## УДК 621.318.5:681.3

# И.А. Афиногенов, И.А. Зельцер, Е.Б. Трунин

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТНО-ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И РЕСУРС РАБОТЫ МЭМС-КОММУТАТОРОВ

Методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, атомно-силовой, растровой электронной и оптической микроскопии исследованы элементно-химический состав и морфология поверхности контактных покрытий МЭМС-коммутаторов. Рассмотрено влияние различных типов примесей и приведены количественные характеристики их содержания на поверхности. Показано, что примеси меди и алюминия, выступы, поры на поверхности контактов приводят к повышению электрического сопротивления и понижению ресурса прибора.

Установлено, что элементно-химический состав и морфология поверхности определяют величину и стабильность электрического сопротивления и, как следствие, коммутационные возможности и работоспособность МЭМС-коммутатора.

микроэлектромеханическая система (МЭМС), коммутатор, элементно-химический состав, морфология, контактное покрытие, электрическое сопротивление, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), атомно-силовая микроскопия (АСМ), растровая электронная микроскопия (РЭМ), поверхностные загрязнения.

## Введение

Элементно-химический состав и морфология поверхности контактных покрытий МЭМС-коммутатора определяют величину и стабильность его важнейшего параметра – электрического сопротивления и, как следствие, коммутационные возможности и работоспособность всего прибора в целом.

На поверхности МЭМС, в том числе на контактных поверхностях, могут быть загрязнения, которые препятствуют достижению требуемых параметров (электросопротивление, количество срабатываний до отказа).

На примере работ [3; 5–8], посвященных исследованию влияния состава и морфологии поверхности на электрическое сопротивление и коммутационные характеристики герконов, показано, насколько важно учитывать это влияние при изготовлении, эксплуатации и разработке приборов. МЭМС-коммутаторы, в отличие от герконов, являются не милли-, а микроэлектромеханическими системами. Из-за микрометрических размеров их контактных площадок проведение подобного рода исследований для МЭМС еще более актуально, чем для герконов.

С учетом вышеизложенного целью данной работы является исследование влияния элементно-химического состава и морфологии поверхности контактных покрытий на коммутационные возможности и работоспособность МЭМС-коммутаторов.

<sup>©</sup> Афиногенов И.А., Зельцер И.А., Трунин Е.Б., 2014

## 1. Образцы и методика эксперимента

Объектами исследований являлись образцы электростатических МЭМС-коммутаторов (в дальнейшем по тексту – МЭМС) изготовленные ОАО «СКТБ РТ» (Великий Новгород).

Прибор в сборе (без герметичного корпуса) и элементы его конструкции изображены на рисунках 1, 2.

Структура МЭМС изготавливается на подложке  $Al_2O_3$  односторонней полировки. Термовакуумным напылением золота формируется сигнальная линия и управляющие элементы. Подвижная механическая структура, выполненная из двух слоев золота (последовательное термовакуумное и гальваническое осаждение), формирует консоль электростатического актюатора. Зазор в контактной системе обеспечивается жертвенным слоем толщиной от 3 до 5 *мкм* (в зависимости от варианта конструкции). На контактную систему химическим методом осажден тонкий слой родия для обеспечения износостойкости поверхностей контактов. Более подробное описание конструкции и технологии изготовления этих МЭМС можно найти, например, в работе [1].



Рис. 1. РЭМ-изображение электростатического МЭМС-коммутатора:

а – прибор в сборе (без герметичного корпуса); б – подвижная контакт-деталь (крышка);
в – подвижная (которую специально отогнули для проведения анализа) (1) и неподвижная (2) контакт-деталь; г – контактная площадка на неподвижной контакт-детали (2)



а

b



Рис. 2. ОМ-изображение конструкции и деталей МЭМС:

а – МЭМС без подвижной контакт-детали; b, c – изображения МЭМС без подвижной контакт-детали, полученные с различным увеличением; d – контактная площадка

Было проанализировано 7 образцов МЭМС, параметры которых представлены в таблице 1, где:  $R_{nau}$  – сопротивление цепи контактов до наработки;  $R_{коn}$  – сопротивление цепи контактов после наработки; n – количество циклов; I – ток через контакты; U – коммутируемое напряжение; f – частота коммутации. Обозначения образцов МЭМС 3–1 (3 – номер образца, 1 – номер контактной площадки).

