

УДК 621.318.51

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ МИКРОРЕЛЕ НА ПРОФИЛИРОВАННЫХ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ

И.Л.Григоришин, Г.И.Ефремов, М.Э.Стельмах

В в е д е н и е

Анализ фундаментальных свойств емкостных устройств и машин показал, что они по многим своим характеристикам имеют неоспоримые преимущества перед индуктивными [1]. Эти преимущества наиболее четко проявляются при реализации таких устройств в микроминиатюрном исполнении. В настоящее время достаточно полно разработаны общие теоретические положения построения емкостных устройств, предложен ряд конкретных конструктивных и технологических решений [1-3]. Однако, как видно из состояния развития этого направления в отечественной и зарубежной практике, еще предстоит приложить немало усилий, чтобы построение электростатически управляемых устройств и машин вышло за рамки лабораторных исследований и они нашли бы широкое применение в технике. Одним из основных путей решения этой задачи, очевидно, является адаптация средств и методов построения микроэлектронных приборов применительно к созданию устройств микроэлектроники [4].

Определенные перспективы совершенствования и расширения функциональных возможностей пленочных микромеханизмов открывают разработанные в последнее время методы синтеза органических

и неорганических материалов с необходимым микрорельефом толщиной от долей микрометра и более с широкой гаммой механических, теплотехнических и электрофизических параметров.

Имея в виду предельные габаритные размеры и достижения микроэлектронной технологии, целесообразно и реально конструировать интегрированные элементы, в том числе с различными характеристиками и в виде определенных функциональных устройств. В этой связи несомненно важной является разработка новых базовых конструкций электростатических микромеханизмов требуемых функциональных качеств, которые допускали бы возможность их интегрального исполнения, и с определенным спектром характеристик при вариации геометрических параметров.

На примере электростатического пленочного микрореле ниже рассматриваются конструктивные и технологические особенности построения емкостных устройств и машин с использованием в качестве конструкционной основы микропрофильных диэлектрических пластин из оксида алюминия.

1. Конструкция микрореле

Конструкция электростатического микрореле [5] представлена на рис.1. Ее основными составляющими являются наложенные

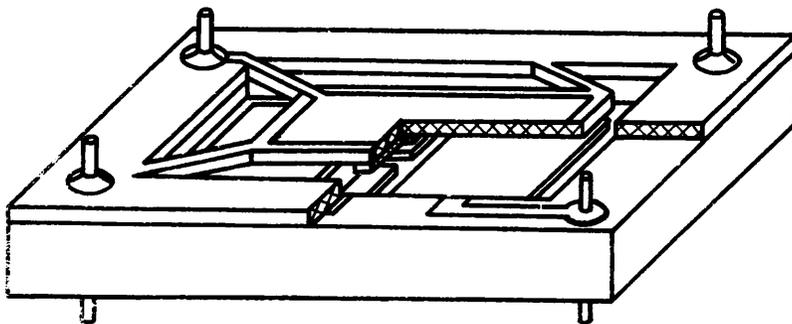


Рис. 1

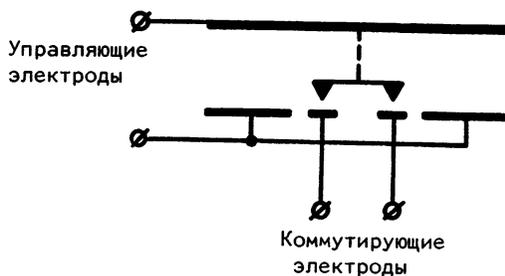


Рис. 2

друг на друга диэлектрические подложки, на одной из которых выполнен подвижный элемент в виде жесткой пластины, монолитно соединенной с остальной частью подложки тонкими упругими перемычками. Перемычки расположены симметрично на противоположных сторонах пластины под углом к ее большей оси, причем вершины этих углов направлены в одну сторону. На внешней поверхности пластины сформирован тонкопленочный управляющий электрод, а посередине внутренней поверхности - подвижный замыкающий контакт. На внутренней поверхности другой подложки выполнено углубление, на дне которого напротив неподвижного контакта расположены два неподвижных коммутируемых контакта и по обе стороны от них нанесен второй тонкопленочный управляющий электрод. Подложки соединены при помощи металлических штырей, впаянных в металлизированные соосные отверстия. Штыри служат также для токоподвода к контактным и управляющим электродам. На рис. 2 представлена эквивалентная схема микрореле.

