

04

## Влияние потока воздуха на отрицательный коронный разряд

© Р.Х. Амиров<sup>1</sup>, С.А. Баренгольц<sup>2,3</sup>, Е.В. Коростелев<sup>4</sup>,  
Н.В. Пестовский<sup>3,4</sup>, А.А. Петров<sup>3,4</sup>, С.Ю. Савинов<sup>3,4</sup>,  
И.С. Самойлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва

<sup>2</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФАН), Москва

<sup>3</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва

<sup>4</sup> Московский физико-технический институт (Государственный университет) (МФТИ), Московская обл., Долгопрудный

E-mail: petrov@oivtran.ru

Поступило в Редакцию 8 февраля 2016 г.

Исследовано влияние потока воздуха на отрицательный коронный разряд. С помощью телемикроскопии показано, что аэродинамическим воздействием на область разрядного промежутка можно существенно влиять на локализацию разрядного факела на катодной поверхности.

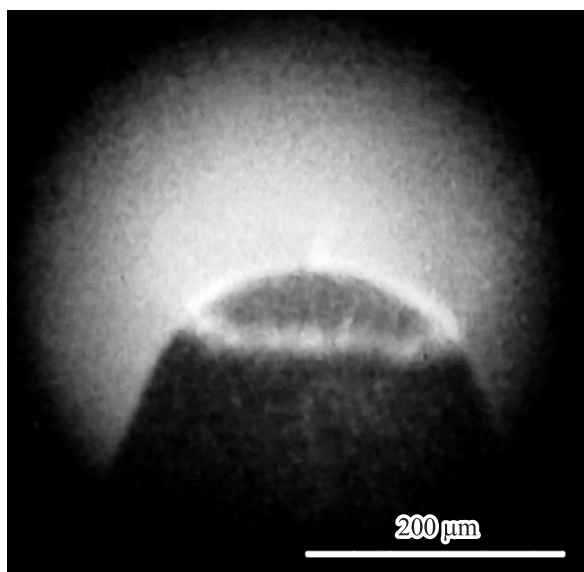
Отрицательный коронный разряд в электродной конфигурации острие–плоскость, как правило, может реализовываться в режиме импульсов Тричела, в безимпульсном режиме и в режиме отрицательной стримерной короны [1]. Режим разряда зависит от распределения потенциала в электродном промежутке. Формирование пространственного отрицательного заряда в дрейфовой области приводит к перераспределению потенциала в электродном промежутке и накоплению пространственного положительного заряда в прикатодной области. Если плотность положительного заряда достаточна для формирования катодонаправленной волны ионизации, разряд реализуется в режиме импульсов Тричела — средний ток 1–100  $\mu\text{A}$ , амплитуда импульсов  $\sim 1\text{ mA}$ , частота следования  $\sim 1\text{ MHz}$ , длительность на полувывоте  $\sim 20\text{ ns}$ , длительность переднего фронта импульса  $\sim 2\text{ ns}$ . Увеличение межэлектродного напряжения ускоряет отток отрицательных ионов из дрейфовой области, что приводит к уменьшению плотности пространственного положительного заряда в прикатодной области. Формируется стационарный катодный слой, и разряд реализуется в безимпульсной форме при среднем

токе 100–200  $\mu\text{A}$ . Дальнейшее увеличение напряжения может привести к отрицательной стримерной форме и нестационарной диффузной тлеющей форме разряда и завершается искровым пробоем разрядного промежутка [2]. В электроположительных газах режим импульсов Тричела может реализоваться при включении балластного сопротивления  $\sim 100 \text{ M}\Omega$  в электрическую цепь [3]. В таких газах добавка 0.1% кислорода также приводит к формированию отрицательных ионов и возникновению условий для формирования импульсов Тричела [4].

Внешним воздействием на пространственный отрицательный заряд в дрейфовой области можно изменять распределение потенциала в промежутке, форму разряда и его режим. Так, в [2] в поперечном потоке воздуха со скоростью до 100 м/с был получен отрицательный коронный разряд в безимпульсном режиме при токе  $\sim 1 \text{ mA}$  и классифицирован как тлеющий разряд атмосферного давления. Известны работы по исследованию влияния потока воздуха на ВАХ отрицательного коронного разряда [5,6] и на параметры импульсов Тричела [7]. В режиме импульсов Тричела формируется кольцевая форма разряда, если отношение межэлектродного расстояния к диаметру острия  $h/d < 20$  [8]. В работе [8] с помощью вспомогательного электрода, удаляющего отрицательные ионы из дрейфовой области, была установлена роль пространственного отрицательного заряда в механизме формирования кольцевой формы разряда. Применение режима питания, в котором на постоянное напряжение ниже уровня зажигания разряда накладываются импульсы напряжения с периодом, сравнимым с временем дрейфа отрицательных ионов в промежутке, также приводило к исчезновению кольцевой формы отрицательного коронного разряда [8].

