

## Эрозия медного катода в отрицательном коронном разряде

© Э.И. Асиновский,<sup>1</sup> А.А. Петров,<sup>1,2</sup> И.С. Самойлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН,  
125412 Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (государственный университет),  
141700 Долгопрудный, Московская область, Россия  
e-mail: lioha84@mail.ru

(Поступило в Редакцию 30 июля 2007 г.)

Исследован импульсно-периодический режим отрицательной короны — импульсы Тричела — в воздухе при атмосферном давлении, связанный с реализацией взрывоэмиссионных механизмов эрозии (эктонов) острых катодов. Обнаружен струйный эрозионный процесс на острие медного катода. Зарегистрировано образование на катоде микронных дендритоподобных структур в результате возврата на катод эрозионных продуктов.

PACS: 52.40.Hf, 61.46.Df

Отрицательный коронный разряд исследовался в электродной конфигурации острие—плоскость в воздухе при атмосферном давлении в режиме импульсов Тричела (ИТ) [1]. В качестве катода использовалась заточенная и отполированная химическим травлением медная проволока. Во время разряда производилась фронтальная и боковая видеосъемка катодного острия с применением длиннофокусного микроскопа. Импульсы Тричела осциллографировались (С1-75). Измерялся средний ток разряда.

### Катодная эрозия

Эрозионные микрократеры на катоде в отрицательной короне, горящей в режиме ИТ, были обнаружены В. Беннетом [2]. Позже Г. Вайслер [3], выполняя подробные исследования отрицательной короны, также наблюдал кратеры на металлических катодах. Он высказал предположение, что эрозия может быть связана с катодным распылением, заметив, однако, что энергия положительных ионов, достигающих катод в отрицательной короне, не превышает 1 eV. М. Ланн [4] пришел к выводу, что в генерации импульса существенную роль играет пробой диэлектрических включений на поверхности катода, сопровождающийся интенсивной электронной эмиссией, и предположил, что распыление катода вызывается пробоем. Г.А. Месяц предположил [5], что возникновение микрократеров на катоде в отрицательной короне обусловлено эктонным механизмом эрозии.

Оценим возможность генерации эктонов в отрицательной короне. Концентрированное выделение энергии на поверхности катода, вызывающее эрозию, связано с воздействием на поверхность катода заряженной головки катодонаправленного стримера, периодически возникающего в результате неустойчивости катодного слоя отрицательной короны и определяющего автоколебательный режим разряда. Наблюдения таких стримеров в отрицательной короне описаны в монографии [6],

а результаты расчета напряженности электрического поля, создаваемого ими вблизи поверхности катода, приведены в статье [7].

Таким образом, автоколебательный режим возникновения катодонаправленных стримеров приводит к генерации множественных импульсных участков сильного электрического поля, последовательно локализующихся на микроплощадках поверхности катодного острия за время около  $10^{-9}$  s. Импульсные микрополя достигают  $10^6$  V/cm. Из-за присутствия микровыступов на поверхности катода микрополя могут увеличиваться в  $10^2$  раз. В результате возникает автоэмиссия, завершающаяся микровзрывами на катодной поверхности и генерацией эктонов [8].

Оценим величину интеграла действия ИТ [8]. Примем, что ток ИТ замыкается на катоде через площадку, равную сечению элементарного эрозионного фрагмента. Для оценки плотности тока  $j$  определим величину элементарного эрозионного фрагмента как отношение величины эрозии катода к количеству токовых импульсов. Величина эрозии определялась сравнением фотоснимков катода, выполненных на электронном микроскопе до и после разряда. Измеренный таким образом элементарный эрозионный фрагмент для меди оказался  $1000 \text{ nm}^3$ , а площадь элементарного микрократера соответственно  $100 \text{ nm}^2$ . При амплитуде тока ИТ  $\sim 0.5 \text{ mA}$ , максимальная плотность тока составляет не менее  $5 \cdot 10^8 \text{ A/cm}^2$ . Принимая полуширину ИТ равной  $t = 10 \text{ ns}$ , вычислим интеграл действия импульса Тричела

$$h = \int_0^t j^2 dt > 10^9 \text{ A}^2\text{s/cm}^4.$$

Полученное значение свидетельствует о том [8], что эрозия в отрицательной короне может быть вызвана генерацией эктонов.

Эктонный механизм эрозии может дополняться кавитационным разрушением при взаимодействии поля

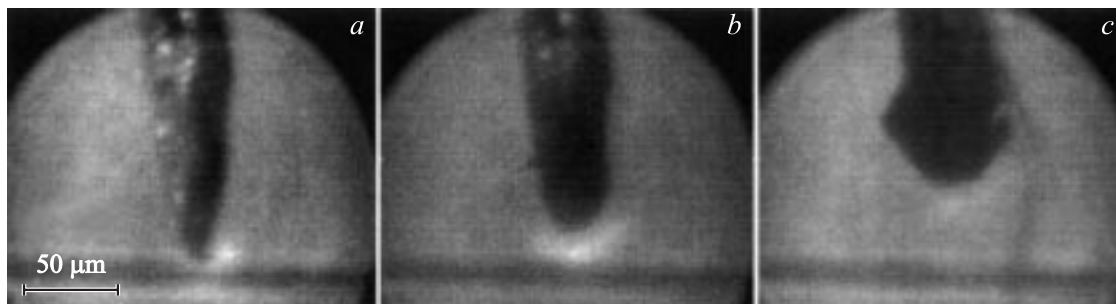


Рис. 1.

головки катодонаправленного стримера с поверхностью катода аналогично кавитационному вскипанию перегретой поверхности жидкого металла под действием электрического поля [9].