Отличительными особенностями реле являются конструкция подвижного элемента и способ его закрепления. Так, при

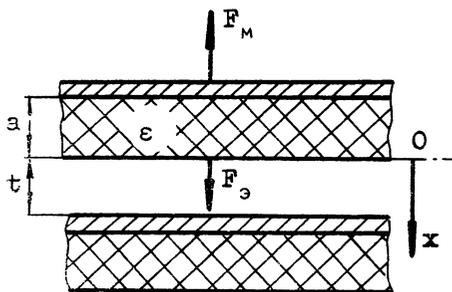


Рис. 3

подаче разности потенциалов на управляющие электроды, на подвижную пластину действует распределенная сила электростатического притяжения. Под действием этой силы упругие перемычки прогибаются, причем концы перемычек, соединенные с подвижной пластиной, передвигаются по дугам в одном направлении. Поэтому сама пластина перемещается параллельно своему начальному положению к дну углубления, сохраняя неизменной свою плоскостность, так как в ней не возникает никаких механических напряжений. Кроме того, независимый выбор жесткости пластины, упругости перемычек и площади управляющих электродов позволяет подвучать необходимые характеристики микрореле.

Управляющие электроды представляют собой плоский конденсатор с кусочно однородным диэлектриком, схема которого приведена на рис. 3, где a - толщина подложки подвижного элемента, t - расстояние между подвижным элементом и дном углубления в подложке, ϵ - относительная ди-

электрическая проницаемость материала подложки, F_3 - сила электростатического притяжения электродов, F_M - механическая сила сопротивления, ось x - направление перемещения подвижного элемента.

Величину силы электростатического взаимодействия F_3 управляющих электродов можно определить как изменение энергии от изменения расстояния между ними на величину x [6]. Тогда без учета краевых эффектов

$$F_3 = \frac{\epsilon_0 \epsilon U^2 S}{2(a\epsilon + (t-x))^2},$$

где ϵ_0 - электрическая постоянная, U - разность потенциалов. При смещении подвижного элемента на величину x и изгибе перемычек шириной, длиной и толщиной соответственно равными b , l и d возникает сила сопротивления [7]

$$F_M = \frac{E d^3 b x}{l^3},$$

где E - модуль упругости.

Преимущество конструкции элементов заключается в том, что можно при разработке легко предусматривать то или иное значение сил F_3 и F_M независимо друг от друга. Например, при заданных значениях размеров перемычек d , b и l , т.е. при определенном значении F_M , можно варьировать F_3 , выбирая значения S и a , не влияя на величину F_M , и наоборот.

Анализируя технологические возможности, механическую прочность и требуемые эксплуатационные параметры микроконтакт-

