

МИКРОННАЯ И СУБМИКРОННАЯ СТРУКТУРА ОТПЕЧАТКОВ ТОКОВЫХ КАНАЛОВ НА ЭЛЕКТРОДЕ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ПРИ ИСКРОВОМ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ В ПРОМЕЖУТКЕ ОСТРИЕ – ПЛОСКОСТЬ

MICRON AND SUB-MICRON STRUCTURE OF CURRENT CHANNELS IMPRINTS ON STAINLESS STEEL ELECTRODE AT AIR SPARK DISCHARGE IN POINT-PLAIN GAP

В. И. Карелин, А. А. Тренькин, Ю. М. Шибитов, О. М. Блинова
V. I. Karelin, A. A. Trenkin, Yu. M. Shibitov, O. M. Blinova

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
 пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия
 Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

Методом автографов исследована микроструктура отпечатков токовых каналов искрового разряда субмикросекундного диапазона в воздухе в промежутке «острие – плоскость» при положительной и отрицательной полярностях острия. Установлено, что при обеих полярностях отпечатки (автографы) токовых каналов диаметром 0,2–0,5 мм на поверхности плоского электрода представляют собой области, содержащие морфологические изменения в виде совокупности микрократеров диаметром 0,3–5 мкм и дорожек. Поверхностная концентрация микрократеров составляет $(2-5) \cdot 10^4 \text{ мм}^{-2}$. Установлено, что все микрократеры расположены на дорожках, образующих сложную сетчатую структуру. Обнаружена внутренняя субмикронная структура микрократеров и дорожек.

Using an autograph method, the authors studied microstructure of current channels imprints of sub-microsecond spark discharge in the air in the gap «point-plain» at positive and negative polarities of the «point» electrode. It was found that at both polarities the imprints (autographs) of the current channels of 0,2–0,5 mm in diameter on a surface of the plain electrode represent themselves the areas, which contain morphological changes in the form of clusters of microcraters of 0,3–5 μm in diameter and tracks. Surface concentration of the microcraters is $(2-5) \cdot 10^4 \text{ mm}^{-2}$. It was found that all microcraters were located on the tracks that form complicated grid structure. Internal sub-micron structure of the microcraters and tracks was found.

Ключевые слова: газовый разряд, пространственная структура, автограф токового канала, сканирующая электронная микроскопия, микроструктура, микроканалы.

Введение

Образование искрового канала сопровождается резким ростом тока, нагревом и испарением материала электродов и образованием эрозионных пятен на катоде и аноде. Исследование микроструктуры электродных пятен (отпечатков) представляет интерес, как вследствие широкого практического применения высоковольтных искровых разрядов, так и с целью получения фундаментальных знаний о газоразрядных явлениях.

Вместе с тем, в основной своей массе экспериментальные исследования преимущественно направлены на изучение катодных и анодных пятен вакуумной дуги, где достаточно давно уста-

новлено существование пятен диаметрами 1–100 мкм, проявляющих сложную динамику движения, а также предложено множество моделей и гипотез, объясняющих те или иные аспекты данного явления [1–4].

Количество экспериментальных работ, посвященных исследованиям микроструктуры отпечатков токовых каналов в микросекундных и наносекундных разрядах в плотных газах, значительно меньше.

Так, в [4] приведены данные исследований разряда в воздухе в геометрии острие-плоскость при подаче на промежуток импульсов напряжения наносекундной длительности. Методами электронной микроскопии было установлено, что эро-

зия поверхности острья-катода имеет вид сгруппированных оплавленных шариков диаметром 1–2 мкм, которые чаще всего плотно упакованы в области размером 20–30 мкм. На острье-аноде следы эрозии распределены равномерно по всей поверхности. Однако, микроструктура поверхности плоского электрода в данной работе не исследовалась.

В работе [5], посвященной исследованию слабоботочного искрового разряда в геометрии острье (катод) – плоскость в аргоне, указано, что микроструктура отпечатка канала на обоих электродах представляет собой скопления оплавленных шарообразных форм диаметром 3–10 мкм, локализованных в области 30–40 мкм. Следует, однако, отметить, что в данной работе отсутствует информация о методах исследования микроструктуры и не приведено фотографий, иллюстрирующих представленные результаты.