Таблица 1

Номер МЭМС	Кнач., Ом	I, мА	U, B	f <sub>1</sub> , Гц	п1, шт.	f2, Гц	п2, шт.	<i>Rкон.&gt;,</i> Ом
3	1,4	-	-	-	-	-	-	-
4	1,5	100	3	500	58 000	-	-	40
5	1,5	100	3	100	12 000	-	-	40
6	1,5	50	3	500	250 000	_	-	40

Параметры МЭМС

7	1,5	2	3	500	300 000	-	-	40
9	5	2	3	500	1 000000	1 000	2 800000	40
10	0,15	2	3	500	1 000000	1 000	2 800000	= 0,5

Состояние поверхности контактов исследовалось методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и атомно-силовой (АСМ), растровой электронной (РЭМ) и оптической микроскопии (ОМ). Результаты сопоставлялись с характеристиками приборов.

Проводился сравнительный анализ образцов МЭМС 4–7, 9, забракованных в результате коммутационных испытаний по электрическому сопротивлению ( $R_{cm} > N$ , статическое сопротивление больше нормы) и образца МЭМС 10, прошедшего тест по электрическому сопротивлению ( $R_{cm} \le N$ ) в этих испытаниях.

Анализ топографии поверхности контактов МЭМС осуществлялся на воздухе с помощью атомно-силового микроскопа (зондовой нанолаборатории (ЗНЛ) NTEGRA производства компании NT-MDT, Зеленоград, Москва, Россия). Применялись Si-кантилеверы марки NSG10/W<sub>2</sub>C с твердым токопроводящим покрытием W<sub>2</sub>C толщиной 30 *нм*. Измерения проводились в контактном режиме.

Для электронно-микроскопических и оптических исследований рабочих поверхностей контактов и других элементов конструкции МЭМС использовались растровый электронный микроскоп JEOL JSM-6610LV и металлографический микроскоп MMP-4 с компьютерной системой визуализации изображений.

Анализ элементного и химического состава поверхности контактов осуществлялся на сканирующем рентгеновском фотоэлектронном микрозонде PHI Quantera SMX (производство Physical Electronics, Inc., США-Япония).

Все измерения проводились в вакууме  $1 \times 10^{-8}$  Па для устранения эффектов электронно-стимулированной адсорбции молекул остаточных газов на исследуемых поверхностях.

Ионная очистка не проводилась. Излучение – Al K<sub> $\lambda$ </sub>, немонохроматизированное. Энергия пропускания – 160 э*B*. Мощность рентгеновского источника – 375 *Bm*. Калибровка по C1s – 284,8 э*B*.

## 2. Результаты экспериментов

#### 2.1. Атомно-силовая микроскопия

Были исследованы контактные площадки МЭМС 3–7, 9, 10. Наиболее характерные изображения и профилограммы поверхностей этих площадок представлены на рисунках 3–6. В таблице 2 даны статистические параметры типичного участка поверхности МЭМС 3–7, 9.

