

И. В. Уваров, канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр., **В. В. Наумов**, канд. физ.-мат. наук, уч. секретарь, **Р. В. Селюков**, мл. науч. сотр.

Ярославский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологического института Российской академии наук, e-mail: ilnik88@mail.ru

МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ТИПА НА ОСНОВЕ КАНТИЛЕВЕРА НАНОРАЗМЕРНОЙ ТОЛЩИНЫ

Поступила в редакцию 04.08.2014

Представлен МЭМС-переключатель электростатического типа с резистивным контактом, изготовленный с помощью микроэлектронных технологий. Подвижным элементом переключателя является трехслойный металлический кантилевер, имеющий наноразмерную толщину и высокое отношение длины к толщине. Малая упругость кантилевера позволяет достичь относительно низких значений напряжения срабатывания. Выполнен теоретический анализ и экспериментальное исследование электромеханических характеристик переключателя.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, электростатический переключатель, резистивный контакт, металлический кантилевер, напряжение срабатывания, контактное сопротивление

Введение

Широкий класс микроэлектромеханических систем (МЭМС) составляют переключатели. Они находят применение в ВЧ и СВЧ системах, таких как адаптивные антенны, переключательные матрицы и приемопередающие блоки беспроводных устройств связи [1]. Среди МЭМС-ключей наибольшее распространение получили устройства с электростатическим механизмом срабатывания. В таких ключах подвижным механическим элементом является кантилевер (мост, мембрана), под которым располагаются управляющий и коммутируемый электроды. Между кантилевером и управляющим электродом прикладывается напряжение, кантилевер деформируется по направлению к электроду под действием электростатической силы притяжения. При некотором значении напряжения, называемом напряжением срабатывания, кантилевер соприкасается с коммутируемым электродом, переводя ключ в замкнутое состояние. Размыкание ключа осуществляется, как правило, за счет силы упругости, возникающей в деформированном кантилевере. По сравнению с радиочастотными ключами на *pin*-диодах и полевых транзисторах, МЭМС-переключатели электростатического типа имеют ряд преимуществ: малая потребляемая мощность цепи управления; малые потери в замкнутом состоянии; хорошая развязка в разомкнутом состоянии; низкий уровень нелинейных искажений; высокая радиационная стойкость; широкий диапазон рабочих температур [2].

Современной тенденцией является переход от микро- к наноэлектромеханическим системам (НЭМС) с созданием ключей на основе наноразмерных кантилеверов [3–5]. Цель такого перехода — уменьшение габаритных размеров переключателя,

увеличение скорости переключения и расширение полосы пропускаемых частот. Один из основных недостатков МЭМС/НЭМС-ключей — высокое напряжение срабатывания — по-прежнему не преодолен. Напряжение срабатывания современных серийно выпускаемых ключей составляет несколько десятков вольт [6] и не позволяет широко использовать их в современных электронных схемах, имеющих низкое энергопотребление. Поэтому разработка МЭМС/НЭМС-переключателей с низким напряжением срабатывания является актуальной задачей.

Существуют несколько способов снижения напряжения срабатывания ключа. Один из них — увеличение электростатической силы, действующей на кантилевер, за счет расширения зоны действия электростатического поля, т. е. за счет увеличения площади перекрытия кантилевера и управляющего электрода [7], другой метод — уменьшение зазора между кантилевером и управляющим электродом [8]. Однако наиболее эффективным и широко применяемым методом снижения напряжения срабатывания является уменьшение упругости кантилевера. Уменьшение упругости достигается, как правило, путем использования нестандартной конструкции кантилевера: применяются складчатые кантилеверы [9], кантилеверы на торсионных [10] и зигзагообразных подвесах [11] и др. В настоящей работе представлен МЭМС-переключатель электростатического типа с резистивным контактом. Кантилевер переключателя имеет наноразмерную толщину (80...160 нм) и высокое отношение длины к толщине (достигающее 400) и поэтому обладает малой упругостью. Малая упругость кантилевера позволяет достичь низких значений напряжения срабатывания переключателя.

Конструкция и технология изготовления переключателя

МЭМС-переключатель электростатического типа представляет собой однополюсный ключ с нормально разомкнутыми контактами. Конструкция переключателя 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 нему 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 применяют кантилеверы, имеющие низкие значения упругости (0,012...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 изготавливали по технологии поверхностной микрообработки. Основные этапы процесса изготовления представлены на рис. 2. На кремниевой пластине КДБ 0,01 диаметром 100 мм формировали диэлектрический слой. Для этого пла-

