

posure to radiation was done in an active mode, the potential difference $U_{\text{СМ}}$ in the course of irradiation was established at the level of 1,0 V for *n*MOS and -1,0 V for *p*MOS. During the irradiation all the transistors were in the open state.

The leak current of a closed *p*MOS increased 5 times at the initial levels of influence, however, under the further irradiation the level of the leaks stabilized and its further change did not exceeded 5 %. This can be connected with the presence of the final number of the "small" charge capture centers, activated by already small levels of influence.

The shift of the unlocking threshold (measured by the drain current equal to 2 μ A) did not exceed 200 mV at the level of the radiation influence up to 970 thousand units, except for *n*MOS, which was characterized by the threshold shift of nearby 400 mV. In the given transistor an expressed Rebound-effect [6] was also revealed.

Analysis of the received characteristics depending on the topology of the elements of the test structures allows us to select the optimal design of the elements of a working IC, to increase its prefailure life time and radiation resistance. Besides, by placing a test crystal together with the working IC as a part of a wafer it is possible to carry out control and certification of the processes of those factories, at which the working IC are made. The data obtained in the control process allow us to see, which of the factories ensures the highest reliability of IC from the point of view of the applied technology. Such control allows us to find the "technological bookmarks" — unintentional change of the technological routes, composition or parameters of the technological layers and materials, with a view to decrease the IC reliability. The given changes cannot

be defined during a functional testing, however, at that, the long-term reliability of IC can be reduced many times.

The work was done with the use of equipment of the Functional Control and Diagnostics of Micro- and Nanosystem Technologies on the basis of NPK Technological Center with support of the Ministry of Education and Science of Russia within the framework of FTP "Research and Development in the Priority Directions of the Scientific-technological Complex of Russia for the period of 2014—2020" (GK № 14.574.21.0115, unique identifier RFMEFI57414X0115).

References

1. Yap K. L., Yap H. K., Tan Y. C., Lo K. F., Karim M. F., Implementation of FWLR for process reliability monitoring, *IEEE IRW*, 2001, pp. 94—96.
2. Papp A., Bieringer F., Koch D., Kammer H., Kohlhasse A., Lill A., et al. Implementation of a WLR-program into a production line, *IEEE IRW*, 1995, pp. 49—54.
3. Kuznetsov E. V., Sivchenko A. S., Belostotskaya S. O., Basaeva T. S., Certificate of State registration of a layout No. 2015630130, *Test chip for evaluation of reliability and radiation hardness of CMOS integrated circuits with 65 nm design rules*, 2015.
4. **Jedec Standard JP001.01**, Foundry process qualification guidelines, may, 2004.
5. **Jedec Standard JESD 61A.01**, Isothermal Electromigration Test Procedure, october, 2007.
6. Oldham T. R., McLean F. B., Total Ionizing Dose Effects in MOS Oxides and Devices, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 50, no. 3, June 2003.

УДК 621.3

И. В. Уваров, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., **В. В. Наумов**, канд. физ.-мат. наук, уч. секретарь, **О. М. Королева**, вед. технолог, **Е. И. Ваганова**, вед. технолог, **И. И. Амиров**, д-р физ.-мат. наук, зам. директора, зав. лаб., Ярославский Филиал Физико-технологического института РАН, г. Ярославль, ilnik88@mail.ru

БИСТАБИЛЬНЫЙ МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ С МЕХАНИЗМОМ АКТИВНОГО РАЗМЫКАНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ

Поступила в редакцию 09.06.2016

Представлен МЭМС-переключатель электростатического типа с резистивным контактом. Подвижным электродом ключа является балка, закрепленная на крутильных подвесах. Особенности переключателя являются бистабильность и наличие механизма активного замыкания контакта, позволяющего решить проблему прилипания балки к коммутируемому электроду под действием сил адгезии. Активное замыкание реализуется за счет наличия двух управляющих электродов. Отработана технология изготовления переключателя. Выполнены теоретический анализ, компьютерное моделирование и экспериментальное исследование его рабочих характеристик.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, переключатель, электростатическое управление, резистивный контакт, напряжение срабатывания, контактное сопротивление, адгезия

Введение

МЭМС-переключатели с электростатическим принципом управления широко используют в различных ВЧ- и СВЧ-системах [1]. По сравнению с радиочастотными ключами на *p**n*-диодах и полевых транзисторах, МЭМС-ключи электростатического типа имеют следу-

ющие преимущества: малую потребляемую мощность, малые потери в замкнутом состоянии; хорошую развязку в разомкнутом состоянии, низкий уровень нелинейных искажений; высокую радиационную стойкость [2]. Недостатком современных коммерчески доступных МЭМС-ключей является высокое напряжение срабатывания,

которое составляет несколько десятков вольт [3]. Для управления такими переключателями необходимы специальные устройства и цепи высоковольтной изоляции, что существенно усложняет их применение.