## ФИЗИКА. МАТЕМАТИКА



а



b





d



*Рис. 3.* АСМ-изображения 3-й контактной площадки МЭМС 4: а – 3Д изображение; b – 2Д изображение с линией 122; с – профилограмма вдоль линии 122; d – 3Д изображения участка поверхности; е – 2Д изображение участка поверхности с линией 153; f – профилограмма вдоль линии 153









d



Рис. 4. АСМ-изображения 2-й контактной площадки МЭМС 6: а – 3Д изображения; b – 2Д изображение с линией 106; с – профилограмма вдоль линии 106; d – 3Д изображения участка поверхности; t – 2Д изображение участка поверхности с линией 80; f – профилограмма вдоль линии 80



a



b





d



*Рис. 5.* АСМ-изображения 2-й контактной площадки МЭМС 9: а – 3Д изображения; b – 2Д изображение с линией 89; с – профилограмма вдоль линии 89; d – 3Д изображения участка поверхности; е – 2Д изображение участка поверхности с линией 204; f – профилограмма вдоль линии 204







b



*Рис. 6.* АСМ-изображения 2-й контактной площадки МЭМС 10: а – 3Д изображения; b – 2Д изображение с линией 118; с – профилограмма вдоль линии 118

Статистические характеристики типичного участка поверхности представлены в таблице 2.

Таблица 2

Наименование параметра	Значение, нм
Max	220,585
Min	0
Peak-to-peak, Sy	220,585
Ten point height, Sz	110,413
Average	110,441
Average Roughness, Sa	26,0704

Статистические параметры типичного участка поверхности МЭМС 3–7, 9

При рассмотрении изображений контактных площадок и профилограмм образцов МЭМС 3–7, 9, 10 (рис. 2–6) и статистических параметров (табл. 2) можно сделать некоторые выводы.

Во-первых, контактные площадки МЭМС 3–7, 9, не прошедших коммутационные испытания, имеют чашеобразную форму. Диаметр «чаши» приблизительно 22 *мкм*, глубина приблизительно – 0,8 *мкм*. При замыкании с контактами подвижной контакт-детали только небольшая группа выступов, расположенных по краю «чаши» (по диаметральной окружности), участвует в токопрохождении, образуя контактные пятна.

Фактическая площадь контактирования МЭМС 10, имеющего относительно плоские контактные площадки, значительно выше, а  $R_{nav}$  соответственно меньше по сравнению МЭМС 3–7, 9. Увеличение плоскостности привело к росту порога срабатывания, повышению стабильности электросопротивления при коммутации МЭМС 10 (табл. 1).

Поэтому проблема плоскостности контактов является одной из основных факторов, препятствующих повышению технических характеристик прибора.

Во-вторых, видно, что зерна гальванопокрытия имеют латеральный размер приблизительно 500 *нм* и высоту 70–170 *нм*.

В-третьих, важно отметить, что практически на всех гальванопокрытиях контактных площадок имеются дефекты, которые условно можно разделить на два вида – «выступы» и «впадины». Характерные «выступы» были обнаружены на поверхности контактных площадок МЭМС 4–1 и МЭМС 4–3, МЭМС 6–2 и МЭМС 6–3, а «впадины» на контактах МЭМС 7–1 и МЭМС 9.

### 2.2. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

Методом РФЭС были исследованы образцы МЭМС 3-7, 9, 10.

На рисунках 7–11 приведены результаты РФЭС-анализа образца МЭМС 3, не прошедшего коммутационные испытания на безотказность.

На рисунке 7 приведено изображение поверхности образца в фотоэлектронах линии Au4f. На этом же рисунке показаны точки, в которых были получены обзорные фотоэлектронные спектры поверхности. Для точки P5 область анализа составляла 110 *мкм*, а для точек P1, P2 и P3 – 27 *мкм*.

Таким образом, при анализе в точке Р5 в область анализа попадали также и Rh контакты.

На рисунке 8 показано комбинированное изображение поверхности образца в фотоэлектронах линий Au4f и Rh3d. На данном изображении хорошо видно положение контактов, содержащих Rh.

