

УДК 621.382.049.77

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ КОММУТАЦИОННЫЕ МИКРОУСТРОЙСТВА НА АНОДНОМ ОКСИДЕ АЛЮМИНИЯ

Н.И. МУХУРОВ¹, Г. И. ЕФРЕМОВ¹, А.С. МУССКИЙ²

¹Институт электроники НАН Беларуси
Логойский тракт, 22, Минск, 220090, Беларусь,

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 12 февраля 2007

Анализируются особенности построения перспективных электростатических коммутационных микроустройств. Приводятся обобщенные формулы для определения контактных усилий. Широкое применение таких микроустройств в различных схемах управления, диагностики и контроля обусловлено мизерным потреблением электроэнергии и минимальными массогабаритными показателями. Использование алюмооксидной технологии позволяет формировать элементы с точностью в десятки нм.

Ключевые слова: электростатические коммутационные микроустройства, моделирование, перспективные конструктивные варианты.

Введение

В настоящее время одним из важных и востребованных направлений развития науки и техники является разработка и создание устройств микросистемной техники (МСТ) и микроэлектромеханических систем (МЭМС) [1]. Согласно данным исследований фирмы Business Communications С.І. среднегодовой прогнозируемый прирост мировых продаж МЭМС устройств и технологического оборудования за период 2005–2010 гг. составит 20,1%. Будут развиваться новые области применения МЭМС: с 2004 по 2010 г. их доля в телекоммуникациях вырастет от 4 до 11%; в информационных технологиях от 0,1 до 5,1% [2].

По данным фирмы In-Stat, стоимость использованных МЭМС в мобильных телефонах в 2005 г составила сумму 157 млн долларов, а к 2010 г. превысит уровень 1млрд долларов. К 2007 г. телефонные трубки будут оборудованы МЭМС переключателями и устройствами цифровой настройки на базе МЭМС. В настоящее время у переключателей достигнут уровень циклов работы >100 млрд [5]. Наиболее важными требованиями, предъявляемыми к современным и перспективным изделиям микротехники, является снижение их массы, объема, потребляемой мощности и стоимости одновременно с повышением их функциональности, рабочей частоты и уровня интеграции. Реализацию данных требований обеспечивают новые компоненты, изготовленные по МЭМС технологии с использованием системного подхода к построению их архитектуры. Интерес к использованию МЭМС технологии является следствием ее гибкости. Она позволяет преодолеть ограничения, присущие интегрированным устройствам, и реализовать схемы совершенно иного уровня [6]. Объем рынка основных изделий МСТ/МЭМС, по данным Европейской программы NEXUS III, представлен на рис. 1.

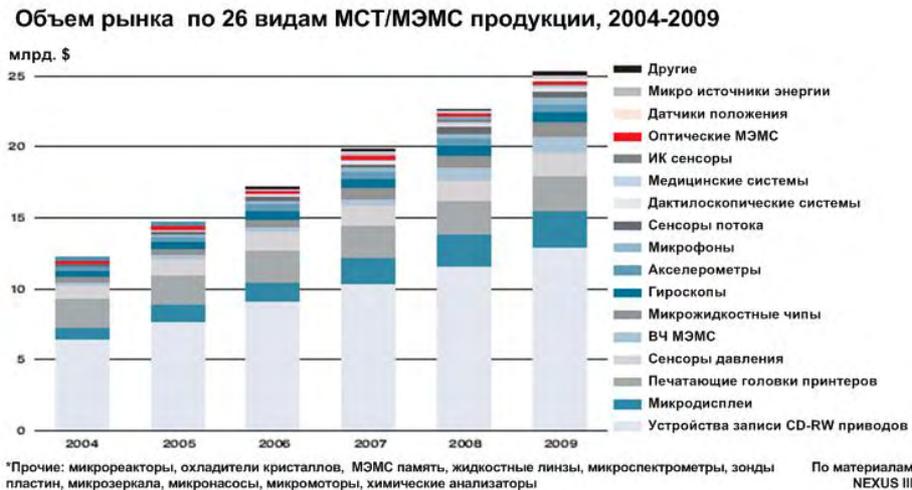


Рис. 1. Объем рынка основных изделий МЭМС по данным Европейской программы NEXUS III