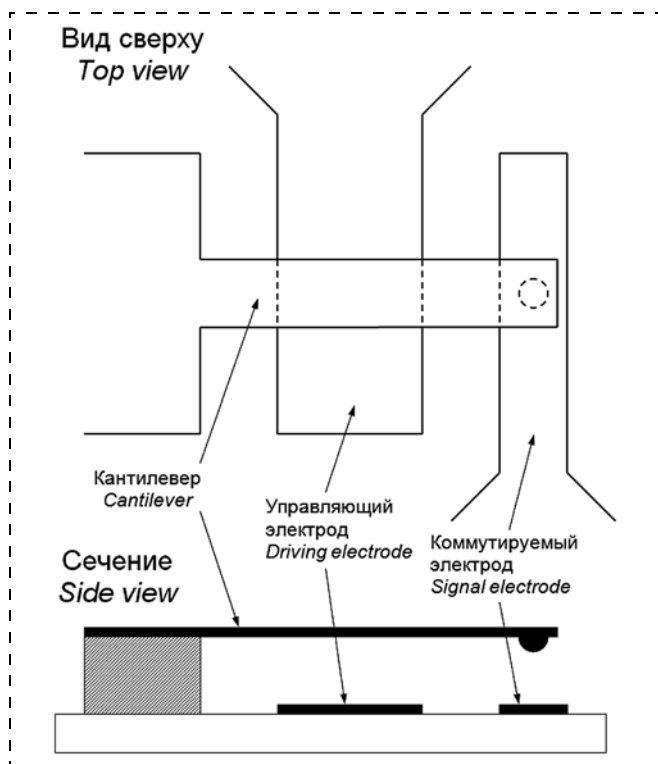


Рис. 1. Конструкция МЭМС-переключателя
Fig. 1. Design of MEMS switch

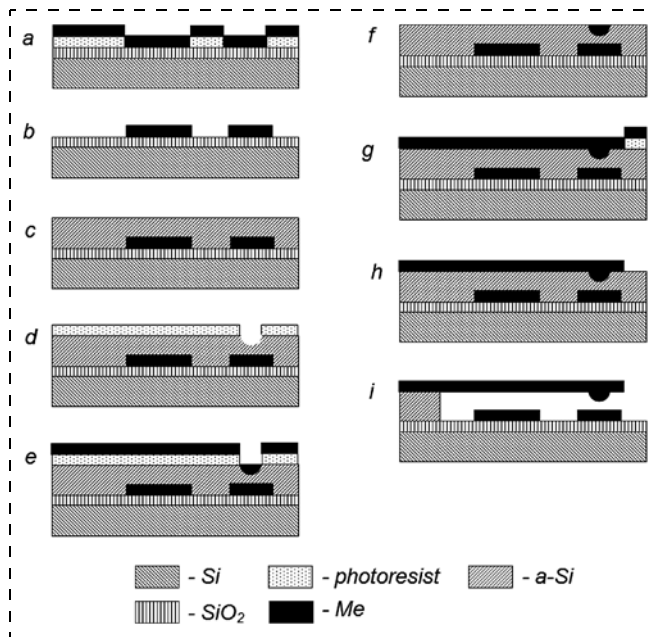


Рис. 2. Процесс изготовления переключателя
Fig. 2. Manufacture of the switch

стина термически окислялась во влажном кислороде до толщины слоя SiO_2 1 мкм. Далее на слое SiO_2 создавали управляющий и коммутируемый электроды переключателя. Для этого пластину покрывали слоем позитивного фоторезиста толщиной 1,5 мкм и выполняли контактную фотолитографию. После проявления фоторезиста на пластину методом магнетронного распыления наносили адгезионный слой хрома толщиной 10 нм и слой платины толщиной 50 нм (рис. 2, a). После нанесения слоев металла выполнялось "взрывное" удаление фоторезиста (*lift-off*, рис. 2, b).

Далее формировали кантилевер с контактным выступом на его нижней поверхности. Для этого на пластину магнетронным методом наносили жертвенный слой аморфного кремния (a-Si) толщиной 1 мкм (рис. 2, c). Пластины снова покрывали слоем фоторезиста и выполняли контактную фотолитографию. При этом в слое резиста формировали круглое окно диаметром 2 мкм. Через окно методом травления в плазме SF_6 в слое a-Si формировали ямку глубиной около 100 нм (рис. 2, d). Далее на пластину напыляли слой Pt толщиной 100 нм (рис. 2, e) и удаляли остатки фоторезиста (рис. 2, f). Затем пластину снова покрывали слоем фоторезиста и выполняли литографию — формировали рисунок кантилевера. На пластину напыляли слой металла Cr/Al/Cr толщиной 10/60/10, 15/90/15 и 20/120/20 нм (рис. 2, g), затем проводили взрывное удаление фоторезиста (рис. 2, h).

Заключительный этап изготовления — удаление жертвенного слоя a-Si из-под кантилевера (освобождение кантилевера) методом травления в плазме SF_6 (рис. 2, i).

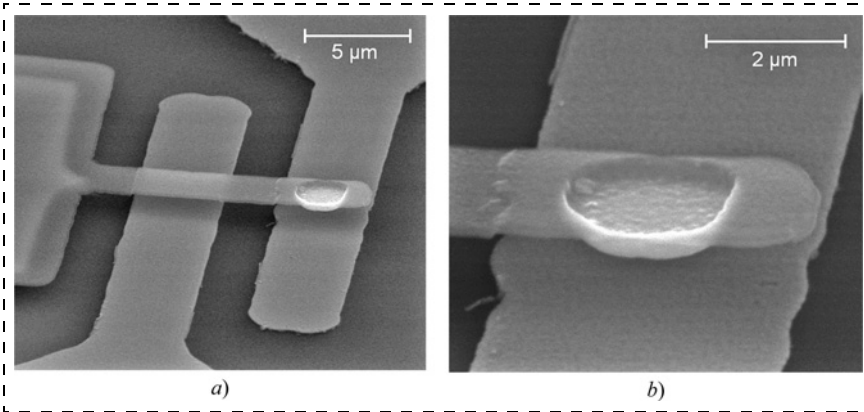


Рис. 3. СЭМ-изображение переключателя: *a* — общий вид; *b* — свободный конец кантилевера (длина кантилевера 14 мкм, ширина 2 мкм, толщина 120 нм)

Fig. 3. SEM image of the switch: *a* — general view; *b* — free end of the cantilever (length — 14 μm, width — 2 μm, thickness — 120 nm)

Были изготовлены переключатели с различными размерами кантилевера и электродов. Кантилевер имел длину 14...32 мкм, ширину 2...6 мкм и толщину 80...160 нм. Управляющий электрод имел ширину 4...16 мкм. Ширина коммутируемого электрода составляла 4...6 мкм. Зазор между кантилевером и электродами был 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 выбрана платина благодаря химической инертности, относительно высокой твердости и проводимости [14]. СЭМ-изображение переключателя представлено на рис. 3, *a*. На рис. 3, *b*, крупным планом показан свободный конец кантилевера с контактным выступом.

