

УДК 621.318.5:681.3

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ,
ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТНО-ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ
И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
КОНТАКТНЫХ ПОКРЫТИЙ МЭМС-КОММУТАТОРОВ**

Методом рентгеноспектрального микроанализа исследован элементно-химический состав и морфология поверхности контактных покрытий МЭМС-коммутаторов. Используются методики локализации примесей по глубине, изучены технологические среды, предложена математическая модель и установлена связь пористости гальванопокрытий с концентрацией микрочастиц. Рассмотрено влияние различных типов примесей и приведены количественные характеристики их содержания на поверхности. Показано, что примеси меди и алюминия 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, рентгено-спектральный микроанализ (РСМА), пора, 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 (электросопротивления, количество срабатываний до отказа).

Источниками загрязнения поверхности пластин, металлических дорожек, контактных поверхностей являются: абразивные, смазочные материалы, используемые при механической обработке; пыль, водяные пары, пары масел, попадающие из атмосферы производственных помещений; технологические среды (газы, вода, химические реактивы), в которых обрабатываются изделия, а также инструмент, оснастка, тара для переноса и хранения, с которыми они соприкасаются. Продукты дыхания, аэрозоли также загрязняют поверхность контактов.

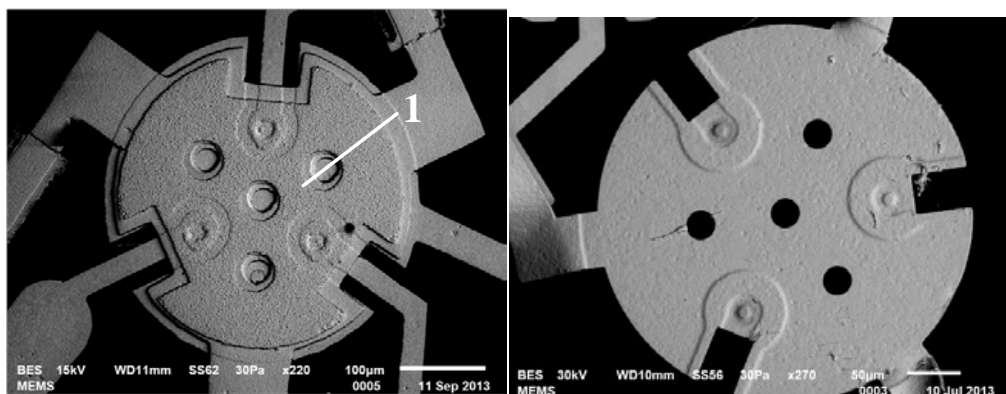
Поверхностные загрязнения можно условно разделить на молекулярные, ионные и атомарные. Молекулярные загрязнения представляют собой масла, жиры, смолы, органические загрязнения. Ионные загрязнения – это химические

соединения, появляющиеся после травления, гальванических операций, кислотной или щелочной отмывки. Негативную роль играют также микрочастицы, образующиеся после механической обработки и иных механических воздействий на элементы конструкции МЭМС. Все указанные виды загрязнений формируются в процессе технологических операций из различных источников (подложка, реактивы, технологическая оснастка и оборудование, транспортная тара, окружающая среда производственных помещений), природу которых необходимо уточнять.

На примере работ ¹, 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 мили, а микроэлектромеханическими системами. Из-за микрометрических размеров их контактных площадок, проведение подобного рода исследований для МЭМС еще более актуально, чем для герконов.

1. Образцы и методика эксперимента

Объектами исследований в настоящей работе являлись образцы электростатических МЭМС-коммутаторов, изготовленные ОАО «СКТБ РТ» (Великий Новгород). Прибор в сборе (без герметичного корпуса) и элементы его конструкции изображены на рисунке 1.



¹ Arushanov K.A. [et al.]. New technology of ion-plasma modification of the contact surfaces of reed switches in oscillatory discharge // *Journal of Physics : Conference Series*. 2012. Vol. 345, № 01-2003. P. 1–28 ; Karabanov S.M. [et al.]. Creation of Principally New Generation of Switching Technique Elements (Reed Switches) with Nanostructured Contact Surfaces // [Journal of Physics : Conference Series, 2011. Vol. 291, № 01-2020. P. 1–17](#) ; Arushanov K.A. [et al.]. Ion-Induced Surface Modification of Magnetically Operated Contacts // *Coatings*. 2012. № 2. P. 8–44 ; Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Шоффа В.Н.. Магнитоуправляемые герметизированные контакты (герконы) и изделия на их основе. М. : Интеллект, 2011. 408 с. ; Зельцер И.А., Некрасов Р.А. Технологические артефакты на стадии герметизации магнитоуправляемых контактов // *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. 11.10–14.10.2005) / под ред. С.М. Карабанова. Рязань : Поверенный, 2006. С. 56–65.

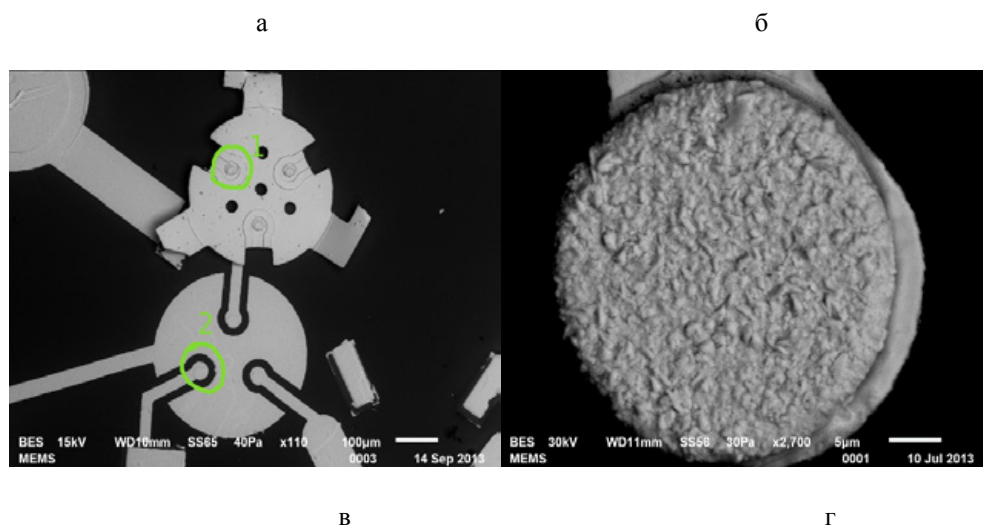


Рис. 1. РЭМ-изображение электростатического МЭМС-коммутатора

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

Структура МЭМС изготавливается на подложке Al_2O_3 односторонней полировки. Термовакuumным напылением золота формируется сигнальная линия и управляющие элементы. Подвижная механическая структура, выполненная из двух слоев золота (последовательное термовакuumное 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 ².

Состояние поверхности контактов исследовалось методами рентгеноспектрального микроанализа (РСМА).

В методе РСМА толщина анализируемого слоя зависит от энергии электронного зонда и может изменяться от 50 нм до нескольких микрон. С ростом

² Афиногенов И.А. [и др.]. Коммутационная техника на основе технологий МСТ // 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. 27.09–30.09.2011) / под ред. С.М. Карабанова ; ОАО «РЗМКП». Рязань, 2011. С. 126–131.

энергии электронов увеличивается глубина их проникновения, что позволяет анализировать все более глубокие слои и таким образом находить распределение концентрации элементов по глубине. В общем случае электронные траектории рассчитываются с помощью метода Монте-Карло. Но на практике для оценки максимальных размеров области генерации рентгеновского излучения используют приближенные формулы.

В частности, для определения максимального пробега R электрона с энергией E_0 в материале со средним атомным номером Z , средним атомным весом A и плотностью ρ используется формула Канайа – Окаямы:

$$R(\text{мкм}) = 0,0276 \frac{AZ^{-8/9}}{\rho(\text{г/см}^3)} E_0^{5/3} (\text{кэВ}). \quad (1)$$

Например, для золота:

при $E_0 = 15 \text{ кэВ}$ расчет дает $R = 0,517 \text{ мкм}$;

при $E_0 = 5 \text{ кэВ}$ расчет дает $R = 0,083 \text{ мкм}$.

Для оценки максимальной глубины генерации кванта характеристического рентгеновского излучения с энергией возбуждения $E_{кр}$ в РСМА можно использовать формулу

$$R(\text{мкм}) = 0,0276 \frac{AZ^{-8/9}}{\rho(\text{г/см}^3)} (E_0^{5/3} - E_{кр}^{5/3}) (\text{кэВ}). \quad (2)$$

Проводился сравнительный анализ образца МЭМС, забракованного по электрическому сопротивлению ($R_{cm} > N$, статическое сопротивление больше нормы), и образца МЭМС, прошедшего тест по электрическому сопротивлению ($R_{cm} \leq N$).

2. Результаты экспериментов

2.1. Рентгеноспектральный микроанализ элементов конструкции микроэлектромеханической системы

Для локализации примесей по глубине была разработана специальная методика послойного РСМА, основанная на варьировании энергии электронного зонда. По этой методике был исследован элементно-химический состав контактных площадок (неподвижных деталей) и проводящих дорожки МЭМС методом послойного РСМА.