Наиболее распространенным методом снижения напряжения срабатывания является уменьшение упругости подвижного электрода переключателя. Однако размыкание ключа, как правило, осуществляется именно за счет силы упругости, возникающей в подвижном электроде (пассивное размыкание). Поэтому снижение его упругости уменьшает размыкающую силу и увеличивает вероятность слипания электродов под действием сил адгезии. Но слипание электродов имеет и положительную сторону: для сохранения переключателя в замкнутом состоянии не требуется подача управляющего напряжения, т.е. замкнутое состояние является стабильным. При этом в конструкцию переключателя должны быть заложены механизмы, позволяющие при необходимости преодолевать адгезионные силы и размыкать электроды (активное размыкание). Важно, чтобы реализация механизма активного размыкания не привела к существенному усложнению конструкции переключателя, технологии его изготовления и способов управления. В настоящей работе представлен бистабильный МЭМС-переключатель электростатического типа с резистивным контактом, обладающий механизмом активного размыкания электродов.

Конструкция и принцип работы переключателя

Конструкция переключателя представлена на рис. 1. 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. 2, 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.

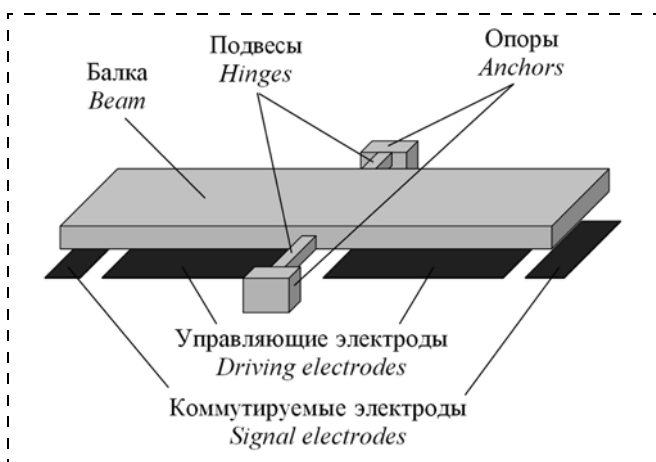


Рис. 1. Конструкция МЭМС-переключателя

Fig. 1. MEMS switch design

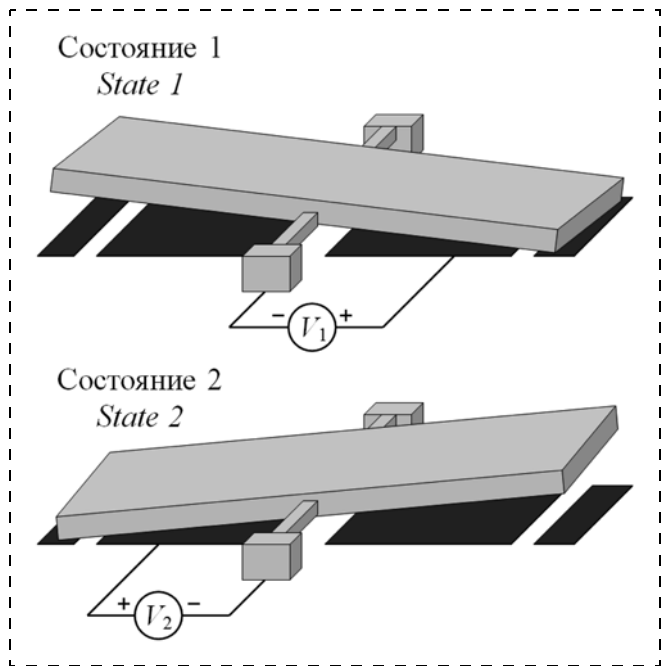


Рис. 2. Рабочие состояния переключателя

Fig. 2. Working positions of the switch

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 используют 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. 2, 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, т.е. ключ является бистабильным. Горизонтальное положение балки после первого срабатывания более не достигается.