Результаты подробных исследований микроструктуры в субмикросекундных и наносекундных разрядах в воздухе в режиме однократных импульсов представлены в работах [6–14]. Автографы таких разрядов на поверхности плоского электрода представляли собой скопления (до 1000 и более) эрозионных микрократеров диаметрами 1–30 мкм примерно равномерно распределенных по автографу. Поверхностная концентрация микрократеров составляла $2 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^3 \text{ мм}^{-2}$.

Проведенные к настоящему времени исследования позволяют заключить, что при разрядах в плотных газах микроструктура отпечатков каналов на поверхности плоских электродов присутствует в довольно широком диапазоне экспериментальных условий: различные типы газовых разрядов; различные геометрии разрядного промежутка и материалы электродов, а также их покрытия; различные газы и их смеси; различные уровни напряжений и токов наносекундного и субмикросекундного диапазонов длительности [5–14].

Следует, однако, отметить, что в основной массе исследований микроструктуры разрядов, формируемых в резко-неоднородной геометрии, плоский электрод являлся анодом. Исключение составляет работа [10], где при исследовании разрядов в геометрии острье – плоскость, микроструктура на поверхности плоского электрода обнаружена, как при отрицательной, так и при положительной полярностях острья. Это свидетельствует о том, что наличие микроструктуры не зависит также и от полярности электрода с малым радиусом кривизны. Вместе с тем, следует заключить, что детальным исследованиям микрострук-

туры при положительной полярности острья до настоящего времени не уделялось достаточного внимания.

В настоящей работе исследована микроструктура катодных и анодных пятен высоковольтного субмикросекундного искрового разряда в воздухе атмосферного давления в промежутке острье – плоскость при положительной и отрицательной полярностях острья.

Методика экспериментальных исследований

Эксперименты проводились на стенде, включающем генератор импульсов напряжения (ГИН), разрядный промежуток и диагностическую аппаратуру (рис. 1).

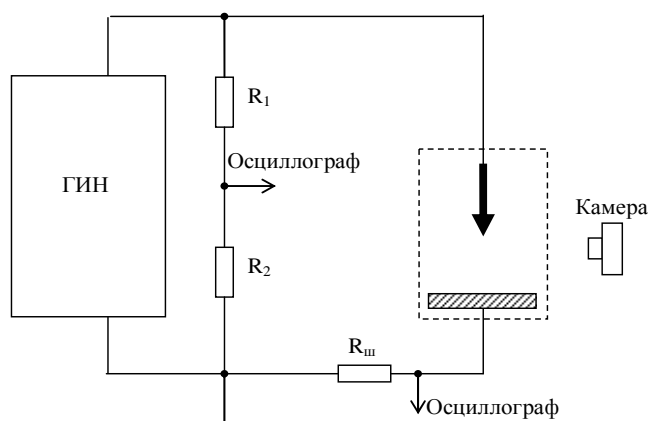


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: ГИН – генератор импульсов напряжения, R_1/R_2 – резистивный делитель напряжения, $R_{ш}$ – резистивный токовый шунт, камера – цифровой фотоаппарат

Разрядный промежуток образован заостренным стержнем длиной 50 мм и диаметром 15 мм и пластиной размером 80×50 мм толщиной 1 мм. Пластина изготовлена из нержавеющей стали марки 316L, острье из алюминиевого сплава. Угол при вершине острья 80° , радиус кривизны 0,2 мм. Межэлектродное расстояние составляло 3 мм.

Вне зависимости от полярности приложенного к промежутку напряжения в работе исследовались отпечатки на поверхности плоского электрода. Рабочая поверхность электрода предварительно полировалась на наждачной бумаге вплоть до P2500 (по ISO-6344), затем полировалась на сукне алмазной суспензией с дисперсностью 9 мкм и далее на бархате алмазной суспензией с дисперсностью 3 мкм.

Для получения автографов использовалась одна и та же пластина, что обеспечивало идентич-

ность материала электрода и качества обработки его поверхности и позволяло исключить влияние различия этих факторов при воздействии разрядов в разных импульсах. В каждом импульсе сдвижкой пластины относительно острия осуществлялось пространственное разнесение отпечатков.

