

ФОРМИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННЫХ ЯЧЕЕК В ОТРИЦАТЕЛЬНОМ КОРОННОМ РАЗРЯДЕ БЕЗЫМПУЛЬСНОЙ ФОРМЫ

Р. Х. Амиров¹, С. А. Баренголец^{2,3}, Е. В. Коростылев⁴,
Н. В. Пестовский^{3,4}, А. А. Петров^{3,4}, С. Ю. Савинов^{3,4}, И. С. Самойлов¹

Исследовалась эрозия поверхности графитового катода в безымпурсной форме отрицательного коронного разряда в воздухе в электродной конфигурации острие–плоскость при давлении 0.3–1 атм. Обнаружено формирование на острие катода эрозионных кратеров в виде упорядоченно расположенных эрозионных ячеек, имеющих форму правильных многоугольников. Размер ячейки совпадает с диаметром отрицательного свечения разрядного факела. Формирование упорядоченно расположенных ячеек связано с особенностями динамики разрядного факела в безымпурсной форме разряда.

Ключевые слова: коронный разряд, эрозия катода, эрозионные ячейки, самоорганизация.

1. Введение. Отрицательный коронный разряд в электродной конфигурации острие–плоскость при токе 1–100 мкА как правило реализуется в виде последовательности токовых импульсов Тричела, а при токе 100–200 мкА – в безымпурсной форме [1]. Разряд вызывает эрозию поверхности катода с удельной скоростью $10^{-6} - 10^{-4}$ г/Кл с образованием эрозионных кратеров микронных и нанометровых размеров. Топография эрозионной поверхности определяется процессами удаления катодного материала в области локализации разрядного факела и зависит от его динамики на катодной по-

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, ОИВТ РАН, 125412 Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

² ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38.

³ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

⁴ Московский физико-технический институт (государственный университет), МФТИ, 141700 Россия, Долгопрудный, Московская область, Институтский пер., 9; e-mail: petrov@oivtran.ru.

верхности. Рециклинг эрозионных продуктов и формирование диэлектрических пленок на поверхности также влияют на топографию эрозионной поверхности.

Диаметр отрицательного свечения разрядного факела при атмосферном давлении составляет ~ 40 мкм, что, как правило, меньше диаметра катодного острия. Разрядный факел локализован на поверхности катода в области максимального электрического поля, наиболее благоприятной для функционирования разряда. При этом данная область должна иметь достаточный геометрический размер [1, 2]. Микрополя на поверхности катода не оказывают существенное влияние на динамику разрядного факела, поскольку ослабевают на расстоянии, существенно меньшем 1 мкм. Изменение топографии поверхности в области локализации разрядного факела вследствие эрозии, локальное окисление, зарядка диэлектрических включений, осаждение на поверхность эрозионных продуктов приводят к изменению конфигурации электрического поля, вследствие чего область локализации разрядного факела на поверхности катода смещается – происходит блуждание разряда [1, 3, 4].

В режиме импульсов Тричела ток разряда представляет собой последовательность импульсов длительностью ~ 20 нс, каждый из которых вызван катодонаправленной волной ионизации вследствие неустойчивости катодного слоя [5].

Для импульсов Тричела различают три режима динамики области локализации разрядного факела: устойчивый, неустойчивый и стохастический [3, 4]. Устойчивый режим характерен для катодов диаметром менее 100 мкм, слабо подверженных окислению. В устойчивом режиме разрядный факел может длительное время (более 1 секунды) не менять положение на катодной поверхности. При этом в области локализации разрядного факела формируется кратер размером 1–5 мкм. Неустойчивый режим вызван формированием оксидных пленок на поверхности катода. Разрядный факел локализуется в некоторой области на поверхности катода на время 10^{-6} – 1 с, при этом формируются эрозионные кратеры размером 10 нм – 1 мкм. В стохастическом режиме, характерном для катодов, полностью покрытых оксидной пленкой, разрядный факел меняет положение на поверхности катода после каждого импульса Тричела. Эрозионные кратеры в оксидной пленке, как правило, неразличимы.