Поперечный размер разрядного факела в отрицательном коронном разряде при атмосферном давлении составляет порядка 50  $\mu\text{m}$  в безимпульсном режиме и 1  $\mu\text{m}$  в режиме импульсов Тричела, что, как правило, существенно меньше поперечного размера катодного острия. На поверхности катода происходит непрерывное изменение локализации разрядного факела [4,9]. Изменение локализации вызывается процессами на поверхности катода — эрозионной очисткой, окислением и зарядкой участков поверхности, изменением ее топографии, а также процессами в электродном промежутке — за счет перераспределения потенциала вследствие локального увеличения плотности отрицательных ионов.

В режиме импульсов Тричела в кольцевой форме возможна самоорганизация движения области локализации разрядного факела на поверхности катода [10]. В [11] показано влияние отрицательных ионов

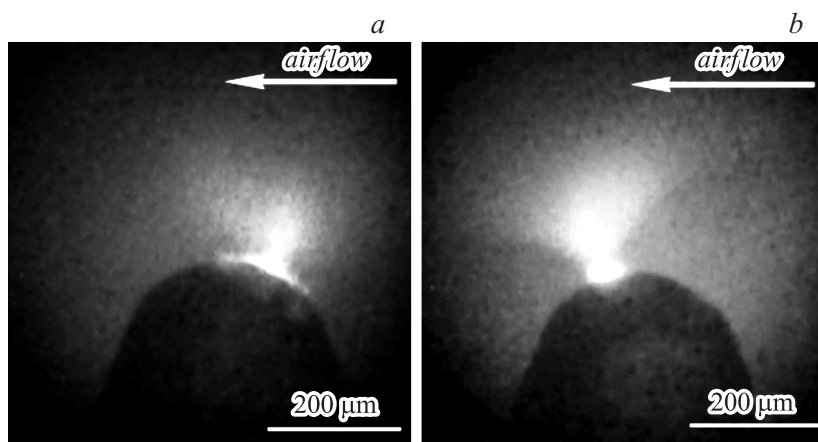


**Рис. 1.** Боковой снимок острия катода. Коронный разряд в кольцевой форме в режиме импульсов Тричела в неподвижной среде,  $V = 15 \text{ kV}$ ,  $I = 100 \mu\text{A}$ .

на динамику разрядного факела на поверхности катода в безимпульсной отрицательной короне.

Нами исследовался отрицательный коронный разряд в электродной конфигурации острие — плоскость на катодах из графита. Применение графита предотвращает формирование оксидной пленки на поверхности катода, зарядка которой влияет на распределение потенциала в прикатодной области. Воздействие на разряд осуществлялось поперечным потоком воздуха со скоростью до  $100 \text{ m/s}$ . Основное внимание в данной работе уделено телемикроскопии разряда на катодной поверхности — полученные результаты, с нашей точки зрения, являются новыми в физике газового разряда, им дано качественное объяснение.

Напряжение на разрядном промежутке  $V = 1\text{--}30 \text{ kV}$ , средний ток разряда  $I = 1\text{--}500 \mu\text{A}$ . Графитовое острие, изготовленное из поликристаллического графита с-3, диаметром  $d = 200\text{--}600 \mu\text{m}$  ориентировано перпендикулярно набегающему потоку воздуха, скорость которого  $U$  менялась в интервале от  $5$  до  $100 \text{ m/s}$ . Уровень турбулентности в

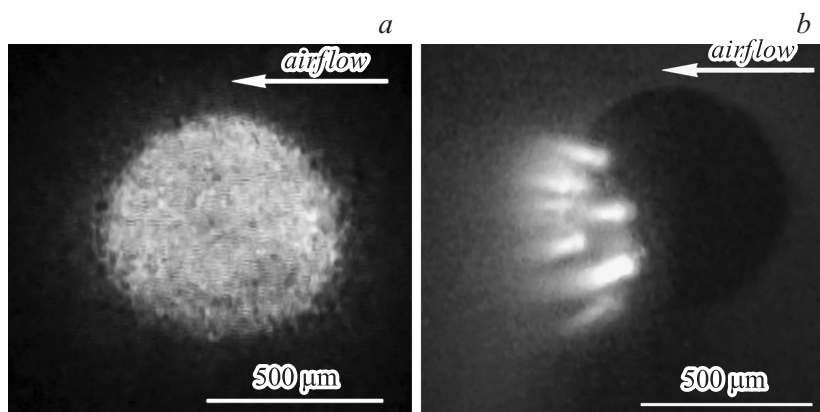


**Рис. 2.** Боковой снимок острия катода. Разряд при скорости потока 10 м/с, направление потока справа налево,  $V = 15 \text{ kV}$ ,  $I = 100 \text{ } \mu\text{A}$ : *a* — режим импульсов Тричела (разряд смещен навстречу потоку); *b* — безимпульсный режим (разряд смещен по потоку).

набегающем потоке не превышал 0.2%. Толщина пограничного слоя на острие катода при скорости 10 м/с составляет  $\sim 10 \text{ } \mu\text{m}$ .