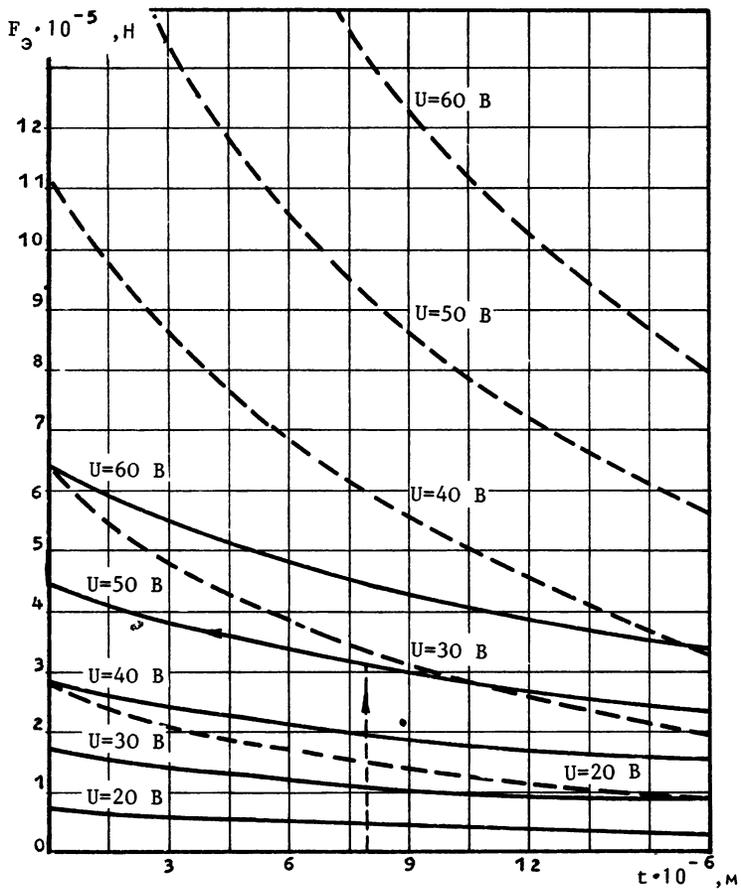


Рис. 4

ных элементов, можно заключить, что реальные геометрические размеры находятся в следующих пределах: $3 \text{ мкм} \leq a \leq 8 \text{ мкм}$; $3 \text{ мкм} \leq t \leq 15 \text{ мкм}$; $2 \text{ мкм} \leq d \leq 6 \text{ мкм}$; $b \cong 10d$; $l \approx (75-100)d$; $20 \text{ В} \leq U \leq 80 \text{ В}$. Рассчитанная для некоторых из этих параметров зависимость $F_3 = f(t)$ при $x = 0$ представлена на рис.4 ($\epsilon = 7,5$; $S = 1 \text{ мм}^2$; $a =$

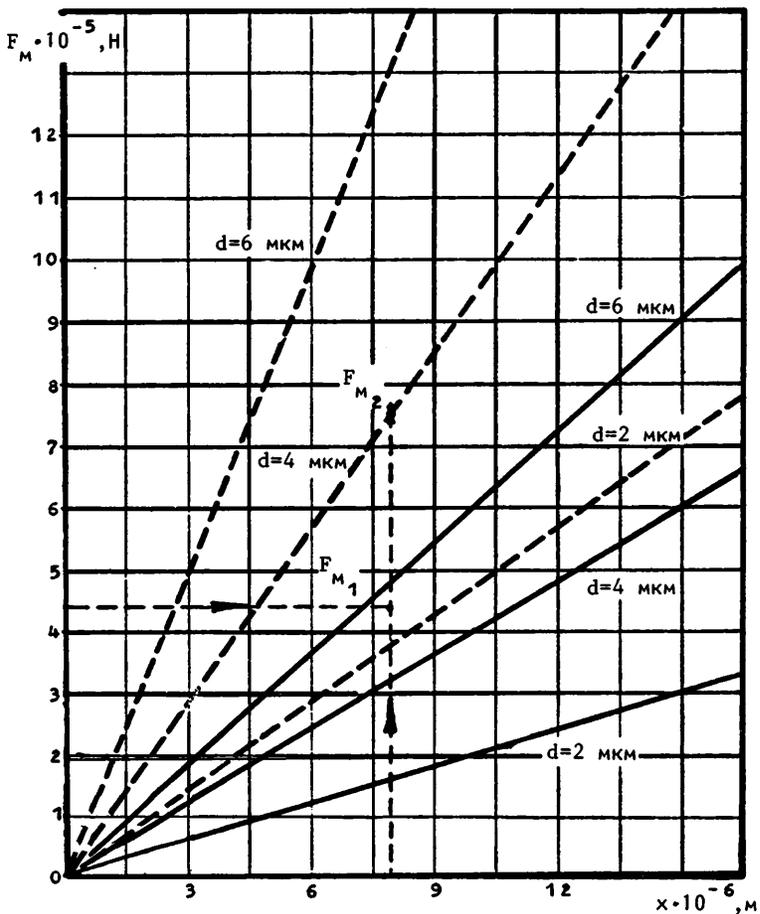


Рис. 5

$d = 6 \text{ мкм}$ - сплошная линия; $d = 3 \text{ мкм}$ - пунктирная линия). Зависимость $F_M = f(x)$, рассчитанная при тех же параметрах, представлена на рис. 5 ($E = 10^{11} \text{ Н/м}^2$; $d = 2, 4 \text{ и } 6 \text{ мкм}$; $l = 100d$ - сплошная линия, $l = 75d$ - пунктирная линия). Так как зависимость F_3 от S линейна, то для получения в конкретной конструкции необходимой величины F_3 площадь обкладки соответственно увеличивается или уменьшается. Выбрав

конструктивные параметры a и t для F_3 из графиков для предельного случая, когда $F_3 = F_M$ при $t = 0$, легко найти соотношения для выбора геометрических параметров перемычек. Например, для $U = 50$ В, $a = 6$ мкм, $t = 8$ мкм, $S = 1$ мм² по соответствующей кривой F_3 находим ее минимальное значение при $t = 0$. Определив F_M при $x = 8$ мкм, находим, что за данным требованиям удовлетворяют F_{M1} с соответствующими значениями l , d и b . В случае необходимости выбрать конструкцию с $l = 75d$ и $d = 4$ мкм следует удвоить (при тех же электрических параметрах) площадь обкладок в F_{M2}/F_{M1} раз.