На рисунках 2–4 представлены:

– РЭМ-изображения контакта с токопроводящей дорожкой;

- спектры 81, 87 (рис. 3) сняты в области 81 контакта (рис. 2) при энергиях зондирующего пучка электронов 20,5 кВ соответственно;
- спектры 82, 88 (рис. 4) сняты в области 82 дорожки (рис. 2) при энергии зондирующего пучка электронов в 20,5 кВ соответственно.

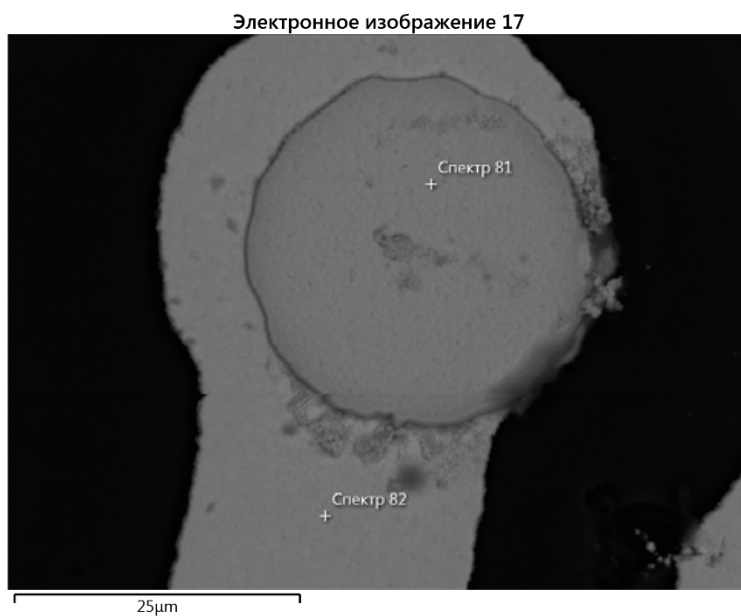
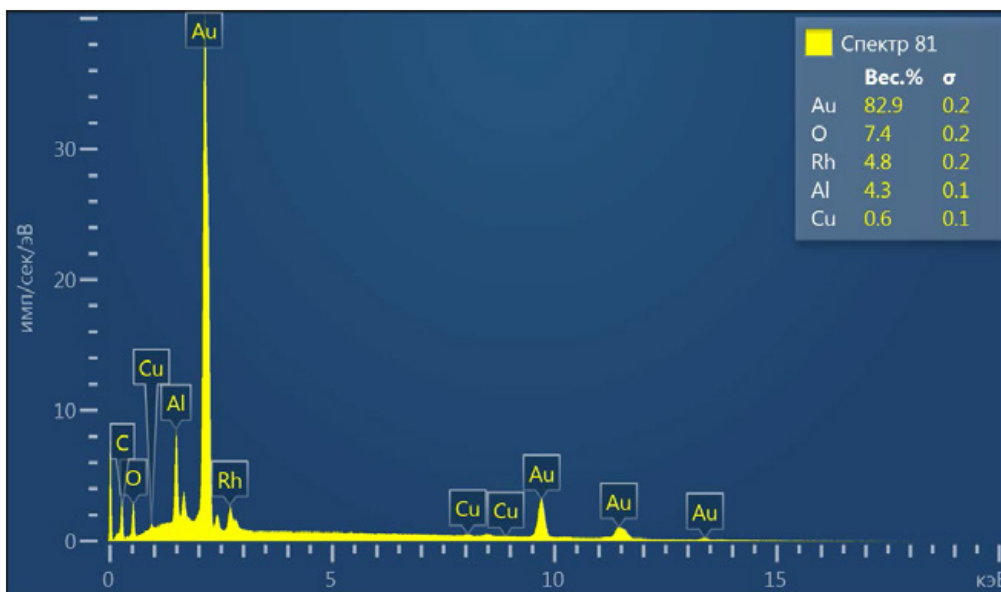
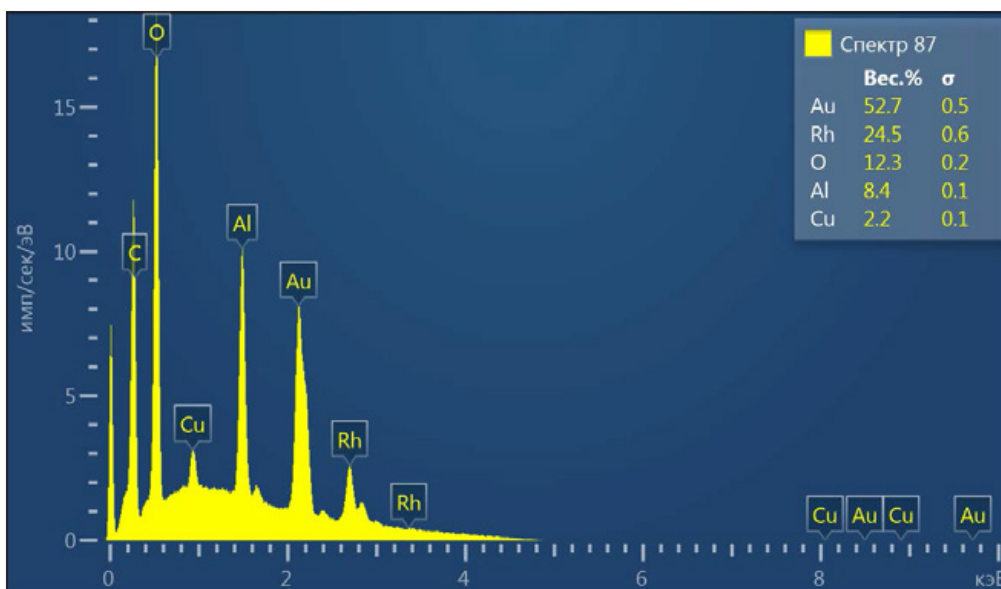


Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности контакта и проводящей дорожки (неподвижной контакт-детали) МЭМС ($R_{ст} > N$).

Области зондирования 81 (поверхность контакта) и 82 (дорожка), где были получены соответственно спектры 81, 87 (поверхность контакта) и 82, 88 (дорожка) отмечены крестиками. Область анализа – 1 мкм