Расчет напряжения срабатывания

Конструкция переключателя с обозначением размеров изображена на рис. 3. 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 [4]:

$$V_{PI} = \sqrt{\frac{0,8275 K g^3}{\epsilon_0 w a_2^3} \left(1 - \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2\right)^{-0,5} \left(1 + 0,6735 \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^{1,931}\right)^{-0,3244}}, \quad (1)$$

где K — константа упругости подвесов, которая задается выражением [5]:

$$K = \frac{G w_{hinge}^3 t_{hinge}}{8 L_{hinge}} \left[\frac{16}{3} - 3,36 \frac{t_{hinge}}{w_{hinge}} \left(1 - \frac{t_{hinge}^4}{12 w_{hinge}^4}\right) \right]. \quad (2)$$

В выражении (2) G — модуль сдвига материала подвесов.

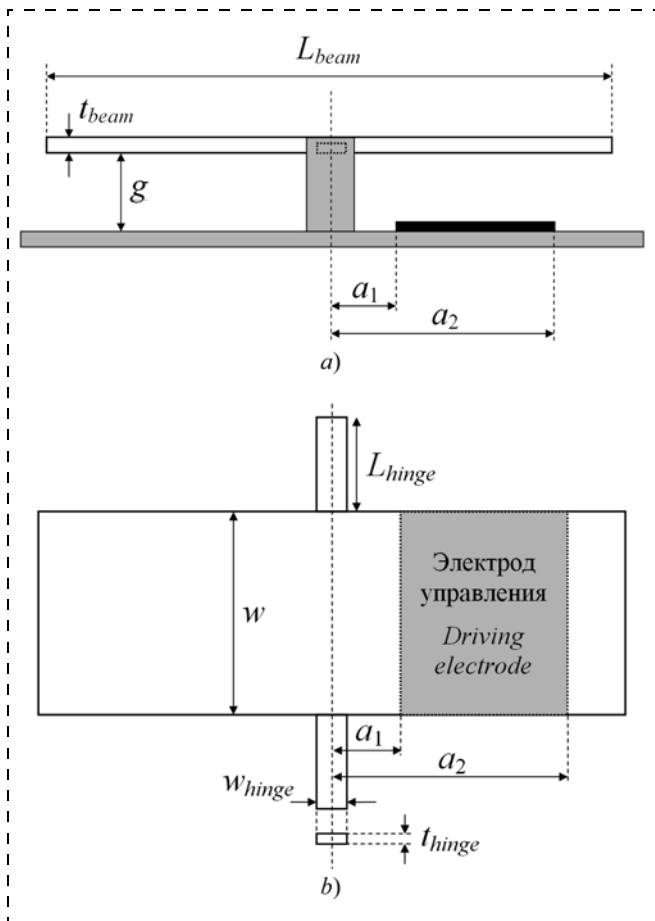


Рис. 3. Конструкция переключателя с указанием геометрических размеров: а — вид сбоку; б — вид сверху

Fig. 3. Design of the switch with indication of the dimensions: a — side view; b — top view

В табл. 1 представлены номинальные значения размеров конструкции переключателя и результаты расчетов напряжения срабатывания с использованием выражения (1). 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 (2) составляла $3,9 \cdot 10^{-9}$ Н·м. Согласно расчетам напряжение первого 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.

В целях упрощения 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. Во-вторых, были добавлены продольные ребра жесткости, призванные увеличить упругость балки без существенного возрастания ее массы.

Учесть влияние перфорации и ребер жесткости на характеристики ключа позволяет моделирование методом конечных элементов. Моделирование выполняли в среде COMSOL Multiphysics. На рис. 4 показана модель балки типа 3 (см. табл. 1). На верхней поверхности балки расположены ребра жесткости высотой 1 мкм. Между ребрами находятся отверстия перфорации с латеральными размерами 2×2 мкм. Модель переключателя включает балку и один управляющий электрод. Торцы подвесов зафиксированы. На управляющий электрод относительно балки подавался электрический потенциал. Значение потенциала, при котором происходит электростатическое схлопывание (*pull-in*) балки с электродом, соответствует напряжению первого срабатывания.