Расчет электромеханических характеристик переключателя

На рис. 4 схематически изображены кантилевер и управляющий электрод переключателя с указанием основных геометрических размеров. Пусть на кантилевер действует распределенная нагрузка $q(x)$,

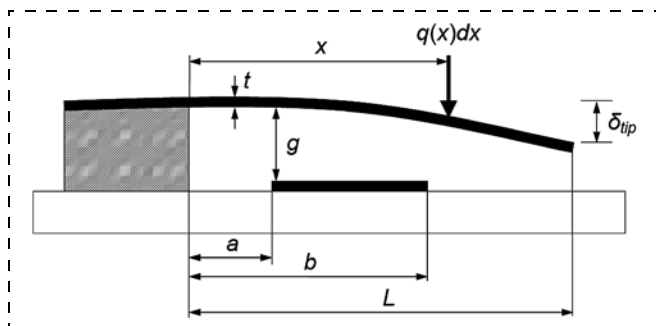


Рис. 4. Кантилевер и управляющий электрод переключателя с указанием параметров, используемых при расчете напряжения срабатывания

Fig. 4. Cantilever and the control electrode of the switch with specification of the parameters, used for calculation of the actuation voltage

имеющая размерность силы, деленной на единицу площади. На малый элемент кантилевера длиной dx с координатой x будет действовать сила $F(x) = q(x)w dx$, где w — ширина кантилевера. Обусловленное действием этой силы вертикальное отклонение свободного конца кантилевера от начального положения задается выражением [15]

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

где $(EI)_{eff}$ — эффективная жесткость кантилевера на изгиб; L — его длина. Эффективная жесткость трехслойного кантилевера,

рассчитанная методом эквивалентного поперечного сечения [16], задается выражением

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

где E_{Cr} , E_{Al} , t_{Cr} , t_{Al} — модули Юнга и толщина 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):

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

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 [16]:

$$q(x) = \frac{\epsilon_0 V^2 [\sigma(x-a) - \sigma(x-b)]}{2(g - \delta(x))^2}, \quad (4)$$

где ϵ_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]:

$$\delta(x) = (x/L)^2 \delta_{tip}. \quad (5)$$

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

$$V^2 = \frac{12(EI)_{eff} \delta_{tip}^3}{\epsilon_0 w L^4} \left[\int_a^b x^2 (3L - x) \left(\frac{gL^2}{\delta_{tip}} - x^2 \right)^{-2} dx \right]^{-1}. \quad (6)$$

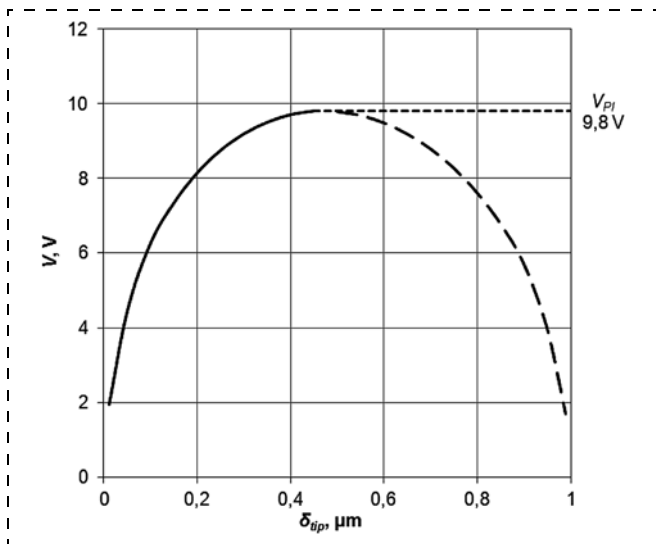


Рис. 5. Связь отклонения свободного конца кантилевера с приложенным напряжением, рассчитанная для переключателя с $L = 20$ мкм, $a = 4$ мкм, $b = 12$ мкм (табл. 1, тип 4)

Fig. 5. Connection between the deviation of the free end of the cantilever and the applied voltage, calculated for a switch with $L = 20 \mu\text{m}$, $a = 4 \mu\text{m}$, $b = 12 \mu\text{m}$ (table 1, type 4)

Выражение (6) представляет собой связь отклонения свободного конца кантилевера δ_{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 нестабильным, его свободный конец падает на подложку. Напряжение срабатывания определялось как максимальное значение функции $V(\delta_{tip})$ (выражение (6)) [17]. Расчетные значения напряжения срабатывания переключателей с кантилевером шириной 2 мкм и различным положением управляющего электрода представлены в табл. 1. Значения лежат в диапазоне 9,8...105,1 В. Чем шире электрод управления и чем ближе он расположен к свободному концу кантилевера, тем ниже напряжение срабатывания. При расчетах были использованы значения модуля Юнга объемного материала $E_{Cr} = 279$ ГПа, $E_{Al} = 70$ ГПа.

Контактное сопротивление переключателя оценивали с использованием модели, в которой шероховатая поверхность приходит в контакт с плоско-

стью. Исходя из параметров конструкции переключателя была рассчитана сила, с которой контактный выступ кантилевера давит на коммутируемый электрод. Значение этой силы зависит от геометрии кантилевера и составляет 0,01...1 мН. При таких контактных усилиях происходит пластическая деформация неровностей поверхности [18], и площадь контакта выступа с электродом определяется выражением $A = F_c/H$, где F_c — сила прижатия выступа к электроду; H — твердость материала контактов (твердость платины полагали равной 450 ГПа). Контактное сопротивление переключателя определяется выражением $R_c = \rho/\sqrt{\pi A}$, где ρ — удельное сопротивление материала (для платины $\rho = 10,6 \cdot 10^{-6}$ Ом·см при температуре 293 К) [18]. При контактных усилиях 0,01...1 мН площадь контакта не превышает $2,4 \cdot 10^{-3}$ мкм². 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 $\tau_s \approx 0,58 f_0^{-1}$ [18]. Это выражение справедливо в случае малого демпфирования, т. е. когда добротность кантилевера превышает 2. Резонансная частота кантилеверов Cr/Al/Cr была измерена методом "светового рычага" [13]. У кантилеверов с толщиной слоев 10/60/10 нм она составляла 89...466 кГц в зависимости от длины кантилевера, у кантилеверов толщиной 15/90/15 нм — 134...699 кГц, 20/120/20 нм — 178...932 кГц. Добротность кантилеверов в воздухе при нормальных условиях составляла 5...10. Согласно расчетам время срабатывания переключателей должно составлять 1...10 мкс.

