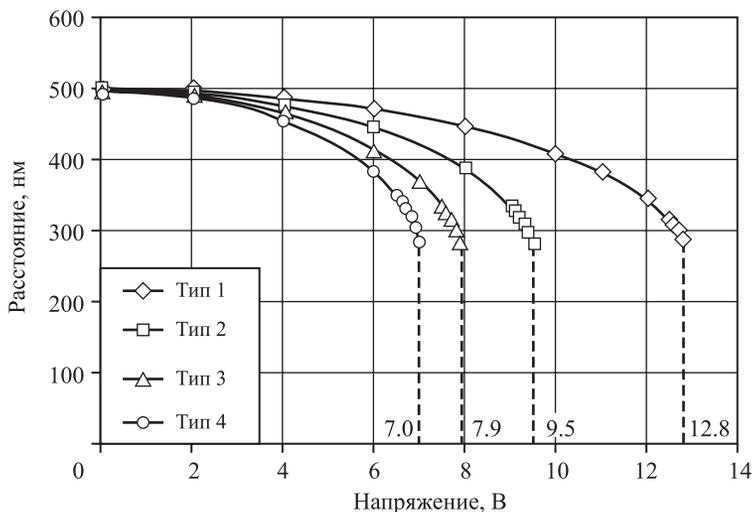
срабатывания должно составлять от 4.1 до 8.2 В. Стоит отметить, что выбор материала балки не влияет на напряжение срабатывания переключателя, так как полагается, что балка является недеформируемой.

С целью упрощения процесса изготовления переключателя и улучшения его функционирования конструкция балки была модифицирована. Во-первых, были добавлены отверстия перфорации, позволяющие ускорить удаление жертвенного слоя из-под балки и частично снять остаточные механические напряжения в материале. Также перфорация снижала воздушное демпфирование и массу балки, тем самым увеличивая скорость переключения [25]. Во-вторых, были добавлены продольные ребра жесткости, призванные увеличить упругость балки без существенного возрастания ее массы, а также снизить изгиб балки под действием остаточных напряжений [26].

Учет влияния перфорации и ребер жесткости на характеристики ключа позволяет моделирование методом конечных элементов. Моделирование выполнялось в среде COMSOL Multiphysics. На рис. 11 представлены модели балок переключателей четырех типов, размеры которых указаны в табл. 3. На верхней поверхности балки располагались ребра жесткости высотой 1 мкм (выделены на рис. 11 темным цветом). Между ребрами находились отверстия перфорации с латеральными размерами  $2 \times 2$  мкм<sup>2</sup>. Модель



**Рис. 11.** Модели балок переключателей четырех типов



**Рис. 12.** Зависимость расстояния между концом балки и подложкой от управляющего напряжения

переключателя включала балку и один управляющий электрод. Торцы подвесов были фиксированы. На управляющий электрод относительно балки подавался электрический потенциал. Потенциал постепенно увеличивался до момента потери балкой стабильности, то есть до электростатического схлопывания (срабатывания ключа, pull-in). Зависимость расстояния между концом балки и подложкой от приложенного напряжения, рассчитанная для четырех типов переключателя, показана на рис. 12. Из данной зависимости определялось напряжение срабатывания.

Результаты моделирования представлены в табл. 3. Смоделированные значения  $V_{PI}$  превышали рассчитанные аналитически в 1.5–1.7 раза и составляли от 7.0 до 12.8 В. Моделирование учитывало влияние перфорации балки на электростатическое поле. Введение отверстий в конструкцию балки уменьшало площадь перекрытия ее с управляющим электродом и, следовательно, увеличивало напряжение срабатывания. Тем не менее наличие перфорации было необходимым и обуславливалось особенностями технологии изготовления переключателя.

После срабатывания переключателя в области контакта балки с коммутируемым электродом начинают действовать силы адгезии, которые удерживают балку в наклонном положении. Для размыкания контакта необходимо приложить напряжение между балкой и управляющим электродом, находящимся под поднятым плечом балки. Назовем его напряжением размыкания (recovery voltage,  $V_{REC}$ ). Величина его определяется из условия баланса моментов сил:

$$M_{REC} + M_{MECH} = M_{ADH}, \quad (9)$$

где  $M_{REC}$ ,  $M_{MECH}$ ,  $M_{ADH}$  — моменты электростатической силы, силы упругости подвесов и силы адгезии, соответственно. Расчет  $V_{REC}$  из выражения (9)

затруднен, поскольку величина адгезионных сил неизвестна. Можно утверждать, что напряжение размыкания будет превышать напряжение первого срабатывания. Во-первых, воздушный зазор между поднятым плечом балки и управляющим электродом превышает начальную величину зазора  $g$ . Во-вторых, для размыкания контакта балки с коммутируемым электродом необходимо преодолеть силы адгезии. Важно, что в работе переключателя придется оперировать именно значением напряжения размыкания, поскольку после первого срабатывания горизонтальное положение балки достигаться не будет.