Условие равенства F_M и F_3 означает прижатие контактов с нулевым усилием. Соответствующее этому минимальное напряжение срабатывания определяется из условия

$$U_{\min} = \sqrt{\frac{2\epsilon E d^3 a^2 b t}{\epsilon_0 l^3 S}}$$

Для надежной работы микрореле необходимо создавать усилие прижатия контактов, т.е. обеспечивать превышение управляющего напряжения над минимальным напряжением срабатывания.

2. Метод получения и сборка конструктивных элементов

Основные элементы конструкции микрореле - диэлектрические подложки - выполнены из оксида алюминия. Методы формирования данных конструктивных элементов основаны на процессах электрохимического окисления алюминия по технологии, разработанной в Институте электроники АН БССР. Комбинацией локального окисления и размерного травления оксида и алюминия на исходной заготовке формируются различные элементы с требуемой конфигурацией микрорельефа. В свободном виде диэлектрические изделия получают после селективного травления алюминиевой основы. Дан-

ный метод технологичен, так как обеспечивает получение многоуровневых прецизионных пластин регулируемой толщины в процессе формирования самого материала. Изготовленные таким образом изделия не требуют никакой дополнительной механической обработки. Анодный оксид алюминия является рентгеноаморфным, что обеспечивает его эластичность и достаточно высокую твердость. Кроме того, данный материал практически не изменяет механических параметров в результате старения. Поскольку диэлектрические элементы микрореле имеют малую толщину, существенное значение приобретает выбор материалов для тонкопленочных покрытий. По коэффициенту термического расширения с аморфным оксидом алюминия удовлетворительно согласуется молибден. В связи с этим в качестве управляющих электродов наносятся пленки молибдена, что позволяет свести к минимуму деформацию диэлектрических элементов конструкции. Контакты реле выполнены из меди, обладающей высокой эрозионной стойкостью. Металлизация отверстий с контактными площадками для впаивания соединительных штырей также выполнена из меди с подслоем молибдена. Все пленочные элементы формируются нанесением тонких пленок в вакууме через трафаретные маски.

Соединение подложек между собой осуществляется при помощи никелевых штырей, впаиваемых в соосные отверстия. Пайка осуществляется общим разогревом в среде водорода до температуры плавления припойной шайбы с предварительным прижатием плат между собой или путем разогрева коммутационных штырей пропусканием через них электрического тока. В связи с использованием тонких металлических пленок и необходимостью надежной работы в различных экстремальных условиях, микрореле герметизируется в вакуумном корпусе. Это способствует повышению частоты срабатывания реле, поскольку исключается демпфирующее действие газовой прослойки.

3. Основные параметры электростатического микрореле

В ходе исследований получены экспериментальные образцы в виде автономного реле и матрицы из трех независимых коммутирующих элементов со следующими конструктивными параметрами: толщина подложки с подвижным элементом $a = 5 \cdot 10^{-6}$ м; длина и ширина перемычек соответственно $l = 6 \cdot 10^{-4}$ м и $b = 6 \cdot 10^{-5}$ м; величина углубления в подложке неподвижного элемента $t = 15 \cdot 10^{-6}$ м; площадь конденсаторной пластины $S = 2,1 \cdot 10^{-6}$ мм²; модуль упругости и относительная диэлектрическая проницаемость для аморфного Al_2O_3 равны $E = 10^{11}$ Н/м² и $\epsilon = 7,5$ соответственно; толщина пленочных медных контактов $\approx 2 \cdot 10^{-6}$ м. Типовые значения основных параметров экспериментальных образцов приведены в таблице.

Как видно из данных таблицы, устройство имеет малые габариты и вес, относительно низкое напряжение срабатывания. Наибольшая частота надежного срабатывания составляет около 2,5 кГц.