Среди широкой номенклатуры МСТ/МЭМС большое внимание уделяется коммутирующим устройствам (КУ), в частности, переключающим и сканирующим системам. Предпочтение отдается системам электростатического принципа действия, которые наряду с потреблением ничтожно малого количества электроэнергии, резким сокращением массогабаритных показателей оптимально соответствуют требованиям интегральной микроэлектронной технологии. Именно в микроминиатюрном исполнении электростатические устройства имеют существенные преимущества по энергоемкости, быстродействию, простоте исполнения по сравнению с широко распространенными в автоматике электромагнитными. Однако бурное развитие МЭМС сопровождается нарастанием сложности комплекса возникающих новых проблем: с одной стороны, конструктивных, технологических и материаловедческих, с другой - производственно-экономических. Одним их эффективных, но альтернативных путей решения значительной доли стоящих проблем является проведение теоретического анализа взаимодействующих факторов (входных параметров, внешних и внутренних сил различной природы, перемещений и т.п.), охватывающего полный рабочий цикл КУ. Выявленные при этом внутренние резервы и нюансы дают возможность сформировать оптимальную принципиальную конструкцию и, внося в нее незначительные изменения, расширить области применений. Технология и материалы при этом останутся прежними. Успешное функционирование устройств МЭМС стало напрямую зависеть от исследования примененной кинематической схемы и параметров напряженного состояния механических компонентов. Теоретическим расчетам микромеханики, имеющей благодаря специфике размеров и конфигурации существенные отличия от объектов машиностроения, посвящен ряд работ. Проведены исследования режимов работы электростатических микродвигателей [7], планарных микрогироскопов [8], электростатических и механических сил в процессе включения электростатического микрореле консольного типа [9], упругих деформаций в микроэлектронных акселерометрах [10, 11], электростатического вращающего момента и рабочего напряжения в переключателе торсионного типа, работающего в режиме Push-Pull [12], и ряд других. В работах [7, 8, 13] описываются свойства новых материалов и методы их обработки.

В данной статье рассматривается методика обеспечения требуемых контактных усилий в микро-КУ электростатического принципа действия с различными конструктивными схемами.

Отличительные особенности микромеханических структур

Специфической особенностью микромеханических структур (ММС) — переключателей, датчиков, актюаторов и т.п. — является наличие подвижных кинематических микроэлементов, предназначенных для выполнения различных, в том числе самостоятельных, функций. Они обычно имеют достаточно сложную плоскую или пространственную

конфигурацию, должны быть выполнены с прецизионной точностью и длительное время сохранять физико-механические характеристики в широком интервале температур и внешних воздействий.

Схематически ММС представляет собой пластину, в которой размещены каркасные, упругие соединительные, жесткие подвижные элементы и которая закрепляется на относительно жесткой базовой подложке-основании или соединяется с другими аналогичными пластинами. Оптимальным построением конструкции можно считать такое, в котором все элементы формируются в одной пластине едиными интегральными процессами, а затем на ее поверхностях создаются функциональные слои, обеспечивающие требуемые параметры ММС. В частности, в КУ, формируются электроды и контакты.

