

07

Исследование свойств контактных покрытий на основе наноразмерных пленок рутения для МЭМС-коммутаторов

© С.М. Карбанов, Н.А. Верлов, Д.В. Суворов,
Г.П. Гололобов, Е.В. Сливкин

Рязанский государственный радиотехнический университет
E-mail: dmitriy_suvorov@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 декабря 2015 г.

Приведены результаты исследования коммутационных свойств контактных покрытий на основе наноразмерных пленок рутения, полученных методом электрохимического осаждения. Установлены закономерности изменения контактного сопротивления в зависимости от числа циклов коммутации при различных толщинах и шероховатости покрытия. По результатам эксперимента были установлены оптимальные параметры контактного покрытия, необходимые для обеспечения минимальной величины контактного сопротивления МЭМС-коммутатора (микроэлектромеханического коммутатора) в установившемся режиме.

Одним из новых направлений в области коммутационной техники являются магнитоуправляемые МЭМС-коммутаторы (микроэлектромеханические коммутаторы). Такие коммутаторы не требуют электропитания в режиме ожидания, обеспечивают возможность прямой коммутации электрического тока, имеют малые размеры, а форма корпуса позволяет использовать их в SMT-технологии (Surface Mount Technology). В [1–3] приведены результаты исследований по созданию магнитоуправляемых МЭМС-коммутаторов, которые показывают, что они являются перспективной альтернативой магнитоуправляемым контактам (герконам) и датчикам Холла.

В ряде применений магнитоуправляемых МЭМС требуется высокая стабильность контактного сопротивления в течение срока службы (10^7 – 10^9 циклов коммутации). Это особенно актуально при их использовании в имплантируемых Био-МЭМС-устройствах и кардиостимуляторах. Важнейшим конструкционным элементом магнитоуправляе-

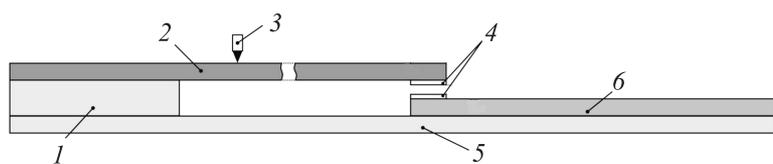


Рис. 1. Макет магнитоуправляемого МЭМС-коммутатора: 1 — изолятор (стеклотекстолит FR4), 2 — подвижная балка (пермаллой Fe–Ni, Cu), 3 — прижимной винт, 4 — контактные площадки, 5 — основание (стеклотекстолит FR4), 6 — медный проводник.

ных МЭМС-коммутаторов является контактное покрытие. От свойств контактного покрытия зависят величина и стабильность контактного сопротивления и, следовательно, срок службы изделия в целом.

В МЭМС-коммутаторах, представленных в [2,3], в качестве контактного покрытия были использованы пленки рутения, нанесенные методом PVD (Physical Vapour Deposition) непосредственно на поверхность пермаллоевой балки (верхний контакт) и золотого проводника (нижний контакт). Толщина контактных покрытий коммутаторов составляла величину порядка 100 нм, шероховатость — менее 10 нм. В работе [4] приведены результаты исследования контактных покрытий в магнитоуправляемых герметизированных контактах, полученных методом электрохимического осаждения. Пленки рутения, получаемые этим способом, устойчивы к электроэрозии и имеют твердость большую, чем твердость металлургического рутения [5]. Однако исследования [4] были проведены для покрытий толщиной более 1000 нм, что обусловлено их использованием при коммутации больших токов (более 0.1 А), характерных для магнитоуправляемых контактов.

В данной работе исследования свойств контактного покрытия проводились на специально разработанном макете, моделирующем работу магнитоуправляемого МЭМС-коммутатора. Макет МЭМС-коммутатора (рис. 1) в целом повторял конструктивное решение, используемое в [1–3].

