

Высокочастотные микроэлектромеханические переключатели

В. Н. Шоффа, Е. А. Коваленко

Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва, РФ,
e-mail: shoffavn@mail.ru

Представлен обзор принципов коммутации, конструкций, используемых материалов, результатов исследований и разработок высокочастотных микроэлектромеханических переключателей с электростатическим управлением, представляющих одно из современных направлений развития коммутационной техники.

Ключевые слова: МЭМС, резистивные переключатели, емкостные переключатели, механизмы отказов.

Введение

Высокочастотные (ВЧ) микроэлектромеханические (МЭМС) переключатели — это устройства, которые используют механическое движение, создающее замыкание или размыкание цепи электрического тока в высокочастотной трансмиссионной линии. Переключатели МЭМС разрабатываются с различными приводными механизмами, такими как электростатический, магнитостатический, пьезоэлектрический, тепловой и др. Но только переключатели с электростатическим управлением обеспечивают высокую надежность в диапазоне коммутируемых частот 0,1—100 ГГц [1].

Существуют емкостные и резистивные ВЧ МЭМС переключатели, изготавливаемые в двух конфигурациях: параллельной и последовательной. В емкостных переключателях коммутация высокочастотного сигнала осуществляется за счет изменения емкости в коммутируемой цепи. В резистивных переключателях коммутация сигнала реализуется соединением и разъединением металлических контактов.

Емкостные переключатели — это коммутационные элементы для таких применений, как регулируемые конденсаторы и полосковые фильтры [2]. Большинство емкостных переключателей имеет параллельную конфигурацию (рис. 1, а) [3]. В такой конструкции состояние, при котором подвижная металлическая мембрана находится в верхнем положении и высокочастотный сигнал проходит через переключатель от входа к выходу, называется "включенным" (рис. 1, а, I). Состояние, когда мембрана под действием электростатических сил, возникающих при приложении управляющего напряжения между нижним электродом и мембраной, опускается вниз и большая часть высокочастотного сигнала замыкается на землю, называется "выключенным" (рис. 1, а, II). Для изоляции друг от друга мембраны и нижнего электрода в "выключенном состоянии" нижний электрод покрывают тонким слоем диэлектрика (рис. 1).

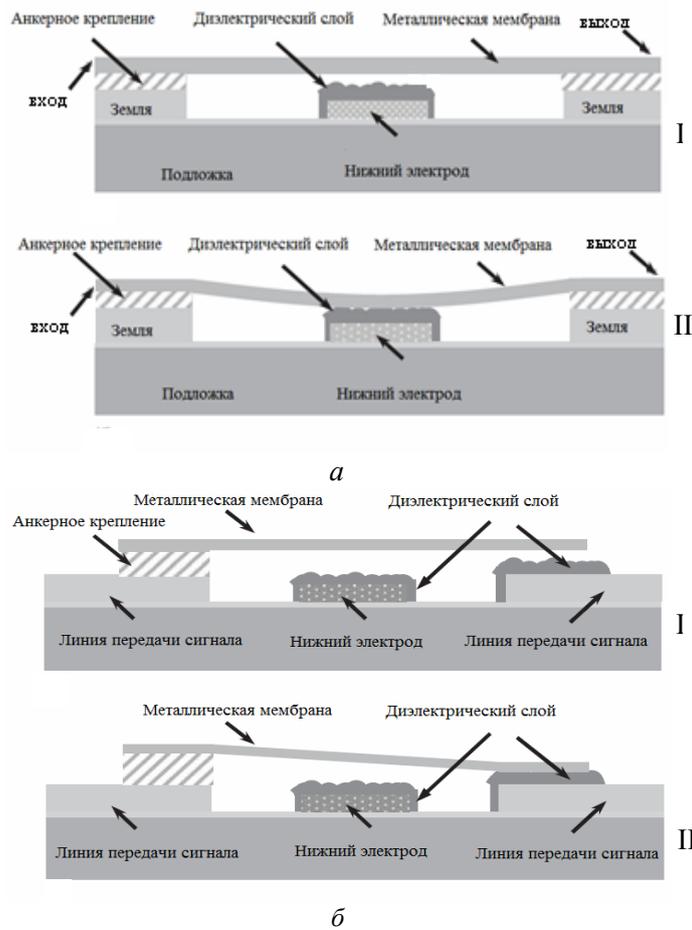


Рис. 1. Схемы параллельного (а) и последовательного (б) емкостных переключателей в выключенном (I) и включенном (II) положениях.