На рисунке 9 приведен обзорный фотоэлектронный спектр, полученный в точке P5. В спектре наблюдаются сильные линии золота, кислорода, алюминия и углерода. Линия алюминия и частично линия кислорода обусловлены сигналом от подложки (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Кроме того, в спектре видна слабая линия родия. Что касается рутения, то его основная линия Ru3d накладывается на сильную линию углерода C1s, что не позволяет уверенно говорить о присутствии рутения, хотя при энергии связи около 460 э*B*, наблюдается линия, которая может быть отнесена к линии рутения Ru3p<sub>3/2</sub>. Наблюдаемые линии олова и йода связаны с небольшим загрязнением камеры спектрометра соединением S<sub>n</sub>I<sub>4</sub> и к поверхности образца отношения не имеют.

Помимо указанных выше элементов, в спектре наблюдаются линии меди, хрома, азота и, вероятно, никеля. Линий натрия и хлора в спектре не наблюдается. Линия, наблюдаемая при энергии связи около 684 эВ, может быть линией фтора F1s. Однако, поскольку линия наблюдается слабой и накладывается на структуру от линий других элементов, уверенно утверждать о присутствии фтора не представляется возможным. Следует также иметь в виду, что поскольку спектры получались с использованием немонохроматического излучения, то при меньших энергиях связи (на  $8-10 \ 3B$ ) от сильных фотоэлектронных линий (C1s, O1s) в спектре наблюдаются рентгеновские сателлиты.

На рисунке 10 приведены обзорные фотоэлектронные спектры образца для точек Р1, Р2 и Р3. Поскольку эти спектры получены для меньшей области анализа, то они наблюдаются более шумными, чем спектр для точки Р5. В то же время в данных спектрах наблюдается более сильный сигнал от линий родия, так как относительный вклад от площади родий-содержащего контакта в область анализа в данном случае больше, чем для точки Р5. В целом в данных спектрах, помимо линий кислорода, углерода, золота, алюминия и родия, видны линии меди и хрома, а также, вероятно, линия никеля.

Медь, по всей видимости, распределена по поверхности образца достаточно равномерно, о чем свидетельствует изображение поверхности образца в фотоэлектронах линии Cu2p (рис. 11), а также то, что относительная интенсивность линии Cu2p электронов практически одинаковая во всех обзорных спектрах.



*Рис.* 7. Изображение поверхности образца в фотоэлектронах линии Au4f. Показаны точки, в которых были получены обзорные спектры







Рис. 9. Обзорный РФЭС спектр исследованного образца в точке Р5. Область анализа – 110 мкм



*Рис. 10.* Обзорный РФЭС спектр исследованного образца в точках Р1, Р2 и Р3. Область анализа – 27 *мкм* 



Рис. 11. Изображение поверхности образца в фотоэлектронах линии Cu2p

### 3. Обсуждение

Теперь рассмотрим природу примесей, спектры которых приведены на рисунках 9, 10.

Линии примесей С, О, Al, Си демонстрируют повышенную интенсивность вблизи поверхности, что свидетельствует об их локализации на глубине до 10 *нм*.

Углерод – распространенное поверхностное загрязнение. В нашем случае источником углерода могут быть растворители, которые использовались для очистки и обезжиривания и различные органические соединения, адсорбирующиеся на поверхность деталей из воздуха. При коммутации происходит их механоэлектростимулированная полимеризация с образованием непроводящих полимерных пленок.

Кислород входит в состав окислов алюминия и меди, существующих на поверхности контактов.

Наиболее вероятными источниками окислов меди и алюминия являются соответственно жертвенный слой и подложка. Это могут быть, например, микрочастицы материала подложки (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), образующиеся при ее резке и других механических воздействиях, приводящих к образованию микросколов и микрокрошки. Эти окислы затрудняют токопрохождение, повышают сопротивление, понижают ресурс и стабильность MЭMC, так как являются диэлектриками.

У МЭМС, прошедших тест по электрическому сопротивлению при коммутационных испытаниях на безотказность, окислов меди и алюминия на поверхности контактных площадок, согласно РФЭС исследованиям, не обнаружено и поэтому их электрическое сопротивление на порядок меньше, чем у приборов, которые этот тест не прошли, и составляет примерно 0,5 *Ом*.

