

УДК 537.52; 537.533

DOI: 10.21779/2542-0321-2021-36-4-13-19

В.С. Курбанисмаилов, Г.Б. Рагимханов, З.Р. Халикова

Процессы расширения плазмы катодного факела в высоковольтном разряде в Не высокого давления

*Дагестанский государственный университет; Россия, 367000, г. Махачкала,
ул. М. Гаджиева, 43а; Vali_60@mail.ru*

Приведены экспериментальные и теоретические результаты исследования процесса расширения катодной плазмы в высоковольтном разряде в гелии высокого давления в коротких межэлектродных промежутках (1 см). По пространственно-временным картинам, полученным с применением фотоэлектронного регистратора (ФЭР) с наносекундным временным разрешением, изучена динамика развития тела свечения прикатодной плазмы и получена характерная временная зависимость скорости расширения плазмы катодного факела. Показано, что в спектре излучения разряда присутствуют линии излучения материала вещества электродов как в области катодного факела, так из центральной зоны разрядного промежутка. Предложена одномерная физико-математическая модель расширения плазмы катодного факела. Рассчитаны характерные пространственно-временные распределения концентрации ионов и атомов металлов (Al), электронов, давления и плотности вещества, а также скорости расширения прикатодной плазмы. Показано, что пары металла способны проникать вглубь разрядного промежутка и тем самым влиять на кинетику процессов в объеме разряда. Получено удовлетворительное согласие результатов расчетов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: *газовый разряд, прикатодная плазма, спектр излучения*.

Введение

Широкое практическое применение в различных областях науки и техники стимулирует дальнейшие исследования свойств высоковольтных импульсных газовых разрядов.

При этом, несмотря на большой объем данных, представленных в научно-периодической литературе, отдельные вопросы формирования и развития импульсных высоковольтных разрядов представляют значительный интерес. В частности, остается открытым вопрос о формировании пространственной микроструктуры в наносекундных искровых разрядах и взаимодействии токовых нитей с поверхностью электродов, определяющих характер и степень распыления материала вещества электродов.

Взаимодействие плазмы импульсного разряда с поверхностью электродов приводит к их распылению, следовательно, в разрядную зону попадают атомы металла [1–3]. Добавление малых примесей металла в инертный газ [4–6] способно существенно повлиять на ионизационно-дрейфовые характеристики электронов.

С другой стороны, ряд явлений, протекающих в прикатодной области, до сих пор недостаточно исследован. Одно из них связано с наличием микроструктуры токовых каналов, когда искровой канал представляет собой скопление большого количества токовых микронитей (около 100 и более каналов микронного диаметра) [7–10]. Взаимодействие токовых микронитей с поверхностью электрода [8, 9] приводит к образова-

нию микрократеров диаметром от 5 до 35 мкм и глубиной от 0.1 до 0.4 мкм, которые формируют полусферические ударные волны.

Поэтому экспериментальное и теоретическое исследования процессов формирования и расширения катодного факела представляют научный интерес.

В статье обсуждаются результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса расширения плазмы катодного факела в импульсном разряде между двумя плоскими электродами в гелии атмосферного давления.

Экспериментальное оборудование, методики исследования и результаты.

С экспериментальной установкой и методами исследования можно ознакомиться в работах [11, 12]. Исследуемый разряд создавался между двумя алюминиевыми электродами с радиусом кривизны $R = 30$ см, диаметром электродов $D = 4$ см. Расстояние между электродами $d = 1$ см, подача высоковольтных импульсов напряжения амплитудой до 25 кВ на предварительно ионизованный газ с концентрацией электронов $\sim 10^8 \text{ см}^{-3}$.

Динамика развития свечения в разрядном промежутке отслеживалась с помощью электронно-оптического преобразователя (ФЭР-2).

Спектр излучения как из объема плазмы, так и из приэлектродной плазмы регистрировался с помощью монохроматора с дифракционной решеткой (МДПС-3).

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

На рисунке 1 представлены покадровые картины свечения разряда для двух моментов времени. В условиях предварительной ионизации газа в промежутке идет формирование квазистационарного однородно объемного разряда (см. рис. 1a). Однако однородная форма горения разряда является неустойчивой, и за счет взрывоэмиссионных процессов на катоде происходит контрагирование объемного разряда в искровой канал, что отчетливо видно из рисунка 1б в виде светящейся области.