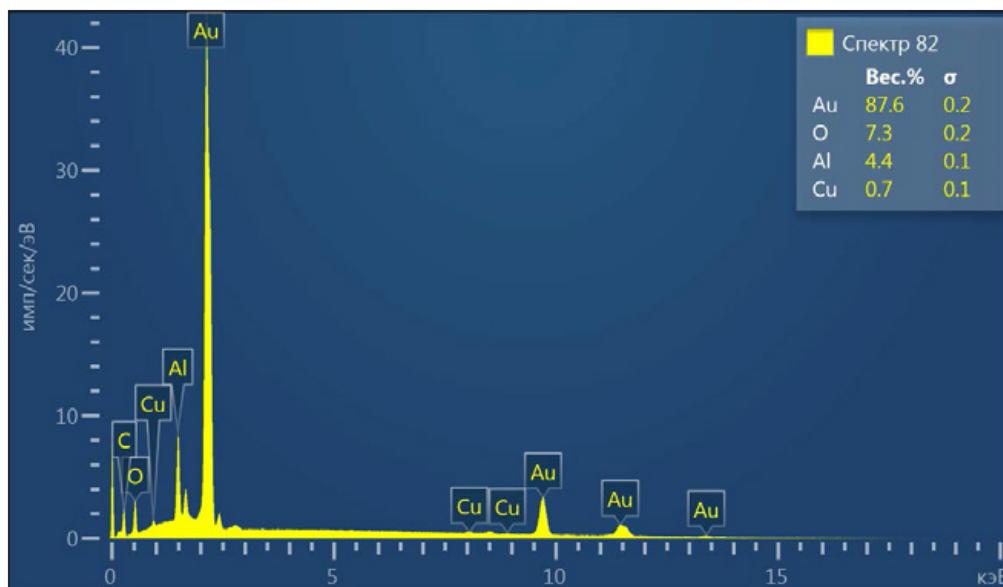


а

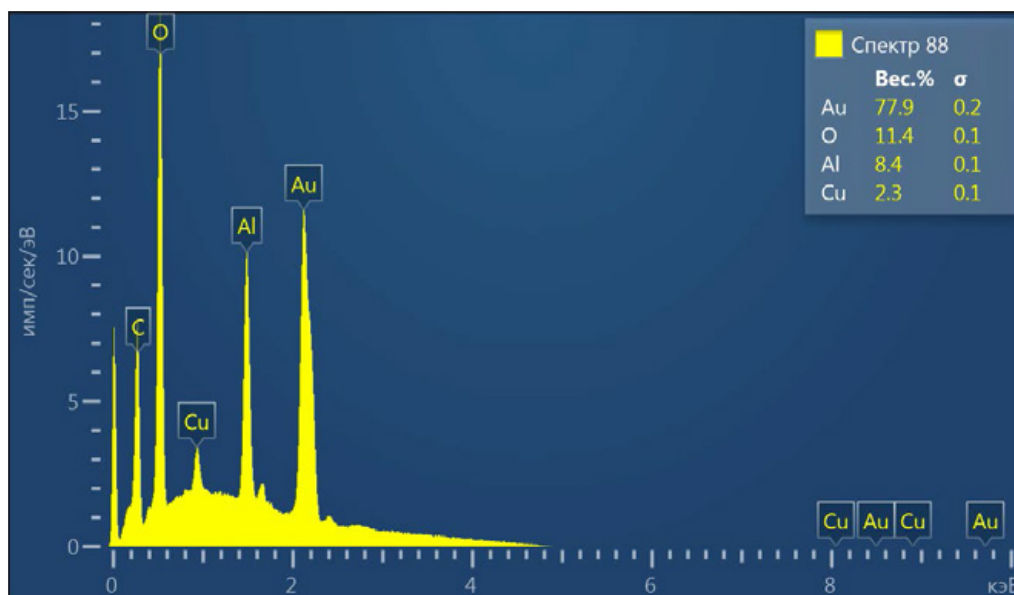


б

Рис. 3. Спектры 81 (а), 87 (б) сняты в области 81 (рис. 5) контакта при энергии зондирующего пучка электронов 20,5 кВ соответственно. $R_{cm} > N$.
Область анализа – 1 мкм



а



б

Рис. 4. Спектры 82 (а), 88 (б) сняты в области 82 дорожки (рис. 5) при энергии зондирующего пучка электронов в 20,5 кВ соответственно. $R_{cm} > N$. Область анализа – 1 мкм

Кроме этого, исследовалась подвижная контакт-деталь (крышка) с наружной (в области 1, рис. 1) и внутренней (в области 59, рис. 6) стороны.

На рисунке 5 представлен рентгеновский спектр, полученный в области 1 (рис. 1).

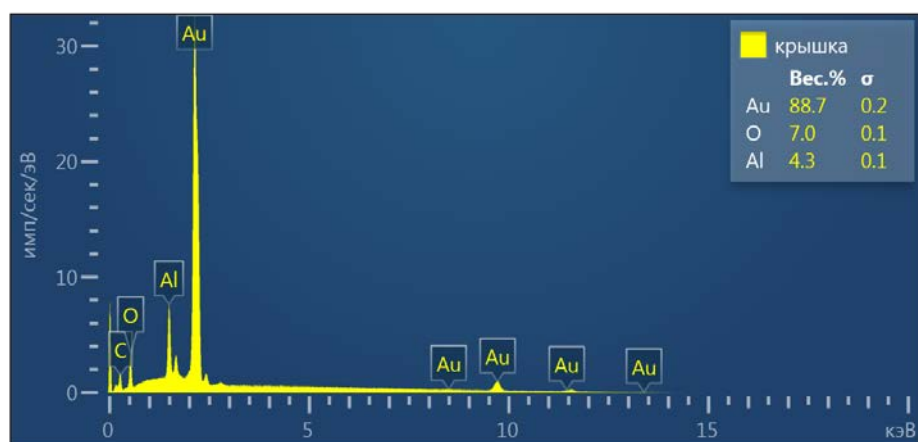


Рис. 5. Спектр получен в области 1 подвижной контакт-детали (крышки) с наружной стороны (рис. 1) при энергии зондирующего пучка электронов 20 кВ. $R_{cm} > N$. Область анализа – 1 мкм

На рисунке 6 дано РЭМ-изображение поверхности контакта (подвижной контакт-детали) МЭМС, забракованного по электрическому сопротивлению ($R_{cm} > N$).



Рис. 6. РЭМ-изображение поверхности контакта (подвижной контакт-детали) МЭМС, забракованного по электрическому сопротивлению ($R_{cm} > N$). Область анализа 59 имеет диаметр около 1 мкм

На рисунке 7 представлен рентгеновский спектр, полученный в области 59 (рис. 6).

Теперь рассмотрим природу примесей, спектры которых приведены на рисунках 3–5, 7.

Линии примесей *C*, *O*, *Al*, *Cu* демонстрируют повышенную интенсивность вблизи поверхности, что свидетельствует об их локализации на глубине от 0 до 60 нм (рис. 3, 4).

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 углеводородов и окислов алюминия и меди, существующих на поверхности контактов.

Наиболее вероятными источниками окислов меди и алюминия являются соответственно жертвенный слой и подложка. Эти окислы затрудняют токопрохождение, повышают сопротивление, понижают ресурс и стабильность МЭМС, так как являются диэлектриками.

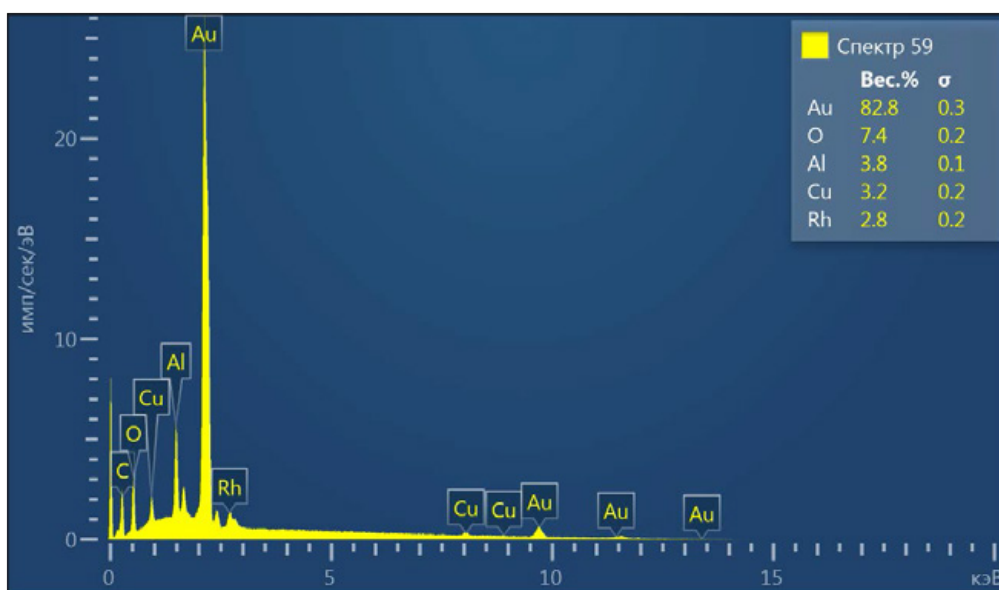


Рис. 7. Спектр получен в области контакта 59 подвижной контакт-детали (крышки) (рис. 6) при энергии зондирующего пучка электронов в 20 кВ.
 $R_{cm} > N$. Область анализа – 1 мкм

У МЭМС, прошедших тест по электрическому сопротивлению, окислов меди и алюминия, затрудняющих токопрохождение, на поверхности контактных площадок нет (рис. 8), и поэтому их сопротивление на порядок меньше, чем у приборов, которые этот тест не прошли, и составляет примерно $0,15 \text{ Ом}$.

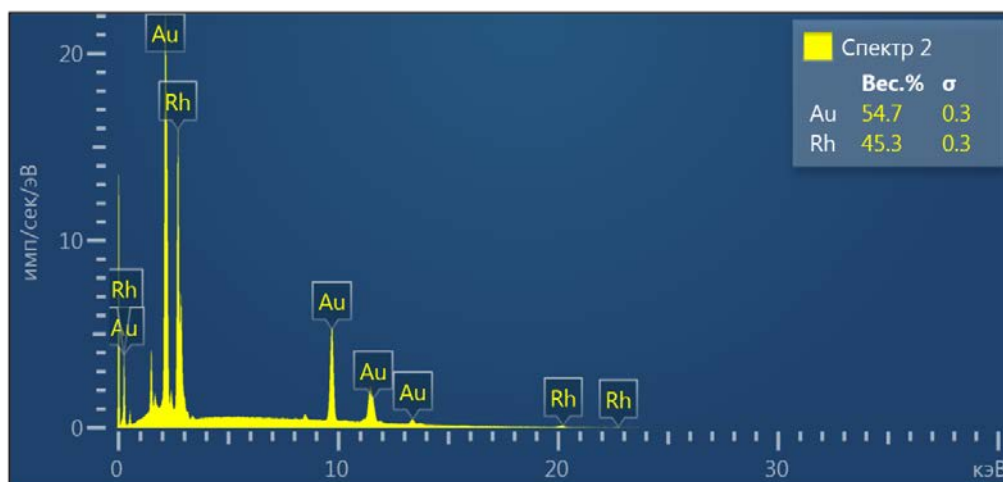


Рис. 8. РСМА-спектр контактной площадки (неподвижной детали) МЭМС.
Область анализа – 1 мкм . $R_{cm} \leq N$

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 будет показано в разделе 3.2, одной из основных причин возникновения пор (рис. 9), приводящих к росту электрического сопротивления мили- и микроэлектромеханических систем. Причем концентрация поверхностных дефектов непосредственно 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.

