

УДК 621.315.55

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ ВЧ-МЭМС ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ**

**COMPARATIVE CHARACTERISTICS
FOR RF-MEMS SWITCHES**

Н. В. Конухов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

N. V. Konukhov

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В статье проведено сравнение характеристик ВЧ-МЭМС переключателей и переключателей на PIN-диодах и полевых транзисторах. Показаны основные конструктивные особенности и принципы работы ВЧ-МЭМС переключателей. Приведены требования к материалам контактной группы, а так же характеристики основных материалов, применяемых в ВЧ-МЭМС переключателях. Выполнен анализ используемых материалов для структурных и жертвенных слоев ВЧ-МЭМС переключателей. Представлены их комбинации и рекомендуемые для данных комбинаций травители для материала жертвенных слоев.

Ключевые слова: МЭМС, ВЧ-МЭМС, переключатели, нитрид титана, золото-рутений, диоксид кремния, нитрид титана, биметаллические контакты.

DOI: 10.25206/2310-4597-2021-1-18-22

I. ВВЕДЕНИЕ

В связи с ростом рабочих частот и мощностей сигналов в современных средствах связи и радиолокации применение классических переключательных СВЧ-компонентов, таких как МОП-транзисторы и PIN-диоды, становится проблематичным в силу ряда причин. Перспективным решением данной проблемы является применение МЭМС-переключателей, которые являются аналогами объемных механических переключателей, но изготовлены по микросистемной технологии. За последние годы их технология изготовления значительно усовершенствовалась. Теперь они имеют достаточную надежность, обеспечивают большое число переключений и становятся перспективными не только для коммерческих, но также и для ответственных применений.

В СВЧ электронной аппаратуре всегда необходимы переключатели, вносящие низкие потери в открытом состоянии, и обеспечивающие высокую изоляцию в закрытом состоянии, с высокой допустимой мощностью сигнала и низкой мощностью управления. Длительный период применения для этих целей электромагнитных реле выявил их основные недостатки, как ограниченный ресурс, большие габариты и высокая стоимость. Перспективным решением стало использование в СВЧ технике в качестве переключателей PIN-диодов и полевых транзисторов. Переключатели на PIN-диодах и полевых транзисторах на основе GaAs имеют ряд преимуществ перед высокочастотными реле, заключающихся в малом весе и габаритах, низкой мощности управления, а так же высокой скорости срабатывания. Однако PIN-диоды вносят в тракт более высокие потери и потому не могут полностью заменить электромеханические переключатели.

Дальнейшие исследования привели к разработке высокочастотных переключателей на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС), объединившие некоторые достоинства релейных и полупроводниковых устройств, см. табл. 1 [1]. МЭМС появились в 70-е годы прошлого столетия как датчики температуры, давления, акселерометры, газовые хроматографы и т.д. Изготавливают МЭМС методом локального вытравливания подложки и нанесением проводящих и диэлектрических материалов на образованные конструкции. Первые данные о МЭМС-переключателях, разработанных для СВЧ-приложений, относятся к началу 1990-х годов [2].

Для успешной реализации конструкций МЭМС-переключателей требуются знания в различных областях науки и технологии, таких как: физики, теоретической механики, электродинамики, материаловедения и микроэлектронных технологий.

ТАБЛИЦА 1
ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Параметры	МЭМС-переключатель	PIN-диод	Полевой транзистор
Статическое напряжение управления, В	5-80	3-5	3-5
Статический ток управления, мА	0	3-20	0
Динамическая мощность управления, мВт	0,05-0,1	5-100	0,05-0,1
Время переключения, нс	1000-300000	1-100	1-100
Емкость, фФ	1-6	40-80	70-140
Сопротивление, Ом	0,3-2	2-4	4-6
Отношение емкостей вкл./выкл.	20-100	10	-
Предельная частота, ТГц	20-80	1-4	0,5-2
Изоляция на частоте 1-10ГГц	Очень высокая	Высокая	Средняя
Изоляция на частоте 10-40ГГц	Очень высокая	Средняя	Низкая
Изоляция на частоте 160-100ГГц	Высокая	Средняя	Низкая

Важной составляющей данного процесса является правильный выбор материалов для всех элементов составляющих МЭМС-переключателя. В связи с этим целью данной работы является обзор материалов, используемых в конструкциях МЭМС-переключателей.

II. КОНСТРУКЦИЯ ВЧ-МЭМС ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

МЭМС-переключатель служит для замыкания или размыкания электрической цепи и имеет, как правило, два фиксированных положения подвижной части. Эти переключатели выполняются по микросистемной технологии. Их подвижная часть называется актюатор и выполняется в виде закрепленного с одной стороны кантилевера (рис. 1а) или закрепленной по краям мембраны (рис. 1б). Чаще всего для управления актюатором используется электростатический (емкостной) привод, однако он может быть также пьезоэлектрическим, электромагнитным или термоэлектрическим [3].