### 2.3. Технология изготовления МЭМС-переключателя

Переключатели изготавливались по технологии поверхностной микрообработки. Основные этапы процесса изготовления представлены на рис. 13. На кремниевой пластине КДБ (100) диаметром 100 мм формировался диэлектрический слой. Для этого пластина термически окислялась во влажном кислороде до толщины слоя  $\text{SiO}_2$  1 мкм. Далее на диэлектрическом слое формировались управляющие и коммутируемые электроды переключателя (рис. 13, *а*). Для этого на пластину методом магнетронного распыления наносился слой хрома толщиной 50 нм, выполнялась контактная фотолитография и жидкостное травление хрома в цериевом травителе.

Затем на пластину магнетронным методом наносился жертвенный слой аморфного кремния ( $\text{a-Si}$ ) толщиной 0.5 мкм (рис. 13, *б*). В жертвенном слое формировались углубления, необходимые для создания контактных выступов на нижней поверхности балки переключателя (рис. 13в). Для этого на пластину наносился слой фоторезиста, в котором выполнялись круглые окна диаметром 2 мкм. Через окна проводилось травление  $\text{a-Si}$  в плазме  $\text{SF}_6$  на глубину около 200 нм.

Далее на жертвенном слое последовательно формировались торсионные подвесы и балка переключателя. На пластину наносился слой хрома толщиной 300 нм, из которого с помощью фотолитографии и жидкостного травления выполнялись подвесы (рис. 13, *г*). Затем формировались ребра жесткости

