

ФРАКТАЛЬНОСТЬ НИТРИДНЫХ КОНТАКТОВ

Методами атомно-силовой и оптической микроскопии изучены железоникелевые контактные поверхности после ионно-индуцированной модификации в пульсирующем разряде азота. Показана зависимость фрактальной размерности поверхностных гетерогенных структур от длительности ионно-плазменной обработки и мощности режимов коммутации. Фрактальная размерность позволяет численно характеризовать эволюцию рельефа и оптимизировать режимы получения коррозионно- и эрозионно-устойчивых контактов с высокой проводимостью.

атомно-силовой, ионно-индуцированный, разряд, геркон, контакт, нитрид, фрактал, поверхность.

Известно, что фрактальный анализ в течение последних лет широко используется в материаловедении для исследования эволюции морфологии поверхности под действием концентрированных потоков энергии [2; 4]. Такого рода воздействия применяются для модификации свойств поверхности и приповерхностных слоев, например, для нитрирования, карбонитрирования, борирования металлов.

Одним из наиболее перспективных способов повышения коррозионной и эрозионной устойчивости поверхности металлов является ионное азотирование в пульсирующей плазме тлеющего разряда.

Идея применения этого метода для создания контактных поверхностей герконов, альтернативных гальванопокрытиям из драгоценных металлов, нашла свое экспериментальное подтверждение в цикле работ, ссылки на которые можно найти в работе [5].

Процесс ионно-плазменной обработки железоникелевых контактов в пульсирующей плазме азота происходит непосредственно в оболочке геркона [5]. Ограниченность в объеме, импульсный характер разряда при высокой концентрации в пространстве и во времени потоков подводимой энергии означает неравновесность плазменной среды и ионно-индуцированных в ней гетерогенных поверхностных контактных структур. Процессы, происходящие при коммутационных испытаниях герконов [5], также из-за ограниченности газового объема являются термодинамически неравновесными, а ионные потоки формируют неравновесные структуры. Согласно [3] термодинамическая неравновесность процессов обработки может приводить к фрактальности формируемых ими структур.

Цель данной работы состояла в применении фрактального анализа в сочетании с атомно-силовой микроскопией для исследования влияния параметров

ионно-плазменной обработки, режимов коммутации на состояние шероховатости и свойства контактных поверхностей герконов. Настоящие исследования проводятся впервые.

Опытными образцами являлись герконы МКА-14108, конструктивно выполненные на базе серийных приборов МКА-14103 [1]. Особенность конструкции этих герконов по сравнению с серийными приборами – в отсутствии золоторутениевых гальванопокрытий на пермалловых контактах.

Контактные пружины штамповались из пермалловой проволоки марки «Dilaton», обезжиривались и отжигались в атмосфере водорода. Проволока вытягивалась из катанки пермаллоя (52 % Ni, 48 % Fe) вакуумной плавки. В качестве газового наполнения при герметизации использовался спектрально чистый (99,999 %) азот с давлением в оболочке геркона $p = 33 \cdot 10^3 - 40 \cdot 10^3$ Па.

Ионно-плазменное воздействие контактных поверхностей проводилось высоковольтными импульсными разрядами при разомкнутых контактах (зазор $d = 27-30$ мкм). Использовались два режима, отличающиеся электрофизическими условиями разряда и, как следствие, степенью нагрева подложки.

Первый режим – режим ионного азотирования – обеспечивает диффузионное насыщение приповерхностных слоев контактов атомами азота, формирование на контактах азотированного слоя с заданными контактными свойствами. Оптимизация свойств упрочиваемой поверхности, ее коррозионная и эрозионная стойкость, электропроводность обеспечиваются за счет необходимого сочетания нитридного и диффузионного слоев, которые образуются в основном материале. В зависимости от химического состава нитридный слой является либо γ' -фазой (Fe_4N) либо ε -фазой ($Fe_{2,3}N$).

Во втором режиме реактивного катодного распыления на поверхности контактов формируется пленка, состоящая из нитридов железа и никеля. Эти покрытия и ионно-азотированные слои удовлетворяют современным требованиям к контактным поверхностям герконов. Длительность обоих режимов (при однократной обработке) составляла 30 с.

Процессы азотирования и напыления происходят непосредственно в самом герконе. Стеклобаллон выполняет функцию рабочей камеры, а контактные детали попеременно служат анодом и катодом.

Подробное описание процессов обработки и испытаний данных типов герконов приведено в работе [5].