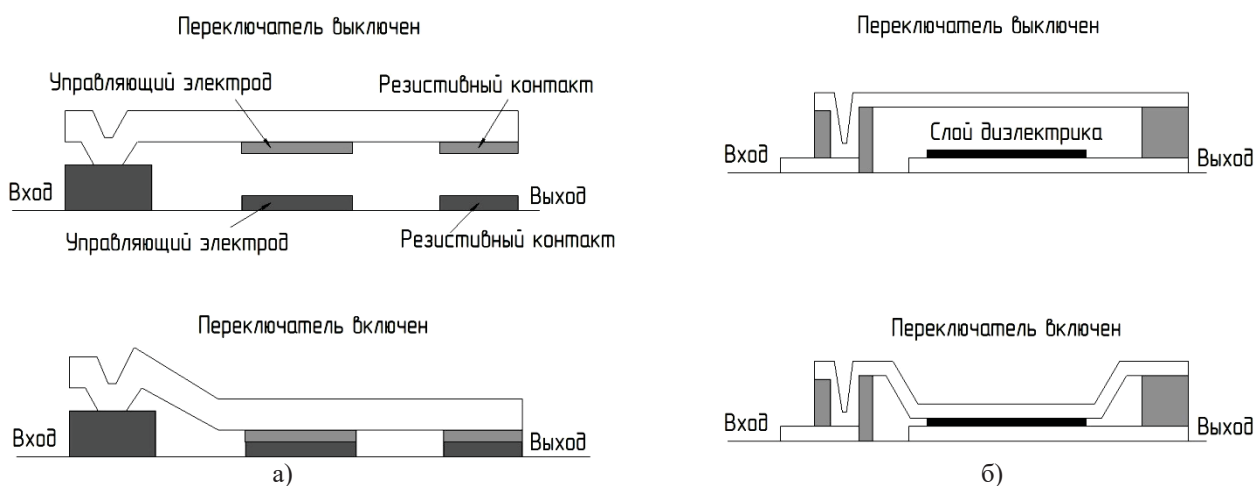


Рис. 1. МЭМС-переключатели:
а) кантилевер с резистивным контактом; б) мембрана с емкостным контактом

Металлический кантилевер находится над коммутируемыми и управляющим электродами, выполненными из металла. На свободном конце кантилевера находится контактный выступ. После подачи напряжения между кантилевером и управляющим электродом, кантилевер притягивается за счет электростатических сил, замыкая коммутируемые электроды. При отключении напряжения кантилевер возвращается в исходное положение. На актюатор с пьезоэлектрическим приводом наносятся управляющие электроды, разделенные слоем пьезоэлектрика. После подачи на них управляющего напряжения происходит изгиб актюатора и срабатывание переключателя. Эти приводы потребляют электрическую мощность только в момент срабатывания. Контакты МЭМС-переключателей бывают двух типов резистивные «металл–металл» и емкостные «металл–диэлектрик–металл».

Для формирования конструкции МЭМС переключателей используются два основных способа: объёмная и поверхностная технология. Объёмная технология подразумевает выборочное удаление кремния для формирования в подложке канавок, мембран, балок, отверстий и других подобных структур. Поверхностная технология формирует конструкцию путем осаждения и последующего травления жертвенных и структурных слоев на поверхности кремния. Данный способ отлично сочетается с базовыми технологическими процессами микроэлектроники, при этом в основном используются те же материалы, что и при изготовлении интегральных схем [4].

III. МАТЕРИАЛЫ ВЧ-МЭМС ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

МЭМС-технология может быть реализована с использованием целого ряда различных материалов и технологий производства, выбор которых будет зависеть от создаваемого устройства и сектора, в котором он должен работать. В процессе разработки микросистем, выделяют две группы материалов:

- материалы структурных слоёв, используемых для формирования несущих конструкций и токопроводки.

- материалы жертвенных слоёв, которые используются для формирования объёмных полостей между структурным слоем и подложкой.

Работа МЭМС переключателей осуществляется за счет упругих сил, возникающих в актюаторе. Включение или отключение из электрической цепи осуществляется путем замыкания проводников. Работу подобного МЭМС переключателя можно сравнить с микрореле, где подвижный элемент – это пластинчатая пружина изгиба, а замыкающий контакт является разрывным контактом [5].