Экспериментальное исследование переключателей

Фотография изготовленного образца представлена на рис. 6. На чипе расположены три контактные площадки размерами $1,5 \times 1,5$ мм, которые с помощью металлических дорожек шириной 200 мкм соединены с кантилевером и электродами переключателя. На площадки установлены вольфрамовые иглы. К иглам подключены измерительные приборы, схема подключения приборов показана

Таблица 1
Table 1

Тип образца Sample type	$L, \mu\text{m}$	$a, \mu\text{m}$	$b, \mu\text{m}$	V_{PI}, V					
				$t = 80 \text{ nm}$		$t = 120 \text{ nm}$		$t = 160 \text{ nm}$	
				Расч. Calc.	Эксп. Measured	Расч. Calc.	Эксп. Measured	Расч. Calc.	Эксп. Measured
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	$49,3 \pm 11,5$

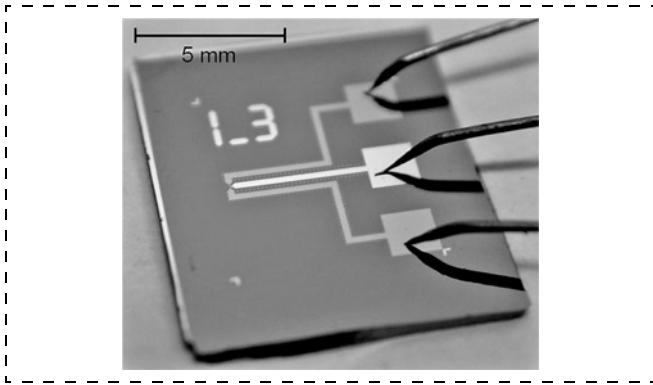


Рис. 6. Фотография образца с иглами на контактных площадках
Fig. 6. Photo of the sample with needles on the contact sites

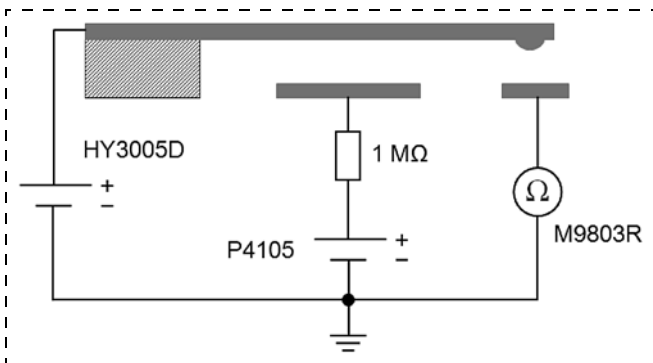


Рис. 7. Схема подключения приборов для тестирования переключателя
Fig. 7. Connection of the devices for testing of the switch

на рис. 7. Тестирование переключателей проводили в воздухе при нормальных условиях.

Для определения напряжения срабатывания ключа между кантилевером и управляющим электродом прикладывали постоянное напряжение от стабилизатора напряжения постоянного тока П4105. Подаваемое напряжение постепенно увеличивали до тех пор, пока не происходило касание кантилевера с коммутируемым электродом. Момент срабатывания фиксировал мультиметр Mastech M9803R в режиме омметра. В табл. 1 приведены средние значения напряжения срабатывания V_{PI} 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 исходно были изогнуты под действием остаточных напряжений в трехслойной металлической пленке [12]. Поэтому расстояние между кантилевером и электродами отличалось от номинального значения. Во-вторых, технология изготовления переключателей была такова, что управляющий 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 сложной задачей, для ее решения требуется тщательное численное моделирование.

Сопротивление переключателя в замкнутом состоянии составляло 200...500 Ом. Экспериментально полученные значения сопротивления R представлены в табл. 2. Измеряемое сопротивление представляло собой сумму сопротивлений трех участков переключателя: 1) дорожки Cr/Al/Cr толщиной 80...160 нм, идущей от иглы к кантилеверу; 2) контакта кантилевера с коммутируемым электродом; 3) дорожки Cr/Pt толщиной 60 нм, идущей 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 иметь сопротивление около 80 Ом. Измеренные значения составляли 100...300 Ом. Таким образом, существенный вклад в сопротивление 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

Таблица 2
Table 2

$w, \mu\text{m}$	$t = 80 \text{ nm}$		$t = 120 \text{ nm}$		$t = 160 \text{ nm}$	
	R, Ω	$I_{\text{max}}, \text{mA}$	R, Ω	$I_{\text{max}}, \text{mA}$	R, Ω	$I_{\text{max}}, \text{mA}$
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

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 прикладывали постоянное напряжение от источника питания Mastech HY3005D (см. рис. 7). Ток, протекающий при этом через переключатель, измеряли мультиметром M9803R. Напряжение постепенно повышали, и при некотором значении тока происходило плавление кантилевера в месте контакта с электродом. Значения допустимого тока I_{\max} приведены в табл. 2. Минимальное значение (около 10 мА) имели 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 максимального значения 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 [19]. 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).

Заключение

Представлен МЭМС-переключатель электростатического типа на основе трехслойного металлического кантилевера наноразмерной толщины, имеющего высокое отношение длины к толщине. Низкие значения напряжения срабатывания переключателя достигаются за счет малой упругости кантилевера. Изготовлен переключатель с напряжением срабатывания 8,1 В. Описана технология изготовления переключателей, проведены расчеты и выполнены измерения их электромеханических характеристик. Расхождение экспериментальных значений напряжения срабатывания с теорией обусловлено особенностями конструкции переключателя,

связанными с технологией изготовления. Следствием малой упругости кантилевера является его подверженность прилипанию к коммутируемому электроду под действием адгезионных сил.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием "Диагностика микро- и наноструктур" при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, а также РФФИ в рамках научного проекта № 14-07-31156 мол_а.