В последовательных емкостных переключателях состояние, когда металлическая мембрана находится в верхнем положении и высокочастотный сигнал не пропускается, называется "выключенным" (рис. 1, б, I) и, напротив, состояние, когда мембрана находится в нижнем положении и высокочастотный сигнал пропускается, называется "включенным" (рис. 1, б, II) [3].

Резистивные МЭМС переключатели отличаются от емкостных тем, что у них между металлической мембраной и сигнальной линией нет диэлектрика. Коммутационное состояние этих переключателей в основном определяется изменением резистивного контактного сопротивления. Эта особенность выключателя дает возможность использовать его при низких частотах.

Причины возникновения отказов емкостных МЭМС переключателей

Главным фактором, влияющим на надежность емкостных МЭМС переключателей, является залипание между диэлектрическим и металлическим слоями. Основная причина этого — введение заряда и его накопление в диэлектрическом слое [4—6]. Для воздействующего напря-

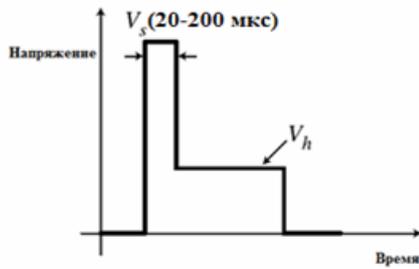


Рис. 2. Однополярное напряжение управления для уменьшения накопления заряда.

жения $V_s = 30\text{—}60$ В и при толщине диэлектрика 1500 нм электрическое поле в диэлектрическом слое может быть равным 2—4 МВ/см. В этих

условиях возможно возникновение туннельного разряда в диэлектрике [6, 7]. Поэтому, как только выключатель переходит в рабочее положение, напряжение уменьшают до удерживающего значения $V_h \approx 8\text{—}12$ В (рис. 2).

Наблюдается два вида отказов в емкостном переключателе с электростатическим управлением. Первый заключается в том, что после приложения управляющего напряжения срабатывания между мембраной и нижним электродом мембрана начинает двигаться, касается диэлектрика, но затем перемещается в обратном направлении, вместо того чтобы остаться прижатой к диэлектрику. Это объясняется состояниями поверхностей на границах раздела металл—диэлектрик и диэлектрик—воздух (рис. 3). В этом случае заряд передается от металлической мембраны в поверхностные части диэлектрика. В результате электростатическая сила, действующая на мембрану, уменьшается, заставляя последнюю двигаться в обратном направлении. После того, как напряжение управления удалено, заряд остается на поверхностных частях, увеличивая напряжения срабатывания выключателя при следующем приложении управляющего напряжения.

Второй вид отказов обусловлен инжекцией заряда во внутренний слой диэлектрика. Из-за этого мембрана остается во включенном положении выключателя (рис. 4), когда прикладываемое напряжение удалено. Это вызвано тем, что накопленный заряд в диэлектрике приводит к отображенным зарядам на металлических поверхностях мембраны [8].

С целью исключения указанных отказов предлагаются различные методы: выбор диэлектрических материалов, использование биполярного управления вместо униполярного, конструктивные решения [8]. Рассмотрим только использование биполярного управления (рис. 5) [8].

