

Микроэлектромеханические выключатели

С. М. Карабанов, В. Н. Шоффа*

ОАО «РЗМКП», г. Рязань, Россия, E-mail: rzmkp@rmcip.ru;

*МЭИ, г. Москва, Россия, E-mail: shoffavn@mail.ru

Описаны микровыключатели, изготовленные с применением микро- и нанотехнологий (примеры конструкций, характеристики, использованные контактные материалы, значения сил контактного нажатия и разрыва контактов); изложены мнения авторов о стабильности характеристик и проценте выхода годных изделий.

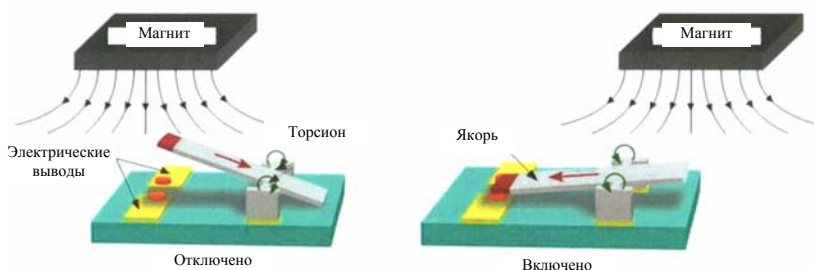
Ключевые слова: микромеханическая техника, микроэлектромеханический выключатель, сила контактного нажатия, контактное сопротивление, пассивация.

Введение

Развитие технологий микросистем и информационных технологий вызвало появление *микросистемной техники* (МСТ) и входящих в нее *микроэлектромеханических систем* (МЭМС) [1]. Одним из направлений МЭМС является разработка *микроэлектромеханических выключателей* (МЭМС выключателей) с применением исполнительных приводов различного принципа действия (термического, электростатического и электромагнитного). Использование микротехнологий позволяет уменьшить размеры и время срабатывания выключателей. Это повышает их способность к интеграции с электронными компонентами, что важно, в частности, для матричных переключателей систем связи, требующих высокой скорости переключения цепей и большой плотности компоновки. К выключателям такого рода не предъявляются требования по коммутации больших токов и напряжений, а также по повышенной электрической прочности. Обычно для них это, соответственно, десятки миллиампер, от единиц до нескольких десятков, сотен вольт. Однако требования к сопротивлению остаются высокими: в замкнутом состоянии — желательно не более нескольких сотен миллиом, в разомкнутом — 10^{10} — 10^{12} Ом. Цель настоящей работы — проанализировать технические решения в этой области и оценить перспективы массового производства микроэлектромеханических выключателей.

Типы микровыключателей

Микроэлектромеханический выключатель типа G1 (рисунок) [2, 3] имеет габариты $1,6 \times 1,65 \times 1,3$ мм³, что показывает очень высокий уровень его интеграции. Он управляется перемещением миниатюрного постоянного магнита и имеет следующие основные характеристики: механическая износостойкость — $>250 \cdot 10^6$ циклов срабатываний; электрическая износостойкость при нагрузке постоянного тока при 14 В/10 мА — $>10^4$ циклов, при 3 В/10 мкА — $>10 \cdot 10^6$ циклов, при 5 В/1 мА — >1 млн. циклов; электрическая прочность — >100 В (действующее значение); сопротивление изоляции — >100 МОм; максимальная частота коммутации — 1000 Гц; удароустойчивость — $>30g$ при длительности удара 11 мс; интервал рабочей температуры — $-40 \dots 100$ °С.



Принцип действия МЭМС выключателя типа G1.

Выключатель состоит из исполнительного механизма и системы электрических контактов, размещенных в герметичном кремниевом корпусе. Корпус включает подложку и кожух, которые соединены герметизирующим слоем.

Исполнительный механизм представляет собой ферромагнитную пластину толщиной 8 мкм из сплава 80Fe20Ni, прикрепленную с помощью торсионной подвески к подложке, дополнительно покрытую изоляционным слоем. На ферромагнитной пластине расположен подвижный электрический контакт из распыленного рутения толщиной 100 нм, нанесенного на подслой электроосажденного золота толщиной 1,5 мкм. Подвижный контакт при срабатывании выключателя замыкает два неподвижных электрических контакта, выполненных с применением нанотехнологии и расположенных на подложке совместно с проводниками из золота. В корпусе имеются токопроводящие каналы, соединяющие эти проводники с контактными площадками из эвтектического сплава AuSnCu для внешнего поверхностного монтажа. Подвижный и неподвижные контакты образуют контактный узел мостикового типа, представляющий собой два последовательно соединенных контакта. При этом из-за неодновременности замыкания (размыкания) этих соединений возникает отличие в их износе.