Список литературы

1. **Varadan V. K., Vinoy K. J., Jose K. A.** RF MEMS and their applications. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2003. 394 p.
2. **Spencer M., Chen F., Wang C. C.** et al. Demonstration of integrated micro-electromechanical relay circuits for VLSI applications // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2011. Vol. 46. P. 308–320.
3. **Loh O. Y., Espinosa H. D.** Nanoelectromechanical contact switches // Nature Nanotechnology. 2012. Vol. 7. P. 283–295.
4. **Jang W. W., Lee J. O., Yoon J.-B.** et al. Fabrication and characterization of a nanoelectromechanical switch with 15 nm thick suspension air gap // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 92. P. 103110.
5. **Fruehling A., Xiao S., Qi M.** et al. Nano-switch for study of gold contact behavior // IEEE Sensors. 2009. P. 248–251.
6. **RadantMEMS RF Switches.** URL: <http://www.radantmems.com/radantmems/products.html>
7. **Kim M.-W., Song Y.-H., Yoon J.-B.** Modeling, fabrication and demonstration of a rib-type cantilever switch with an extended gate electrode // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2011. Vol. 21. P. 115009.
8. **Lee J. O., Song T.-H., Kim M.-W.** et al. A sub-1-volt nanoelectromechanical switching device // Nature Nanotechnology. 2013. Vol. 8. P. 36–40.
9. **Song Y.-T., Lee H.-Y., Esashi M.** Low actuation voltage capacitive shunt RF-MEMS switch having a corrugated bridge // IEICE Transactions on Electronics. 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 // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2013. Vol. 23. P. 045022.
11. **Dai C.-L., Chen J.-H.** Low voltage actuated RF micromechanical switches fabricated using CMOS-MEMS technique // Microsystem Technologies. 2006. Vol. 12. P. 1143–1151.
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 // Journal of Micromechanics and Microengineering. 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 Transactions on Electron Devices. 1978. Vol. ED-25. P. 1241–1250.
18. **Rebeiz G. M.** RF MEMS: Theory, Design, and Technology. — Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 483 p.
19. **Bhushan B.** Adhesion and stiction: Mechanisms, measurement techniques, and methods for reduction // Journal of Vacuum Science and Technology B. 2003. Vol. 21. P. 2262–2296.

Electrostatically Actuated MEMS Switch Based on a Cantilever of Nanometer Thickness

The presented electrostatically actuated MEMS switch with a resistive contact was manufactured with the use of micro-electronic technologies. The movable electrode of the switch is a three-layer metal cantilever with a nano-scale thickness and high length-to-thickness ratio. Low elasticity of the cantilever allows us to achieve relatively low values of the pull-in voltage. The authors implemented a theoretical analysis and experimental study of the electromechanical characteristics of the switch.

Keywords: microelectromechanical systems, electrostatic switch, resistive contact, metal cantilever, pull-in voltage, contact resistance

Introduction

Switches present a wide class of microelectromechanical systems (MEMS). They find application in high frequency and superhigh frequency systems (adaptive aeri-als, switching matrixes, transmitter/receiver modules of wireless communication devices) [1]. Among the MEMS-keys the most widespread devices are the ones with an electrostatic mechanism of actuation. The mobile mechanical element in them is a cantilever (a bridge, a membrane), under which the control and switched electrodes are located. Between the cantilever and control electrodes a certain voltage is applied, and under the influence of the electrostatic force the cantilever is deformed in the direction of the electrode. When the voltage is applied, the cantilever contacts the switched electrode, moving a key in the closed position. As a rule, the disjunction of the key is implemented due to the force of elasticity in the deformed cantilever. In comparison with radio-frequency keys on pin-diodes and field transistors, MEMS switches of electrostatic type have low power consumption of the control circuit, small losses in the closed state, a good isolation in the opened state, low level of nonlinear distortions, high radiation resistance, and a wide range of the operating temperatures [2].

A modern trend is transition to the nanoelectromechanical systems (NEMS) with development of keys on the basis of nano-sized cantilevers [3–5]. Its aim is reduction of the dimensions of a switch, increase of the speed of switching and widening of the frequency band. One of the main drawbacks of MEMS/NEMS-keys — their high actuation voltage, still has to be overcome. For the batch-produced keys it reaches several tens of volts [6] and does not allow us to use them widely in the electronic circuits with a low power consumption. Therefore, development of MEMS/NEMS switches with a low actuation voltage is a topical task.

There are several ways to lower the actuation voltage of a key. One of them is an increase of the electrostatic force, influencing a cantilever, due to expansion of the operative range of the electrostatic field, i.e. an increase of the area overlapping the cantilever and the control electrode [7]. Another one is reduction of the gap between the cantilever and the control electrode [8]. The most effective and widely applied method of reduction of the actuation voltage is reduction of the elasticity of the cantilever, which is reached, as a rule, due to an unusual design of the cantilever: application of folded cantilevers [9], cantilevers on torsion [10] and zigzag suspensions [11], etc. The work presents a MEMS-switch of an electrostatic type with a resistive contact. The cantilever of the switch has a nano-sized thickness (80...160 nm) and high relation of

its length to its thickness (up to 400). Therefore, it has low elasticity, which allows us to reach low actuation voltage values of the switch.

Design and manufacturing technology of the switch

The MEMS-switch of an electrostatic type is a single-pole key with normally opened contacts (fig. 1). A metal cantilever is situated above the control and switched electrodes (also made of metal). On the free end of the cantilever there is a contact ledge. When voltage is applied between the cantilever and the control electrode, the cantilever is attracted to it by the electrostatic forces, closing the switched electrode. When the voltage is switched off, the cantilever returns to the original position. The switch employs a metal-metal contact.