Посторонние частицы, в том числе окислы алюминия и меди, могут находиться в электролитах золочения и родирования во взвешенном состоянии.

Дисперсные (взвешенные в растворе электролита) микрочастицы являются, как было показано в работах [2; 4], одной из основных причин возникновения пор, приводящих к росту электрического сопротивления милли- и микроэлектромеханических систем, причем концентрация поверхностных дефектов напрямую зависит от соотношения толщины покрытия, диаметра частиц и их распределения по размерам. С уменьшением толщины покрытия все более мелкие частицы становятся критическими для структурной целостности пленки, вследствие чего происходит рост плотности поверхностных дефектов, адсорбирующей способности поверхности и соответственно электрического сопротивления контакта.

Таким образом, с высокой долей вероятности можно утверждать, что наличие загрязнений на поверхности контактов, в первую очередь окислов алюминия и меди, негативно сказывается абсолютно на все характеристики прибора.

Как показали проведенные исследования, на элементно-химический состав и морфологию поверхности электростатических МЭМС-коммутаторов особое влияние оказывают посторонние частицы (ПЧ).

Классификация ПЧ по источникам их возникновения для герконов дана в работе [3]. Ее авторы указывают на четыре источника ПЧ. Данный подход [3] к анализу источников ПЧ применим для электростатических МЭМС-коммутаторов. Источники ПЧ как жидкие и газообразные технологические среды используются на различных стадиях производства МЭМС. Они содержат посторонние микрочастицы (ПЧ-1), которые, попадая между контактами МЭМС, негативно сказываются на его работоспособности.

Наличие микрочастиц (ПЧ-1) в электролитах золочения, родирования или рутенирования является также одной из основных причин пористости контактных покрытий. Поры в свою очередь не просто уменьшают (до десяти и более процентов) область контактирования, но и являются причиной коррозии, приводящей к образованию на поверхности контактов микрочастиц и паразитных покрытий (ПЧ-2), повышающих переходное сопротивление. На различных стадиях процесса изготовления МЭМС могут наблюдаться гальваническая, газовая или электролитическая коррозии. Непременным условием возникновения электролитической коррозии является наличие пленки воды, которая может быть очень тонкой (несколько монослоев), но адсорбированной по всей площади поры.

Кроме этого, на поверхность МЭМС могут попадать микрочастицы материала подложки ( $Al_2O_3$ ), образующиеся при ее резке, а также в результате других технологических операций, связанных с механическими воздействиями на детали МЭМС (ПЧ-3).

Особый интерес представляют микрочастицы и паразитные покрытия (ПЧ-4), синтезируемые на поверхности контакт-деталей в результате физикохимических процессов, происходящих при нанесении покрытий, удалении жертвенного слоя, некачественной промывки, а также в условиях коммутации электрических сигналов. Так, например, на родиевом покрытии, если оно предварительно не было специально пассивировано, могут быть синтезированы при коммутации из адсорбированных на его поверхности паров масла полимерные диэлектрические пленки.

#### Заключение

Таким образом, чтобы МЭМС имели низкое и стабильное электрическое сопротивление, высокий ресурс работы, прежде всего необходимо решить проблему полного удаления жертвенного слоя и минимизировать влияние различного рода посторонних частиц, для чего обеспечить постоянный мониторинг технологических процессов и сред. Кроме этого, для увеличения площади фактического контакта необходимо повысить плоскостность контактных площадок и уменьшить количество выступов и пор на них, затрудняющих токопрохождение.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афиногенов, И.А. Коммутационная техника на основе технологий МСТ [Текст] / И.А. Афиногенов, А.В. Конькин, А.В. Орлов, А.В. Кустова // Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе (Reed Switches and Products on Basis Thereof) : сб. тр. 3-й Междунар. науч.-практ. конф., 27–30 сентября 2011 г. (Proceedings of the 3rd International Science and Practical Conference, 27–30 Sept. 2011) / под ред. С.М. Карабанова ; ОАО «РЗМКП». – Рязань, 2011. – С. 126–131.