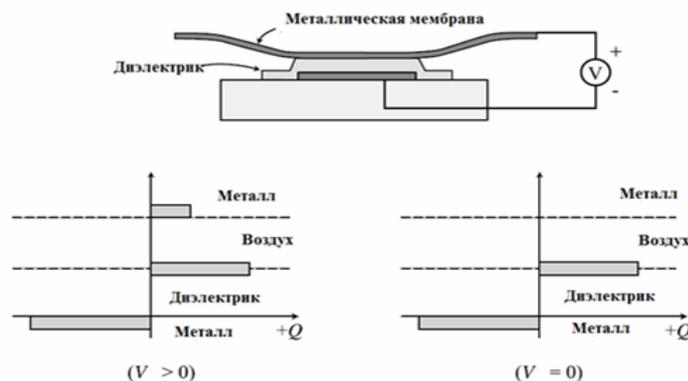


Рис. 3. Распределение зарядов на поверхностях диэлектрика, когда напряжение приложено ($V > 0$) и после того, как оно удалено ($V = 0$).

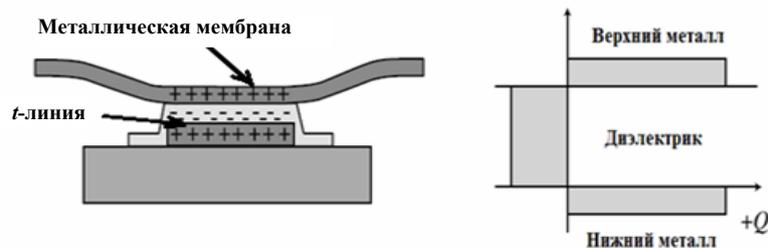


Рис. 4. Отображенные заряды на металлических поверхностях мембраны и сигнальной t -линии.

Электростатическая сила на мембране пропорциональна квадрату управляющего напряжения V , приложенного между мембраной и нижним электродом, и поэтому изменение знака этого напряжения (биполярное управление) будет всегда приводить к постоянной по направлению силе на мембране как в режиме форсирования включения (V_s), так и в режиме удержания (V_h). При биполярном управлении в пределах одного цикла включения напряжение V может либо не изменять полярность (рис. 5, a), либо менять ее во время режима удержания (рис. 5, b). Электростатическая сила становится равной нулю в момент перехода напряжения V через ноль. Но мембрана выключателя не успевает реагировать на это изменение в силе, если время перехода напряжения с одного знака на другой не превышает примерно 20—100 нс.

Если длина прямоугольной волны будет выбрана таким образом, что ее период намного короче времени заряда диэлектрического слоя, диэлектрик не будет заряжаться. А значит, надежность выключателя будет значительно повышена. Типичная частота прямоугольной волны управляющего напряжения составляет 5—20 кГц со временем перехода 20 нс (рис. 5, b). Биполярное управление привело к значительному повышению надежности выключателей лабораторий Линкольна и Мичиганского университета, использующих формы волны (рис. 5, a, b) [8].

Максимальное значение коммутируемого напряжения переключателя определяется, в частности, максимальным напряжением разомкнутой коммутируемой цепи переключателя, не вызывающим отказ переключателя в его выключенном состоянии. Это обусловлено тем, что напряжение в разомкнутой коммутируемой цепи создает электростатическую силу между переключателем и линией передачи сигнала (t -линией) (рис. 1, a, b).

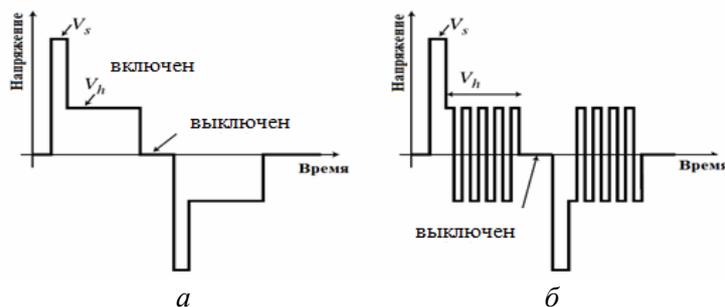


Рис. 5. Биполярное управление МЭМС выключателем с униполярным (a) и биполярным (b) удерживающим напряжением V_h в пределах одного цикла включения.