На рисунке 9 представлено РЭМ-изображение исследуемого участка 81 поверхности контакта (рис. 2), где были сняты спектры 81, 87 (рис. 3). Темные точки на рисунке 9 – это поры. Их латеральные размеры лежат в нанометровом диапазоне и находятся в пределах от 100 до 1000 нм . Поэтому в область анализа, которая имеет латеральный размер по диаметру около 1 мкм , могут попасть одна или несколько пор и внести свой вклад в

регистрируемый спектр (аналитический сигнал), соответствующий по энергии алюминию.

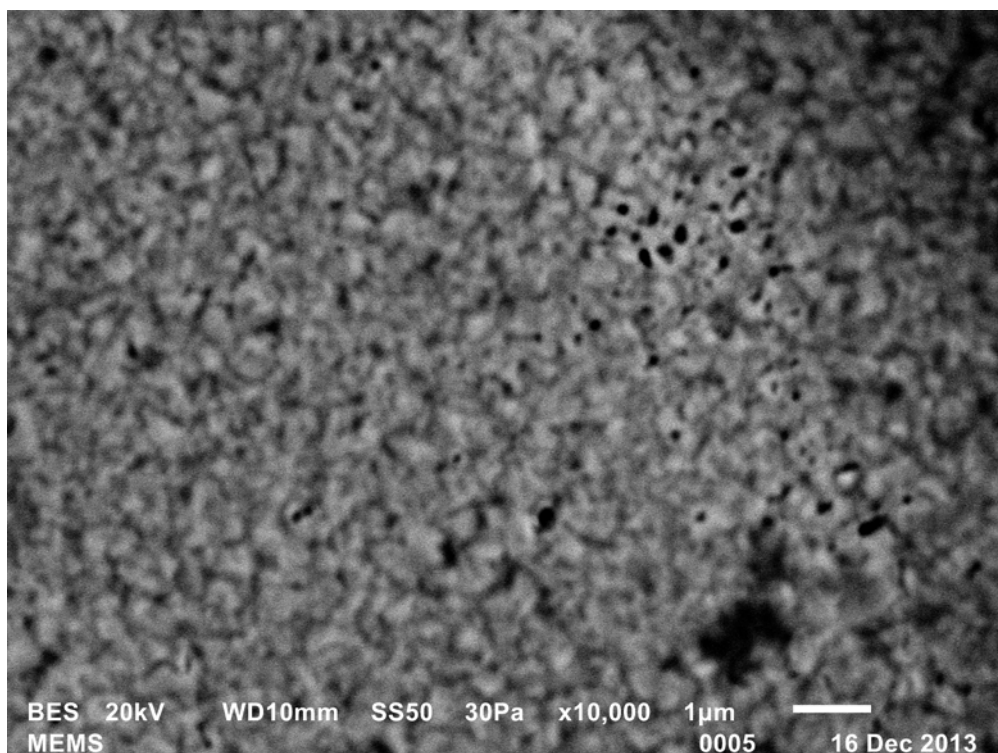


Рис. 9. РЭМ-изображение исследуемого участка 81 поверхности контакта (рис. 2), где были сняты спектры 81, 87 (рис. 3)

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 всех характеристиках прибора.

2.2. Рентгеноспектральный микроанализ технологических сред

На поверхности фильтра обнаружены микрочастицы размерами порядка нескольких микрон (рис. 10). Как видно при рассмотрении рентгеновских спектров на рисунках 11–13, в состав их входят *Ca* (до 34,4 процента, рис. 11), *Al* (до 2 процентов, рис. 12), *Ti* (до 64 процентов, рис. 12).

Электронное изображение 3

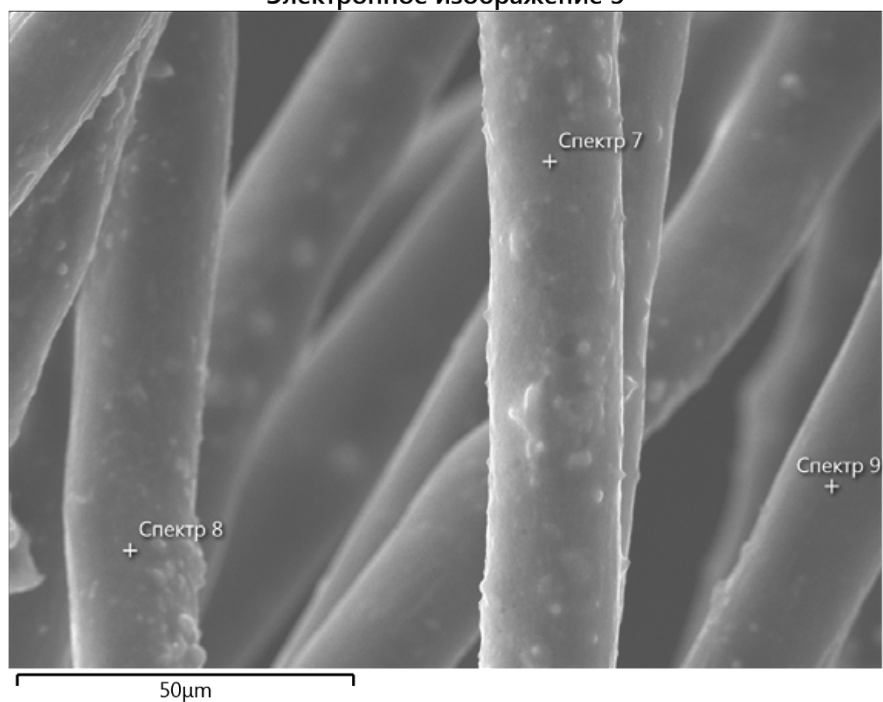


Рис. 10. РЭМ-изображение поверхности беззольного фильтра после его использования для фильтрации электролита родирования