ГИН включал кабельную линию из 6 параллельно соединенных отрезков коаксиальных кабелей длиной 20 м с волновым сопротивлением 50 Ом каждый, разрядник и трансформатор. Трансформатор выполнен на 6 отрезках коаксиальных кабелей длиной 20 м с волновым сопротивлением по 50 Ом. Для зарядки ГИН использовался биполярный источник. Энергоемкость генератора ≈ 1 Дж.

В зависимости от полярности зарядного напряжения ГИН обеспечивал на острие импульсы напряжения положительной или отрицательной полярности. Для обеих полярностей амплитуда напряжения составляла примерно 20 кВ. Длительность фронта напряжения 5...10 нс. После пробоя промежутка в разрядной цепи возникал колебательный процесс с экспоненциальным затуханием тока. Длительность полуволны 200 нс, амплитуда тока и время его затухания для обеих полярностей составляли примерно 100 А и 1 мкс.

В экспериментах регистрировались напряжение на промежутке и ток разряда. Измерение напряжения осуществлялось резистивным делителем, тока разряда – резистивным шунтом. Для регистрации электрических сигналов использовался цифровой осциллограф с полосой пропускания 500 МГц. Интегральное свечение разрядов фотографировалось. Исследование морфологии автографов осуществлялось с помощью сканирующего электронного микроскопа ZEISS SIGMA с использованием детекторов вторичных электронов InLens и SE.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В экспериментах было установлено, что для обеих полярностей в структуре свечения токового канала выделяются две области: яркий центральный kern и периферийная диффузная оболочка. Определенные по фотографиям характерный диаметр керна составляет 0,3...0,4 мм, а диаметр диффузной оболочки – приблизительно 0,8 мм. Аналогичные результаты относительно структуры свечения канала получены в работе [14], где материалом плоского электрода являлся висмут.

Автограф токового канала на поверхности катода приведен на рис. 2. Он представляет собой

два соприкасающихся округлых отпечатка диаметрами 200 мкм и 120 мкм.

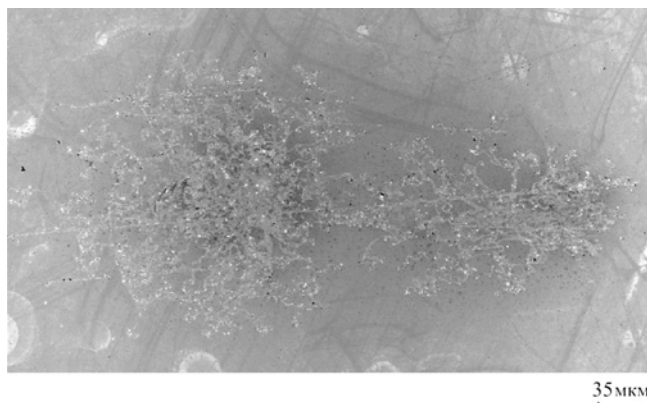


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение автографа канала разряда на катоде

На аноде автограф состоит из трех близко расположенных отпечатков диаметрами 200 мкм, 270 мкм и 300 мкм.

Все отпечатки представляют собой области, содержащие морфологические изменения поверхности электрода в виде совокупности большого количества микрократеров и дорожек (рис. 3). Судя по внешнему виду, эти элементы образовались в результате нагрева участков поверхности до температуры плавления или сублимации и последующего отверждения.

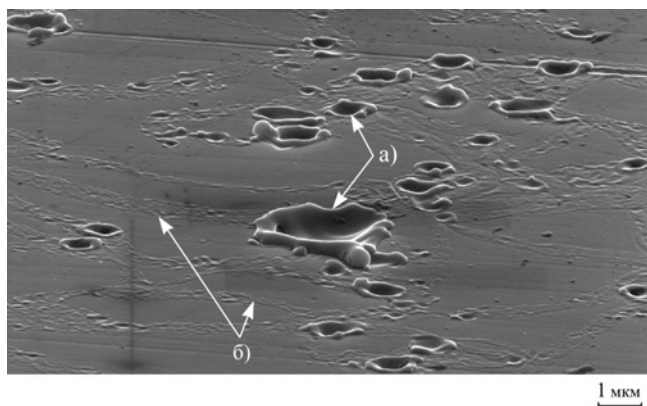


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение фрагмента автографа канала разряда на плоском катоде: а) микрократеры; б) дорожки

Микрократеры представляют собой углубления полусферической формы в центральной области и кольцевые полусферические валики, на периферии (рис. 4). На периферии некоторых микрократеров видны каплевидные выбросы материала электрода. Ширина валиков составляет

200–500 нм. Диаметры микрократеров автографов обеих полярностей, измеренные как внешние диаметры валиков, находятся в диапазоне 0,3–5 мкм.