2. Афиногенов, И.А. Исследование факторов, определяющих элементно-химический состав и морфологические особенности контактных покрытий МЭМС-коммутаторов [Текст] / И.А. Афиногенов, И.А. Зельцер, Е.Б. Трунин // Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. – 2014. – № 3/44. – С. 114–139.

3. Зельцер, И.А. Технологические артефакты на стадии герметизации магнитоуправляемых контактов [Текст] / И.А. Зельцер, Р.А. Некрасов // Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе (Reed Switches and Products on Basis Thereof) : сб. тр. 1-й Междунар. науч.-практ. конф., октября 2005 г. (Proceedings of the 1st International Science and Practical Conference, 11–14 Oct. 2005 / под ред. С.М. Карабанова. – Рязань : Поверенный, 2006. – С. 56–65.

4. Зельцер, И.А. Влияние технологической среды на пористость электролитических покрытий герконов [Текст] / И.А. Зельцер, Е.Б. Трунин, Е.Н. Моос // Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе (Reed Switches and Products on Basis Thereof) : сб. тр. 1-й Междунар. науч.-практ. конф., 11–14 октября 2005 г. (Proceedings of the 1st International Science and Practical Conference, 11–14 Осt. 2005 / под ред. С.М. Карабанова. – Рязань : Поверенный, 2006. – С. 56–65.

5. Карабанов, С.М. Магнитоуправляемые герметизированные контакты (герконы) и изделия на их основе [Текст] / С.М. Карабанов, Р.М. Майзельс, В.Н. Шоффа. – М. : Интеллект, 2011. – 408 с.

6. Arushanov, K.A. New technology of ion-plasma modification of the contact surfaces of reed switches in oscillatory discharge [Text] / I.A. Zeltser, S.M. Karabanov, R.M. Maizels, E.N. Moos // Journal of Physics : Conference Series. – 2012. – Vol. 345. – N 01-2003. – P. 1–28.

7. Arushanov, K.A. Ion-Induced Surface Modification of Magnetically Operated Contacts [Text] / K.A. Arushanov, I.A. Zeltser, S.M. Karabanov, R.M. Maizels, E.N. Moos, A. Tolstoguzov // Coatings. – 2012. – N 2. – P. 8–44.

8. Karabanov, S.M. Creation of Principally New Generation of Switching Technique Elements (Reed Switches) with Nanostructured Contact Surfaces [Text] / S.M. Karabanov, I.A. Zeltser, R.M. Maizels, E.N. Moos, K.A. Arushanov // Journal of Physics : Conference Series. – 2011. – Vol. 291. – N 01-2020. – P. 1–17.

#### REFERENCES

1. Afinogenov, I.A. Kommutatsionnaya tekhnika na osnove tekhnologiy MST [Switching equipment based on MST technology] [Text] / I.A. Afinogenov, A.V. Kon'kin, A.V. Orlov, A.V. Kustova // Magnitoupravlyayemyye kontakty (gerkony) I izdeliya na ikh osnove – Reed Switches and Products on Basis Thereof : sb. tr. 3-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii – Proceedings of the 3rd International Science and Practical Conference, 27–30 Sept. 2011 / ed. by S.M. Karabanova ; JSC «RZMKP». – Ryazan, 2011. – P. 126–131.

2. Afinogenov, I.A. Issledovaniye faktorov, opredelyayuschikh elementno-khimicheskiy sostav I morfologicheskiye osobennosti kontaktnykh pokrytiy MEMS-kommutatorov [Research of the factors, which determine the element-chemical structure and morphological characteristics the contact surfaces of MEMS switches] [Text] / I.A. Afinogenov, I.A. Zeltser, YE.B. Trunin // Vest-nik Ryazanskogo gosudarstvennogo universiteta imeni S.A. Yesenina. – Bulletin of the Ryazan State University named after S.A. Yessenin. – 2014. – N 3/44. – pp. 114–139.