Для переключателей с большой площадью контактирования, таких как емкостные (рис. 1, а, б), это может привести их в положение рабочего состояния до приложения управляющего напряжения, что называется "самоприведением в действие" [8].

Механизмы отказов МЭМС выключателей с резистивными контактами

Среди механизмов отказа выключателей низкой мощности с резистивными контактами преобладают механическое разрушение поверхности контакта, эрозия и наклеп области металлического контакта. Другие механизмы отказа возникают из-за органических отложений и загрязнений на поверхности контакта. Их можно уменьшить, поместив выключатель в чистую окружающую среду. Один из видов отказов — резкое увеличение контактного сопротивления R_k (рис. 6) [7]. Есть предположение, что увеличение контактного сопротивления свыше 5 Ом приводит к вносимой потере — 0,5 дБ [7].

При электростатическом приводе надежность выключателя может быть повышена выбором специальной формы сигнала управляющего напряжения для уменьшения энергии удара и, в результате, уменьшения эрозии и наклепа контакта (рис. 7) [9]. Аналогичные рекомендации были ранее даны применительно к герконам [10].

Выключатели с резистивными контактами также подвержены залипанию или свариванию. Залипание, в частности, происходит, когда используется электростатическое приведение в действие. Однако эта проблема решена в последовательных выключателях, поскольку в большинстве конструкций нижние притягивающие электроды не касаются подвешенного стержня (мембраны или консоли). Причинами отказов являются также микросварки и перенос материала в области контактной площадки. Надежность резистивных МЭМС выключателей еще плохо изучена. Необходимо фундаментальное исследование, чтобы понять механизмы отказа в таких выключателях с очень малыми контактными усилиями (до сотых и даже тысячных долей ньютона) [9, 10].

Твердость золотого покрытия зависит от способа его нанесения: если им гальванически покрывают поверхность, то твердость равна 1 ГПа, а если распыляют — 3 ГПа. Твердость пленочного материала сильно зависит от твердости подложки. Согласно работе [7], для контактного усилия 100 мкН и контакта радиусом 0,12 мкм необходимо использовать, по крайней мере,

0,4—0,5 мкм золота, нанесенного распылением или покрытием на кремниевое основание. На рис. 8 представлена зависимость контактного сопротивления от контактного усилия для различных материалов: золота, $AuNi_5$ [10] и родия, согласно работе [11].

По данным работы [12], расчетное контактное сопротив-

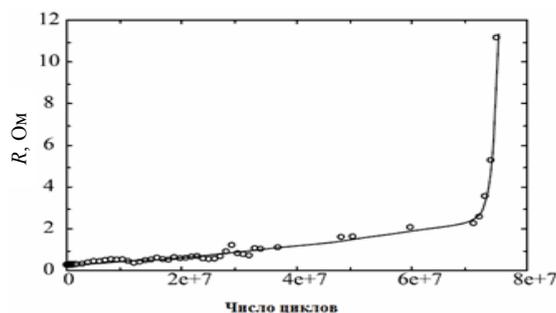
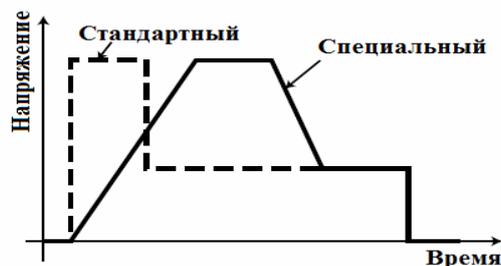


Рис. 6. Зависимость контактного сопротивления R_k от числа циклов срабатываний для золотых контактов.

Рис. 7. Стандартный и специальный сигналы управляющего напряжения.



ление золота при различных значениях тока составляет около 70—100 мОм для контактного усилия выше 80 мкН.

Измеряемое сопротивление золотого контакта падает очень медленно с ростом контактного усилия и не соответствует расчетным моделям [7].