### Рециклинг вещества катода

С помощью фронтальной микровидеосъемки острия медного катода зарегистрирован струйный выброс эрозийных продуктов в межэлектродное пространство.

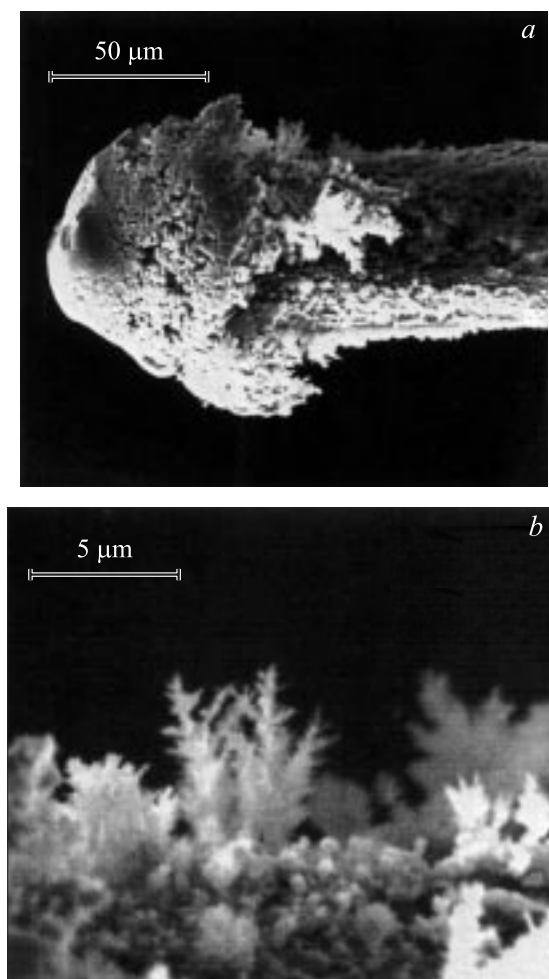


Рис. 2.

Боковая микросъемка позволила обнаружить рециклинг катодного материала (рис. 1) — за 15 min катод в разряде уменьшился на  $40\ \mu\text{m}$  и вблизи острия сформировалось шаровидное образование диаметром около  $60\ \mu\text{m}$ . Трансформация острия происходит в результате струйно-эрозионного процесса и частичного возврата продуктов эрозии в виде нанодисперсной аэрозоли и, возможно, пара на поверхность катода. Электронная микроскопия показала, что образование имеет дендритоподобную структуру (рис. 2). Размер элементарных фрагментов дендритов не превышает  $100\ \text{nm}$  (рис. 2, *b*), а макроразмер дендритов достигает десятков микрометров. На торцевой части катода, там где реализуется факел разряда, дендритоподобные образования имеют следы оплава.

Продуктами катодной эрозии может являться медный пар, а также жидкие или твердые медные кластеры. Оценки показали, что диффузия с учетом термоэмиссионной зарядки кластеров способна отвечать за возврат эрозионного материала на поверхность катода. Сила, обусловленная поляризацией кластера, мала в прикатодном поле и не вносит существенного вклада в механизм возврата [10].

### Выводы

1. Экспериментально зарегистрирован струйный процесс истечения продуктов эрозии из области локализации катодного пятна.
2. Кратеры на поверхности катода размером в десятки микрон образуются в результате импульсно-частотного воздействия ИТ при неподвижной привязке катодного пятна. Элементарный эрозионный фрагмент медного катода имеет размер  $10\ \text{nm}$ .
3. Обнаружено осаждение эрозийных продуктов на катодной поверхности в виде развитых дендритоподобных структур (рециклинг).
4. Интеграл действия ИТ на поверхности катода составляет величину порядка  $10^9\ \text{A}^2\text{s/cm}^4$ , что дает основания считать возможным эктонный механизм катодной эрозии в отрицательной короне.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований президиума РАН „Фундаментальные проблемы релятивистской импульсной и стационарной электроники большой мощности“.

Авторы выражают благодарность сотрудникам УНЦ „Нанотехнологии в электронике“ МФТИ за предоставление возможности исследований на растровом и зондовых сканирующих микроскопах (грант Минобрнауки РФ: РНП.2.1.2.9353).

## Список литературы

- [1] *Trichel G.W.* // Phys. Rev. 1938. Vol. 54. P. 1078.
- [2] *Loeb L.B., Kil A.F., Hudson G.G., Bennett W.H.* // Phys. Rev. 1941. Vol. 60. P. 714.
- [3] *Weissler G.L.* // Phys. Rev. 1943. Vol. 62. N 3–4. P. 96.
- [4] *Korge H., Laan M., Paris P.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1993. Vol. 26. P. 231.
- [5] *Месяц Г.А.* // УФН. 1995. Т. 165. № 6. С. 601.
- [6] *Леб Л.Б.* Основные процессы электрических разрядов в газах. М.: ГИИТЛ, 1950. 672 с. (Loeb L.B. *Fundamental Processes of Electrical Discharge in Gases.* N. Y.: Wiley, 1939).
- [7] *Napartovich A.P., Akishev Yu.S., Deryugin A.A., Kochetov I.V., Pankin M.V., Trushkin N.I.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1997. Vol. 30. P. 2726–2736.
- [8] *Месяц Г.А.* Эктонны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.
- [9] *Воробьев Г.Л., Лисица В.С., Мальшенко С.П.* // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 78. № 10. С. 737.
- [10] *Смирнов Б.М.* // УФН. 2003. Т. 173. № 6. С. 609.