Образцы после обработок высоковольтными разрядами подвергались коммутационным испытаниям. Измерения сопротивления, напряжения пробоя герконов и коммутационные испытания на безотказность проводились с применением оборудования и методик, представленных в работе [1].

О морфологии модифицированной поверхности судили по результатам атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью зондовой нанолaborатории NTEGRA. Для лучшего анализа полученных двумерных структур их изображе-

ния были обработаны в режиме «Local Equilization», который позволяет контрастировать тонкую структуру поверхностных объектов.

Фрактальная размерность определялась, а затем усреднялась по четырем методам: подсчет кубов, триангуляция, декомпозиция и спектр мощности. Полученные при этом данные сопоставлялись с результатами измерения ряда характеристик, в частности, напряжения пробоя и переходного контактного сопротивления.

Ионно-азотированные слои. Исследовались зависимости фрактальной размерности, сопротивления, напряжения пробоя герконов с ионно-азотированными слоями от длительности ионного воздействия (с учетом многократности воздействия).

После различных по длительности обработок на рисунке 1 представлены 2D-изображения контактных поверхностей и графики названных выше зависимостей.

В результате ионной бомбардировки на поверхности образуются поверхностные поры. Концентрация их, как видно из рисунка 1b – 1d возрастает с увеличением длительности обработки. Развитие пор завершается ростом на их дне конических выступов.

Полученные на рисунке 1e зависимости указывают на инвариантность фрактальной размерности, сопротивления, напряжения пробоя герконов к изменению длительности обработки в диапазоне 30–100-кратного воздействия. Контактные поверхности после 30–100-кратной обработки обнаруживают самоподобные свойства. Все полученные в этих режимах ионно-азотированные слои инвариантны от длительности обработки и обладают всеми необходимыми для стабильной работы геркона электрическими, коррозионными и эрозионными свойствами. При этом 30-кратная обработка является минимальной по времени, а поэтому наиболее оптимальной с точки зрения практического применения. Таким образом, фрактальная размерность дает численную оценку не только шероховатости поверхности, но и всей обработки в целом, способствуя тем самым ее оптимизации.

Покрyтия, полученные методом реактивного катодного распыления. Исследовалось влияние величины мощности режима коммутации на фрактальную размерность, среднюю квадратичную шероховатость и другие характеристики рельефа контактной поверхности.