В режиме импульсов Тричела эрозионные кратеры формируются на некотором расстоянии друг от друга, что вызвано блужданием разряда по поверхности. В безимпульсном режиме на поверхности катода эрозионные кратеры, как правило, объединены в следы длиной до 20 мкм и шириной 1–5 мкм [6].

В различных работах предлагались следующие гипотезы о механизме эрозии катода: распыление поверхности вследствие бомбардировки положительными ионами, химическое травление, локальный нагрев и испарение, формирование на поверхности диэлектрических пленок с последующей зарядкой и распылением, а также микровзрывные процессы. Заметим, что энергия положительных ионов в отрицательном коронном разряде ~ 10 эВ [7, 8] и недостаточна для катодного распыления поверхности. Температурный предел испарения катода не достигнут [7]. Эрозия наблюдается в том числе и на катодах из графита, на которых оксидная пленка не формируется. Механизм эрозии в настоящее время окончательно не установлен [6, 8]. В данной работе исследуется эрозия графитового катода в безимпульсной форме отрицательного коронного разряда в воздухе в электродной конфигурации острие–плоскость.

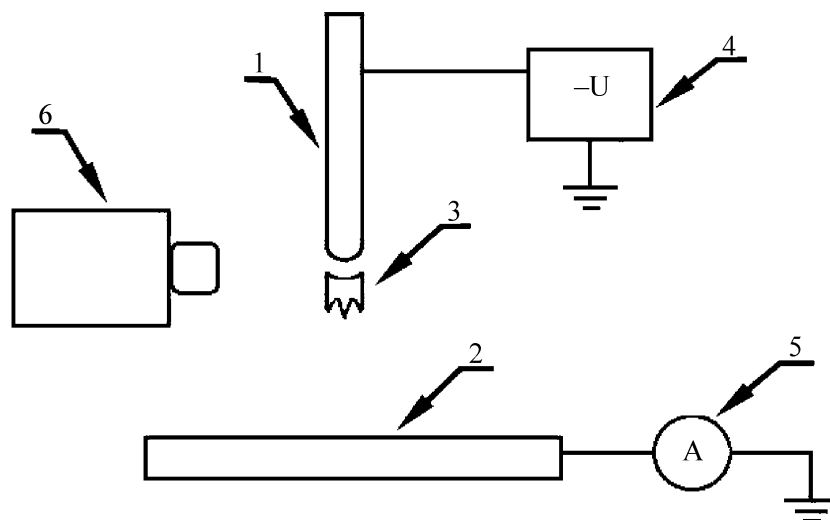


Рис. 1: Экспериментальная установка: 1 – катод, 2 – анод, 3 – коронный разряд, 4 – источник напряжения, 5 – микроамперметр, 6 – микроскоп.

2. Экспериментальная установка. Отрицательный коронный разряд исследовался в воздухе при давлении 0.3–1 атм в электродной конфигурации острие–плоскость. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Катоды изготавливались из поликристаллического графита С-3 (проводимость 10^{-6} Ом·см, характерный размер зерна 1 мкм). Графит был выбран для того, чтобы предотвратить формирование оксидных диэлектрических пленок на поверхности катода, влияющих на конфигурацию электрического поля и динамику разрядного факела. Также на графите не формируются микроструктуры в результате рециклинга продуктов эрозии [6], влияющие на

динамику разрядного факела. Диаметр острия катода составлял 50–600 мкм, межэлектродное расстояние 10 мм. Анодом являлась медная пластина диаметром 80 мм.

Электродная система располагалась в камере, оборудованной системой откачки и напуска воздуха, а также системой контроля давления. Напряжение разряда варьировалось в пределах 1–30 кВ, разрядный ток составлял 1–200 мкА. Проводилась видеосъемка разряда фотокамерой Casio EX-ZR100 (1000 кадров/с) с использованием длиннофокусного микроскопа МБС-9. После разряда проводился топографический анализ поверхности катодов при помощи электронной микроскопии. Проводилась регистрация осциллограмм разрядного тока при помощи широкополосного осциллографа. Нагрузочное сопротивление 50 Ом располагалось в цепи между анодом и землей.