Согласно работе [11], измеренное в исследовательской лаборатории сопротивление контактов для золота и AuNi₅ при усилиях 100—500 мкН гораздо меньше типичных значений, наблюдаемых при производстве. Это может быть отнесено к специальным процедурам очистки, сделанным в области контакта до измерения сопротивления [14]. Золото и AuNi₅ хорошо подходят для контактного усилия свыше 80—500 мкН, а родий — для конструкций с большим усилием. Измеренное сопротивление контактов переключателей с использованием золота при усилиях 80—200 мкН составляет 0,15—0,4 Ом. Причина этого роста по сравнению с указанным расчетным значением не выяснена, но это наблюдается при всех промышленных измерениях. Способ очистки золотого контакта, наличие примесей, чистота испытательной станции — все влияет на сопротивление золотого контакта. Согласно работе [13], одно из возможных

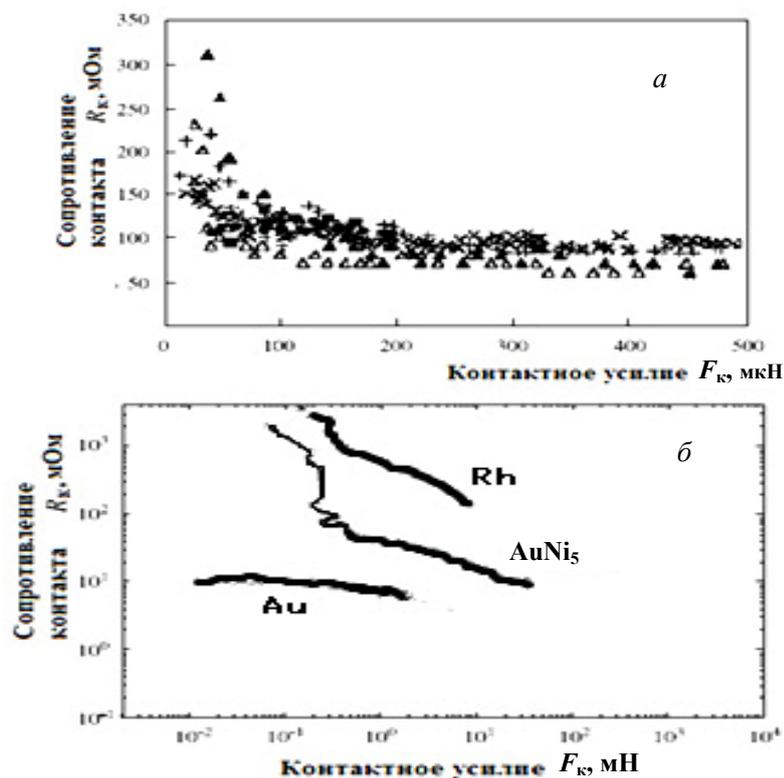


Рис. 8. Измеренные сопротивления контакта в зависимости от контактного усилия для золота (а), золота, AuNi₅ и родия (б).

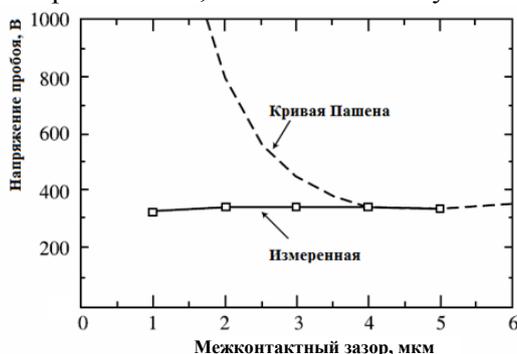
объяснений — поглощение углеводородов в контактном слое и наличие поверхностных загрязнений.