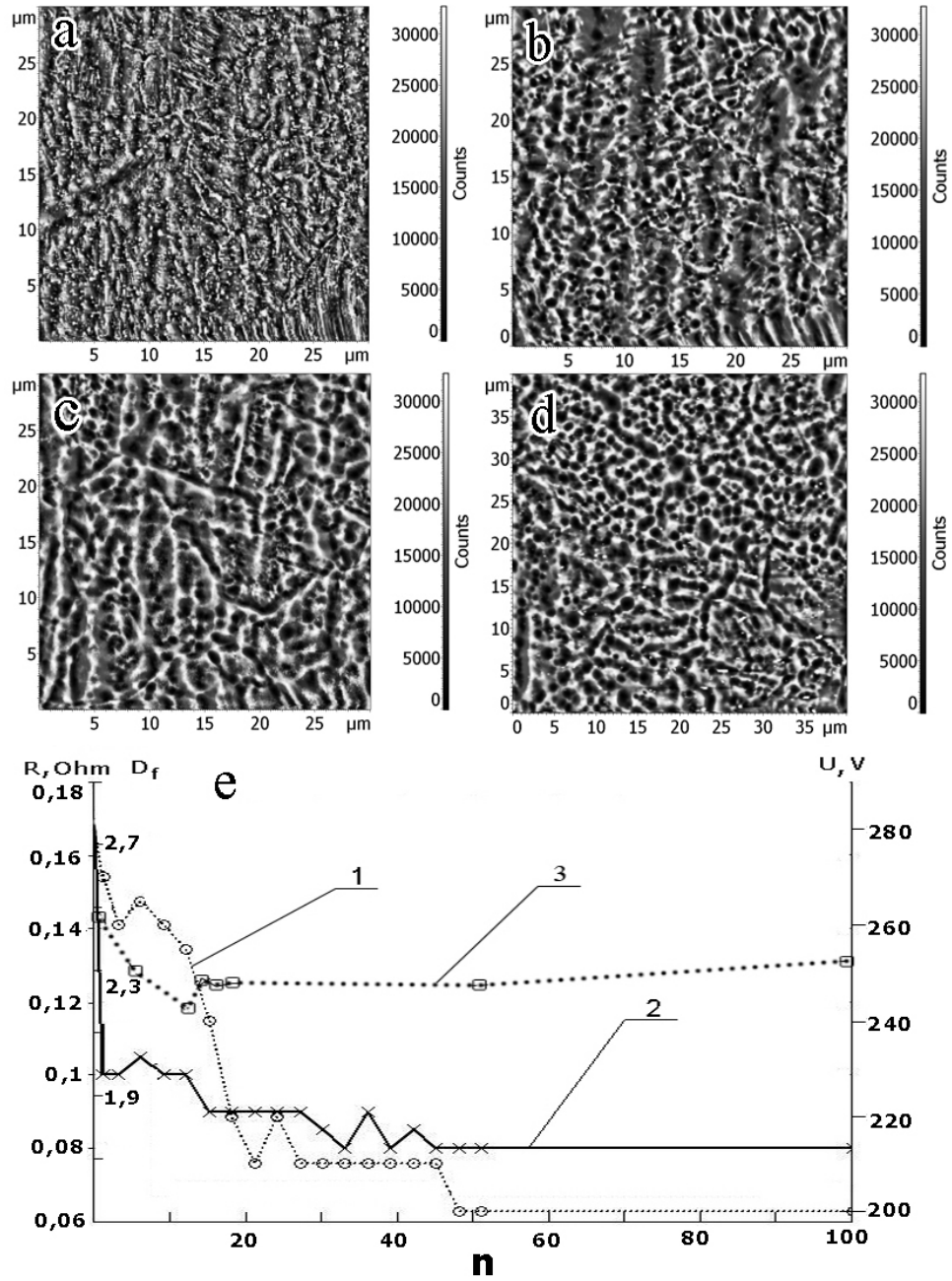


Рис. 1. 2D АСМ-изображение контактной поверхности: а – без обработки, б – 18-кратная обработка, с – 51-кратная обработка, d – 100-кратная обработка; е – зависимости сопротивления R, напряжения пробоя U, усредненной фрактальной размерности S_f геркона МКА-14108 от количества обработок n (R и U усреднялись по медиане; количество образцов в партии – 100 шт.)

Испытания опытных образцов на безотказность проводились по методике с переменным температурным режимом: 1/4 наработки при температуре 125 °С + 1/4 в нормальных условиях + 1/4 наработки при температуре 125 °С + 1/4 в нормальных условиях с двухчасовой выдержкой герконов в замкнутом состоянии перед коммутацией. Критерии отказа – неразмыкание контактов или сопротивление $R > 0,1 U/I$, где U и I – коммутируемые напряжение и ток. Результаты сравнительных испытаний опытных образцов и серийно выпускаемых герконов представлены на рисунке 2.