3. Zeltser, I.A. Tekhnologicheskiye artefakty na stadia germetizatsii magnitoupravlyayemykh kontaktov [Technological artefacts in the sealing step of reed switches] [Text] / I.A. Zeltser, R.A. Nekrasov // Magnitoupravlyayemyye kontakty (gerkony) I izdeliya na ikh osnove – Reed Switches and Products on Basis Thereof : sb. tr. 1-y Mezhdunarodnoy nauchnoprakticheskoy konferentsii – Proceedings of the 1st International Science and Practical Conference, 11–14 Oct. 2005 / ed. by S.M. Karabanova. – Ryazan : Poverennyy, 2006. – P. 56–65.

4. Zeltser, I.A. Vliyaniye tekhnologicheskoy sredy na poristosť elektroliticheskikh pokrytiy gerkonov [The influence of technological medium on the porosity of electrolytic coating of reed switches] [Text] / I.A. Zeltser, Ye.B. Trunin, Ye.N. Moos // Magnitoupravlyaye-myye kontakty (gerkony) I izdeliya na ikh osnove – Reed Switches and Products on Basis Thereof : sb. tr. 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii – Proceedings of the 1st International Science and Practical Conference, 11–14 Oct. 2005 / ed. by S.M. Karabanova. – Ryazan : Poverennyy, 2006. – P. 56–65.

5. Karabanov, S.M. Magnitoupravlyayemyye germetizirovannyye kontakty (gerkony) I izdeliya na ikh osnove [Reed Switches and Products on Basis Thereof] [Text] / S.M. Karabanov, R.M. Mayzels, V.N. Shoffa. – M. : Intellect, 2011. - 408 p.

6. Arushanov, K.A. Novuye New technology of ion-plasma modification of the contact surfaces of reed switches in oscillatory discharge [Text] / I.A. Zeltser, S.M. Karabanov, R.M. Maizels, E.N. Moos // Journal of Physics : Conference Series. -2012. - Vol. 345. - N 01-2003. - P.\_1–28.

7. Arushanov, K.A. Ion-Induced Surface Modification of Magnetically Operated Contacts [Text] / K.A. Arushanov, I.A. Zeltser, S.M. Karabanov, R.M. Maizels, E.N. Moos, A. Tolstoguzov // Coatings. - 2012. - N 2. - P. 8-44.

8. Karabanov, S.M. Creation of Principally New Generation of Switching Technique Elements (Reed Switches) with Nanostructured Contact Surfaces [Text] / S.M. Karabanov, I.A. Zeltser, R.M. Maizels, E.N. Moos, K.A. Arushanov // Journal of Physics : Conference Series. – 2011. – Vol. 291. – N 01-2020. – P.\_1–17.

## I.A. Afinogenov, I.A. Zeltser, E.B. Trunin

## INVESTIGATING THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION AND MORPHOLOGICAL FEATURES OF CONTACT SURFACES ON ELECTRICAL RESISTANCE AND WORKABILITY OF MEMS-SWITCHBOARDS

The chemical composition and morphological features of contact surfaces of MEMSswitchboards are investigated by means of x-ray photoelectron spectroscopy, atomic-force microscopy, scanning electron microscopy, and optical microscopy. The paper treats the influence of various admixtures on surfaces. The paper maintains that admixtures of copper and aluminium, various pores and protuberances on the surface increase electrical resistance and decrease apparatuses' workability. The paper states that the chemical composition and morphological features of contact surfaces determine the stability of electrical resistance and, as a result, the workability of MEMS-switchboards.

Microelectromechanical systems (MEMS), switchboard, chemical composition, morphology, contact surface, electrical resistance, x-ray photoelectron spectroscopy (XPS), atomic-force microscopy (AFM), scanning electron microscopy (SEM), surface impurities.