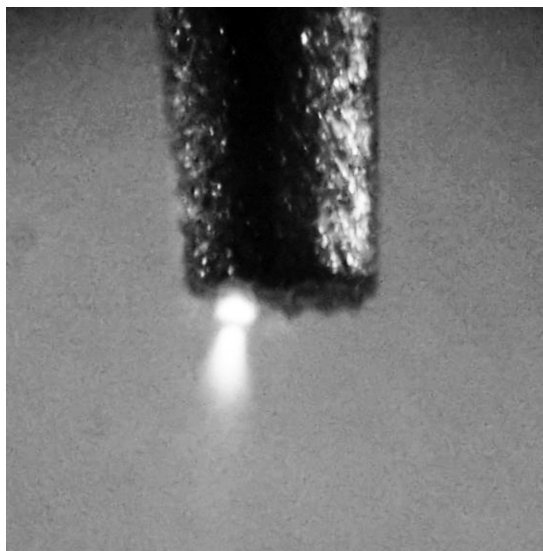


Рис. 2: Отрицательный коронный разряд в безимпульсной форме на графитовом катоде. Диаметр катода 300 мкм.

Во время разряда катод укорачивается со скоростью несколько микрометров в минуту, что по оценкам соответствует скорости эрозии 10^{-5} г/Кл. Длительность разряда в экспериментах составляла около 10–40 мин, поэтому топография катодной поверхности до разряда не оказывает никакого влияния на режим разряда, динамику разрядного факела и эрозионную картину, наблюдаемую после эксперимента. Влажность воздуха составляла 40–80% и также не оказывала влияние на динамику разрядного факела и на топографию поверхности.

3. Результаты. Снимок катода с диаметром острия 300 мкм во время разряда представлен на рис. 2. Ток разряда составлял 170 мкА, напряжение – 13 кВ, давление

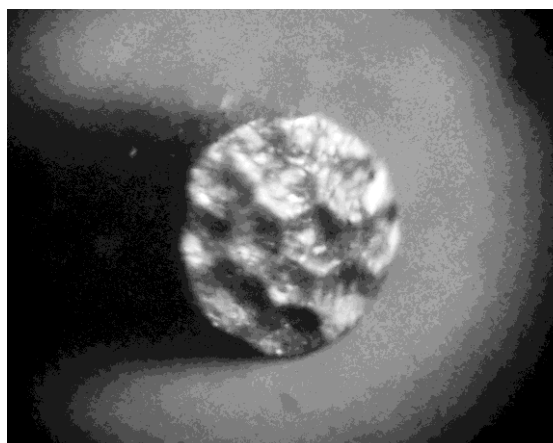


Рис. 3: Острие графитового катода после разряда в безымпulseной форме. Давление 0.45 атм, ток 170 мкА, диаметр острия 300 мкм.

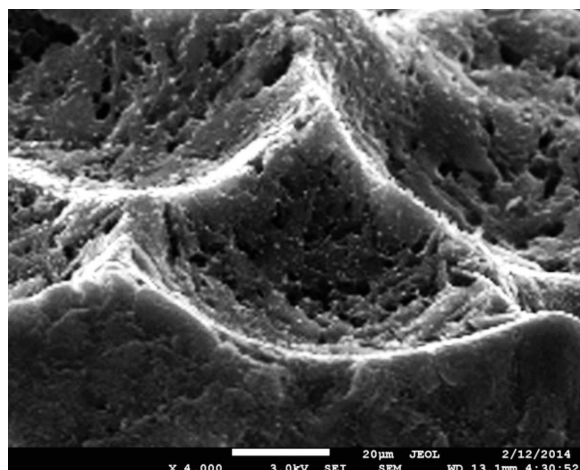


Рис. 4: Эрозионная ячейка (вид сбоку). На поверхности эрозионной ячейки формируются кратеры размером ~ 1 мкм.