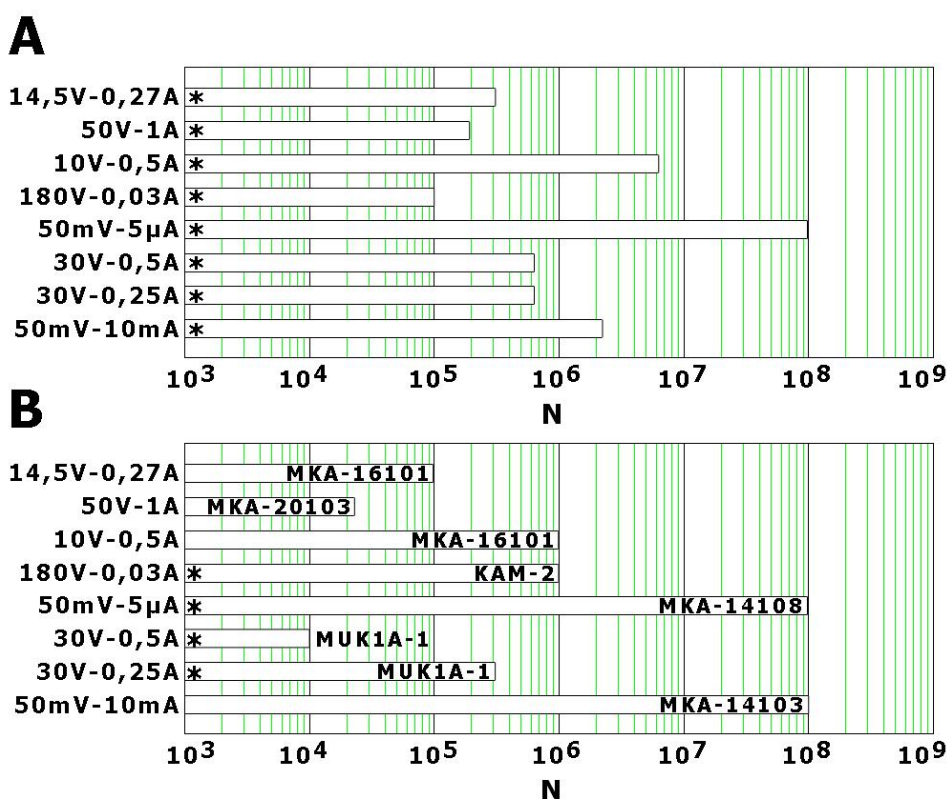


Рис. 2. Нарработка (количество срабатываний при безотказной работе – N) опытных образцов (А) и серийно выпускаемых герконов (В) в различных режимах коммутации (* – переменный температурный режим коммутации, без * – коммутация в нормальных условиях)

Из их рассмотрения видно, что герконы, изготовленные по ионно-плазменной технологии в режиме реактивного катодного распыления, в основном превосходят по длительности безотказной работы серийно выпускаемые герконы с контактными гальванопокрытиями из драгоценных металлов.

На рисунке 3 представлены АСМ-изображения контактной поверхности и графики зависимостей величины фрактальной размерности и средней квадратичной шероховатости от величины мощности режима коммутации.