In order to ensure a low actuation voltage in the switch, the applied cantilevers have low values of elasticity (0,012...0,38 N/m). The manufacturing technology of the cantilevers was developed earlier [12]. Also various properties of the cantilevers, including their resonant characteristics [13] were investigated in detail.

For production of the switches surface microtreatment was used. The basic manufacturing stages are presented in fig. 2. On KDB 0,01 silicon plate with diameter of 100 mm a dielectric layer was formed. For this purpose the plate was thermally oxidized in moist oxygen up to the thickness of 1 μm of SiO_2 layer. Then the control and switched electrodes of the switch were made on SiO_2 . For this purpose the plate was covered with a layer of a positive photoresist with thickness of 1,5 μm and a contact photolithography was done. After development, an adhesive layer of chrome with thickness of 10 nm and a layer of platinum with thickness of 50 nm were deposited on the plate by the method of magnetron sputtering (fig. 2, a). After the deposition of the layers a lift-off of the photoresist was done (fig. 2, b).

Then a cantilever with a contact ledge on the lower surface was formed. By the method of magnetron sputtering a sacrificial layer of amorphous silicon (a-Si) with thickness of 1 micron (fig. 2, c) was made. The plate again was covered with a layer of photoresist and a contact photolithography was made. In the photoresist layer a round window with diameter of 2 microns was formed. Through it by etching in SF_6 plasma a pit was formed in the layer of a-Si with depth of about 100 nm (fig. 2, d). A layer of Pt was sputtered on the plate with thickness of 100 nm (fig. 2, e), and the remains of the photoresist were removed (fig. 2, f). The plate again was covered with a layer of a photoresist and a lithograph was done — a drawing of the cantilever was formed. Layers of Cr/Al/Cr

metals with thickness of 10/60/10, 15/90/15 and 20/120/20 nm were sputtered on the plate (fig. 2, *g*), and a lift-off of the photoresist was carried out (fig. 2, *h*). The final stage was removal of the sacrificial layer of a-Si from under the cantilever (clearing) by etching in SF₆ plasma (fig. 2, *i*).

Switches with various sizes of the cantilever and electrodes were made. A cantilever had length 14...32 μm, width 2...6 μm and thickness 80...160 nm. The control electrode had width from 4...16 μm. The width of a switched electrode was 4...6 μm. The gap between the cantilever and the electrodes was equal to 1 μm. The ledge on the bottom surface of the cantilever had the form of a cylinder with diameter of 2 μm and height of about 100 nm. Platinum was chosen as the material of the contact ledge and of the switched electrode thanks to its chemical inertness, relatively high hardness and conductivity [14]. SEM image of the switch is presented in fig. 3, *a*. Fig. 3, *b* presents a close up of the free end of the cantilever with a contact ledge.

Calculation of the electromechanical characteristics of the switch

Fig. 4 presents a cantilever and a control electrode of the switch with indication of the basic dimensions. Let the cantilever be subjected to a distributed loading $q(x)$, having a dimension of force divided by an area unit. The small element of cantilever with length of dx and coordinate x is influenced by force $F(x) = q(x)wdx$, where w is the width of the cantilever. The vertical deviation of the free end of the cantilever caused by this force from the initial position is expressed by the following formula [15]

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

where L is the length of the cantilever, $(EI)_{eff}$ is efficient bending stiffness of the cantilever. The efficient bending stiffness of a three-layer cantilever, calculated by the method of equivalent cross section [16], is expressed by the following formula:

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

Where E_{Cr} , E_{Al} , t_{Cr} , t_{Al} are Young modules and thicknesses, accordingly, of the layers of chrome and aluminum.

If loading $q(x)$ works along all the length of the cantilever, we can find the deviation of the free end from the initial position by integrating the following expression (1):

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

Under the cantilever at the distance of g there is the control electrode, the borders of which (a and b) are marked in fig. 4. Between the cantilever and the electrode the voltage V is applied. If we neglect the regional fields, the electrostatic force, influencing per unit of the area of the cantilever, can be expressed in the following form [16]:

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

Where ε_0 is an electric constant, $\sigma(x)$ is Heaviside function, $\delta(x)$ is a deviation of the point of the cantilever with coordinate x from the initial position. The profile of the cantilever

deformed under the influence of the electrostatic force can be presented as quadratic [17]:

$$\delta(x) = (x/L)^2 \delta_{tip}. \quad (5)$$

By substituting expressions (4) and (5) in the integral (3) and implementing transformations, we will get:

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

Expression (6) presents a connection of the deviation of the free end of the cantilever δ_{tip} with the applied voltage V . The diagram illustrating this connection is presented in fig. 5. At a certain actuation voltage the position of the cantilever is unstable, its free end falls on the substrate. The actuation voltage was defined as the maximum value of the function $V(\delta_{tip})$ (expression (6)) [17]. The calculated actuation voltage of the switches with a 2 μm wide cantilever and various positions of the control electrode are presented in table. They are within the range 9,8...105,1 V. The wider is the control electrode and the closer it is situated to the free end of the cantilever, the lower is the actuation voltage. The calculations used the

Young modulus of the voluminous material: $E_{Cr} = 279$ GPa; $E_{Al} = 70$ GPa.

The contact resistance of the switch was estimated on the basis of the model, in which a rough surface contacts the plane. Proceeding from the switch design, the force with which the contact ledge of the cantilever presses the switched electrode, was calculated. This force depends on the geometry of the cantilever and varies 0,01...1 mN. Such contact efforts result in a plastic deformation of the roughness of the surface [18], and the contact area of the ledge with an electrode is determined by formula $A = F_c/H$, where F_c is the force pressing the ledge to the electrode, H is hardness of a contact material (hardness of platinum was assumed as equal to 450 GPa). The contact resistance of a switch is determined by expression $R_c = \rho/\sqrt{\pi A}$, where ρ is the specific resistance of the material (for platinum $\rho = 10,6 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ at 293 K) [18]. In case of the contact efforts of 0,01...1 mN the contact area does not exceed $2,4 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$. According to calculations, the switches should have a contact resistance of 1...10 Ω.