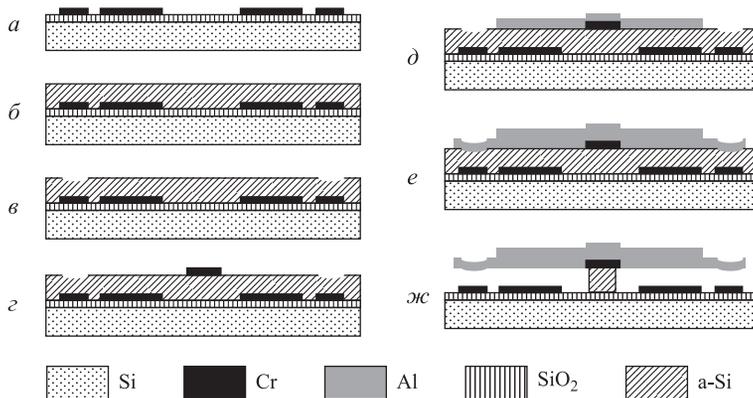


Рис. 13. Основные этапы процедуры изготовления переключателя

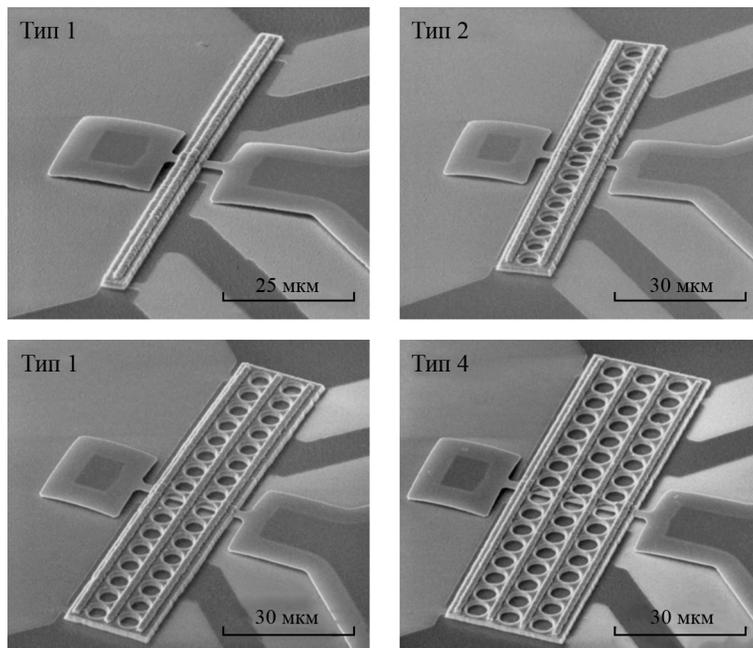


Рис. 14. РЭМ-изображения МЭМС-переключателей четырех типов

балки (рис. 13д). Для этого на пластину наносился слой алюминия толщиной 1 мкм, выполнялась литография и жидкостное травление алюминия в кислотном травителе. Далее поверх ребер жесткости наносился еще один слой алюминия толщиной 1 мкм, выполнялась литография (в слое фоторезиста формировался рисунок балки с отверстиями перфорации) и травление алюминия (рис. 13, е). Таким образом, балка имела толщину 1 мкм и продольные ребра жесткости высотой 1 мкм.

Заключительным этапом изготовления являлось удаление жертвенного слоя  $\alpha$ -Si из-под балки (освобождение балки) методом травления в плазме  $SF_6$  (рис. 13, ж). РЭМ-изображения изготовленных переключателей четырех типов представлены на рис 14.

#### 2.4. Экспериментальные результаты и обсуждение

Чип, содержащий четыре переключателя, показан на рис. 15. Каждый переключатель имел пять контактных площадок, которые соединялись с балкой и электродами ключа с помощью металлических дорожек. На контактные площадки устанавливались иглы, к иглам подключались измерительные приборы. Схема подключения приборов приведена на рис. 16. Управляющее напряжение подавалось от источника питания Agilent E3647A, сопротивление ключа измерялось мультиметром Keysight 34461A в режиме омметра. Измерение рабочих характеристик образцов выполнялось в воздухе при нормальных условиях.

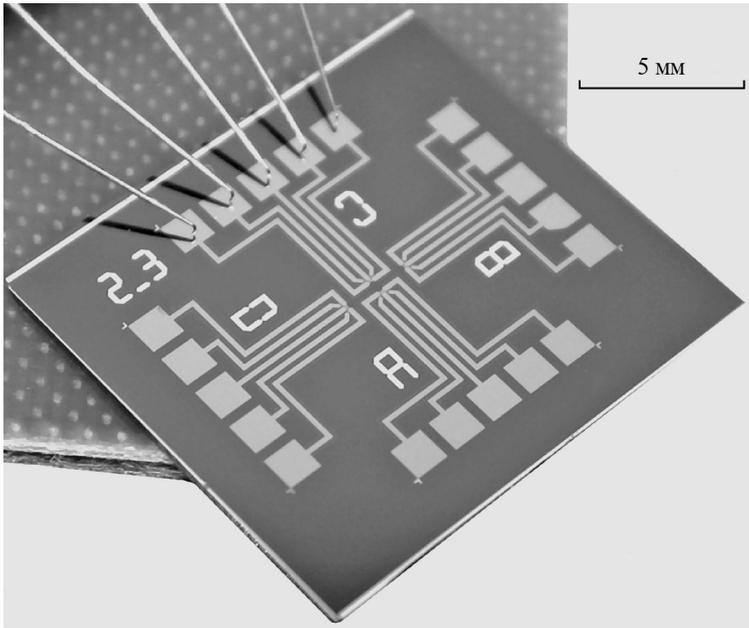


Рис. 15. Чип, содержащий четыре переключателя

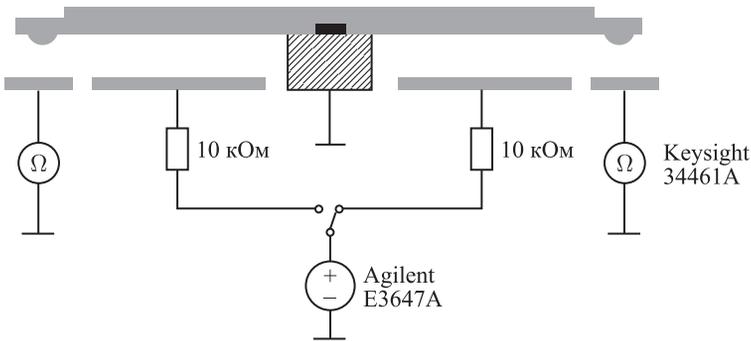


Рис. 16. Схема подключения приборов

Экспериментально полученные значения напряжения первого срабатывания даны в табл. 4. Наблюдалось хорошее согласие экспериментальных данных с результатами моделирования методом конечных элементов (см. табл. 3). Наименьшим напряжением срабатывания обладали переключатели с наиболее широкой балкой (тип 4), минимальное значение  $V_{PI}$  составляло 6.0 В.