воздуха – 0.45 атм. Удельная скорость эрозии составляла 10^{-5} г/Кл – скорость эрозии измерялась путем измерения длины катода до и после разряда. Катод диаметром 300 мкм после отрицательного коронного разряда в безымпulseной форме представлен на рис. 3. В процессе эксперимента катод на рис. 2, 3 укоротился на 200 мкм. На поверхности катода сформирована структура эрозионных кратеров (ячеек) размером 60 мкм. Поскольку ячейки занимают всю поверхность, за размер эрозионной ячейки принимается усредненное по поверхности катода расстояние между центрами соседних ячеек. Поверхность эрозионной ячейки покрыта более мелкими кратерами размером ~ 1 мкм

(рис. 4). Эрозионные ячейки расположены на поверхности катода в правильном геометрическом порядке в виде 5- и 6-угольников. Поверхность ячейки имеет сферическую форму (рис. 4), пересечение соседних ячеек – линии, образующие стороны правильных многоугольников.

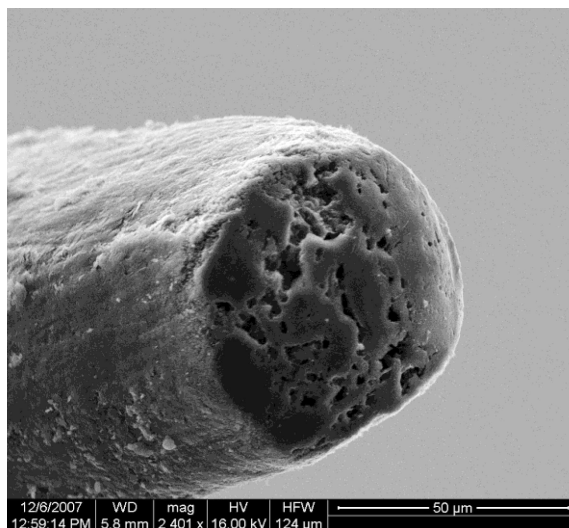


Рис. 5: Острие графитового катода после разряда в режиме импульсов Тричела в воздухе при атмосферном давлении. Ток 50 мкА.

Эрозионные ячейки не формируются в разряде в режиме импульсов Тричела (рис. 5) – на сглаженной поверхности острия присутствуют только кратеры микронных и субмикронных размеров.

Размер эрозионных ячеек зависит от давления воздуха и измерен в интервале 0.3–1 атм. Данная зависимость при токе 170 мкА представлена на рис. 6. Обнаружено, что диаметр отрицательного свечения разрядного факела совпадает с размером эрозионных ячеек в диапазоне давлений воздуха 0.3–1 атм. Упорядоченное расположение эрозионных ячеек на всей поверхности катода наблюдается в случае, когда диаметр катода в 4-6 раз превышает размер ячейки. В случае катодов большего диаметра (или при увеличении давления), как правило, правильный порядок может присутствовать лишь на длине нескольких ячеек (рис. 7). Формирование эрозионных ячеек не было обнаружено на металлических катодах как в импульсно-периодическом, так и в безимпульсном режиме разряда.

4. Обсуждение результатов.

4.1. Эрозия в режиме импульсов Тричела. В результате каждого импульса Тричела разрядный промежуток освобождается от пространственного положительного заряда.

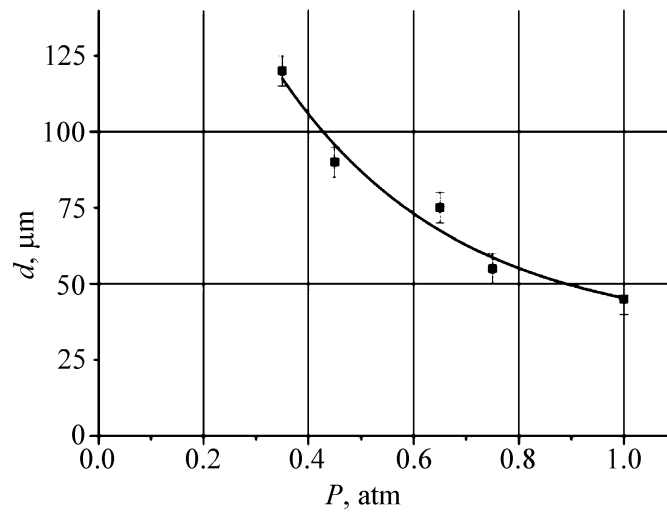


Рис. 6: Зависимость размера эрозионных ячеек от давления при токе разряда 170 мкА.