Результаты моделирования представлены в табл. 1. Смоделированные значения V_{PI} превышают рассчитанные аналитически в 1,5–1,7 раза и составляют 7,0...12,8 В. Моделирование учитывало влияние перфорации балки на электростатическое поле. Введение отверстий в конструкцию балки уменьшает площадь перекрытия ее с управляющим электродом и, следовательно, увеличивает напряжение срабатывания. Тем не менее наличие перфорации необходимо и обусловлено 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}). Значение его определяется из условия баланса моментов сил:

$$M_{REC} + M_{MECH} = M_{ADH}, \quad (3)$$

Размеры переключателя и результаты аналитических расчетов и моделирования напряжения первого срабатывания

Таблица 1

Dimensions of the switch and the results of the analytical calculations and modeling of the first pull-in voltage

Table 1

Тип ключа Type of key	$L_{beam}, \mu m$	$t_{beam}, \mu m$	$L_{hinge}, \mu m$	$w_{hinge}, \mu m$	$t_{hinge}, \mu m$	$a_1, \mu m$	$a_2, \mu m$	$G, \mu m$	$w, \mu m$	$V_{PI}, V,$ расчет calculated	V_{PI}, V 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

где M_{REC} , M_{MECH} , M_{ADH} — моменты электростатической силы, силы упругости подвесов и силы адгезии соответственно. Расчет V_{REC} из выражения (3) затруднен, поскольку значение адгезионных сил неизвестно. Можно утверждать, что напряжение размыкания будет превышать напряжение первого срабатывания. Во-первых, воздушный зазор между поднятым плечом балки и управляющим электродом превышает начальное значение 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.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Переключатели изготавливают методом поверхностной микрообработки. Основные этапы процесса изготовления представлены на рис. 5. Подложкой служила термически окисленная кремниевая пластина диаметром 100 мм. Сначала на диэлектрическом слое формировали управляющие и коммутируемые электроды переключателя (рис. 5, *a*). Для этого на пластину методом магнетронного распыления наносили слой хрома толщиной 50 нм, выполняли контактную фотолитографию и жидкостное травление хрома. Затем на пластину магнетронным методом наносили жертвенный слой аморфного кремния (*a*-Si) толщиной 0,5 мкм (рис. 5, *b*). В жертвенном слое с помощью плазменного травления формировались ямки глубиной около 200 нм, необходимые для создания контактных выступов на нижней поверхности балки (рис. 5, *c*). Далее на жертвенном слое последовательно формировались подвесы из хрома и балка из алюминия (рис. 5, *d–5, f*). Хром и алюминий наносили магнетронным методом и травили жидкостным способом. Заключительным этапом изготовления было удаление жертвенного слоя из-под балки методом травления в плазме SF_6 (рис. 5, *g*). РЭМ-изображение изготовленного переключателя типа 3 представлено на рис. 6.

Измерение рабочих характеристик переключателей выполняли в воздухе при нормальных условиях. Экспериментально полученные значения напряжения первого срабатывания представлены в табл. 2. Наблюдали хорошее согласие экспериментальных данных с результатами моделирования методом конечных элементов (см. табл. 1). Наименьшее напряжение срабатывания имели переключатели с наиболее широкой балкой (тип 4), минимальное значение V_{PI} составляло 6,0 В.

Экспериментально полученные значения напряжения размыкания также представлены в табл. 2. Напряжение размыкания превышало напряжение первого срабатывания в 3–4 раза. Превышение было ожидаемым, однако значение его трудно было предсказать теоретически. Предлагаемая конструкция переключателя дает возможность пойти по другому пути: зная из эксперимента напряжение размыкания и геометрию ключа, можно определить значение сил адгезии. Однако это является отдельной исследовательской задачей. Стоит отметить, что на начальном этапе работы значение напряжения размыкания было относительно высоким, оно составляло от 19,4 до 40,3 В. В дальнейшем планируется