В настоящее время в качестве исходных материалов широко используются кремний и его модификации, обладающие достаточно высокими физико-механическими свойствами. Технология создания ММС на его основе в ряде случаев не позволяет получить требуемую форму (например, квадратное сечение) элемента, сопряжена с высокотемпературными операциями (например, пайкой при 500–1200°C), что ухудшает физико-механические характеристики и приводит к появлению значительных внутренних механических напряжений. В связи с этим проводятся интенсивные исследования возможности использования в качестве базового материала полиамида, пермаллоя, композиционных керамико-полимерных материалов и др. [1]. В ряду этих материалов одно из перспективных мест в последнее время занимает анодный оксид алюминия (АОА), обладающий высокими физико-механическими свойствами [14]. Особенно существенное значение для ММС имеют практически постоянные значения механических характеристик в широком интервале температур $-50...+600^{\circ}\text{C}$ (их изменение не превышает 5–7%), а также совпадение пределов упругости и прочности. Отсутствие текучести повышает надежность функционирования ММС и исключает гистерезис перемещения упругих элементов после многократного действия внешних сил. В результате появляется возможность увеличения допустимых перемещений упругих элементов, что расширяет диапазон их функционирования и номенклатуру устройств. Существенное значение имеют также высокие адгезионные свойства АОА, гарантирующие прочность соединения электропроводящих пленок из различных металлов с поверхностью подложек. В качестве материала проводящих пленок обычно используются металлы с близкими к АОА значениями коэффициентов термического расширения (к.т.р.): молибден ($5,5 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$), хром ($8,1 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$), ванадий ($10,9 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$). Для снижения электрического сопротивления и повышения надежности соединения с цепями управляющей и управляемой аппаратуры на эти пленки могут быть локально нанесены другие металлы, имеющие больший к.т.р. Специфической особенностью АОА является самоорганизующаяся нанопористая структура, которая позволяет получать детали с планарными и объемными элементами сложной конфигурации и с прецизионной точностью (клин травления $\leq 0,01$ при толщинах в сотни мкм). К достоинствам технологического процесса производства ММС на базе АОА относится также возможность использования методов и оборудования интегрального микроэлектронного производства. Таким образом, АОА является материалом, в достаточной степени удовлетворяющим основным технологическим и конструктивным требованиям, предъявляемым как к статическим, так и к кинематическим элементам ММС. Однако расчету последних пока не уделено должное внимание и рассматриваются лишь отдельные частные вопросы.

Специфические требования к упругим элементам микромеханических структур

Конструктивные формы и технические показатели упругих элементов (УЭ), соединяющих подвижные элементы (ПЭ) с каркасными, предопределяются назначением и требуемым диапазоном эксплуатационных характеристик разрабатываемого устройства. При этом физическая сущность воздействующих сил или смещений (механическая, электрическая, тепловая и т.п.), определяющих деформирование упругих элементов, не имеет значения. Для обеспечения работоспособности ММС важна лишь функциональная зависимость деформирования УЭ от внешнего воздействующего силового, размерного или иного фактора.

В свою очередь, максимальная величина последних существенным образом зависит от показателей деформируемости УЭ.

Специфика УЭ состоит в том, что именно они должны обеспечить основные, нередко противоречивые требования к ММС: стабильность исходного расположения элементов; значительную величину деформации на микроединицу воздействующего фактора (разрешающую способность); быстрый и надежный возврат элементов; долговечность и др. Все они полностью относятся к держателям — УЭ, соединяющим подвижный элемент — якорь с каркасом. Жесткость держателей, схема их закрепления оказывают непосредственное влияние на усилие сжатия контактов.

На данном этапе разработок ММС УЭ в подавляющем большинстве выполняются в виде разнообразных очертаний в плане плоских пружин-держателей, работающих на изгиб (держатели, испытывающие растяжение, рассматривать нецелесообразно в связи с их недолговечностью), или торсионных, работающих на кручение.

Конструктивно первые можно разделить на: консольные К с жестко закрепленным одним и свободным другим концом; балочные БЖ, соединенные внутренними концами с подвижным электродом — якорем и жестко закрепленные наружными в каркасе; балочные БШ, соединенные внутренними концами с якорем и свободно, шарнирно оперты на каркасе, наружными [15, 16].

Характеристика соединения держателя с якорем зависит от соотношения длин держателя и якоря $\alpha=L_d/L_j$ и их моментов инерции $\beta=I_d/I_j$. По проведенным нами расчетам, жесткими якорями, обеспечивающими минимальную стрелу прогиба, т.е. равномерность величины рабочего промежутка, являются якоря в БЖ при $\beta<0,04$, $\alpha>0,4$, в БШ при $\beta<0,04$, $\alpha>0,25$. Анализ существующих конструкций свидетельствует о реальности таких сочетаний. Известны конструкции ММС с промежуточной опорой держателей, позволяющей увеличить реактивную силу возврата ПЭ из конечного положения [14].