Выбор материала контакта в значительной степени определяется конструкцией выключателя и областью применения. Основной рассматриваемый фактор для конструкции контакта — его площадь. Большая площадь контакта соответствует более низкому сопротивлению. Следующий фактор — сила залипания контактов. Залипание возникает, когда только убрано управляющее напряжение и надо разделить контакты. Силы, необходимые для разрыва области атомарно-связанного металла, определяются площадями пластично деформированных областей. Таким образом, силы прилипания зависят от кристаллической структуры используемого металла. Золото формирует гранцентрированную кубическую кристаллическую структуру, у которой достаточно большая сила залипания. Анализируя зависимость между строением атома металлов и их коэффициентами прилипания и твердостью, можно сделать вывод, что сила залипания составляет приблизительно 40% от силы предварительного сжатия, если разделяющее движение перпендикулярно поверхности контакта [12]. В большинстве выключателей с силами контактного нажатия 40—100 мкН используется чистое золото или золотой сплав, хотя они и имеют проблемы с залипанием. Исключением является фирма "Radant МЭМС", которая применяет собственный тугоплавкий металл [8].

Более твердые металлы, например родий, имеют меньшую по сравнению с золотом склонность к адгезии на сопоставимых уровнях силы контактного усилия [8]. Но использование родия приводит к более высокому контактному сопротивлению. Если сравнивать с золотом, то твердость и удельное сопротивление родия в 2 раза больше [8]. Это значит, что если к контакту из золота и родия приложить одинаковое контактное усилие, то сопротивление родия будет больше в 4 раза. Но золото имеет в 3,6 раза больший коэффициент прилипания по сравнению с родием.

Выключатели МЭМС могут быть изготовлены с контактными усилиями и возвращающими (отрывающими) силами 1—2 мН ("Omron", термовыключатель Кроноса) или 50—200 мкН ("Rockwell", "Radant МЭМС", "Motorola", "Microlab", "Samsung Electronics") [1].

Для выключателя с резистивными контактами отказ самоприведением в действие минимален из-за небольшой площади контакта. В этом случае выключатель может прийти в негодность из-за пробоя воздушного промежутка между t -линией и мембраной выключателя. Межконтактный зазор 1—5 мкм, согласно закону Пашена, может выдержать ~340 В



напряжения постоянного тока [13]. Однако реально имеется отклонение от кривой Пашена, показанное на рис. 9, при измерении с зазорами меньше 4 мкм [15]. Данные на рис. 9 [11, 12]

Рис. 9. Напряжение пробоя в зависимости от межконтактного зазора.

Ресурс работы переключателей с резистивными контактами при малой мощности

Компания	Материал контакта	Сила контактного нажатия, мкН	Число срабатываний, млрд.
"Motorola"	Сплав с золотом	100	>60
"Radant МЭМС"	Тугоплавкий металл	100	>60
"Cronos"	Золото	≈1000	>1
"Omron"	Сплав с золотом	≈1000	>1
"Rockwell Scientific"	Сплав с золотом	100—150	>1
"Samsung Electronics"	Сплав с золотом	100	>0,5
"ST-Microelectronics"	Сплав с золотом	100—200	>0,5
"Microlab"	Золото	100—200	>0,1

получены на чистых, круглых поверхностях; фактические напряжения пробоя составляют 150—250 В для измерений при зазорах 1—4 мкм. Это происходит из-за присутствия острых выступов в области контакта, вызванных шероховатостью контактных поверхностей, что может значительно увеличить электрическое поле в районе межконтактного зазора.

Испытания на надежность при малой и средней мощностях

Большинство готовых последовательных выключателей с резистивными контактами были испытаны в течение 100—1000 миллионов циклов, только выключатели фирм "Radant МЭМС" и "Motorola" были протестированы более чем в 10 миллиардах циклов (таблица) [7].

Все опыты проводили при ВЧ мощности 0,1—1 мВт (1,5—4 мА, от постоянного до ВЧ тока), используя частоту переключения 0,1—10 кГц в среде азота или сухого воздуха при чистых комнатных условиях. Выключатель фирмы "Radant МЭМС" может надежно управлять усилителями пульсирующих токов, что представляет интерес для промышленной и медицинской ультразвуковой техники [7].

Все другие проекты используют золотой сплав с сопротивлением контакта 0,1—0,3 Ом и имеют два контакта в последовательной конфигурации. Фирма "Radant МЭМС" также осуществляла сборку своего выключателя стандартными методами герметичной сборки, и собранный таким образом выключатель был испытан на 10 миллиардах циклов.