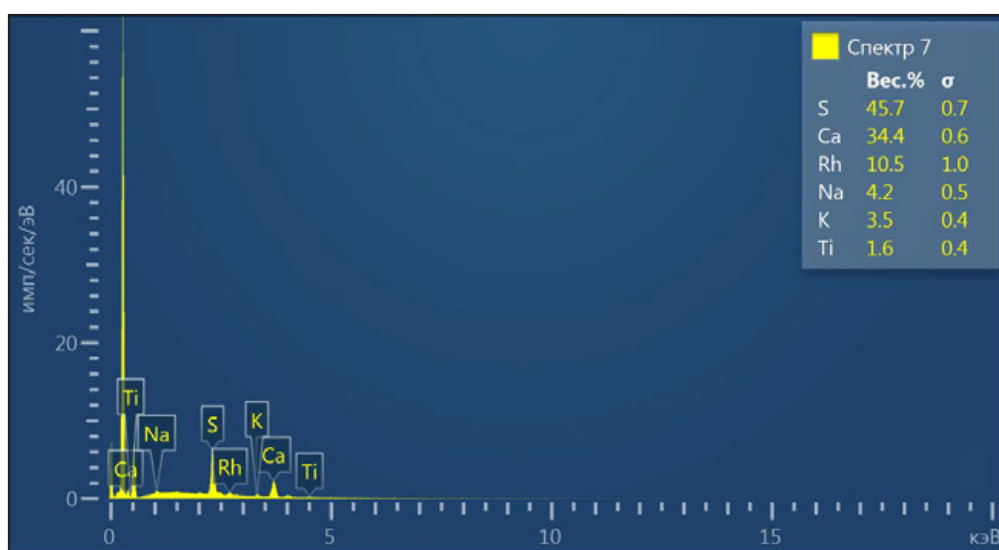


Рис. 11. Рентгеновский спектр области 7, изображенной на рисунке 10

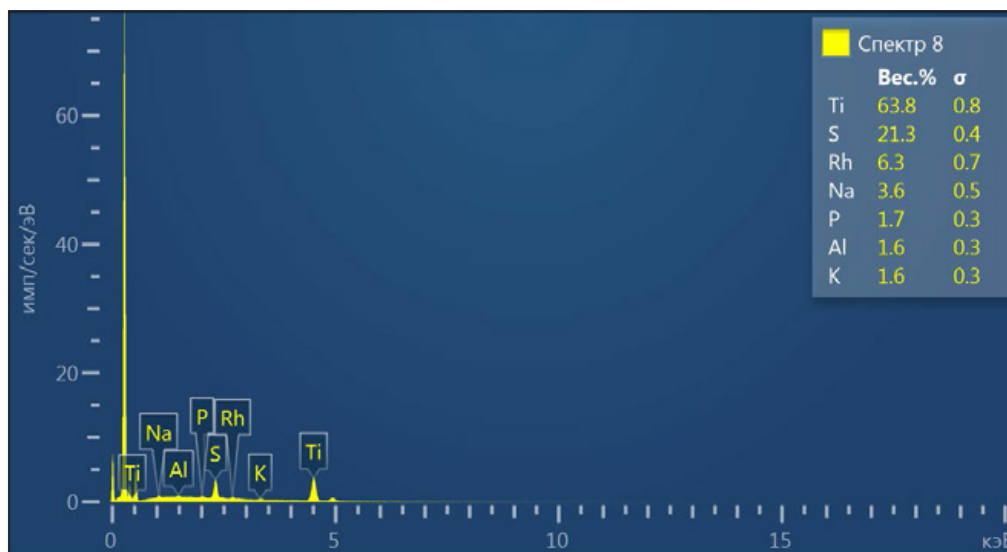


Рис. 12. Рентгеновский спектр области 8, изображенной на рисунке 10

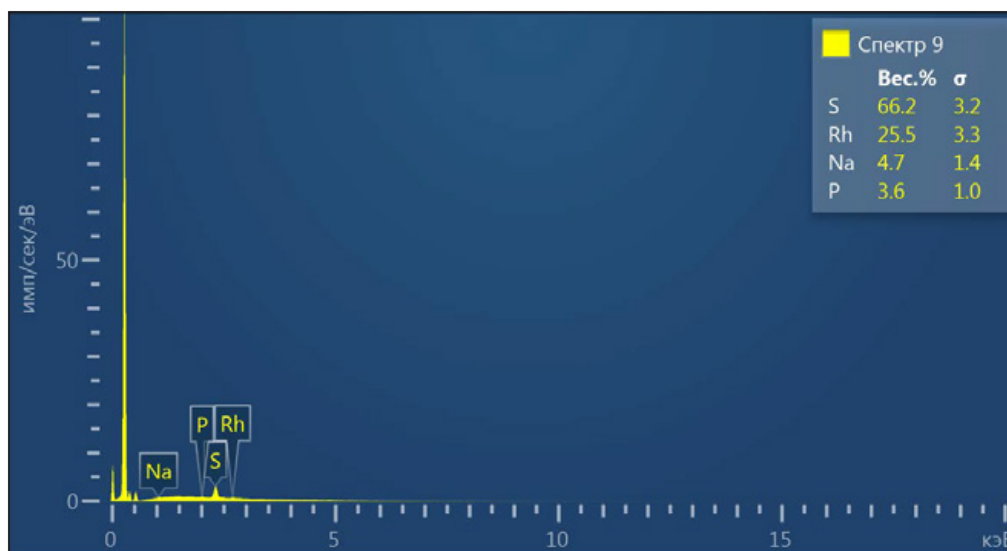


Рис. 13. Рентгеновский спектр области 9, изображенной на рисунке 10

Вышеперечисленные примеси присутствуют в образцах в значительных количествах и поэтому могут негативно влиять на работу приборов. Важно отметить, что соединения кальция, алюминия, титана являются, как правило, диэлектриками и, находясь на поверхности контактов, могут так же, как окислы алюминия и меди, приводить к росту электрического сопротивления и понижению ресурса МЭМС.

3. Обсуждение

3.1. Технологические артефакты

Рентгеноспектральный микроанализ микроэлектромеханической системы, согласно тесту, по величине электрического сопротивления показал (рис. 8), что в приповерхностной области контактов отсутствуют какие-либо загрязнения. Контакты, примерно в равных массовых долях, состоят из родия и золота. Следов жертвенного слоя на поверхности контактов не обнаружено.

В приповерхностной области контактов МЭМС, не прошедшей тест по электрическому сопротивлению, наоборот, видны следы жертвенного слоя (соединения меди с кислородом, которые являются диэлектриками) и углеводородов (С), а пики родия, по сравнению с контактами МЭМС, прошедшей тест по величине электрического сопротивления, очень слабые (рис. 3–5, 7).

Таким образом, чтобы не возник брак МЭМС по электрическому сопротивлению, прежде всего, необходимо решить проблему полного удаления жертвенного слоя (добиться чистоты поверхности хотя бы на уровне чувствительности РСМА – анализа).

В соответствии с полученными результатами РСМА убедительно показано, что на поверхности контактов и контактных дорожек МЭМС, не прошедшей тест по величине электрического сопротивления, присутствует не только медь, но и алюминий в окисленном состоянии (рис. 3–5, 7). Содержание алюминия на контактных площадках примерно соответствует содержанию родия (рис. 3–5, 7), причем алюминий присутствует не только на контактах подвижной и неподвижной контакт-деталей, токопроводящих дорожках, но и на наружной стороне подвижной контакт-детали (крышке), что указывает на его наиболее вероятный источник. Это микрочастицы материала подложки (Al_2O_3), образующиеся при ее резке и других механических воздействиях, приводящих к образованию микросколов и микрокрошки.

Указанные примеси алюминия и меди, которые неконтролируемо попали на контактные площадки МЭМС, забракованной по электрическому сопротивлению, значительно (на порядок) увеличили сопротивление прибора по сравнению с прибором, прошедшим соответствующий тест по электрическому сопротивлению. Следовательно, необходим постоянный мониторинг технологических процессов и сред, тем более, что, как показал РСМА фильтра, после его применения для фильтрования электролита родирования в нем (в этом электролите) также находятся микрочастицы соединений алюминия, кальция и титана (рис. 10–13).

3.2. Посторонние частицы

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, авторы которой указывают на четыре источника ПЧ. Данный

³ Зельцер И.А., Р.А. Некрасов. Технологические артефакты на стадии герметизации магнитоуправляемых контактов.

подход к анализу источников ПЧ применим для электростатических МЭМС-коммутаторов.

Такие источники ПЧ, как жидкие и газообразные технологические среды, используемые на различных стадиях производства МЭМС, содержат посторонние микрочастицы (ПЧ-1), которые, попадая внутрь 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 герконов. Поры в свою очередь не просто уменьшают (до 10 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 физико-химических процессов, происходящих при нанесении покрытий, удалении жертвенного слоя, некачественной промывке, 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.

3.3. Влияние посторонних микрочастиц на пористость гальванопокрытий

Одним из важнейших элементов конструкции МЭМС являются контактные гальванопокрытия. Они должны обеспечить стойкость к коррозии, сопротивление механическому и электроэрозионному износу, низкое удельное и переходное сопротивление. Наилучшим образом этим требованиям отвечают золото-рутениеевое или золото-родиевые покрытия, изготовленные по специальной технологии методом электрокристаллизации ⁴.

⁴ Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Шоффа В.Н. Магнитоуправляемые герметизированные контакты (герконы) и изделия на их основе ; Зельцер И.А., Некрасов Р.А. Технологические артефакты на стадии герметизации магнитоуправляемых контактов ; Афиногенов И.А. [и др.]. Коммутационная техника на основе технологий МСТ ; Арушанов К.А., Зельцер И.А., Моос Е.Н. Фрактальность нитридных контактов // Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. 2013. № 1/38. С. 148–155 ; Карабанов С.М., Быков А.Н. Опыт использования рутениевого гальванопокрытия в производстве герконов // Электронная промышленность. 2003. № 4. С. 37–42.

Независимо от способа выращивания основным при росте кристалла признается вещественное взаимодействие кристалла и среды, причем одним из наиболее мощных воздействий внешней среды на образование кристалла следует считать ее неизбежное в той или иной мере вхождение в состав кристалла, которое служит важным источником ростовых напряжений и структурных дефектов ⁵. Другая главная особенность роста кристаллов – его саморегулирующий характер, когда кристалл, раз возникнув, растет по законам взаимодействия со средой. Он приспосабливается к условиям роста, изменяя в соответствии с этим свою форму, образует почти совершенные или, отравляясь примесями, аномальные, искаженные формы. Кристалл почкуется, отделяя мельчайшие частицы, производящие в благоприятных условиях новые кристаллы, образует сложные сообщества, подчиняющиеся законам коллективного роста, зарождается, развивается и стареет, накапливая напряжения, растрескиваясь в процессе роста и расщепляясь ⁶.

Весь процесс эволюции монокристаллов от предельных форм, простейших по огранке и почти совершенных по строению, до полного разрушения под влиянием вхождения внешней среды может быть охарактеризован наиболее кратко с помощью представлений о взаимодействии симметрии кристалла и среды ⁷.

Если принять, что входящая в кристалл среда полностью асимметрична, то ее проникновение в состав кристалла, понижающее его приближенную симметрию все умножающимися нарушениями, можно рассматривать как «борьбу» асимметричной среды с симметричным кристаллом.

Таким образом, эволюция конечных макроформ кристаллов в зависимости от вхождения в них внешней среды подчиняется осуществляющемуся через ряд этапов принципу Кюри – суперпозиции симметрии. Асимметрия среды шаг за шагом преодолевает упорядоченность макроформ однородных кристаллов, рассматриваемых с точки зрения их реальной, то есть приближенной симметрии ⁸. Принцип Кюри может быть также обобщен для случая взаимодействия материала покрытий МЭМС с технологической средой при их электролизе. При этом необходимо также руководствоваться все той же идеей, связывающей возникший дефект электролитического покрытия с вхождением среды в его состав.

Внимание должно быть сосредоточено как на индивидуальных проявлениях, так и на суммарном действии дефектов.

Одним из наиболее важных типов дефектов в электролитических покрытиях, оказывающих существенное влияние на их электрические свойства и коррозионную стойкость, являются поры ⁹.