Торсионные могут быть подразделены на: одноступенчатые, имеющие постоянное сечение; двух (или более) ступенчатые, состоящие из участков, отличающихся по величине сечения. Последовательное отключение участков при повороте якоря позволяет варьировать реактивным моментом.

Как известно, воздействующая сила F , стимулирующая реактивные усилия, обуславливает деформации УЭ — прогиб y или угол поворота α . Анализ показывает, что при прочих равных условиях величина деформации держателей существенно зависит от конструктивной реализации закрепления концов держателей, характеризующегося коэффициентом заделки k . Обычно он принимается $k=3$. Однако по проведенным нами расчетам, у БЖ коэффициент k увеличивается до 12, а в вариантах с промежуточными опорами возрастает до 36, что, естественно, оказывает существенное влияние на силовые факторы.

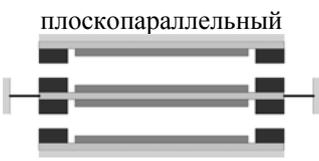
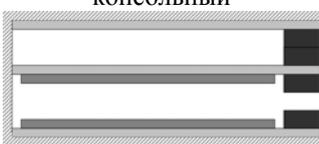
Контактные группы в микрокоммутационных системах

Принципиально контактные группы идентичны соответствующим элементам электромагнитных реле. Типовые варианты представлены в табл. 1, в которой расположение держателей и торсионных показано условно. Отметим, что на основе приведенных вариантов могут быть скомбинированы разнообразные многоконтактные переключатели, обеспечивающие эффективное расширение диапазона регулирования и управления.

Примеры конструктивных исполнений

Рассмотрим реальные конструктивные решения некоторых схем, представленных в табл. 1. В статье [12] описана конструкция торсионного электростатического КУ, работающего в режиме Push-Pull. На рис. 2 изображена его конструктивная схема.

Таблица 1. Типы контактных групп и их схемы

Контактные группы	Примеры	Источник
Замыкание одного контакта (одной цепи)	консольный 	[18–20]
	плоскопараллельный 	[21]
	торсионный 	[12]
Замыкание двух (и более) контактов (цепей) одновременно	Плоскопараллельный 	[22, 23]
Замыкание двух (и более) контактов (цепей) поочередно	плоскопараллельный 	[24]
	торсионный 	
Переключение двух (и более) контактов (цепей)	консольный 	[20]
	плоскопараллельный 	[25]
	торсионный 	

Данная конструкция может использоваться в микрополосковых линиях передачи. Первоначально переключатель находится в отключенном состоянии и контакты сигнальной линии разомкнуты. Когда контактное плечо притягивается вниз электростатической силой, контакты замыкают сигнальную линию. Изоляция переключателя определяется емкостью между контактами. Поскольку емкость обратно пропорциональна расстоянию, изоляция становится больше, когда контакт поднимается выше. С этой целью предлагается режим Push-Pull. Якорь с контактом вращается вокруг оси упругих торсионов. На подложке имеются два фиксированных электрода. Один является тянущим электродом, второй – отводящим. Когда к тянущему электроду прикладывается напряжение, якорь поворачивается по часовой стрелке и контакты замыкаются. Когда тянущее напряжение отключается и прикладывается отводящее напряжение, контакт поднимается вверх. Для снижения рабочего напряжения межэлектродный зазор можно уменьшать, но в этом случае для сохранения хорошей изоляции необходимо

увеличивать длину якоря для сохранения в отключенном состоянии расстояния между контактами. КУ выполнено из кремния и его модификаций.