The operating time of the switch is in inverse proportion to the resonant frequency of the cantilever f_0 and it can be estimated by means of expression $\tau_s \approx 0,58 f_0^{-1}$ [18]. This expression is fair in case of a low damping, i.e. when the quality factor of the cantilever exceeds 2. The resonant frequency of the cantilevers of Cr/Al/Cr was measured by the light lever method [13]. For the cantilevers with the thickness of layers of 10/60/10 nm it was 89...466 kHz, depending on the length of the cantilever, for the cantilevers with thickness of 15/90/15 nm — 134...699 kHz; 20/120/20 nm — 178...932 kHz. The quality factor of the cantilevers in the air under normal conditions was 5—10. According to calculations, the operating time of the switches should be about 1...10 μm.

Experimental research of the switches

Fig. 6 presents a photo of the sample. Its chip contained three contact platforms with dimensions of $1,5 \times 1,5$ mm, which by means of metal paths with width of 200 μm were connected with the cantilever and the switch electrodes. On the platforms tungsten needles were fixed. Measuring devices were connected to them (fig. 7). Testing of the switches was done in the air under normal conditions.

For determination of the actuation voltage of a key between the cantilever and the control electrode a direct voltage was applied from P4105 voltage stabilizer of direct current. It gradually increased till there was a contact of the cantilever with the switched electrode. The actuation moment was recorded by Mastech M9803R multimeter in an ohmmeter mode. Table 1 presents average values of the actuation voltage of the switches of various geometry and maximal deviations from the average values. The lowest actuation voltage was 8,1 V (type 4 switch, thickness of the cantilever — 80 nm). A considerable divergence of the experimental data from the results of calculations was observed. The measured actuation voltages of the keys of type 1 were 2—2,5 times lower than the calculated ones, irrespective of the thickness of a cantilever. At the same time, in case of the switches of type 4 the averages actuation voltages 1,3—2 times exceeded the theoretical values.

It is possible to name several reasons for the divergence of the experiments from the theory. Firstly, the cantilevers are bent under the influence of the residual voltages in a three-layer metal film [12]. Therefore the distance between the cantilever and the electrodes differ from the nominal value. Secondly, the manufacturing technology of the switches is such that the control and the switched electrodes "are printed" on the top surface of the sacrificial layer. A consequence of this is "the steps" on the cantilever reducing its elasticity (fig. 3). Thirdly, when the cantilevers were released, the sacrificial layer was removed not only from under the cantilever, but also from under its basic platform [12], which increased the effective length of the cantilever and also reduced its elasticity. The first circumstance could both increase and reduce the actuation voltage, depending on the bend direction of the cantilever (in the experiment both situations were observed). The other two circumstances reduced the actuation voltage. A simultaneous account of the influence of all the factors on the properties of the switch is a challenging problem. For its solution a careful numerical modeling is required.

Resistance of the switch in the closed position is 200...500 Ω . The experimentally obtained resistance (R) is presented in table 2. The measured resistance was the sum total of the resistances of three sites of the switch: 1) Cr/Al/Cr path with thickness of 80...160 nm, going from the needle to the cantilever; 2) contact of cantilever with the switched electrode; 3) Cr/Pt path with thickness of 60 nm, going from the electrode to the needle. The design resistance of Cr/Al/Cr path was 7...15 Ω and depended on its thickness, the experimental values were 8...40 Ω . According to calculations, Cr/Pt path should have resistance of about 80 Ω . The measured values were 100...300 Ω . The paths made an essential contribution to the resistance of the switch. It is difficult to separate out the resistance of the contact of the cantilever with an electrode (the calculated value is 1...10 Ω) from the total resistance. On the basis of the experiment it is possible to assert, that, as a rule, the resistance of the contact was within the range of 10...100 Ω and considerably exceeded the calculated value. The reason for this excess could be pollution of the contacting surfaces of the switch occurring in the air under normal conditions [14].

The maximal possible current going through the switch and not resulting in its breaking was measured in its closed condition. After actuation of the switch a direct voltage was applied between the cantilever and the switched electrode from Mastech HY3005D power supply (fig. 7). The current going through the switch was measured by M9803R multim-

eter. The voltage increased gradually, and at a certain value of the current there was a fusion of the cantilever in the place of contact with the electrode. The values of the admissible current (I_{\max}) are presented in table 2. The switches with a 2 μm wide cantilever had the minimal value (about 10 mA).

The keys with a wider cantilever withstood a current up to 30 mA. The admissible current did not depend on the thickness of the cantilever, probably, because the current density reached its maximum in the area of the contact ledge, which had an identical geometry in all the switches.

The basic problem of the switches is sticking of the cantilever to the switched electrode at the moment of actuation. The effect is especially characteristic for the cantilevers with thickness of 80 and 120 nm. The returning force of elasticity is not big enough to overcome the adhesive forces between the contact ledge of the cantilever and the electrode. Adhesion in MEMS/NEMS devices is frequently caused by the capillary forces and Van der Waals forces [19]. One of the most effective ways to reduce the adhesive forces is reduction of the area of contact, therefore it is planned to reduce the diameter of the contact ledge on the bottom surface of the cantilever, to raise the roughness of the contacting surfaces, and to use materials harder than platinum (chrome, tungsten).