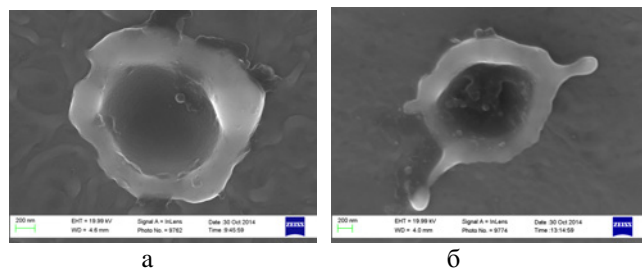


Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения микрократеров на плоском электроде: а – на катоде; б – на аноде

Следует особо отметить, что все микрократеры расположены на дорожках. Дорожки образуют сложную сетчатую структуру, причем, как правило, наиболее крупные микрократеры расположены на граничных участках дорожек (вначале или в конце), либо в узлах сети. Микрократеры распределены примерно равномерно по длине дорожек, при этом на отдельной дорожке расположено 5...7 микрократеров.

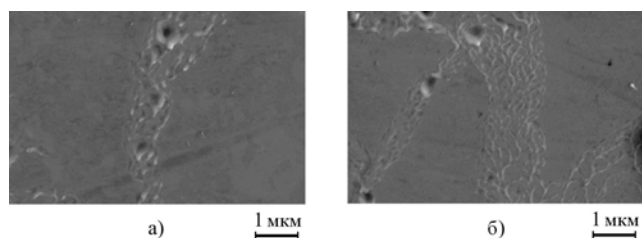


Рис. 5. Электронно-микроскопические изображения отдельных дорожек: а – на катоде; б – на аноде

На рис. 5 представлены увеличенные изображения дорожек. Каждая дорожка представляет собой сетку наплывов, ориентированных преимущественно по длине дорожки. Особенно хорошо эта сетка видна на фотографии рис. 5 б. Характерные длина и ширина наплыва составляют, соответственно, 100–500 нм и 50–100 нм. Ширина дорожек на катоде меньше, чем на аноде, а наплывы расположены плотнее.

Следует отметить, что дорожки в пространственной структуре автографов токовых каналов на плоском электроде при экспериментальных исследованиях субмикросекундного и наносекундного разрядов в воздухе атмосферного давления [6–14] ранее не наблюдались.

Для получения информации о характеристиках микроструктуры был проведен статистический анализ массива изображений автографов. В качестве параметров определялись: диаметр микрократеров, их количество в изображении, расстояние между соседними микрократерами, концентрация микрократеров, количество дорожек, их длина и ширина. Длина дорожки определялась как длина кривой от начала до конца либо до ее разветвления или слияния, если последнее имело место. Средние значения параметров микроструктуры автографов для всех обработанных изображений, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Средние значения параметров микроструктуры автографов

Параметр микроструктуры	Катод	Анод
Диаметр микрократеров, мкм	1	1
Межмикрократерное расстояние, мкм	2	3
Концентрация микрократеров, мм ⁻²	5·10 ⁴	2·10 ⁴
Длина дорожек, мкм	10	10
Ширина дорожек, мкм	0,3	2

Сравнение параметров микроструктуры автографов каналов, реализующихся при разных полярностях острия, показывает, что существенное отличие наблюдается в ширине дорожек и поверхностной концентрации микрократеров. Так для катода средняя поверхностная концентрация микрократеров более чем в два раза выше, а средняя ширина дорожки в 7 раз меньше, чем для анода.