Отмечается факт увеличения контактного сопротивления при рутениевом покрытии в процессе работы выключателя.

Микроэлектромеханический выключатель — магнитоэлектрический датчик [4] для сотовых телефонов, электрокардиостимуляторов, слуховых аппаратов, наручных часов и беспроводного компьютерного оборудования имеет размеры 1,99x1,39x0,75 мм³ и управляется постоянным магнитом из материала SmCo размером 1 мм³. Материал контактного покрытия — родий; толщина покрытия — 8 мкм; раствор контактов — 4 ± 0,5 мкм; сила контактного нажатия — 10—30 мкН. Материал крепления контактной группы — боросиликатное стекло. Для герметизации применяли эпоксидную смолу. Контактное сопротивление при испытаниях было в пределах 2—20 Ом до герметизации и увеличивалось до 10—100 Ом после герметизации. В связи с этим в дальнейшем планируется перейти на герметизацию пайкой эвтектическим сплавом в среде аргона. Предполагается, что в последнем случае при коммутации электрической цепи с постоянными напряжением 0,5 В и током 5 мкА (характер нагрузки не указан) интенсивность отказов приблизительно будет равна $1 \cdot 10^{-9}$ с уровнем достоверности 90% при числе коммутаций до $100 \cdot 10^6$ циклов. Электростатическое воздействие на расположение контактной группы незначительно, если напряжение на контактах менее 10 В. Напряжение пробоя межконтактного промежутка — примерно 75 В. Ударопрочность при одиночных ударах — 5000g, при многократных — 500g.

Микроминиатюрный геркон, разработанный фирмой “Оки” (Япония) [5] и изготовленный с применением МСТ (фотолитография, технология травления и др.), имеет размеры 2,0x1,0x0,75 мм³ и следующие характеристики: контактное сопротивление — 0,5 Ом; максимальный коммутируемый ток — 50 мА; максимальное коммутируемое напряжение — 5 В (характер нагрузки не указан); длительно пропускаемый ток — 150 мА; механическая износостойкость — 10^7 циклов. Изоляционная подложка — стеклянная, контактное покрытие (материал не указан) — электролитическое.

Согласно анализу литературных данных [6], значения силы контактного нажатия в МЭМС выключателях для различных контактных материалов могут допускаться для: Au — 0,006—0,01, AuCuCd — 0,02, Au5Ni — 0,03—0,045, Rh — 0,06—0,09 гс. Согласно этому же анализу, сила разрыва контактов для преодоления адгезии и, соответственно, предотвращения “залипания” контактов должна быть для: Au — 0,01—0,27, Au5Ni — до 0,03, Rh — до 0,01 гс.

Контактное сопротивление и его зависимость от числа срабатываний для различных материалов контактных покрытий

Испытания, проведенные в течение нескольких дней без герметизации на контактных покрытиях, которые выполнены из различных чистых материалов (Au, Rh, Ru, Pt) и сплавов (30% Au—70% Ru, 80% Au—20% Ru, 95% Au—5% Ru), при силе контактного нажатия 0,02 гс показали [7], что наименьшее контактное сопротивление (примерно 1 Ом) после 10^3 циклов срабатываний (нагрузка не указана) было при покрытии из золота, а наибольшее (14 Ом) — при сплаве 30% Au—70% Ru. Сопротивление для золотого покрытия и сплава 95% Au—5% Ru оставалось стабильным вплоть до 10^7 циклов. Для материалов Ru и Pt оно резко возрастало соответственно после примерно $(2—8) \cdot 10^4$ и $(0,5—1) \cdot 10^6$ циклов. Постепенный рост сопротивления для покрытия из сплава 30% Au—70% Ru начался после 10^3 циклов.