⁵ Процессы реального кристаллообразования / коллектив авт. М. : Наука, 1977. 235 с.

⁶ Там же.

⁷ Коломыц Э.Г., Шефталъ Н.Н. Эволюция конечных форм роста кристаллов в зависимости от вхождения среды в их состав // Acta phys. Acad. Sci. Hungar. 1973. Vol. 33, № 3–4. С. 335–351.

⁸ Процессы реального кристаллообразования ; Коломыц Э.Г., Шефталъ Н.Н. Эволюция конечных форм роста кристаллов в зависимости от вхождения среды в их состав.

⁹ Поветкин В.В., Ковенский И.М. Структура электролитических покрытий. М. : Металлургия, 1989. 136 с. ; Гинберг А.М. Повышение антикоррозионных свойств металлических покрытий. М. : Металлургия, 1984. 168 с. ; Груев И.Д., Матвеев Н.И., Сергеева Н.Г. Электрохимические покрытия изделий радиоэлектронной аппаратуры. М. : Радио и связь, 1988. 304

Порами обычно называются макро- или микроканалы, проникающие в покрытия до покрываемого изделия и нарушающие непрерывность слоя осажденного металла. По размерам и форме поры разделяются на три группы: макропоры, микропоры и поры канальчатого типа ¹⁰.

По мнению А.М. Гинберга ¹¹, возникновение микропористости определяется в основном структурными особенностями электроосажденных металлов. Макропоры образуются в результате неоднородности электродной поверхности, связанной с включением различных чужеродных частиц, на которых облегчено выделение водорода и затруднено выделение металла. Что касается канальчатых пор, то они появляются главным образом под действием внутренних напряжений, приводящих к растрескиванию электролитического покрытия и образования «сетки трещин».

Для субмикронных покрытий МЭМС одними из наиболее важных факторов, влияющих на пористость, являются микрозагрязнения и толщина покрытия.

На ранних стадиях осаждения пористость определяется состоянием поверхности подложки. Эта ситуация сохраняется до предельной толщины, после чего происходит резкое снижение пористости и переход к режиму осаждения, в котором наклон кривой «пористость-толщина» определяется параметрами самого осадка. В мелкокристаллических осадках переход от доминантного влияния подложки к определенному влиянию самого покрытия происходит при более низкой толщине. Процессы в переходной зоне, по мнению авторов ¹², не имеют теоретического объяснения. Существуют уравнения, определяющие связь пористости (N) и толщины (t) покрытия. Для золотых покрытий известно уравнение Франта ¹³:

$$N = \gamma t^{\alpha}, \quad (3)$$

где γ , α – параметры, характеризующие условия осаждения.

Как следует из работ ¹⁴, существует взаимосвязь «концентрация примесей и (или) включений – толщина – пористость». Однако эта взаимосвязь установлена

с. ; Кудрявцев Н.Т. Электролитические покрытия металлами. М. : Химия, 1979. 352 с. ; Мамонтов Е.А., Кубатова Л.А., Воленко А.П. Образование пор в начальный период электрокристаллизации меди на индифферентных подложках // Защита металлов. 1983. Т. 19, № 6. С. 971–974.

¹⁰ Гинберг А.М. Повышение антикоррозионных свойств металлических покрытий.

¹¹ Там же.

¹² Груев И.Д., Матвеев Н.И., Сергеева Н.Г. Электрохимические покрытия изделий радиоэлектронной аппаратуры.

¹³ Там же.

¹⁴ Арушанов К.А., Зельцер И.А., Моос Е.Н. Фрактальность нитридных контактов ; Карабанов С.М., Быков А.Н. Опыт использования рутениевого гальванопокрытия в производстве герконов ; Процессы реального кристаллообразования ; Коломыц Э.Г., Шефталь Н.Н. Эволюция конечных форм роста кристаллов в зависимости от вхождения среды в их состав ; Поветкин В.В., Ковенский И.М. Структура электролитических покрытий ; Гинберг А.М. Повышение антикоррозионных свойств металлических покрытий ; Груев И.Д., Матвеев Н.И., Сергеева Н.Г. Электрохимические покрытия изделий радиоэлектронной аппаратуры ; Кудрявцев Н.Т. Электролитические покрытия металлами ; Мамонтов Е.А., Кубатова Л.А., Воленко А.П. Образование пор в начальный период электрокристаллизации меди на

только на качественном уровне и поэтому актуально дальнейшее обобщение полученных экспериментальных данных с целью построения модели порообразования. Исходя из этого целью данной работы является вывод уравнений, определяющих взаимосвязь «концентрация примесей и (или) включений – толщина – пористость», на основе изучения влияния среды на пористость электролитических покрытий МЭМС.

Наиболее чистые современные материалы и технологические среды характеризуются уровнем микрозагрязнений по отдельным контролируемым примесям порядка нескольких десятков частей на миллиард (*ppb*), или 10^{-9} процентов, а суммарное содержание контролируемых примесей в них составляет от единиц до десятков и сотен частей на миллион (*ppm*), или 10^{-3} – 10^{-4} процентов¹⁵. Теоретическая оценка количества сферических частиц на литр жидкости показывает, что при уровне загрязнений в 10^{-4} процентов должно быть около 2×10^{15} частиц размером 0,01 мкм; 2×10^{12} частиц размером 0,1 мкм; 2×10^9 частиц размером 1 мкм; 2×10^6 – размером 10 мкм и т. д. Экспериментальное определение количества микрочастиц в используемых кислотах и распределение по размерам хорошо согласуется с расчетом¹⁶. В работе¹⁷ использовались высокоточные лазерные счетчики микрочастиц¹⁸. Данные распределения взвешенных частиц по размерам, характеризующиеся резким увеличением числа частиц субмикронных размеров по сравнению с частицами размером более 1 мкм, связаны с гравитационными закономерностями и динамикой аэрозолей. Согласно работе¹⁹, имеет место примерно квадратичная зависимость плотности микрочастиц (*n*) в слое от величины, обратной их размеру (*d*):

$$n = 1/d^2 \quad (4)$$

В технологии нанесения покрытия (по оценке вероятности стать источником дефектообразования) принято считать размер (диаметр) микрочастицы ($d_{кр}$) не менее 0,1 толщины пленки (*t*), то есть:

$$d_{кр} \geq 0,1t. \quad (5)$$

Тогда с учетом (3) выражение (2) преобразуется к виду

индифферентных подложках ; Банников В.С. [и др.] Приборы контроля содержания частиц в жидкостях, применяемых в производстве ИС // Электронная промышленность. 1986. № 7. С. 46–50.

¹⁵ Дьяков Ю.Н., Лукичев А.В., Тимофеев Б.В. Современные требования к технологическим средам и химикатам, используемым для микроэлектроники // Электронная промышленность. 1986. № 7. С. 3–10.

¹⁶ Там же.

¹⁷ Там же.

¹⁸ Банников В.С. [и др.]. Приборы контроля содержания частиц в жидкостях, применяемых в производстве ИС.

¹⁹ Дьяков Ю.Н., Лукичев А.В., Тимофеев Б.В. Современные требования к технологическим средам и химикатам, используемым для микроэлектроники.

$$n \sim 1/t^2, \quad (6)$$

и для плотности поверхностных дефектов (D) можно записать следующую формулу ²⁰:

$$D = c/t^2, \quad)$$

где c – параметр, характеризующий условие осаждения пленки.

А теперь сравним формулы (3) и (7). Как видим,

$$D = N, \quad (8)$$

если

$$\alpha = 2, \gamma = c. \quad (9)$$

В случае выполнения условия $\alpha = 2$ можно утверждать, что уравнения (3) и (7) фактически определяют связь пористости с концентрацией микрочастиц в электролите и их распределением по размерам, так как $D \sim n$, и с учетом (4) получим:

$$D = \beta/d^2, \quad (10)$$

где β – параметр, характеризующий условия осаждения. Тогда из этого следует, что основной причиной образования пор в гальванопокрытиях являются включения, содержащиеся в электролите. Действительно, независимо от метода кристаллизации взаимодействие растущего кристалла со средой, имеющей примеси или включения, подчиняется общим закономерностям.

Если в среде присутствует примесь, нарушающая при вхождении в состав кристалла его совершенство, растущие грани будут ее отталкивать силами частичного кристаллизационного давления, которое, как известно, достигает большой величины. Однако это отталкивание, сопряженное с преодолением препятствия, замедляет рост, требуя совершения дополнительной работы. Кроме того, с ростом кристалла процесс отталкивания осложняется возникновением на грани разности пересыщений, облегчающих вхождение примеси внутрь кристалла. Поэтому энергетически более выгодным путем продолжения роста может быть появление и развитие на кристалле таких граней, структура которых наиболее сходна со структурой частиц примеси, вследствие чего включение последних в состав их пирамиды роста наименее расстраивает его совершенство, протекая с наименьшим для него «ущербом». Кристалл как бы «уступает», приспосабливается к условиям, меняет свою форму в соответствии с концентрацией примеси в среде ²¹.