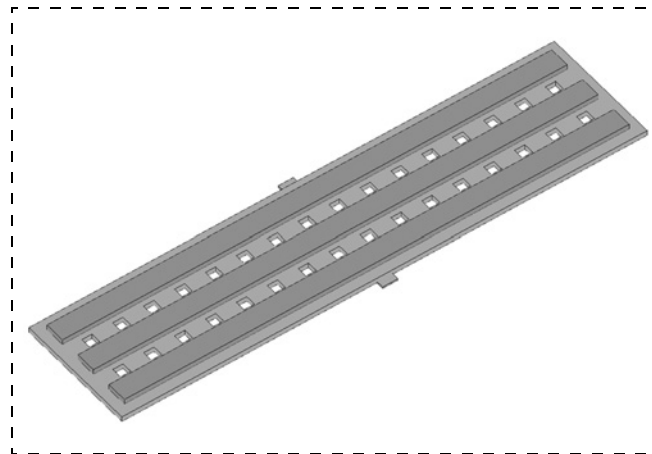


Рис. 4. Модель балки переключателя 3-го типа

Fig. 4. Model of the beam of the switch of the 3rd type

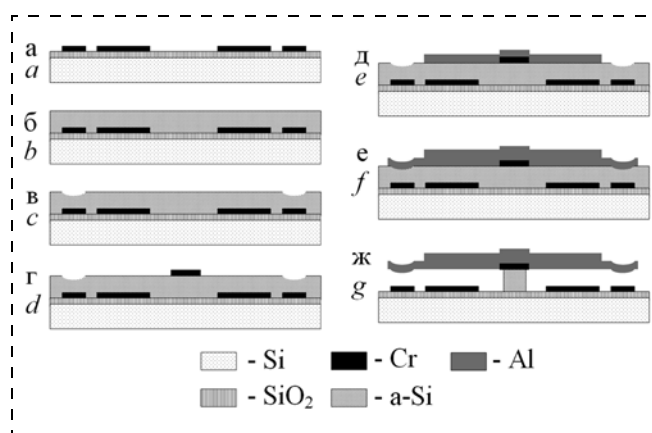


Рис. 5. Основные этапы изготовления переключателя

Fig. 5. Main manufacturing stages of the switch

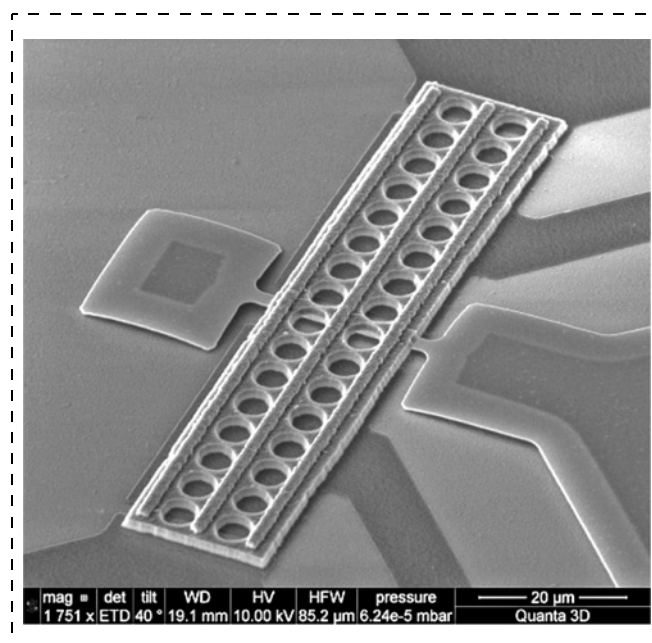


Рис. 6. РЭМ-изображение МЭМС-переключателя типа 3

Fig. 6. REM image of the MEMS switch of the 3rd type

Таблица 2

Экспериментально полученные значения напряжения первого срабатывания (напряжения размыкания и сопротивления переключателей в замкнутом состоянии)

Table 2

The experimentally received values of the first pull-in voltages (voltages of recovery and resistance of the switches in the closed position)

Тип ключа Type of key	V_{PI} , V	V_{REC} , V	R , Ω
1	$13,0 \pm 0,7$	$27,7 \pm 5,1$	344 ± 41
2	$10,6 \pm 1,1$	$32,0 \pm 8,3$	318 ± 33
3	$9,0 \pm 1,5$	$26,7 \pm 3,9$	336 ± 95
4	$6,5 \pm 0,5$	$24,6 \pm 5,2$	317 ± 20

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. Уменьшения сопротивления с увеличением ширины балки не наблюдали. 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 возник контакт алюминий-хром. В дальнейшем планируется использовать принятые в МЭМС-отрасли контактные материалы, такие как золото или платина [6], для достижения малого контактного сопротивления и надежности контакта балки с коммутируемым электродом.