Конструктивное решение устройства и использованные материалы позволили получить большое сопротивление контактов в разомкнутом и замкнутом состояниях, малую электрическую емкость между цепями управления и коммутации, основную долю которой составляет емкость между токоподводящими выводами корпуса. При испытаниях установлено, что при повышении управляющего напряжения на 10 В, по сравнению с минимальным напряжением срабатывания, время дребезга контактов уменьшается в несколько раз. Характерно, что при подъеме окружающей температуры до 300 °С в течение 10^7 циклов включения не замечено изменения каких-либо параметров микрореле, в том числе минимального напряжения срабатывания. Это подтверждает высокую стабильность механических свойств аморфного оксида алюминия в данном диапазоне температур. Для более высоких температур аморфный Al_2O_3 необхо-

Т а б л и ц а

П а р а м е т р ы	Значение параметра
Напряжение срабатывания $U_{ср}$	50-70 В
Мощность срабатывания	не более 10^{-6} Вт
Наибольший коммутируемый ток I_K	10 мА
Постоянное коммутируемое напряжение U_K	$2 \cdot 10^{-6}$ - 200 В
Число переключений:	
при $I_K = 1$ мА, $U_K = 5$ В, $f_{пер} = 1$ кГц, $T = 20$ °С	не менее 10^8
при $I_K = 1$ мА, $U_K = 5$ В, $f_{пер} = 200$ Гц, $T = 300$ °С	не менее 10^7
Сопротивление электрического контакта	не более 7 Ом
Сопротивление коммутирующей цепи при разомкнутых контактах	не менее 10^{15} Ом
Емкость между контактами	0,2 пФ
Емкость между управляющей и коммутирующей цепями	0,4 пФ
Время срабатывания	не более 0,1 мс
Время дребезга контактов	не более 0,1 мс
Габаритные размеры микрореле	$3 \times 4 \times 0,06$ мм ³
Габаритные размеры корпуса	∅ 9×40 мм ³
Вес микрореле	0,005 г
Вес корпуса	3,1 г

димо перевести в поликристаллическую γ -модификацию, которая по механическим свойствам пригодна для построения микромеханики, и данная фаза устойчива вплоть до 900 °С.

З а к л ю ч е н и е

Приведенные данные по конструированию, технологии, а также параметры экспериментальных образцов дают основание утверждать, что разработанное электростатическое микрореле уже сегодня может найти конкретное применение в различных областях техники в виде автономных устройств, матрицы из нескольких независимых коммутирующих элементов и законченных функциональных устройств, содержащих также и другие электронные компоненты. Некоторые специфические характеристики позволяют предположить, что область их применения может выйти далеко за рамки традиционных.

Показанная на примере электростатического микрореле технология получения диэлектрических подложек из оксида алюминия может стать основой для построения ряда микромеханических устройств и машин, так как она позволяет формировать с прецизионной точностью диэлектрические слои с многоуровневым микрорельефом толщиной от десятков нанометров до сотен микрометров. Групповые методы получения, высокая технологичность процессов, применение недорогих материалов и низкая стоимость получаемых изделий делают реальным создание как отдельных микромеханических устройств и машин, так и построение целых систем, объединяемых новым понятием - электромеханические среды.

Л и т е р а т у р а

1. ДЯТЛОВ В.Л. Электростатические устройства и машины из тонких пленок. Электромеханические среды //Моделирование в пленочной электромеханике. - Новосибирск. - 1989. -Вып. 131: Вычислительные системы. - С. 3-33.

2. ДЯТЛОВ В.Л., КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С. Пленочные емкостные структуры с накатом обкладок //Моделирование в пленочной электромеханике. - Новосибирск, 1981. -Вып. 84: Вычислительные системы. -С. 33-53.

3. PETERSEN K.E. Micromechanical Membrane Switches on Silicon //IBM J. Res. Develop. - 1979. - Vol. 23, N. 4, July. - P. 376-385.

4. ПЕТЕРСЕН К.Э. Кремний как механический материал //ТИЭР. - 1982. - Т. 70, № 5. - С. 5-49.

5. А.с. 1575249 СССР, МКИ⁴ H01H 59/00. Электростатическое реле / И.Л.Григоришин, Г.И.Ефремов, М.Э.Стельмах. - Опубл. в Б.и., 1990, № 24.

6. ГОВОРКОВ В.А. Электрические и магнитные поля. - М.: Связьиздат. - 1951. - 339 с.

7. Справочник машиностроителя: В 6 т. /Под ред. С.В.Серенсена. - М.: Машгиз, 1955. - Т. 3. - С. 21-66.

Поступила в ред.-изд.отд.

28 мая 1991 года