Отметим, что диаметры микрократеров в катодном пятне, обнаруженные в данной работе, существенно меньше диаметров (50–120 мкм), приведенных в [1] для искровых разрядов в воздухе, а также существенно отличаются по морфологии от [4, 5]. Кроме того, полученные значения поверхностной концентрации микрократеров для обеих полярностей существенно превосходит аналогичные значения, полученные ранее при исследованиях микроструктуры разрядов наносекундного диапазона [6–14].

Следует особо отметить значительные отличия в диаметрах микрократеров и их концентрации на аноде, от значений, полученных при исследовании микроструктуры разряда в [14], где диаметры микрократеров составляют 15–50 мкм, а их концентрация на два порядка ниже, чем в данных экспериментах. При этом, при прочих близ-

ких условиях, отличием являлось использование в [14] висмута в качестве материала плоского анода. Логично предположить, что именно этим могут быть обусловлены указанные расхождения.

Заключение

Таким образом, при исследовании микро-структуры отпечатков токовых каналов субмикросекундного высоковольтного искрового разряда в воздухе атмосферного давления в промежутке острие–плоскость при положительной и отрицательной полярностях острия было установлено, что:

а) при обеих полярностях отпечатки каналов искры на поверхности плоского электрода из нержавеющей стали представляют собой области, содержащие морфологические изменения в виде совокупности микрократеров и дорожек;

б) отдельные дорожки представляют собой сетку наплывов, ориентированную преимущественно по длине дорожки; дорожки образуют сложную сетчатую структуру, на которой расположены микрократеры;

в) микрократеры и дорожки обладают внутренней субмикронной структурой.

Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам Тольяттинского государственного университета Ясникову И. С. и Винградову А. Ю. за проделанную работу по получению электронно-микроскопических изображений.

Список литературы

1. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. М.: Иностранная литература, 1960. 606 с.
2. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
3. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
4. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1982. 252 с.
5. Балданов Б. Б. Особенности формирования искрового разряда при ограничении разрядного

тока балластным сопротивлением // Прикладная физика. 2012. № 1. С. 64–67.

6. Репьев А. Г., Репин П. Б., Покровский В. С. Микроструктура токового канала диффузного разряда в электродной системе стержень–плоскость в воздухе атмосферного давления // ЖТФ. 2007. Т. 77, № 1. С. 56–62.

7. Репин П. Б., Репьев А. Г. Исследование пространственной структуры токовых каналов высоковольтного диффузного разряда в промежутке проволока–плоскость // Сборник научных трудов / Под общей редакцией В. Д. Селемира и А. Е. Дубинова. – Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. С. 143–172.

8. Буранов С. Н., Горохов В. В., Карелин В. И., Павловский А. И., Репин П. Б. Широкоапертурный источник рентгеновского излучения для предыонизации электроразрядных лазеров большого объема // Квантовая электроника. 1991. Т. 18, № 7. С. 891–893.

9. Буранов С. Н., Горохов В. В. и др. Исследования по физике плазмы: Сб. науч. тр. / Под ред. В. Д. Селемира, А. Е. Дубинова. Саров, 1998. С. 39–67.

10. Перминов А. В., Тренькин А. А. Микроструктура токовых каналов наносекундного искрового разряда в воздухе атмосферного давления в однородном и резко неоднородном электрических полях // ЖТФ. 2005. Т. 75, № 9. С. 52–55.

11. Карелин В. И., Тренькин А. А. Самоподобная пространственная структура бесстримерного разряда наносекундного диапазона // ЖТФ. 2008. Т. 78, № 3. С. 29–35.

12. Karelin V. I., Trenkin A. A. Microchannels in Atmospheric Pressure Pulsed Discharges. In book «Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges». Editors: Victor F. Tarasenko. Nova Publishers. 2014.

13. Trenkin A. A., Karelin V. I., Fedoseev I. G. Formation of Micro-channels and Generation of High-energy Electrons in Nanosecond High-voltage Discharges in Air, Developing in Micro-structuring Regime // High Voltage Engineering. 2014. Vol. 40, N 7. P. 2211-2216.

14. Тренькин А. А., Карелин В. И., Шибитов Ю. М. Экспериментальные исследования начальной стадии разряда наносекундного диапазона в воздухе атмосферного давления // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57, № 12/2. С. 284–289.