Conclusion

MEMS-switch of an electrostatic type on the basis of a three-layer metal cantilever of nano-sized thickness with a high relation of its length to its thickness was presented. Low voltages of actuation of the switch are reached due to the low elasticity of the cantilever. A switch with actuation voltage of 8,1 V was manufactured. The manufacturing technologies of the switches were described, calculations were done, as well as measurements of their electromechanical characteristics. The divergences of the experimental actuation voltages from the theory are due to the specific features of the design of the switch, connected with their manufacturing technology. A consequence of the low elasticity of the cantilever is its susceptibility to sticking to the switched electrode under the influence of the adhesive forces.

The work was done with use of the equipment of the Diagnostics of Micro- and Nanostructures Center of Collective Use of Scientific Equipment and with financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, and also RFFI within the framework of the scientific project № 14-07-31156.

References

1. **Varadan V. K., Vinoy K. J., Jose K. A.** *RF MEMS and their applications*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2003. 394 p.
2. **Spencer M., Chen F., Wang C. C.** et al. Demonstration of integrated micro-electromechanical relay circuits for VLSI applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2011. Vol. 46. P. 308—320.
3. **Loh O. Y., Espinosa H. D.** Nanoelectromechanical contact switches. *Nature Nanotechnology*. 2012. Vol. 7. P. 283—295.
4. **Jang W. W., Lee J. O., Yoon J.-B.** et al. Fabrication and characterization of a nanoelectromechanical switch with 15 nm thick suspension air gap. *Applied Physics Letters*. 2008. Vol. 92. P. 103110.
5. **Fruehling A., Xiao S., Qi M.** et al. Nano-switch for study of gold contact behavior. *IEEE Sensors*. 2009. P. 248—251.
6. **RadantMEMS RF Switches**. URL: <http://www.radant-mems.com/radantmems/products.html>

7. Kim M.-W., Song Y.-H., Yoon J.-B. Modeling, fabrication and demonstration of a rib-type cantilever switch with an extended gate electrode. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2011. Vol. 21. P. 115009.

8. Lee J. O., Song T.-H., Kim M.-W. et al. A sub-1-volt nanoelectromechanical switching device. *Nature Nanotechnology*. 2013. Vol. 8. P. 36–40.

9. Song Y.-T., Lee H.-Y., Esashi M. Low actuation voltage capacitive shunt RF-MEMS switch having a corrugated bridge. *IEICE Transactions on Electronics*. 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. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2013. Vol. 23. P. 045022.

11. Dai C.-L., Chen J.-H. Low voltage actuated RF micro-mechanical switches fabricated using CMOS-MEMS technique. *Microsystem Technologies*. 2006. Vol. 12. P. 1143–1151.

12. Uvarov I. V., Naumov V. V., Amirov I. I. Osobennosti izgotovleniya metalhcheskih kantileverov nanorazmernoj tolshiny. *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*. 2013. N. 11. P. 5–9.

13. Uvarov I. V., Naumov V. V., Amirov I. I. Rezonansnye svoystva mnogoslojnyh metalhcheskih nanokantileverov. *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*. 2013. N. 4. P. 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. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 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 Transactions on Electron Devices*. 1978. Vol. ED-25. P. 1241–1250.

18. Rebeiz G. M. *RF MEMS: Theory, Design, and Technology*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 483 p.

19. Bhushan B. Adhesion and stiction: Mechanisms, measurement techniques, and methods for reduction. *Journal of Vacuum Science and Technology B*. 2003. Vol. 21. P. 2262–2296.

УДК 621.3.049.771.14:004.312.46

И. В. Прокофьев, ст. науч. сотр., **А. В. Суханов**, аспирант, инж.-конструктор, e-mail: a.suhanov@tcen.ru
Федеральное государственное бюджетное учреждение "Научно-производственный комплекс
"Технологический центр" МИЭТ", г. Зеленоград

РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ СБИС КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКА ДОПЛЕРОВСКОГО СВЧ МОДУЛЯ

Поступила в редакцию 09.10.2014

Приведены результаты разработки специализированной СБИС контроля и управления режимами работы приемопередатчика доплеровского СВЧ модуля. Описана структурная схема СБИС контроля и управления, в составе которого входной сдвиговый регистр на 40 разрядов, параллельный регистр-защелка на 40 разрядов и два аналоговых демultipлексора на 8 и 32 разрядов/каналов. Представлена КМОП-технология, по которой изготовлены экспериментальные образцы СБИС. Разработаны макет доплеровского СВЧ модуля и программное обеспечение универсальной цифровой платформы оператора.

Ключевые слова: СБИС, СВЧ, доплеровский СВЧ модуль, сдвиговый регистр, демultipлексор, мультимплексор, параллельный регистр, цифровая платформа, КМОП-технология, цифровая платформа, система мониторинга

В настоящее время в связи с необходимостью обеспечения безопасности на реальных объектах промышленности, бытовой и транспортной инфраструктуры требуется разработка и создание различных дистанционных интерактивных охранных систем. Одним из направлений построения таких охранных систем может быть использование СВЧ систем, основанных на эффекте Доплера, для которых требуется СБИС контроля и управления модулем. Исследование технического уровня и тенденций развития техники показало, что направление перспективно и находится в русле мировых тенденций. Анализ материалов научно-технической литературы показывает, что разработками СБИС систем контроля и управления (СБИС-У) для СВЧ систем занимаются как отечественные, так и зарубежные компании. Наиболее развитыми

странами, занимающимися разработкой и патентованием своих изобретений в данной области, являются США, Германия, Австралия, Китай, которые активно регистрируют свои изобретения. В России основными разработчиками в данной области являются научные центры и специализированные компании, занимающиеся разработками в области конструирования СБИС.

Цель настоящей работы — исследование, разработка и изготовление экспериментальных образцов специализированной СБИС контроля и управления режимами работы СВЧ приемопередатчика доплеровского СВЧ модуля (рис. 1). В ходе реализации проекта были проведены теоретические и патентные исследования перспективных конструкций, технологий изготовления, схмотехнических и топологических решений СБИС-У, а также реали-