К пружинным изгибным элементам предъявляются следующие требования [6]:

- высокий предел упругости;
- высокий предел усталости;
- высокая релаксационная стойкость;
- наличие минимальной вязкости и прочности.

Данные требования, хорошо характеризуют такие параметры, как плотность, модуль Юнга и предел прочности. В таблице 2 и 3 приведены данные характеристики для неорганических материалов и полимеров [7].

ТАБЛИЦА 2
СВОЙСТВА НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Материал	Плотность, ρ (кг / м ³)	Модуль Юнга, E (ГПа)	Предел прочности, σ_f (МПа)	Источник данных
Кремний	2000	160	4000	[7]
Диоксид кремния	2000	73	1000	[7]
Нитрид кремния	3000	323	1000	[7]
Карбид кремния	3000	450	2000	[7]
Арсенид галлия	5320	85.5	Н/Д	[7]
Алмаз	3510	1035	1000	[8]
Кварц	3000	107	1700	[7]

ТАБЛИЦА 3
СВОЙСТВА ПОЛИМЕРОВ

Материал	Плотность, ρ (кг / м ³)	Модуль Юнга, E (ГПа)	Предел прочности, σ_f (МПа)	Источник данных
Полиимиды	1000	8	40	[7]
Поливинилиденфторид	2000	2	50	[7]
Органическое стекло	1000	2	80	[7]

Разрывные контакты используются для частых коммутаций электрических цепей – замыкания, размыкания, переключения. В зависимости от значения коммутируемого тока, меняются нагрузки на разрывные контакты. Они подвергаются трем основным видам износа: эрозии, коррозии, свариванию. Помимо внешних условий на работу и износ контактов влияют и свойства материала. Одним из основных материалов для формирования проводников служит золото, данный материал обладает следующими характеристиками [7] :

- низкое электрическое сопротивление;
- высокая теплопроводность;

- хорошая технологичность, возможность напыления пленок различными методами;
- высокая степень сопротивления окислению;
- устойчивость к абсорбции.

Однако из-за своей пластичности золото обычно имеет гораздо большие силы сцепления между соприкасающимися контактами. Кроме того, контакты, выполненные из золота, не долговечны относительно твердых металлов. Они имеют примерно 10 миллионов циклов срабатывания против 100 миллионов для контактов из материалов более твердой «платиновой группы» [8].

Из-за указанных недостатков чистого золота в последнее время в качестве контактного материала в МЭМС переключателей используют сплавы на его основе. Сплав золото-рутений совмещает в себе лучшие свойства двух материалов. Обладающий высокой твердостью рутений обеспечивает высокую надежность контактной поверхности, а золото - общее низкое контактное сопротивление. Данный сплав увеличивает срок службы контактов в десятки раз по сравнению с контактами из чистого золота. Сплав золото-палладий несколько уступает сплаву золото-рутений. Однако по предварительным данным испытания надежности контактов их этого сплава показывают увеличение числа переключений в 3 раза относительно контактов, изготовленных из золота. Значения контактного сопротивления при этом изменяются примерно от 0.2-1.8 раза [9].

Для контактов, используемых в особых целях, применяют металлы, сплавы и керамику с особыми свойствами. Например, нитрид титана (TiN) является устойчивым к биокоррозии и идеален для биочипов, контактирующих со средами организма. Он характеризуется следующими свойствами:

- низкое удельное электрическое сопротивление;
- высокая химическая инертность;
- высокая температура плавления.

В таблице 4 указаны металлы и сплавы, с основными характеристиками, которые позволяют выбирать материал под необходимые задачи [10].

ТАБЛИЦА 4
СВОЙСТВА КОНТАКТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МЭМС-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Материал	Плотность, ρ (кг / м ³)	Модуль Юнга, E (ГПа)	Предел прочности, σ_f (МПа)	Источник данных
Золото	19,300	70	300	[6]
Никель	8902	193	500	[6]
Алюминий	2700	70	300	[6]
Медь	8960	117	Н/Д	[6]
Платина	21,450	168	Н/Д	[6]
Титан	4506	116	Н/Д	[6]
Серебро	10,490	83	Н/Д	[6]
Палладий	12,023	121	Н/Д	[6]

При выборе материалов структурных слоев МЭМС-переключателей необходимо учитывать, его совместимость с материалами жертвенных слоев. Важно, чтобы структурный слой не был поврежден в процессе травления жертвенного слоя. Основные возможные комбинации жертвенных и структурных слоев приведены в таблице 5 [11].