²⁰ Поветкин В.В., Ковенский И.М. Структура электролитических покрытий.

²¹ Коломыц Э.Г., Шефталъ Н.Н. Эволюция конечных форм роста кристаллов в зависимости от вхождения среды в их состав.

Процесс электроосаждения металлов – кристаллизационный процесс, и поэтому возникновение микропористости определяется в основном структурными особенностями электроосажденных металлов, связанных с взаимодействием растущей пленки со средой, имеющей включения и примеси. Поэтому естественно, что для получения беспористого осадка малой толщины (а именно такие требования предъявляются к контактным покрытиям современных МЭМС) следует разработать технологические условия, при которых образуются плотные, мелкокристаллические, равномерные осадки. Чем больше размеры кристаллов, тем больше должны быть минимальные толщины покрытий, требуемые для получения беспористого осадка. При этом пористость покрытий зависит не только от размеров кристаллов, но и от плотности их упаковки²². Следует также отметить, что под условиями осаждения понимается состав электролита, применяемый для электролиза, и режим электроосаждения: плотность тока, температура и применение нестационарного токового режима, ультразвуковых и магнитных полей, повышенных давлений. Значительную роль, как показано выше, играет загрязненность электролита, вызывающая пористость и другие дефекты. Данные об элементном составе микропримесей в электролите родирования, используемых для производства МЭМС, приведены на рисунках 11–13.

Так, особенностью электролита родирования является наличие в нем микронных включений, состоящих из соединения кальция, алюминия, титана.

Перечисленные особенности связаны с составом электролита. Поскольку элементный состав микрозагрязнений является одним из важных факторов, влияющих на пористость, то, по-видимому, следует ожидать существования взаимосвязи пористости с составом электролита.

Для доказательства выдвинутой гипотезы воспользуемся связью «переходное сопротивление – пористость».

Переходное сопротивление возникает в зонах касания двух контактов, через которые проходит электрический ток, и определяется как сумма сопротивления собственно металла или покрытия и сопротивления поверхностной пленки²³. Переходное сопротивление контактной пары геркона зависит от многих факторов: удельной электрической проводимости, твердости, пластичности и коррозионной стойкости покрытия, усилия нажатия, площади и шероховатости фактической поверхности контакта и т. д.²⁴. Пористость покрытия в свою очередь увеличивает удельное электросопротивление, уменьшает фактическую площадь контактирования, способствует загрязнению поверхности контакта продуктами

²² Гинберг А.М. Повышение антикоррозионных свойств металлических покрытий ; Груев И.Д., Матвеев Н.И., Сергеева Н.Г. Электрохимические покрытия изделий радиоэлектронной аппаратуры.

²³ Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Шоффа В.Н. Магнитоуправляемые герметизированные контакты (герконы) и изделия на их основе ; Груев И.Д., Матвеев Н.И., Сергеева Н.Г. Электрохимические покрытия изделий радиоэлектронной аппаратуры ; Хольм Р. Электрические контакты. М. : Иностранная литература, 1961. 464 с.

²⁴ Там же.

коррозионного разрушения подложки, адсорбции паров воды и т. д. Поэтому они негативно сказываются на переходном сопротивлении. При этом по мере миниатюризации и приближения к субмикронным толщинам покрытий отрицательная роль загрязнений возрастает. Почти любое вещество, не относящееся к основным рабочим компонентам данной среды, может рассматриваться как вредная примесь. По трем групповым параметрам – ионам, микрочастицам и поверхностно-активным веществам – сверхчистые технологические среды обладают неустойчивостью: концентрация этих загрязнений стремится превысить предельно допустимые концентрации (ПДК), причем превышение может произойти в непредсказуемый момент в течение нескольких минут²⁵. Поскольку существует связь «переходное сопротивление – пористость – микрочастицы», то неустойчивость технологической среды (например, электролита) необратимо приведет и к технологическим потерям по переходному сопротивлению. Согласно работе²⁶, выход годных МЭМС (Y) может быть выражен с помощью распределения Пуассона:

$$Y = e^{-DA}, \quad (11)$$

где D – плотность дефектов на поверхности контактного покрытия, A – площадь области перекрытия контактов.

Это выражение может служить аналитическим критерием для оценки эффективности новых технологий. Вследствие термодинамической и кинетической неустойчивости электролитов концентрация микрочастиц в нем может возрасти с большой скоростью, что в свою очередь приведет к пропорциональному росту уровня дефектности и соответственно брака.

Зная выход годных (по величине R_{cm}) серийных (Y_0), а также геометрию и толщины покрытий серийного и нового образца МЭМС, можно оценить по формулам (7)–(11) выход годных (по R_{cm}) новых МЭМС (Y_x):

$$Y_x = e^{-\frac{A_x}{A_0} \left(\frac{t_0}{t_x}\right)^2 \ln Y_0}, \quad (12)$$

где A_0, A_x – площади (перекрытия) контактных площадок серийного и нового образца МЭМС; t_0, t_x – толщины покрытий серийного и нового образца МЭМС.

Таким образом, одной из основных причин возникновения поверхностных дефектов покрытия, приводящих к росту электросопротивления контакта, являются дисперсные (взвешенные в растворе электролита) нано- и микрочастицы. Причем концентрация поверхностных дефектов напрямую зависит от соотношения толщины

²⁵ Абраменко Ю.М. [и др.] Требования к анализу и контролю технологических сред при производстве ИЭТ // Электронная промышленность. 1986. № 7. С. 35–41.

²⁶ Дьяков Ю.Н., Лукичев А.В., Тимофеев Б.В. Современные требования к технологическим средам и химикатам, используемым для микроэлектроники.

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 электросопротивления контакта.

Аналитический критерий равенства по эффективности технологий можно легко получить из формул (5), (6):

$$D_x = D_0 \frac{A_0}{A_x} \quad (13)$$

Одним из путей понижения дефектности является повышение степени фильтрации раствора электролита. Другие направления также связаны с уменьшением содержания микрозагрязнений в технологических средах (жидких и газообразных) и в воздухе технологических помещений.

Однако перечисленные меры окажутся неэффективными без обеспечения постоянного автоматического контроля над уровнем загрязнений технологических сред и воздуха, так как чистая технологическая среда является термодинамически и кинетически неустойчивой системой: концентрация загрязнений стремится превысить ПДК, причем превышение может произойти в непредсказуемый момент в течение нескольких минут. Обратная релаксация к норме ПДК термодинамически невыгодна и поэтому осуществляется за более длительный срок путем принятия мер по выявлению и ликвидации источника загрязнений или при значительном увеличении скорости потока омывающей воды и воздуха. Отсюда следует вывод: в критических точках потребления сверхчистых сред для производства МЭМС требуется оперативная и непрерывная информация о соответствии среды нормам ПДК на ионы, поверхностно-активные вещества и главное – на микрочастицы.

На основании проведенных исследований можно предположить, что одновременно действуют несколько механизмов образования пор под действием микрочастиц. При осаждении золота или родия на участке основы, где находятся адсорбированные микрочастицы, наблюдаются нарушения в механизме ростовой коалиценции зародышей. Плотному смыканию зародышей (это сферолиты) мешают также различного рода загрязнения, находящиеся в электролите во взвешенном состоянии. В какой-то момент некоторые из адсорбированных и (или) зажатых между кристаллами микрочастиц могут быть удалены под давлением выделяющихся продуктов реакции. Кроме этого, при кристаллизации может происходить вхождение в его состав загрязнений, имеющих размер, по крайней мере, 0,1 от диаметра кристалла, при этом в кристалле возникают микродефекты и напряжения, способствующие образованию пор канальчатого типа.

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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абраменко, Ю.М. Требования к анализу и контролю технологических сред при производстве ИЭТ [Текст] / Ю.М. Абраменко, В.С. Банников, С.М. Безручко, Г.П. Бенинг, Б.С. Борисов, С.В. Кузьмин // Электронная промышленность. – 1986. – № 7. – С. 35–41.
2. Арушанов, К.А. Фрактальность нитридных контактов [Текст] / К.А. Арушанов, И.А. Зельцер, Е.Н. Моос // Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. – 2013. – № 1/38. – С. 148–155.
3. 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, 27.09–30.09.2011) / под ред. С.М. Карабанова / ОАО «РЗМКП». – Рязань, 2011. – С. 126–131.
4. Банников, В.С. Приборы контроля содержания частиц в жидкостях, применяемых в производстве ИС [Текст] / В.С. Банников, С.М. Безручко, С.В. Кузьмин, О.В. Степанищев // Электронная промышленность. – 1986. – № 7. – С. 46–50.
5. Гинберг, А.М. Повышение антикоррозионных свойств металлических покрытий [Текст]. – М. : Metallurgia, 1984. – 168 с.
6. Гололобов, Г.П., Исследование поверхности магнитоуправляемых контактов методом атомно-силовой микроскопии [Текст] / Г.П. Гололобов, А.С. Арефьев, В.Р. Трегулов, И.Г. Уточкин, О.В. Киреева // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. – 2003. – Вып. 13. – С. 66–69.
7. Груев, И.Д. Электрохимические покрытия изделий радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / И.Д. Груев, Н.И. Матвеев, Н.Г. Сергеева. – М. : Радио и связь, 1988. – 304 с.
8. Дьяков, Ю.Н. Современные требования к технологическим средам и химикатам, используемым для микроэлектроники [Текст] / Ю.Н. Дьяков, А.В. Лукичев, Б.В. Тимофеев // Электронная промышленность. – 1986. – № 7. – С. 3–10.
9. 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., 11–14 октября 2005 г. (Proceedings of the 1st International Science and Practical Conference, 11.10–14.10.2005) / под ред. С.М. Карабанова. – Рязань : Поверенный, 2006. – С. 56–65.
10. 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.