Заключение

Разработан и изготовлен МЭМС-переключатель электростатического типа с резистивным контактом. Осо-

бенностями ключа являются бистабильность и наличие механизма активного размыкания. Отработана процедура изготовления переключателя с использованием стандартных технологических процессов микроэлектроники. Экспериментальные значения напряжения первого срабатывания согласуются с результатами моделирования методом конечных элементов. Напряжение размыкания переключателя находится в диапазоне 20...40 В. В дальнейшем планируется достичь более низких значений напряжения размыкания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-60065 мол_а_дк с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием "Диагностика микро- и наноструктур".

Список литературы

1. **Rebeiz G. M.** RF MEMS: Theory, Design, and Technology. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
2. **O'Mahony C., Olszewski O., Hill R., Houlihan R., Ryan C., Rodgers K., Kelleher C., Duane R., Hill M.** Reliability assessment of MEMS switches for space applications: laboratory and launch testing // Journal of Micromechanics and Microengineering, 2014. Vol. 24, N. 12. 125009.
3. **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 // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2015. Vol. 25, N. 3. P. 035014.
4. **Degani O., Nemirovsky Y.** Design considerations of rectangular electrostatic torsion actuators based on new analytical pull-in expressions. // Journal of Microelectromechanical Systems. 2002. Vol. 11. P. 20—26.
5. **Timoshenko S. P., Goodier I. N.** Theory of Elasticity. New York: McGraw-Hill, 1970.
6. **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 // Journal of Microelectromechanical Systems. 2013. Vol. 22, N. 4. P. 846—854.

I. V. Uvarov, Ph. D., Researcher, ilnik88@mail.ru, **V. V. Naumov**, Ph. D., Scientific Secretary, **O. M. Koroleva**, Leading Technologist, **E. I. Vaganova**, Leading Technologist, **I. I. Amirov**, D. Sc., Deputy Director, Head of Laboratory Yaroslavl Branch of the Institute of Physics and Technology of RAS, Yaroslavl, ilnik88@mail.ru

Bistable MEMS Switch with an Active Contact Breaking Mechanism

The article presents an electrostatically actuated MEMS switch with a resistive contact. The movable electrode of the switch is a beam, suspended by the torsion springs. The specific features of the switch are bistability and the mechanism of an active contact breaking, which solves the problem of adhesive sticking of the beam to the signal electrode. The active opening of the switch is realized due to two control electrodes. The technology for production of the switch was mastered and the theoretical analysis, finite element simulation and experimental investigation of the switch characteristics were done.

Keywords: microelectromechanical systems, switch, electrostatic actuation, resistive contact, pull-in voltage, contact resistance, adhesion

Introduction

MEMS-switches with an electrostatic control are used in various high frequency and microwave systems [1]. In comparison with the radio-frequency keys on pin-diodes and field transistors, the MEMS keys of the electrostatic type have small power consumption and losses in the closed position; a good outcome in the open position, low level of nonlinear distortions; and high radiation resistance [2]. A drawback of the commercially available MEMS keys is a high pull-in voltage, which is equal to several tens of volts [3]. Control of such switches requires special devices and high-voltage insulation circuits, which complicates their application.

The most widespread method for reduction of the pull-in voltage is reduction of the elasticity of the mobile electrode of the switch. However, a key disconnection, as a rule, is carried out due to the force of elasticity in the mobile electrode (passive disconnection). Therefore, a decrease of its elasticity reduces the disconnecting force and increases the probability of adhesion of the electrodes under the influence of the adhesion forces. But adhesion of electrodes has also a positive side: for preservation of a switch in the closed position no supply of the control voltage is required, i.e. the closed position is stable. The switch design should include the mechanisms, allowing to overcome the adhesive forces and to disconnect the electrodes (active disconnection). It is important, that the active disconnection mechanism does not lead to an essential complication of the design of the switch, the technology of its manufacturing and the control methods. This work presents a bistable MEMS switch of the electrostatic type with a resistive contact and the mechanism of active disconnection of the electrodes.

Design and principle of operation of the switch

The switch design is presented in fig. 1. The mobile electrode is the metal beam fixed on torsion springs (suspensions). Under each shoulder of the beam there are the control and switched electrodes.