Влияние пассивации кислородом контактных покрытий из материалов платиновой группы

Впервые пассивацию кислородом с целью стабилизации контактного сопротивления применили японцы при изготовлении герконов с родиевым покрытием. В дальнейшем ее успешно использовали и используют во всем мире (в том числе в России).

Исследования МЭМС выключателей [7] показали, что пассивация кислородом рутениевого покрытия (образование слоя RuO_2 толщиной 250 нм на поверхности рутения) хотя и увеличила в несколько раз начальное контактное сопротивление по сравнению с рутениевым покрытием (без добавок), но обеспечила стабильность сопротивления вплоть до 10^7 циклов, тогда как при упомянутом рутениевом покрытии сопротивление МЭМС выключателей начинало резко расти для различных образцов уже начиная примерно с 10^5 — 10^6 циклов.

Высокочастотные МЭМС выключатели

Известны разработки МЭМС выключателей, предназначенных для коммутации высокочастотных электрических сигналов (ВЧ МЭМС выключатели) [8, 9]. Так, например, разработаны такие выключатели для коммутации сигналов частотой до 4 ГГц (вносимые потери — <0,5 Дб, изоляция — 35 Дб) и даже до 75 ГГц (вносимые потери — <1,2 Дб, изоляция — 20 Дб) [9]. В настоящее время нет информации о других видах выключателей, которые обеспечивали бы коммутацию сигналов таких частот. Использование высокочастотных МЭМС выключателей перспективно для реконфигурации фильтров и фазорегуляторов, передачи большого объема информации и других целей.

Выводы

Появление в коммутационной технике МЭМС выключателей решает многие насущные задачи, в том числе задачи повышения быстродействия электромеханических коммутаторов и плотности компоновки матричных переключателей систем связи, задачи коммутации высокочастотных электрических сигналов частотой до десятков ГГц. Но для этого необходимо обеспечить стабильность параметров этих выключателей, в том числе контактного сопротивления при очень малой силе и стабильности контактного нажатия. Необходим также высокий процент выхода годных изделий. Из дискуссии с автором работы [8] выяснилось, что последний показатель пока находится на уровне 5—7%, что, скорее всего, определяется незначительными силами контактного нажатия. Следует также отметить, что малые растворы контактов в этих приборах снижают приложенное к контактам напряжение не только из-за уменьшения электрической прочности, но и из-за влияния электростатических сил на электромеханические характеристики.

1. *Robert Neal Dean, Antonio Luque.* Application of microelectromechanical systems in industrial processes and services // IEEE Transaction on Industrial Electronics. — 2009. — 56, No. 4. — P. 913—925.
2. *Vincent M., Chiesi L., Fourier J. C. et al.* Electrical contact reliability in magnetic MEMS-switch // Proc. of the 54th IEEE Holm conf. — Orlando, October 27—29, 2008. — P. 145—150.
3. *Countier C., Chiesi L., Garnier A. et al.* A new magnetically actuated switch for Precise position detection // Proc. of the 15th Internat. conf. (Transducers). — Denver, June 21—25, 2009. — P. 861—864.
4. *Gueissaz F., Piquet D.* The microreed, an ultra-small passive MEMS magnetic proximity sensor designed for portable applications // Proc. of the 14th IEEE Internat. conf. on Micro Electro Mechanical Systems. — Interlaken, 2001. — P. 269—273.
5. *Hiroyasu Torazawa, Naokuni Arima.* Reed switches developed using micro-machine technology // Oki Technical Rev. — 2005. — Issue 202. — 72, No. 2. — P. 76—79.
6. *Oberhammer J., Stemme G.* Passive contact force and opening force electrostatic switches for soft metal contact materials // Proc. of the 19th IEEE Internat. conf. on Micro Electro Mechanical Systems. — Istanbul, Turkey, January 22—26, 2006. — P. 162—165.
7. *McGruer N. E., Adams G. G., Chen L. et al.* Mechanical, thermal and material influence on ohmic-contact-type MEMS switch operation // Ibid. — P. 230—233.
8. *Варадан В., Виной К., Джозе К.* ВЧ МЭМС и их применение. — М.: Техносфера, 2004. — 528 с.
9. *Kurth S., Leidich S., Bertz A. et al.* Ohmic RF MEMS switches // Тез. докл. третьей Междунар. науч.-практич. конф. “Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе” / Под ред. С. М. Карбанова. — Рязань, 2011. — С. 23—24.