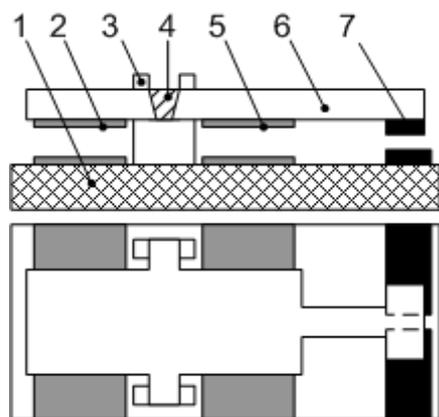


Рис. 2. Торсионное КУ, работающее в режиме Push-Pull: 1 — диэлектрическая базовая подложка; 2 — отводящий электрод; 3 — опора; 4 — торсион; 5 — притягивающий электрод; 6 — якорь; 7 — контакт

деформируют держатели и, электрически соединяясь с подвижным контактом, смещают якорь. Реактивная сила держателей обеспечивает нужное контактное усилие. На внутренней стороне якоря сформирован подвижный управляющий электрод.

На рис. 3, 4 изображены макетные образцы, детали которых сформированы с прецизионной точностью из анодного оксида алюминия методами групповой фотолитографии и последовательной электрохимической локальной обработки. Электропроводящие дорожки и контакты нанесены распылением металлов в вакууме через маски [23, 24].

КУ (рис. 3) состоит из жестко соединенных между собой диэлектрических подложки и пластины. В подложке выполнено двухступенчатое углубление. Первая ступень расположена на противоположных сторонах углубления и на ней предусмотрены неподвижные контакты. На второй ступени сформирован неподвижный электрод. Пластина состоит из закрепленной на подложке рамки и жесткого якоря, соединенного с ней упругими держателями, БЖ, расположенными по "елочной схеме". В отверстиях якоря и отверстиях первой ступени размещены цилиндрические токопроводящие штифты с головкой, свободно с зазором расположенные в отверстиях якоря. Головки при сборке деформируют держатели и, электрически соединяясь с подвижным контактом, смещают якорь.

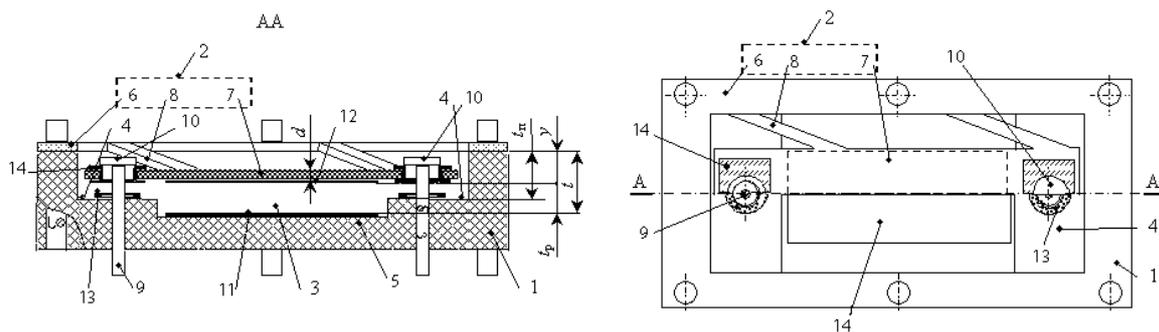


Рис. 3. Плоскопараллельное КУ для переключения двух цепей: 1 — подложка; 2 — пластина; 3 — углубление; 4 — первая ступень; 5 — вторая ступень; 6 — рамка; 7 — якорь; 8 — БЖ держатель; 9 — штифт; 10 — головка; 11 — неподвижный электрод; 12 — подвижный электрод; 13 — неподвижный контакт; 14 — подвижный контакт

Конструкция обеспечивает наличие нормально разомкнутых и нормально замкнутых контактов, расширяет функциональные возможности, одновременно повышая стабильность параметров КУ при вибрационных и ударных нагрузках за счет фиксации подвижного элемента в обоих положениях.

В КУ (рис. 4) содержатся аналогичные подложка и пластина. В нем предусмотрены специальные дополнительные опоры держателей, что повышает надежность размыкания контактов. Они сформированы на подложке под серединой держателей и имеют расчетную высоту. Опоры обеспечивают увеличение реактивной силы приблизительно в 3 раза при неизменной величине рабочего напряжения. Отключение произойдет при напряжении 0,42 от рабочего. Предлагаемая схема сокращает время возврата якоря в исходное положение в 1,73 раза.