The principle of operation of the switch is the following. Voltage is supplied to one of the control electrodes, under the influence of the electrostatic force the beam bends and comes into contact with the switched electrode (fig. 2, position 1). The suspensions are subjected to torsion, a force of elasticity appears in them, trying to return the beam into the horizontal position. However, the elasticity of the suspensions is purposefully designed as small in order to ensure a low pull-in voltage. The force of elasticity cannot overcome the adhesive forces and unstick a beam from the switched electrode, therefore, during the switching-off of the control voltage the switch preserves its position. For a contact disconnection the control electrode is used under the beam's lifted shoulder. When voltage is supplied to it, the beam bends to the opposite side and comes into contact with the other switched electrode (fig. 2, position 2). In order to return to position 1, it is necessary to supply voltage to the first control electrode. Thus, in the course of operation the key is in one of the two positions, which remain, when the control signals are switched off, i.e. the key is bistable. The horizontal position of the beam after the first actuation is not restored any more.

Calculation of the pull-in voltage

The design of the switch with its dimensions is presented in fig. 3. The expression for the first pull-in voltage (V_{PI} , pull-in voltage, voltage of the beam's transition from the horizontal position into the inclined one) is deduced from the equation of the balance of the moments of the electrostatic and elastic forces, and looks like the following [4]:

$$V_{PI} = \sqrt[3]{\frac{0,8275 Kg^3}{\varepsilon_0 w a_2^3} \left(1 - \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2\right)^{-0,5} \left(1 + 0,6735 \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^{1,931}\right)^{-0,3244}}, \quad (1)$$

where K — is the constant of elasticity of the suspensions, which is set by the following expression [5]:

$$K = \frac{G w_{hinge}^3 t_{hinge}^3}{8 L_{hinge}} \left[\frac{16}{3} - 3,36 \frac{t_{hinge}}{w_{hinge}} \left(1 - \frac{t_{hinge}^4}{12 w_{hinge}^4}\right) \right]. \quad (2)$$

In expression (2) G — is the shearing modulus of elasticity of the material of the suspensions.

Table 1 presents the nominal dimensions of the switch design and calculations of the pull-in voltage with the use of (1). Four designs were considered, differing by the width of the beam and electrodes w . Chrome was selected as the material for the suspensions ($G = 115$ GPa). In accordance with (2), the elasticity constant of the suspensions was $3,9 \cdot 10^{-9} \text{ N} \cdot \text{m}$. According to calculations, the first pull-in voltage was from 4,1 up to 8,2 V. It should be pointed out that the choice of the material for the beam does not influence the pull-in voltage of the switch, because it is assumed that a beam is not deformable.

For simplification of manufacturing of the switch and improvement of its functioning the beam design was modified. Firstly, apertures were added, allowing to accelerate the removal of the sacrificial layer from under the beam and to remove partially the locked-up stresses in the material. Besides, the apertures reduced the air damping and the weight of the beam, thereby increasing the speed of switching. Secondly, the longitudinal webbing, intended to increase the beam elasticity without an essential increase of its weight, was added.

Modeling by the method of the final elements allows us to take into account the influence of the apertures and webbing on the key characteristics. It was carried out in the COMSOL Multiphysics environment. Fig. 4 presents a model of beam 3 (see table 1). On the top surface of the beam there is webbing with height of $1 \mu\text{m}$ (in fig. 4 designated by dark blue color). In-between the webbing there are apertures with lateral dimensions of $2 \times 2 \mu\text{m}$. The switch model includes a beam and one control electrode. The end faces of the suspensions are fixed. An electric potential was supplied to the control electrode in relation to the beam. The potential, at which an electrostatic pull-in of the beam with the electrode occurs, corresponds to the first pull-in voltage.

The results of modeling are presented in table 1. The V_{PI} 1,5—1,7 times exceed the analytically calculated values and are equal to 7,0...12,8 V. The modeling took into account the influence of the apertures of the beam on the electrostatic field. Introduction of the apertures into the design reduces the area of its overlapping with the control electrode and increases the pull-in voltage. Nevertheless, presence of the apertures

is necessary and determined by the specific features of the manufacturing techniques of the switch.

After activation of the switch in the contact area of the beam with the switched electrode the forces of adhesion start to operate, keeping the beam in the inclined position. For a contact disconnection it is necessary to apply voltage between the beam and the control electrode, which is under the lifted shoulder of the beam. This is the recovery voltage (V_{REC}). It is found from the balance of the moments of forces:

$$M_{REC} + M_{MECH} = M_{ADH}, \quad (3)$$

where M_{REC} , M_{MECH} , M_{ADH} — are the moments of the electrostatic force, force of elasticity of the suspensions and adhesions, accordingly. Calculation of V_{REC} from (3) is complicated, because the adhesive forces are unknown. It is possible to assert, that the recovery voltage exceeds the first pull-in voltage. Firstly, the air gap between the lifted shoulder of the beam and the control electrode exceeds the initial value of the gap g . Secondly, for disconnection of the contact of the beam with the switched electrode it is necessary to overcome the forces of adhesion. It is important, that in the switch operation it is necessary to deal with the recovery voltage, because after the first actuation the horizontal position of the beam will not be reached.