Выводы

Рассмотрены причины отказов емкостной и резистивной конструкций ВЧ МЭМС выключателей, основные материалы контактов для таких выключателей, а также приведены экспериментальные зависимости сопротивления контактов от контактных усилий, результаты испытаний на надежность выключателей, проведенных разными компаниями-изготовителями.

Эти результаты приводят к выводам, что до сих пор проблемами, требующими решений, остаются склонность к залипанию и необходимость герметизации МЭМС выключателей. Для каждого выключателя, как правило, требуется разработка индивидуального корпуса, который определяется областью применения. Расходы на корпусирование в настоящее время высоки, а технологии корпусирования сами по себе могут иметь отрицательный эффект на надежность МЭМС.

1. *Варадан В.* ВЧ МЭМС и их применение / В. Варадан, К. Виной, К. Джозе: Пер. с англ. — М.: Техносфера, 2004. — 528 с.
2. *John H. Lau.* Advanced MEMS Packaging / [H. Lau John, Lee Chengkuo, C. S. Prema-chandran, Yu Aibin]. — 2009. — P. 475—485.
3. *Белов Л.* Переключатели сверхвысоких сигналов. — М.: Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2006. — № 1. — С. 20—25.
4. *Blaise G.* Charging phenomena, dielectric relaxation processes and breakdown of oxides / G. Blaise and C. Le Gressus // IEEE 1990 Annual Report: conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. — New York, 1990. — P. 231—236.
5. *Blaise G.* Charge trapping in thin SiO₂ layers: Application to the breakdown of MOS // Ibid, 1996. — P. 24—27.
6. *Wolters D. R.* Shoot breakdown in MOS devices / D. R. Wolters and J. J. Vander // Philips J. Res. — 1985. — 40. — P. 115, 137—164.
7. *Gabriel M. Rebeiz.* RF MEMS: Theory, Design, and Technology. — Hardcover, 2003. — P. 20—240.
8. *Шоффа В. Н.* Влияние способов и режимов управления на динамические характеристики магнитоуправляемых контактов / [В. Н. Шоффа, С. В. Хромов, В. Н. Чичерюкин, С. В. Давыдов] // Техника средств связи. Серия "Техника проводной связи". — 1991. — Вып. 8. — С. 3—13.
9. *Карабанов С. М.* Микроэлектромеханические выключатели / С. М. Карабанов, В. Н. Шоффа // Электрические контакты и электроды. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2012. — С. 76—80.
10. *Majumder S.* Measurement and modeling of surface micromachined electrostatically actuated microswitches / [S. Majumder, N. E. McGruer, P. M. Zavracky et al.] // Internat. conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 97), Chicago, 1997. — P. 1145—1148.
11. *Hyman D.* Contact physics of gold microcontacts for MEMS switches / D. Hyman, M. Mehregany // IEEE Trans. Comp. Packaging Tech. — 1999. — 22, No. 3. — P. 357—364.
12. *Schimkat J.* Contact materials for microrelays // The 11th IEEE Internat. conf. on Microelectromechanical Systems, Heidelberg, Germany, 1998. — P. 190—194.
13. *Schimkat J.* Contact measurements providing basic design data for microrelay actuators // Sensors and Actuators. — 1999. — 73. — P. 138—143.

Високочастотні мікроелектромеханічні перемикачі

В. Н. Шоффа, Е. А. Коваленко

Представлено огляд принципів комутації, конструкцій, використовуваних матеріалів, результатів досліджень і розробок високочастотних мікроелектромеханічних перемикачів з електростатичним управлінням, що представляють одне із сучасних напрямків розвитку комутаційної техніки.

Ключові слова: резистивні перемикачі, ємнісні перемикачі, механізми відмов.

Rf mems switches

V. N. Shoffa, E. A. Kovalenko

An overview of the principles of switching structures, used materials, the results of research and development of RF MEMS switches with electrostatic control, representing one of the modern direction of switching technology development is given.

Keywords: MEMS, resistive switch, capacitive switch, failure mechanisms.