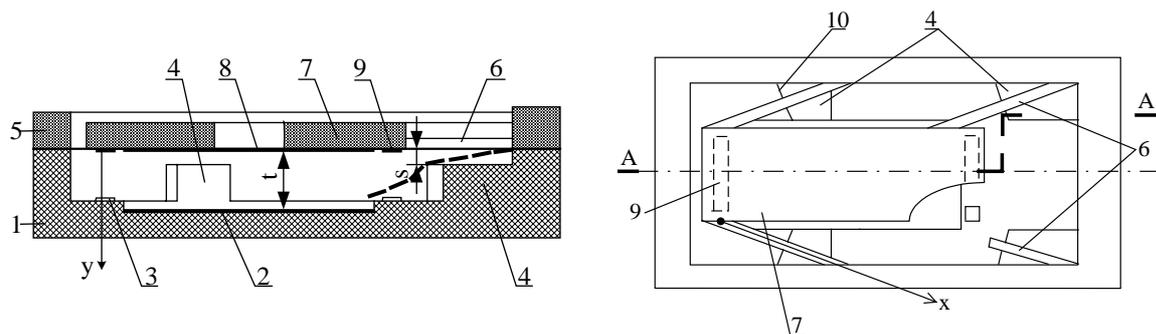


Рис. 4. Плоскопараллельное КУ с двумя контактами: 1 — подложка; 2 — неподвижный управляющий электрод; 3 — неподвижные контакты управляемой цепи; 4 — выступ; 5 — пластина; 6 — упругий БЖ держатель; 7 — якорь; 8 — подвижный управляющий электрод; 9 — подвижные перемычки управляемой цепи; 10 — опорное ребро

Определение контактных усилий

Контактные усилия Q , как видно из схемы включения КУ (рис. 5), представлены разностью электростатических F и реактивных механических сил P , возникающих после перемещения якоря на m_0 и возрастающих по мере уменьшения межэлектродного расстояния, соответственно базовой функции $U^*(m)$ [26]. Выключение микрореле происходит при снижении рабочего напряжения U_p до напряжения выключения U_B , при котором электростатические силы будут равны реактивным механическим.

Эта особенность цикла создает условия для расширения диапазона сферы применения контактных устройств от регулирующих систем при малых значениях U_p/U_B и m_B/m_0 , близких к максимуму кривой, до отключающих при $m_B=0,8-0,95$. Первые обеспечивают стабилизацию параметров управляемых процессов в слаботочных цепях за счет малой разницы U_p-U_B при меньших контактных усилиях, вторые — высокое контактное усилие в высоковольтных схемах. Конструктивно это достигается соответствующей высотой неподвижных контактов, ограничивающих перемещение якоря.

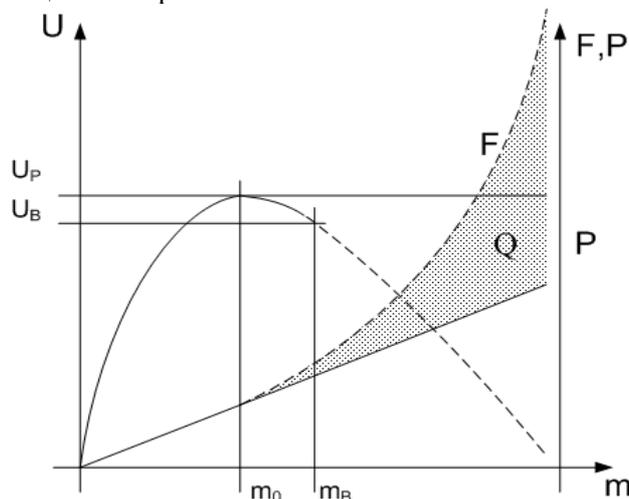


Рис. 5. Схема определения контактных усилий

Расчет контактных усилий (табл. 2) в рассмотренных контактных группах проведен по единой методике: по конструктивным данным определяется P , из условия равновесного состояния ($F=P$) и параметров базовой кривой находятся вначале U_p , затем F и, наконец, контактное усилие Q .