Напряжение размыкания (табл. 4) превышало напряжение первого срабатывания в 3–4 раза. Превышение ожидалось, однако величину его трудно было предсказать теоретически. Предлагаемая конструкция переключателя дает возможность пойти по другому пути: зная из эксперимента напряжение размыкания и геометрию ключа, можно определить

**Таблица 4.** Экспериментально полученные значения напряжения первого срабатывания, напряжения размыкания и сопротивления переключателей в замкнутом состоянии

Тип ключа	$V_{PI}$ , В	$V_{REC}$ , В	$R$ , Ом
1	$13.0 \pm 0.7$	$27.7 \pm 5.1$	$344 \pm 41$
2	$10.6 \pm 1.1$	$32.0 \pm 8.3$	$318 \pm 33$
3	$9.0 \pm 1.5$	$26.7 \pm 3.9$	$336 \pm 95$
4	$6.5 \pm 0.5$	$24.6 \pm 5.2$	$317 \pm 20$

величину сил адгезии. Однако это является отдельной исследовательской задачей. Стоит отметить, что на начальном этапе работы значение напряжения размыкания было относительно высоким и составляло от 19.4 до 40.3 В. В дальнейшем планируется достичь более низких значений путем уменьшения зазора между балкой и электродами и, возможно, модификацией формы балки.

Сопротивление переключателей в замкнутом состоянии составляло 250–400 Ом. Уменьшение сопротивления с увеличением ширины балки не наблюдалось. Хотя, чем шире была балка, тем меньше было ее собственное сопротивление и тем больше она содержала контактных выступов. Отсутствие зависимости сопротивления ключа от ширины балки можно объяснить тем, что значительную часть сопротивления вносили металлические дорожки, идущие от контактных площадок к электродам и балке ключа. Выделить сопротивление контакта из суммарного сопротивления ключа было проблематично. В представленных переключателях возникал контакт алюминий–хром. В дальнейшем планируется использовать принятые в МЭМС-отрасли контактные материалы, такие как золото или платина [27], для достижения малого контактного сопротивления и надежности контакта балки с коммутируемым электродом.

## Заключение

В статье были представлены результаты работы по созданию МЭМС-переключателя электростатического типа с низким напряжением срабатывания. Были рассмотрены две конструкции: переключатель на основе кантилевера наноразмерной толщины и переключатель с механизмом активного размыкания электродов. Согласно расчетам, обе конструкции позволяют достичь малого напряжения срабатывания. Однако эксперимент показал, что переключатель с механизмом активного размыкания более предпочтителен для дальнейшего исследования. Его достоинства: простота и надежность конструкции, бистабильность, возможность преодоления залипания, хорошая повторяемость при изготовлении. Кроме того, конструкция позволяет использовать все методы снижения напряжения срабатывания: уменьшение упругости подвесов, расширение зоны действия электростатического поля, уменьшение воздушного зазора между балкой и электродами. Целевой уровень напряжения 5 В на данный момент не достигнут, но работа в этом направлении продолжается.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 14–07–31156 мол\_а и 16–37–60065 мол\_а\_дк с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием «Диагностика микро- и наноструктур».