Пленки рутения, образующие контактные площадки, наносились на пермаллоевую фольгу и медный проводник методом электрохимического осаждения, по методике, подробно описанной в [5]. Толщину

пленок изменяли в пределах 100-300 nm путем варьирования времени осаждения. Шероховатость покрытия контролируемо изменялась в пределах 30–60 nm путем изменения режимов электрохимического травления подложки. Исследование эрозийных процессов проводилось в режиме коммутации резистивной нагрузки при токе 1 mA, рабочем напряжении 5 V и частоте коммутации — 1 kHz, что является типовым режимом работы МЭМС-коммутаторов. Испытания контактных покрытий завершались после $3 \cdot 10^6$ циклов коммутации. В течение каждого из циклов коммутации измерялось контактное сопротивление.

По динамике изменения контактного сопротивления R_c в процессе коммутации проводились оценка свойств контактного покрытия, определение устойчивости контактов к эрозии и изменение площади контактирования со временем.

Измерение толщины осаждаемых пленок осуществлялось методом атомно-силовой микроскопии с помощью сканирующего зондового микроскопа NTEGRA по методике, указанной в [6]. Шероховатость поверхности определялась с помощью программного обеспечения обработки изображений NOVA сканирующего зондового микроскопа последующей формуле:

$$h = \left(\frac{1}{N^2} \right) \sum_{i,j=1}^N |z(i, j)|.$$

На рис. 2 представлена зависимость динамики изменения контактного сопротивления R_c с ростом числа циклов коммутации при разных значениях начального уровня шероховатости h_0 контактирующей поверхности для различных толщин покрытия — 100, 200 и 300 nm. Исследования показали, что на первой стадии увеличение числа коммутаций сопровождается падением значения контактного сопротивления R_c . Далее после достижения R_c некоторого минимального значения начинается его рост, замедляющийся с дальнейшим увеличением циклов коммутации. Видно, что толщина покрытия в данном электрическом режиме коммутации не оказывает существенного влияния на величину электрического сопротивления, поскольку эрозии подвержены лишь приповерхностные слои и энергетики коммутационных процессов недостаточно для разрушения всей толщины пленки.

Полученные зависимости были обработаны, и на их основе построены зависимости контактного сопротивления R_c от уровня начальной шероховатости покрытия после различного числа циклов коммутации

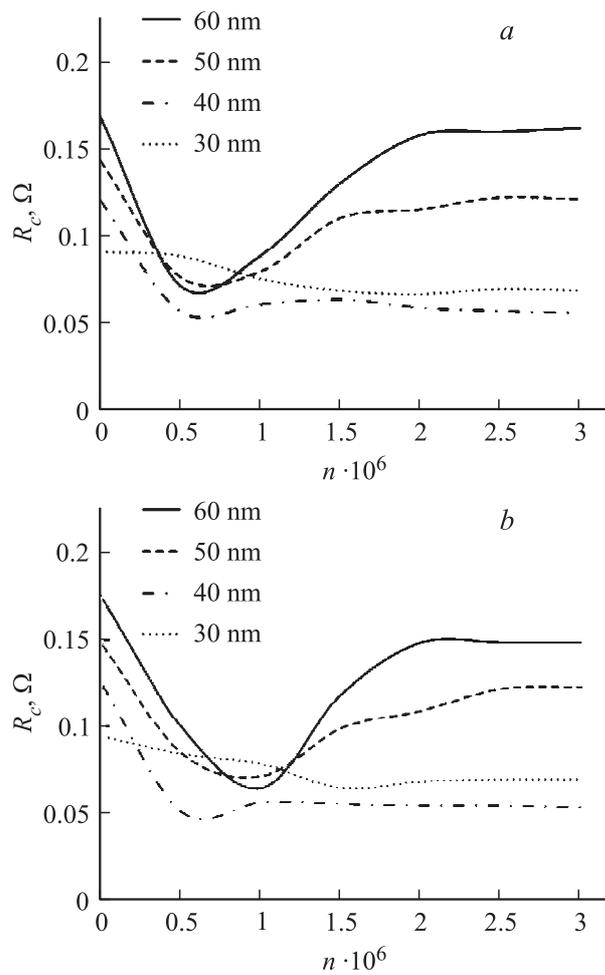


Рис. 2. Зависимость контактного сопротивления (медиана) от числа циклов коммутации при разных значениях начального уровня шероховатости h_0 контактирующей поверхности для различных толщин рутениевого покрытия: *a* — 100 nm; *b* — 200 nm; *c* — 300 nm.