Таблица 2. Определение контактных усилий

Параметр	Консольная система	Плоскопараллельная система	Торсионная система
Реактивная сила P , момент M_P	$P = \frac{kEt}{L^3} m(2-m)^2$	$P = \frac{kEt}{l^3} qm$	$M_P = \frac{2GI_T t}{l_T L} m$
Условие равновесия	$P = F$	$P = F$	$M_P = M_F$
Параметры базовой функции	$m_0 = 0,36;$ $U_{\max}^* = 0,79$	$m_0 = 0,33;$ $U_{\max}^* = 0,38$	$m_0 = 0,44;$ $U_{\max}^* = 0,64$
Рабочее напряжение U_P	$0,79 \sqrt{\frac{2kEt^3}{\varepsilon_0 a L^4}}$	$0,38 \sqrt{\frac{2kElqt^3}{\varepsilon_0 l^3 S}}$	$0,64 \sqrt{\frac{4GI_T t^3}{\varepsilon_0 a l_T L^3}}$
Электростатическая сила F , момент M_F	$F = \frac{\varepsilon_0 a L U_P^2}{2t^2 (1-m)}$	$F = \frac{\varepsilon_0 S U_P^2}{2t^2 (1-m)^2}$	$M_F = \frac{\varepsilon_0 a U_P^2 L^2}{2t^2} \cdot \frac{1}{m^2} \left[\frac{m}{1-m} + \ln(1-m) \right]$
Диапазон m	0,36–0,95	0,33–0,95	0,44–0,95
Значение k	3	3–12	–
Контактное усилие $Q=F-P$	$\frac{kEt}{L^3} \left[\frac{0,62}{1-m} - m(2-m)^2 \right]$	$\frac{kElqt}{l^3} \left[\frac{0,14}{(1-m)^2} - m \right]$	$\frac{GI_T t}{l_T L l_K} \cdot 0,8 \cdot \frac{\left[\frac{m}{1-m} + \ln(1-m) \right] - 2m^3}{m^2}$

Примечания: a — ширина консоли, электрода; ε_0 — электрическая постоянная; E — модуль упругости (Юнга); G — модуль сдвига; I — момент инерции; I_T — момент инерции при кручении; k — коэффициент заделки концов держателя; l — длина держателей; l_T — длина торсионов; l_K — расстояние от оси вращения до контакта; L — длина консоли, электрода; q — количество держателей; S — площадь электрода; t — межэлектродное расстояние.

Заключение

В статье изложены отличительные особенности микромеханических структур, типовые методы их изготовления и наиболее широко применяемые материалы. Определены специфические требования к упругим элементам микромеханических структур. Рассмотрены различные виды контактных групп и конструктивных исполнений микрокоммутационных устройств.

Важным параметром является обеспечиваемое микрореле контактное усилие. В статье дан обобщенный подход к расчету контактных усилий для каждого вида конструкции. Полученные формулы позволяют конструировать микрореле с оптимальным соотношением контактных усилий, конструктивных параметров и рабочего напряжения. Это непременно положительно скажется на долговечности их работы, уменьшении габаритов, сложности схем управления и высокочастотности.

Из изложенного видно, что получаемые результаты достигаются как в рассмотренных вариантах, так и в возможных других за счет незначительного теоретически обоснованного изменения формы или расположения отдельных элементов базовых деталей, не требующих привлечения принципиально новых технологических процессов.

Элементы микрокоммутационных систем геометрически простые и однотипные: углубления, выступы, отверстия и сквозные пазы, балочные и консольные прямоугольного сечения, но все в миниатюрном исполнении и с высокой точностью размеров на уровне десятков нм. Для их изготовления наиболее подходящим материалом является анодный оксид

алюминия. Интегральная микроэлектронная технология в сочетании с электрохимическими методами обработки и фотолитографией обеспечивает прецизионность формирования планарных и объемных элементов из этого материала.