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Rebeiz G.M.* RF MEMS: Theory, design, and technology. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 512 p.
2. *Sharma A.K., Gautam A.K., Farinelli P., Dutta A., Singh S.G.* A Ku band 5 bit MEMS phase shifter for active electronically steerable phased array applications // *J. Micromech. Microeng.* 2015. Vol. 25. P. 035014.
3. *Guo X., Gong Z., Zhong Q., Liang X., Liu Z.* A miniaturized reconfigurable broadband attenuator based on RF MEMS switches // *J. Micromech. Microeng.* 2016. Vol. 26. P. 074002.
4. *Sekar V., Armendariz M., Entesari K.* A 1.2–1.6-GHz substrate-integrated-waveguide RF MEMS tunable filter // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2011. Vol. 59. N. 14. P. 866–876.
5. *Spencer M., Chen F., Wang C.C., Nathanael R., Fariborzi H et. Al.* Demonstration of integrated micro-electro-mechanical relay circuits for VLSI applications // *IEEE J. Solid-State Circuits.* 2011. Vol. 46. N. 1. P. 308–320.
6. *Dai C.-L., Chen J.-H.* Low voltage actuated RF micromechanical switches fabricated using CMOS-MEMS technique // *Microsyst. Technol.* 2006. Vol. 12. P. 1143–1151.
7. RadantMEMS RF switches: <http://www.radantmems.com/radantmems/products.html>.
8. OMRON RF switch 2SMES-01: <http://ru.mouser.com/ProductDetail/Omron-Electronics/2SMES-01/>.
9. *Song Y.-T., Lee H.-Y., Esashi M.* Low actuation voltage capacitive shunt RF-MEMS switch having a corrugated bridge // *IEICE Trans. Electron.* 2006. Vol. E89-C. P. 1880–1887.
10. *Kim M.-W., Song Y.-H., Yang H.-H., Yoon J.B.* An ultra-low voltage MEMS switch using stiction-recovery actuation // *J. Micromech. Microeng.* 2013. Vol. 23. P. 045022.
11. *Уваров И.В., Наумов В.В., Селюков П.В.* МЭМС-переключатель электростатического типа на основе кантилевера наноразмерной толщины // *Нано- и микросистемная техника.* 2015. № 4. С. 32–41.
12. *Уваров И.В., Наумов В.В., Амиров И.И.* Особенности изготовления металлических кантилеверов наноразмерной толщины // *Нано- и микросистемная техника.* 2013. № 11. С. 5–9.
13. *Уваров И.В., Наумов В.В., Амиров И.И.* Резонансные свойства многослойных металлических нанокантилеверов // *Нано- и микросистемная техника.* 2013. № 4. С. 29–32.
14. *Ekkels P., Rottenberg X., Puers R., Tilmans H.A.C.* Evaluation of platinum as a structural thin film material for RF-MEMS devices // *J. Micromech. Microeng.* 2009. Vol. 19. P. 065010.
15. *Timoshenko S.P., Gere J.M.* Mechanics of materials. New York: Van Nostrand, 1972. 552 p.
16. *Younis M.I.* MEMS linear and nonlinear statics and dynamics. New York: Springer Science + Business Media, LLC, 2011. 453 p.
17. *Petersen K.E.* Dynamic micromechanics on silicon: Techniques and devices // *IEEE Trans. Electron Devices.* 1978. Vol. ED-25. P. 1241–1250.
18. *Bhushan B.* Adhesion and stiction: Mechanisms, measurement techniques, and methods for reduction // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2003. Vol. 21. P. 2262–2296.

19. *Chua G.L., Singh P., Soon B.W., Liang Y.S., Jayaraman K.G., Kim et al.* Molecular adhesion controlled microelectromechanical memory device for harsh environment data storage // *Appl. Phys. Lett.* 2014. Vol. 105. P. 113503.
20. *Oberhammer J., Stemme G.* Low-voltage high-isolation DC-to-RF MEMS switch based on an S-shaped film actuator // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2004. Vol. 51. P. 149–155.
21. *Song Y.-H., Han C.-H., Kim M.-W. Lee J.O., Yoon J.-B.* An electrostatically actuated stacked-electrode MEMS relay with a levering and torsional spring for power applications // *J. Microelectromech. Syst.* 2012. Vol. 21. P. 1209–1217.
22. *Уваров И.В., Наумов В.В., Королева О.М., Ваганова Е.И., Амиров И.И.* Бистабильный МЭМС-переключатель с механизмом активного размыкания электродов // *Нано- и микросистемная техника.* 2016. № 9. С. 582–588.
23. *Degani O., Nemirovsky Y.* Design considerations of rectangular electrostatic torsion actuators based on new analytical pull-in expressions // *J. Microelectromech. Syst.* 2002. Vol. 11. P. 20–26.
24. *Timoshenko S.P., Goodier I.N.* Theory of Elasticity. New York: McGraw-Hill, 1970. 608 p.
25. *De Pasquale G., Veijola T., Soma A.* Modelling and validation of air damping in perforated gold and silicon MEMS plates // *J. Micromech. Microeng.* 2010. Vol. 20. P. 015010.
26. *Gupta A., Barron L., Brainin M., Lee J.-B.* Reduction of out-of-plane warpage in surface micromachined beams using corrugation // *J. Micromech. Microeng.* 2014. Vol. 24. P. 065023.
27. *Song Y.-H., Kim M.-W., Lee J.O., Ko S.-D., Yoon J.-B.* Complementary dual-contact switch using soft and hard contact materials for achieving low contact resistance and high reliability simultaneously // *J. Microelectromech. Syst.* 2013. Vol. 22. P. 846–854.