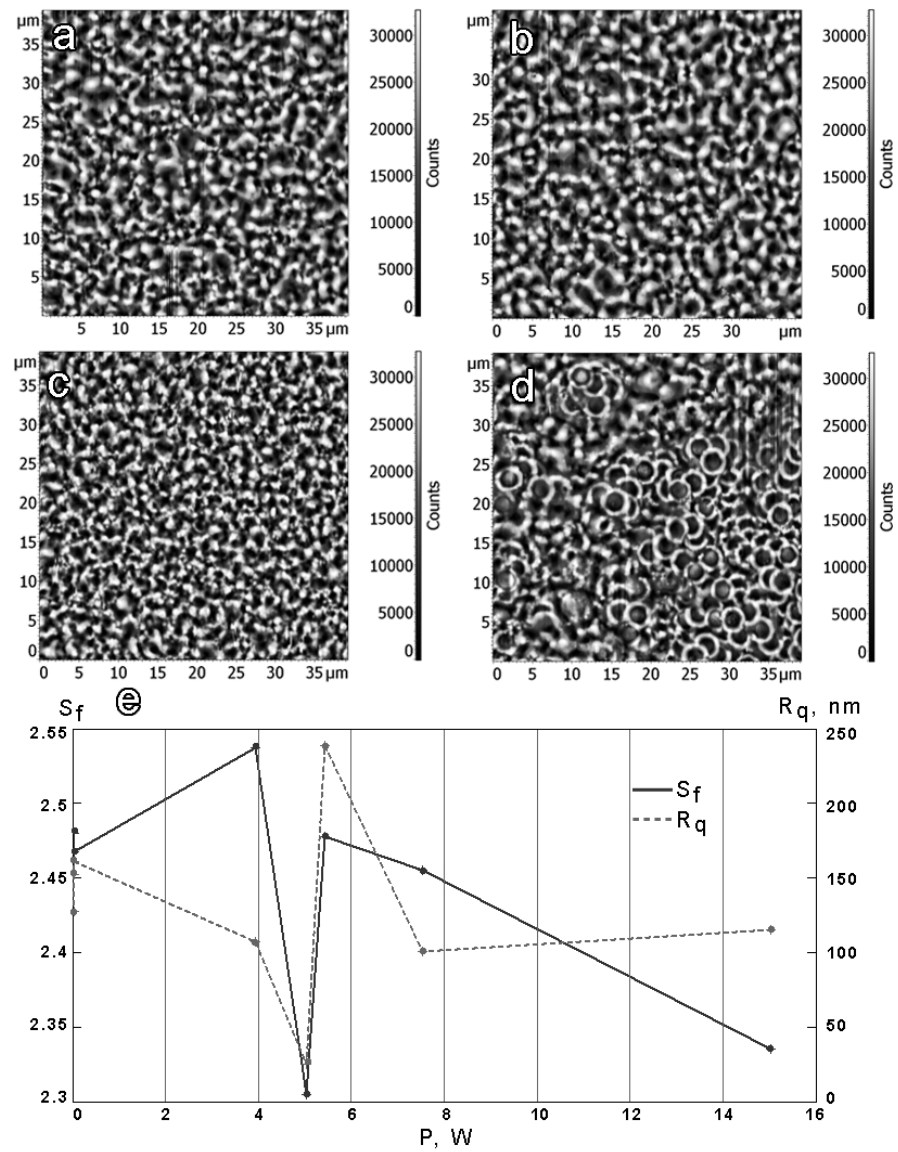


Рис. 3. 2D АСМ-изображение контактной поверхности после обработки и коммутации: а – без коммутации, б – режим 50 мВ – 10 мА ($P = 0,0005 \text{ Вт}$), с – 180 В – 0,03 А ($P = 5,4 \text{ Вт}$), д – 30 В – 0,5 А ($P = 15 \text{ Вт}$); е – зависимости усредненной фрактальной размерности S_f и средней квадратичной шероховатости R_q от величины мощности P режима коммутации

При рассмотрении изображений поверхности и графиков на рисунке 3 видно, что рельеф поверхности претерпевает существенные изменения с ростом мощности режима коммутации. И если в микрорежиме (рис. 3b) эти изменения малозаметны, то, начиная примерно с $5,4 \text{ Вт}$ (режим $180 \text{ В} - 0,003 \text{ А}$), изменения морфологии становятся существенными (рис. 3 с, d, e). Так, например, при коммутации в режиме $30 \text{ В} - 0,5 \text{ А}$ за счет теплового действия дуги размыкания [1] на поверхности контактов образуются конусообразные поры глубиной 50 нм и шириной $2 \text{ } 500 \text{ нм}$ (рис. 3d), которые, как показали испытания, не препятствуют размыканию контактов.

С увеличением мощности коммутации, начиная примерно с 4 Вт (режим $14,5 \text{ В} - 0,27 \text{ А}$), наблюдается синхронный спад величины значений фрактальной размерности S_f и средней квадратичной шероховатости R_q , которые при 5 Вт (режим $10 \text{ В} - 0,5 \text{ А}$) достигают минимума, затем при $5,4 \text{ Вт}$ (режим $180 \text{ В} - 0,03 \text{ А}$) возрастают, а потом снова начинают убывать (рис. 3е).

Таким образом, полученные результаты указывают на перспективность применения метода атомно-силовой микроскопии в сочетании с фрактальным анализом и измерением электрофизических параметров герконов для численной оценки эволюции рельефа и оптимизации режимов получения коррозионно- и эрозионно-устойчивых контактов с высокой проводимостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карабанов, С.М. Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе [Текст] / С.М. Карабанов, Р.М. Майзельс, В.Н. Шоффа. – Долгопрудный : Интеллект, 2011. – 408 с.
2. Попов, В.Л. Статистика длин и зависимость суммарной длины контактов от нормальной силы для фрактальных поверхностей с различным индексом Хирша [Текст] / В.Л. Попов, А.Э. Филиппов // Письма в ЖТФ. – 2008. – Вып. 18. – Т. 34. – С. 47–53.
3. Потапов, А.А. Исследование микрорельефа обработанных поверхностей с помощью методов фрактальных сигнатур [Текст] / А.А. Потапов [и др.] // Журнал технической физики. – 2005. – Вып. 5. – Т. 75. – С. 28–45.
4. Шугуров, А.Р. Фрактальный анализ эволюции поверхности трения гальванических покрытий AuNi [Текст] / А.Р. Шугуров [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2012. – Вып. 10. – Т. 38. – С. 70–78.
5. Arushanov, K.A. New technology of ion-plasma modification of the contact surfaces of reed switches in oscillatory [Text] / K.A. Arushanov [etc.] // J. Phys. : Conf. Ser. – 2012. – Vol. 345. – № 012003. – P. 1–28.

K.A. Arushanov, I.A. Zeltser, E.N. Moos

THE FRACTAL NATURE OF NITRIDE CONTACTS

Iron-nickel contact surfaces subjected to ion-induced surface modification by means of pulsed nitrogen discharge are investigated by atomic-force microscopy and optical microscopy.

It is maintained that the fractal dimension of heterogeneous surfaces depends on the time of ion-plasma surface treatment and on the rate of switching modes. Surface fractal dimension quantitatively characterizes relief evolution and optimizes corrosion-resistant and erosion-resistant contact materials of high conductivity.

atomic force, ion-induced, charge, reed switch, contact, nitride, fractal, surface.