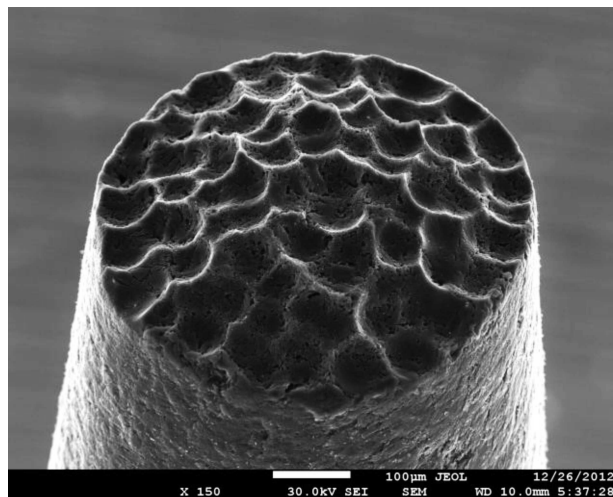


Рис. 7: Острие графитового катода после разряда в безимпульсной форме при атмосферном давлении. Ток 170 мкА.

Поверхностные заряды также не накапливаются, поскольку на графите не формируются оксидные пленки. Поэтому область, в которой возникнет разрядный факел, будет определяться в основном топографией поверхности. Пространственный отрицательный заряд начинает оказывать существенное влияние на динамику разрядного факела в режиме импульсов Тричела в круговой форме разряда [10], однако круговая форма наблюдается при отношении межэлектродного расстояния к диаметру катода $h/b < 20$, и не реализуется в условиях проведенных экспериментов.

После каждого импульса Тричела разрядный факел формируется в области с максимальной кривизной поверхности. Поэтому поверхность графитового катода в режиме импульсов Тричела сглажена и не имеет неровностей размером более ~ 1 мкм. Катод после разряда в режиме импульсов Тричела представлен на рис. 5. Неоднородности размером < 1 мкм не влияют на динамику разряда, поскольку электрическое поле вблизи таких неоднородностей убывает на расстоянии ~ 1 мкм, меньшем, чем необходимо для функционирования разрядного факела [1].

4.2. Эрозия в безимпульсной форме разряда. В безимпульсном режиме разряда формируется стационарный катодный слой, и существенное влияние на динамику разрядного факела оказывает поле пространственного положительного заряда. Согласно результатам наблюдений отрицательное свечение разрядного факела локализуется преимущественно над участками поверхности с минимальной кривизной (в отличие от режима импульсов Тричела, где разряд формируется в области микронеоднородностей). Это объясняется тем, что в таких участках минимальная кривизна поверхности способствует накоплению пространственного положительного заряда, поскольку электрическое поле, связанное с геометрией, над этими участками поверхности минимально и пространственный положительный заряд менее эффективно удаляется из разрядного промежутка. Локальная эрозия поверхности при этом не оказывает влияния на положение разрядного факела, поскольку электрическое поле обусловлено не состоянием поверхности, а пространственным положительным зарядом. Это приводит к стабилизации положения разрядного факела и к формированию эрозионных кратеров с размером, равным диаметру отрицательного свечения разрядного факела (эрозионных ячеек). Согласно результатам измерений, выполненных в данной работе, размер эрозионной ячейки в безимпульсном коронном разряде (рис. 6) совпадает с диаметром отрицательного свечения в диапазоне давлений 0.3–1 атм.

На металлических катодах ячейки не формируются вследствие формирования оксидных пленок на поверхности катода. Зарядка оксидных пленок положительными ионами вызывает изменение распределения электрического поля и оказывает существенное влияние на динамику разрядного факела.

Эрозионные ячейки не формируются в режиме импульсов Тричела потому, что в таком режиме разрядный промежуток освобождается от положительного пространственного заряда после каждого импульса. При этом динамика разрядного факела и эрозионная картина зависят, в основном, от топографии поверхности и влияния пространственного отрицательного заряда.