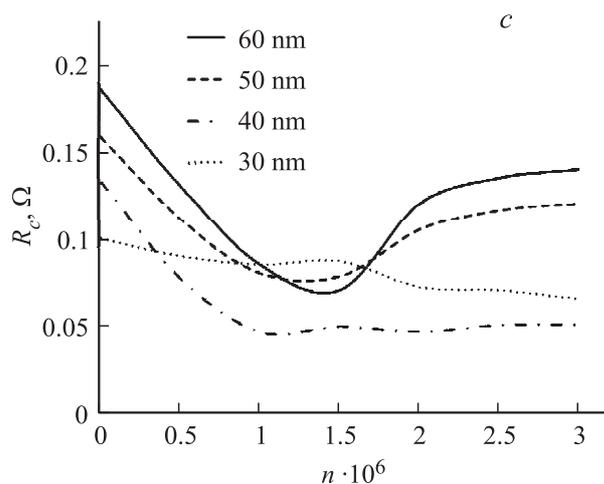


Рис. 2 (продолжение).

(рис. 3, а). До начала коммутационных испытаний кривая, описывающая зависимость контактного сопротивления от шероховатости, практически линейно возрастает, что хорошо известно. В процессе коммутации сопротивление уменьшается, причем минимальное контактное сопротивление достигается при уровне начальной шероховатости рутениевого покрытия 40 нм.

Представленные экспериментальные данные показывают, что минимальный уровень контактного сопротивления R_c относительно начального значения пропорционален начальной шероховатости поверхности h_0 : при шероховатости поверхности 60 нм минимальная величина контактного сопротивления в 2–2.5 раза меньше начального значения, при h_0 , равной 20 нм, сопротивление уменьшается лишь в 1.4–1.5 раза.

Представленная форма зависимости контактного сопротивления от числа циклов коммутации (рис. 2) определяется двумя противоположно действующими факторами:

— увеличением площади контактирования за счет электромеханического взаимодействия поверхностей, что приводит к быстрому снижению контактного сопротивления на начальной стадии;

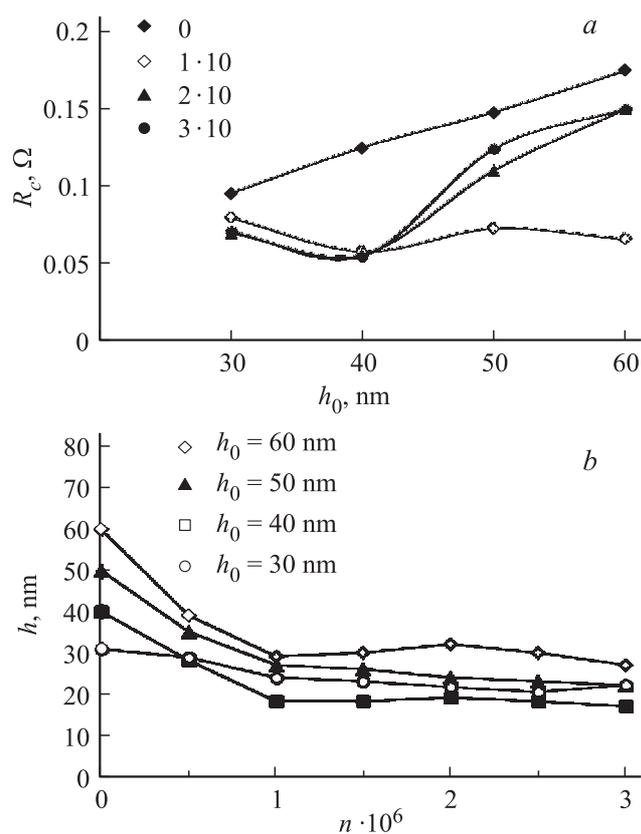


Рис. 3. Изменение характеристик контактного покрытия в процессе коммутации при толщине рутениевого покрытия 200 нм: *a* — зависимость контактного сопротивления от начальной шероховатости поверхности при различном числе циклов коммутации; *b* — динамика изменения шероховатости поверхности контактного покрытия в ходе коммутаций.

— эрозионными процессами, что приводит к постепенному росту контактного сопротивления со временем.