ELECTROSTATIC ANODIC ALUMINA SWITCHING MICRODEVICES

N.I. MUKHUROV, G.I. EFREMOV, A.S. MUSSKI

Abstract

Features of construction of perspective electrostatic switching microdevices are analyzed. The generalized formulas for definition of contact forces are resulted. Wide application of such microdevices in different control circuits, diagnostics and monitoring is stipulated by a extra-low power consumption and minimum mass-overall indexes. Use of anodic alumina technology allows forming elements accurate within tens of nanometers.

Литература

1. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам / Сборник статей под ред. д.т.н., проф. П.П. Мальцева. М., 2005.
2. MEMS market to reach \$12.5 billion by 2010 // *Military & Aerospace Electronics*. July, 2006.
3. Clarke P. MEMS set to invade mobile phone, says In-Stat., <http://www.eetimes.com>.
4. RF MEMS market will reach \$1.1 billion by 2009 // *Military & Aerospace Electronics*, 23 Nov. 2005.
5. Rebeiz G.M. // Proc. Internat. Confer. on MEMS, NANO and Smart System, 24–27 July 2005.
6. MEMS-устройства для СВЧ-приложений: новая волна. Часть II, <http://www.chip-news.ru>.
7. Дятлов В.Л., Косцов Э.Г. // МСТ. 1999. №1.
8. Погалов А.И., Тимошенко В.П., Тимошенко С.П., Чапыгин Ю.А. // МСТ. 1999. №1.
9. Cugliotta A., Soma A., Di Manro S. // Proc. of SPIE. 2000. Vol. 4019.
10. Лысенко И.Е. // Труды 7-й МНТК МНТК, Таганрог, 17–22 сентября 2000 г. Таганрог, 2000.
11. Панкратов О.В., Погалов А.И., Шелепин Н.А. // Труды 7-й МНТК, Таганрог, 17–22 сентября 2000. Таганрог, 2000.
12. Nah D., Yoon T., Hong S. // *Microwave Theory and Techniques*. 2000. Vol. 48. (12).
13. Advance program // The 9th Intern. Confer. on Solid State Sensors and Actuators. (Chicago, June 16–19, 1997).
14. Мухуров Н.И. Аллюмооксидные микро-наноструктуры для микроэлектромеханических систем. Минск, 2004.
15. Пономарев С.Д. и др. Расчеты и прочность в машиностроении. М.: Наука, Ф.М.Л., 1956.
16. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. М.: Наука, Ф.М.Л., 1971.
17. Ефремов Г.И., Мухуров Н.И. Оптоэлектронные и информационные технологии // Сб. статей ИЭ НАН Беларуси. 2003.
18. Петерсен К.Э. // ТИИЭР. Т. 70, № 5. 1982. С. 42.
19. Efremov G.I., Mukhurov N.I., Galdetskiy A.V. // Design, Test, Integration, and Packaging of MEMS / MOEMS. Proceedings of SPIE. May 2000. Vol. 4019. P. 584.
20. Ефремов Г.И., Мухуров Н.И., Галдецкий А.В. // Пат. РБ, № 5486, 2003.
21. Дятлов В.Л., Коняшкин В.В., Потапов Б.С., Фадеев С.И. / Пленочная электромеханика, Новосибирск, 1991.
22. Григоришин И.Л., Ефремов Г.И., Мухуров Н.И. // Пат. РБ, №2667, 1998.
23. Мухуров Н.И., Ефремов Г.И. // Пат. РБ, № 5411, 2003.
24. Ефремов Г.И., Мухуров Н.И. // Пат. РБ, № 4176, 2001.
25. Ефремов Г.И., Мухуров Н.И. // Пат. РБ, № 8453, 2003.
26. Ефремов Г.И., Мухуров Н.И. Материалы НТК "Кибернетика и технологии XXI века". С&Т Воронеж, Россия, 23–24 октября 2001. С.499–508. Воронеж, 2001.