Упорядоченное расположение ячеек на поверхности катода наблюдается в случае, когда диаметр катода не более чем в 4–6 раз превышает размер ячейки. Упорядоченное положение ячеек на катодах меньшего диаметра (менее 300 мкм), а также при понижении давления связано с тем, что после формирования ячейки разрядный факел перемещается в соседнюю область, на расстояние, равное размеру ячейки (в результате наличия граней, усиливающих поле и инициирующих ионизацию, а также присутствия положительного пространственного заряда в данной области). При этом пространственный отрицательный заряд над другими частями катодной поверхности препятствует формированию разрядного факела в этих участках вследствие экранировки электрического поля катода пространственным отрицательным зарядом.

В случае катодов большего диаметра, а также при повышенном давлении, существенное влияние на динамику разрядного факела начинает оказывать пространственный отрицательный заряд в дрейфовой области электродного промежутка. После формирования ячейки, вследствие экранирования поля катода отрицательными ионами в области локализации факела, разрядный факел формируется на расстоянии, существенно превышающем размер ячейки. На таких катодах эрозионные ячейки формируются, но их расположение не упорядочено (рис. 7).

5. Заключение. В данной работе впервые обнаружено формирование упорядоченно расположенных эрозионных ячеек на поверхности катода в безимпульсной отрицательной короне. Установлено, что размер ячеек совпадает с диаметром отрицательного свечения разрядного факела в диапазоне давлений 0.3–1 атм. Эрозионные ячейки в безимпульсной форме разряда формируются вследствие того, что разрядный факел может длительное время (более 1 секунды) не менять положения на катодной поверхности вследствие стабилизации положения полем пространственного положительного заряда стационарного катодного слоя. При этом формируется эрозионная ячейка с размером, равным диаметру отрицательного свечения.

Упорядоченное расположение эрозионных ячеек наблюдается, когда размер катода не более чем в 4–6 раз превышает размер ячейки. На катодах большего диаметра или при увеличении давления упорядоченное расположение ячеек исчезает вследствие влияния пространственного отрицательного заряда в дрейфовой области на динамику разрядного факела.

В режиме импульса Тричела на графитовых катодах эрозионные ячейки не формируются, поскольку в отсутствие стационарного катодного слоя динамика разрядного факела определяется, в основном, топографией поверхности. На металлических катодах

отсутствие эрозионных ячеек объясняется формированием диэлектрических участков, зарядка которых влияет на распределение электрического поля и динамику разрядного факела.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 14-22-00273.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] L. V. Loeb, *Electrical Coronas. Their Basic Physical Mechanisms* (Berkeley, CA, Univ. California Press, 1965).
- [2] Г. Н. Александров, ЖТФ **33**, 223 (1963).
- [3] R. H. Amirov, A. A. Petrov, I. S. Samoylov, International Journal of Plasma Environmental Science and Technology **3**, 35 (2009).
- [4] Э. И. Асиновский, А. А. Петров, И. С. Самойлов, Письма в ЖЭТФ **86**, 354 (2007).
- [5] A. P. Napartovich, Y. S. Akishev, A. A. Deryugin, et al., J. Phys. D, Appl. Phys. **30**, 2726 (1997).
- [6] A. A. Petrov, R. H. Amirov, E. I. Asinovskii and I. S. Samoylov, J. Plasma Fusion Res. Series **8**, 780 (2009).
- [7] J. P. Borra, J. Phys. D: Appl. Phys. **39**, R19 (2006).
- [8] M. Goldman and A. Goldman, in *Gaseous Electronics*, vol. 1, edited by M.N. Hirsh and H.J. Oskam (Academic Press, New York, 1978), p. 219.
- [9] A. A. Petrov, R. H. Amirov, I. S. Samoylov, IEEE – Transactions on Plasma Sciences **37**, 1146 (2009).
- [10] A. Greenwood, J. of Appl. Phys. **23**, 1316 (1952).

Поступила в редакцию 9 декабря 2014 г.