Рост толщины пленки рутения приводит к некоторому снижению интенсивности процессов электромеханической эрозии и сдвигу точки

минимального контактного сопротивления вправо и соответственно замедлению перехода в установившуюся стадию. Очевидно, это связано с тем, что более тонкая пленка рутения легче подвергается механическому воздействию, поскольку она нанесена на пластичный подслоя золота [7].

Далее в работе проводилось исследование изменения шероховатости контактных площадок с течением времени в процессе коммутации. При этом использовались 6 идентичных контакт-деталей с одинаковыми характеристиками рутениевого покрытия, нанесенного в одном технологическом цикле. Через каждые $5 \cdot 10^5$ циклов коммутации одна контактная группа снималась с испытаний, и выполнялось измерение ее шероховатости. Динамика уменьшения шероховатости контактных площадок в процессе коммутации представлена на рис. 3, б.

Видно, что в процессе коммутации шероховатость поверхности контактов уменьшается. При этом чем больше уровень начальной шероховатости, тем более существенно изменяется шероховатость поверхности. Из поставленного эксперимента видно, что минимальная величина шероховатости поверхности достигается при начальной h_0 , равной 40 нм.

Основываясь на полученных результатах и сопоставляя их с литературными данными [5], можно сделать заключение о том, что изменение R_c связано с увеличением общей площади контактирования (токопрохождения). Представленные результаты исследования показывают, что существует оптимальная величина шероховатости поверхности, при которой обеспечивается минимальная величина контактного сопротивления в установившемся режиме. Для представленных условий эксперимента оптимальная шероховатость рутениевого покрытия составляет порядка 40 нм.

Анализ изменения контактного сопротивления в процессе коммутации показывает, что с увеличением начальной шероховатости h_0 в диапазоне 30–40 нм, достигаемая площадь контактирования становится больше начального значения. Это обусловлено модификацией поверхности и формированием комплементарного рельефа на поверхности контактов.

В результате выполненных работ было установлено, что, изменяя уровень шероховатости поверхности контактов, можно обеспечить минимизацию контактного сопротивления в долговременном режиме.

Широко используемая PVD-технология, т.е. метод магнетронного напыления, обеспечивает управление уровнем шероховатости лишь в диапазоне 10–20 nm, таким образом, это делает технологию электролитического осаждения наиболее предпочтительной для осаждения долговечных контактных покрытий с малым уровнем контактного сопротивления.

Полученные результаты могут быть использованы для новых подходов в технологии создания МЭМС-коммутаторов с высоким сроком службы, при разработке методики специализированной тренировки поверхности контактов, а также для повышения стабильности и долговечности различных приборов на основе сухого контакта.

Список литературы

- [1] *Vincent M., Chiesi L., Fourrier J.C., Garnier A., Grappe B., Lapiere C., Coutier C., Samperio A., Paineau S.* // 54th IEEE Holm Conference. Orlando, October 27–29, 2008. P. 145–150.
- [2] *Coutier C., Chiesi L., Garnier A., Fourrier J.C., Lapière C., Trouillon M., Grappe B., Vincent M., Samperio A., Borel S., Dieppedale C., Lorent E., Sibuet H.* // Proc. 15th International Conference Transducers. 2009. Denver, June 21–25, 2009. P. 861–864.
- [3] *Карабанов С.М., Карабанов А.С., Суворов Д.В., Сажин Б.Н., Крутин А.А., Гранпе Б., Кутьер К., Сибьют Г.* // Электронная промышленность. 2009. № 4. С. 51–58.
- [4] *Arushanov K.A., Drozdov M.N., Karabanov S.M., Zeltser I.A., Tolstogouzov A.* // Appl. Surf. Sci. 2012. V. 265. 15 January 2013. P. 642–647.
- [5] *Карабанов С.М., Локитанова О.Г.* Электролитические покрытия магнитоуправляемых герметизированных контактов (герконов). Рязань, 2011. 245 с.
- [6] *Гололобов Г.П.* Исследование структуры покрытия и морфологии контактирующей поверхности магнитоуправляемых контактов методом атомно-силовой микроскопии: Дис. канд. техн. наук. Рязань, 2006. 149 с.
- [7] *Карабанов С.М., Локитанова О.Г.* // Журнал прикладной химии. 2008. Т. 81. В. 6. С. 961–964.