Experimental results and discussion

The switches are produced by the method of surface microprocessing. The basic manufacturing stages are presented in fig. 5. The thermally oxidized silicon plate with diameter of 100 mm was used as a substrate. At first, the control and switched electrodes of the switch were formed on the dielectric layer (fig. 5, a). A layer of chrome with thickness of 50 nm was deposited on a plate by the magnetron sputtering, then, the contact photolithography and liquid etching of chrome were done. On the plate by the same method a sacrificial layer of amorphous silicon (a -Si) with thickness of 0,5 μm (fig. 5, b) was deposited. In the sacrificial layer pits were formed by plasma etching with depth of about 200 nm for creation of the contact ledges on the bottom surface of the beam (fig. 5, c). On the sacrificial layer the chrome suspensions were consistently formed and an aluminum beam (fig. 5, d, 5, f). The chrome and aluminum were deposited by the magnetron method and etched by a liquid method. The final stage was removal of the sacrificial layer from under the beam by etching in plasma SF_6 (fig. 5, g). A REM image of the manufactured switch of type 3 is presented in fig. 6.

Measurement of the working characteristics of the switches were carried out in the air in normal conditions. The experimentally received first pull-in voltages are presented in table 2. The experimental data agreed well with modeling by the method of the final elements (see table 1). The switches with the widest beam (type 4) had the lowest pull-in voltages, the minimal value of V_{PI} was 6,0 V.

The experimentally obtained recovery voltages are also presented in table 2. They are 3—4 times more than the first pull-in voltages. That was expected, however, difficult to predict theoretically. The offered design of the switch gives a chance to go the other way: knowing from the experiments the recovery voltage and the key geometry, it is possible to determine the forces of adhesion. However, it is a problem for a separate research. It is necessary to point out, that at the in-

itial stage the recovery voltage was rather high, from 19,4 up to 40,3 V. In future it is planned to reach lower values of the gap between the beam and the electrodes and modification of the form of the beam.

Resistance of the switches in the closed position was 250...400 Ω . A reduction of resistance with an increase of the width of the beam was not observed. Although, the wider the beam, the less was its own resistance, and the more of contact ledges it contained. Absence of a dependence of the key resistance on the width of the beam can be explained by the fact that a considerable part of the resistance was brought by the metal paths going from the contact platforms to the electrodes and the key beam. It was problematic to single out the contact resistance out of the total key resistance. In the presented switches an aluminum-chrome contact appeared. In future it is planned to use the contact materials accepted in the MEMS branch, such as gold or platinum [6], for achievement of a small contact resistance and reliability of the contact of the beam with the switched electrode.

Conclusion

A MEMS switch of the electrostatic type with a resistive contact was developed and manufactured. Specific features of the key are its bistability and the mechanism of active disconnection. Manufacturing of the switch with the use of the standard processes of microelectronics was mastered. The experimental values of the first pull-in voltages agree well with the results of modeling by the method of the final elements. The recovery voltage of the switch is within the range of 20...40 V. In future it is planned to reach lower values of the recovery voltage.

The work was done with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the project № 16-37-60065 mol_a_dk with the use of the equipment of the Diagnostics of Micro- and Nanostructures of the Center for Collective Use of the Scientific Equipment.

References

1. Rebeiz G. M. *RF MEMS: Theory, Design, and Technology*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
2. O'Mahony C., Olszewski O., Hill R., Houlihan R., Ryan C., Rodgers K., Kelleher C., Duane R., Hill M., Reliability assessment of MEMS switches for space applications: laboratory and launch testing, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, vol. 24, no. 12, p. 125009.
3. 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, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, vol. 25, no. 3, p. 035014.
4. Degani O., Nemirovsky Y., Design considerations of rectangular electrostatic torsion actuators based on new analytical pull-in expressions, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, vol. 11, pp. 20—26.
5. Timoshenko S. P., Goodier I. N., *Theory of Elasticity*, New York: McGraw-Hill, 1970.
6. 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, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2013, vol. 22, no. 4, pp. 846—854.