Разряд в кольцевой форме при напряжении на разрядном промежутке  $V = 15 \text{ kV}$  и среднем токе  $I = 100 \text{ } \mu\text{A}$  в неподвижной среде представлен на рис. 1. Обнаружено, что кольцевая форма разряда устойчива при скорости набегающего потока воздуха не более 10 м/с. При скорости потока более 10 м/с кольцевая форма разряда пропадает, однако при этом режим импульсов Тричела сохраняется. Этот результат подтверждает выводы Гринвуда о роли отрицательных ионов в механизме формирования кольцевой формы разряда [8].

Обнаружено, что в режиме импульсов Тричела область локализации разряда на катодной поверхности смещена в направлении против потока воздуха относительно среднего положения в неподвижной среде (рис. 2, *a*). В безимпульсном режиме область локализации разряда, наоборот, смещается по поверхности острия в направлении по потоку (рис. 2, *b*). Данное явление можно объяснить следующим образом. В режиме импульсов Тричела разрядный промежуток освобождается от пространственного положительного заряда после каждого импульса



**Рис. 3.** Фронтальный снимок острия катода при скорости потока 70 м/с, направление потока справа налево, диаметр катода 500  $\mu\text{m}$ , средний ток разряда,  $\mu\text{A}$ : *a* —  $I = 120$ ; *b* — 250.

Тричела. Время дрейфа отрицательных ионов, напротив, заметно превышает характерный межимпульсный интервал. Отрицательные ионы сносятся потоком воздуха, что приводит к перераспределению напряженности электрического поля на катодной поверхности. Напряженность электрического поля выше на участках, над которыми концентрация отрицательных ионов уменьшена. Поэтому ионизационные процессы в данной области более вероятны и область локализации разрядного факела смещается в направлении против потока воздуха. В безимпульсном режиме сформирован стационарный катодный слой. Отрицательные и положительные ионы сносятся потоком воздуха, что приводит к смещению разрядного факела в направлении по потоку (рис. 2, *b*).

Обнаружено, что при скорости более 60 м/с разряд может перейти в „распределенную“ форму, при которой свечение разряда наблюдается в виде множества микрозарядов, равномерно распределенных по всей поверхности острия катода. Расстояние между микрозарядами не более 1  $\mu\text{m}$  (рис. 3, *a*). Частота смены локализации разрядного факела такова, что при фотографировании катода с экспозицией 10 мс свечение разрядного факела в виде микрозарядов кажется равномерно распределенным по поверхности катодного острия. По-видимому, при скорости потока воздуха, сравнимой со скоростью дрейфа отрицательных

ионов, поток начинает существенно влиять на факторы, отвечающие за формирование нового импульса Тричела в той же области катодной поверхности, где был сформирован предыдущий импульс. Так, удаление отрицательных ионов, метастабильных молекул, а также охлаждение области локализации разряда приводят к тому, что новый импульс Тричела формируется не в том же месте, где предыдущий, а в произвольной части катода. Увеличение напряжения приводит к переходу разряда в безимпульсную форму и локализации разрядного факела (рис. 3, б).

Таким образом, проведено исследование влияния потока воздуха на динамику разрядного факела на катодной поверхности в отрицательном коронном разряде. Обнаружено, что кольцевая форма разряда не реализуется при скорости потока более 10 м/с. Обнаружено, что в режиме импульсов Тричела разрядный факел на поверхности катода смещается навстречу потоку воздуха, а в безимпульсном режиме — по потоку. При скорости потока более 60 м/с разряд в режиме импульсов Тричела реализуется в „распределенной“ форме.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14-12-00784).

## Список литературы

- [1] *Trinh N. Giao, Jordan J.B.* // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. N 10. P. 3991–3999.
- [2] *Akichev Yu., Grushin M., Kochetov I. et al.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2005. V. 14. P. S18–S25.
- [3] *Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Трушкин Н.И.* // Физика плазмы. 2001. Т. 27. В. 6. С. 550–562.
- [4] *Loeb L.B.* Electrical Coronas. Their Basic Physical Mechanisms. Berkeley, CA: Univ. California Press, 1965.
- [5] *D'Alessandro F.* // J. Electrostat. 2009. V. 67. P. 482–487.
- [6] *Chapman S.* // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. N 12. P. 2165–2169.
- [7] *Akichev Yu.S., Grushin M.E., Napartovich A.P. et al.* // Proc. of 12 Int. Conf. on Gas Discharge and Their Applications. Greifswald, Germany. 1997. V. 1. P. 153–155.
- [8] *Greenwood A.* // J. Appl. Phys. 1952. V. 23. N 12. P. 1316–1319.
- [9] *Асиновский Э.И., Петров А.А., Самойлов И.С.* // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 68. № 5. С. 354–355.
- [10] *Amirov R.H., Barenholts S.A., Korostelev E.V. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 550. P. 012052.
- [11] *Амиров Р.Х., Баренгольц С.А., Коростелев Е.В. и др.* // Краткие сообщения по физике. 2015. Т. 42. № 3. С. 9–18.