11. Карабанов, С.М., Опыт использования рутениевого гальванопокрытия в производстве герконов [Текст] / С.М. Карабанов, А.Н. Быков // Электронная промышленность. – 2003. – № 4. – С. 37–42.
12. Коломыц, Э.Г. Эволюция конечных форм роста кристаллов в зависимости от вхождения среды в их состав [Текст] / Э.Г. Коломыц, Н.Н. Шефталъ // Acta phys. Acad. Sci. Hungar. – 1973. – Vol. 33, № 3–4. – С. 335–351.
13. Кудрявцев, Н.Т. Электролитические покрытия металлами [Текст]. – М. : Химия, 1979. – 352 с.
14. Мамонтов, Е.А.. Образование пор в начальный период электрокристаллизации меди на индифферентных подложках [Текст] / Е.А. Мамонтов, Л.А. Кубатова, А.П. Воленко // Защита металлов. – 1983. – Т. 19, № 6. – С. 971–974.
15. Поветкин, В.В. Структура электролитических покрытий [Текст] / В.В. Поветкин, И.М. Ковенский. – М. : Металлургия, 1989. – 136 с.
16. Процессы реального кристаллообразования [Текст] / Коллектив авторов. – М. : Наука, 1977. – 235 с.
17. Хольм, Р. Электрические контакты [Текст]. – М. : Иностранная литература, 1961. – 464 с.
18. 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, № 01-2003. – P. 1–28.
19. 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. – № 2. – P. 8–44.
20. 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, № 01-2020. – P. 1–17.

REFERENCES

1. Abramenko, Yu.M. *Trebovaniya k analizu i kontrolyu tekhnologicheskikh sred pri proizvodstve IET* [Text] [Requirements analysis and control of technological media in the production of EEP] / Yu.M. Abramenko, V.S. Bannikov, S.M. Bezruchko, G.P. Bening, B.S. Borisov, S.V. Kuz'min // Electronic industry. – 1986. – № 7. – P. 35–41.
2. Afinogenov, I.A. *Kommutatsionnaya tekhnika na osnove tekhnologiy MST* [Text] [Switching technology based on MCT] / 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] // Proceedings of the 3rd International Science and Practical Conference, 27.09–30.09.2011 / ed. by S.M. Karabanov ; JSC “RZMKP”. – Ryazan, 2011. – P. 126–131.
3. Arushanov, K.A. *Fraktal'nost' nitridnykh kontaktov* [Text] [The fractality of nitride contacts] / K.A. Arushanov, I.A. Zel'tser, Ye.N. Moos // Bulletin of Ryazan state University named after S.A. Esenin. – 2013. – № 1/38. – P. 148–155.
4. 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. – № 2. – P. 8–44.

5. 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, № 01-2003. – P. 1–28.
6. Bannikov, V.S. *Pribory kontrolya sodержaniya chastits v zhidkostyakh, primenyayemykh v proizvodstve IS* [Text] [The control devices of particles in liquids used in the production of IP] / V.S. Bannikov, S.M. Bezruchko, S.V. Kuz'min, O.V. Stepanishchev // Electronic industry. – 1986. – № 7. – P. 46–50.
7. D'yakov, U.N. *Sovremennyye trebovaniya k tekhnologicheskim sredam i khimikatam, ispol'zuyemym dlya mikroelektroniki* [Text] [Modern requirements to the technological environments and chemicals used for microelectronics] / U.N. D'yakov, A.V. Lukichev, B.V. Timofeyev // Electronic industry. – 1986. – № 7. – P. 3–10.
8. Ginberg, A.M. *Povysheniye antikorroziyonnykh svoystv metallicheskih pokrytiy* [Text] [Improve anti-corrosion properties of metallic coatings]. – Moscow : Metallurgy, 1984. – 168 p.
9. Gololobov, G.P. *Issledovaniye poverkhnosti magnitoupravlyayemykh kontaktov metodom atomno-silovoy mikroskopii* [Text] [The study of surface magnetic contacts by atomic force microscopy] / G.P. Gololobov, A.S. Aref'yev, V.R. Tregulov, I.G. Utochkin, O.V. Kireyeva // Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering Academy. – 2003. – № 13. – P. 66–69.
10. Gruyev, I.D. *Elektrokhimicheskiye pokrytiya izdeliy radioelektronnoy apparatury* [Text] [The electrochemical coating of electronic equipment] / I.D. Gruyev, N.I. Matveyev, N.G. Sergeyeva. – Moscow : Radio and Connection, 1988. – 403 p.
11. Karabanov, S.M. *Magnitoupravlyayemye germetizirovannyye kontakty (gerkony) i izdeliya na ikh osnove* [Text] [Sealed Reed Switches and Products on Basis Thereof] / S.M. Karabanov, R.M. Mayzel's, V.N. Shoffa. – Moscow : Intellect, 2011. – 408 p.
12. Karabanov, S.M., *Opyt ispol'zovaniya ruteniyevogo gal'vanopokrytiya v proizvodstve gerkonov* [Text] [Experience in the use of ruthenium plating in the manufacture of reed switches] / S.M. Karabanov, A.N. Bykov // Electronic industry. – 2003. – № 4. – P. 37–42.
13. 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, № 01-2020. – P. 1–17.
14. Khol'm, R. *Elektricheskiye kontakty* [Text] [The electrical contacts]. – Moscow : Foreign Literature, 1961. – 464 p.
15. Kolomyts, E.G. *Evolyutsiya konechnykh form rosta kristallov v zavisimosti ot vkhozheniya sredy v ikh sostav* [Text] [The evolution of the ultimate forms of crystal growth, depending on the occurrence of the environment in their composition] / E.G. Kolomyts, N.N. Sheftal' // Acta phys. Acad. Sci. Hungar. – 1973. – Vol. 33, № 3–4. – P. 335–351.
16. Kudryavtsev, N.T. *Elektroliticheskiye pokrytiya metallami* [Text] [Electrolytic coating of metals]. – Moscow : Chemistry, 1979. – 352 p.
17. Mamontov, E.A. *Obrazovaniye por v nachal'nyy period elektrokristallizatsii medi na indifferentnykh podlozhkakh* [Text] [The formation of pores in the initial period of electrocrystallization copper indifferent substrates] / E.A.

Mamontov, L.A. Kubatova, A.P. Volenko // Protection of metals. – 1983. – Vol. 19, № 6. – P. 971–974.

18. Povetkin, V.V. *Struktura elektroliticheskikh pokrytiy* [Text] [The structure of electrolytic coatings] / V.V. Povetkin, I.M. Kovenskiy. – Moscow : Metallurgy, 1989. – 136 p.

19. *Protsessy real'nogo kristalloobrazovaniya* [Text] [Processes of real crystal formation] / Collective of authors. – Moscow : Science, 1977. – 235 p.

20. Zel'tser, I.A. *Tekhnologicheskiye artefakty na stadii germetizatsii magnitoupravlyayemykh kontaktov* [Text] [Technological artifacts on stage sealing magnetically operated contacts] / I.A. Zel'tser, R.A. Nekrasov // *Magnitoupravlyayemyye kontakty (gerkony) i izdeliya na ikh osnove* [Reed Switches and Products on Basis Thereof]. – Proceedings of the 3rd International Science and Practical Conference, 27.09–30.09.2011 / ed. by S.M. Karabanov. – Ryazan : Attorney, 2006. – P. 56–65.

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

THE ANALYSIS OF FACTORS THAT DETERMINE CHEMICAL COMPOSITION AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF CONTACT SURFACES OF MEMS SWITCHES

The method of x-ray spectral microanalysis is used to investigate the chemical composition and morphological characteristics of contact surfaces of MEMS switches. The paper describes methods of localizing impurity and investigating technological medium. It also provides a mathematical model and investigates the connection between the porosity of electroplated coatings and the concentration of microparticles. The paper analyzes several types of impurities and provides a quantitative analysis of the characteristics of their surfaces. The paper maintains that copper and aluminum impurities on the surface of contacts results in increasing resistance and decreasing resources of equipment. The paper maintains that the chemical composition and morphological characteristics predetermine the amount and stability of resistance and hence define the efficiency and performance of MEMS switches.

microelectromechanical system, MEMS switch, chemical composition, morphology, contact surface, electrical resistance, x-ray spectral microanalysis, RSMA, surface impurity.