ТАБЛИЦА 5
ВОЗМОЖНЫЕ КОМБИНАЦИИ МАТЕРИАЛОВ СТРУКТУРНЫХ И ЖЕРТВЕННЫХ СЛОЕВ
В МЭМС- ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯХ

Материал жертвенного слоя	Материал структурного слоя	Травитель жертвенного слоя
Poly-Si	SiC, SiN	TMAN, KON
Poly-Si	Oxide	TMAN
Polyimide	Al, SiC, SiN, Ti	Травление в плазме кислорода
Oxide	SiC, SiN, Poly-Si, TiN	HF
Oxide	Ti, Al	73% HF
Cu	Ni	H ₂ O ₂ :HAC:H ₂ O
Al	Ni	H ₃ PO ₄ :HAC:HNO ₃
Ni	Cu	HNO ₃
Cu, Ni, Al	Au	HNO ₃

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные данные по используемым в ВЧ-МЭМС материалам и их характеристикам позволяют оценить характеристики данных материалов и сделать оптимальный выбор материалов переключателя при его проектировании. Сравнение характеристик материалов показывает, что среди них нет материала, который обладает неоспоримыми преимуществами. В каждом конкретном случае необходимо на основе представленных данных решать вопрос о выборе материала. При выборе комбинаций материалов структурных и жертвенных слоев необходимо также учитывать особенности контактного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sugesh M. S, Nataraj B. Design and Modeling of RF MEMS Phase Shifters Using Various Structures of Coplanar Waveguides // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2015. Vol. 2, Is. 3. 47 p.
2. Gabriel M. Rebeiz, Chirag D. Patel, Sung K. Han, Chih-Hsiang Ko, Kevin M. Ho. J. The Search for a Reliable MEMS Switch? // IEEE Microwave Magazine. 2013. Vol. 14, Is. 1. 126 p.
3. Белоусов А. К., Савченко В. С. Электрические разъемные контакты в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Энергия, 1975. 315 с.
4. Arshak A., Arshak, K., Lyons G., Waldron D., Morris D., Korostynska O., Jafer E. Review of the potential of a wireless MEMS microsystem for biomedical applications // Sensor Review. 2005. Vol. 25, no. 4. P. 277–286.
5. Zhang Q., Cicek P. V., Nabki F., El-Gamal M. Thin-film encapsulation technology for above-IC MEMS wafer-level packaging // Electronic Components & Technology Conference. 2014. P. 23–33.
6. Bansal D., Kumar A., Sharma A., Kumar P., Ranga K. Design of novel compact antistiction and low insertion loss RF MEMS switch // Microsyst. Technol. 2014. Vol. 20 (2). P. 337–340.
7. Yazdani M., Payam A. F. A comparative study on material selection of microelectromechanical systems electrostatic actuators using Ashby // VIKOR and TOPSIS. Mater Des. 2015. Vol. 65. P. 328–334.
8. Ермолин Н. А., Жерихин И. П. Надежность электрических машин. Л.: Энергия, 1976. 248 с.
9. Chaudhury A., Pantazis A., Chronis N. An image contrast-based pressure sensor // Sens Actuators A. 2016. Vol. 245. P. 63–67.
10. Ando T., Shikida M., Sato K. Tensile-mode fatigue testing of silicon films as structural materials for MEMS // Sensors Actuators A Phys. 2001. Vol. 93 (1). P. 70–75. DOI:10.1016/S0924-4247(01)00623-9.
11. Jiang L, Cheung R (2009) A review of silicon carbide development in MEMS applications // Int J Comput Mater Sci Surf Eng. 2009. Vol. 2. P. 227–242.

УДК 546.26+547.58 +539.26

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ СОРБЕНТОВ
МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

**INVESTIGATION OF THE SURFACE OF MODIFIED CARBON SORBENTS
BY X-RAY PHOTOELECTRON SPECTROSCOPY**

Н. В. Корниенко¹, Д. Н. Огурцова¹, Н. Н. Леонтьева¹, С. Н. Несов^{2,3}

¹Центр новых химических технологий ИК СО РАН, Институт катализа СО РАН, г. Омск, Россия

²Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

³Омский научный центр СО РАН, г. Омск, Россия

N. V. Kornienko¹, D. N. Ogurtsova¹, N. N. Leont'eva¹, S. N. Nesov^{2,3}

Center of New Chemical Technologies BIC, Boreskov Institute of Catalysis BIC, Omsk, Russia

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Omsk Scientific Center SB RAS, Omsk, Russia

Аннотация. Получены образцы углеродных сорбентов, модифицированных 3-фенилпропановой кислотой и глутаминовой кислотой с глицином. Исследована возможность десорбция модификаторов в условиях, моделирующих различные биологические среды (физиологический раствор, растворы моде-