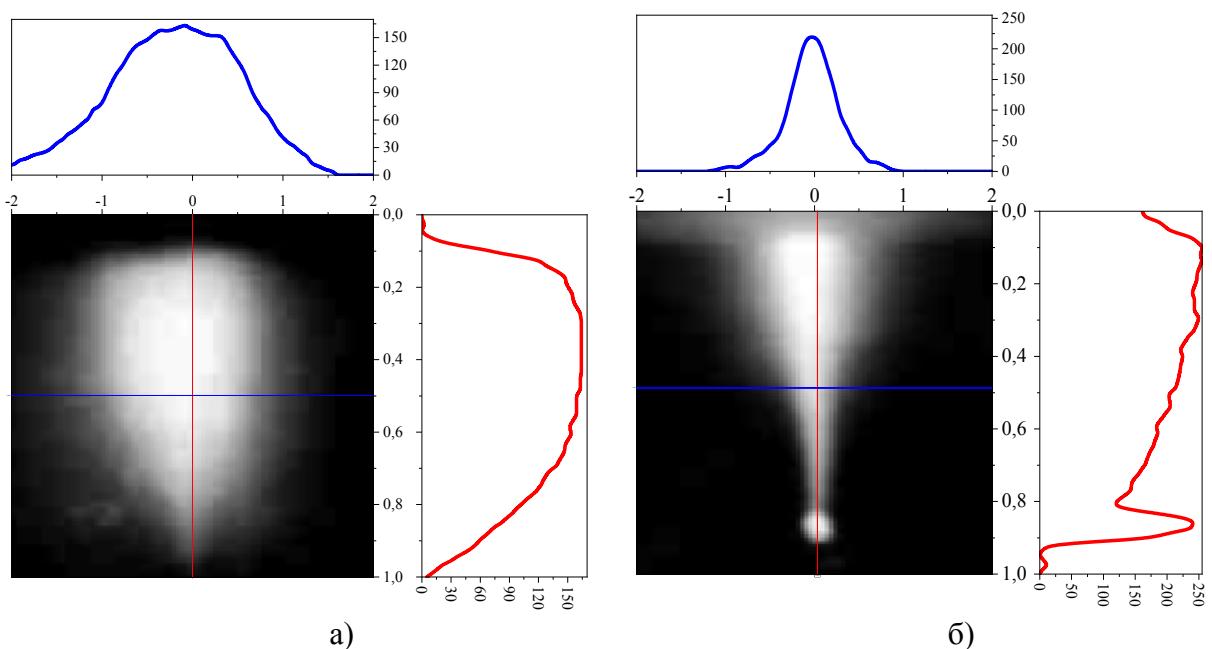


Рис. 1. Картинки свечения плазмы импульсного разряда в гелии атмосферного давления для прикладываемого поля 10 кВ

По пространственно-временным картинам свечения была определена скорость расширения катодного пятна (рис. 2), которая составляет $\sim 10^5$ – 10^6 см/с. Со временем скорость ее разлета уменьшается.

С другой стороны, в процессе образования и развития катодных и анодных факелов в разрядную зону идет выброс паров материала вещества электродов. Следовательно, в спектре излучения разряда должны присутствовать линии излучения атомов алюминия.

Анализ спектрального состава излучения прикатодной плазмы показал, что в плазме катодного пятна формируются атомарные линии Al I 396,1 нм, 394,4 нм.

На рисунке 3 представлены зависимости от времени относительной интенсивности линии Al 394,4 нм, регистрируемые из различных областей разряда.

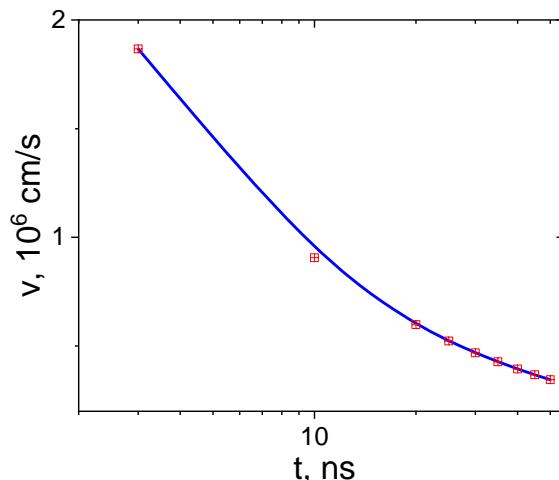


Рис. 2. Характерная временная зависимость скорости расширения плазмы катодного факела: $U = 9$ кВ, $p = 1$ атм, $d = 1$ см

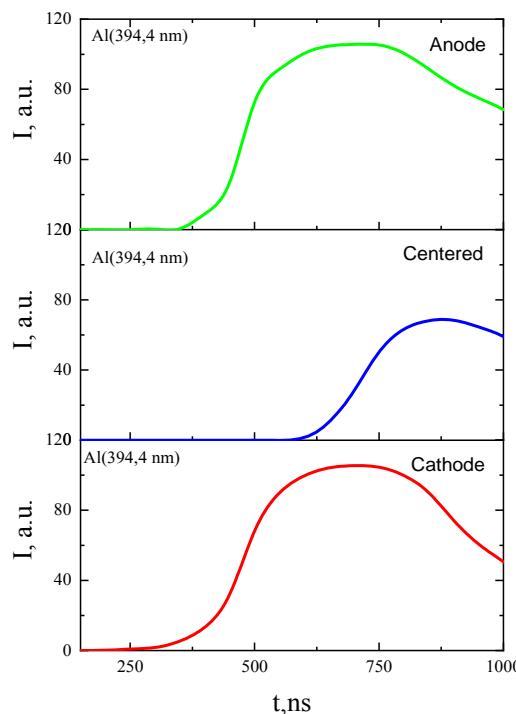


Рис. 3. Характерные временные зависимости линии алюминия Al 394,4 нм из различных областей межэлектродного промежутка

Как видно, линии излучения атомов алюминия регистрируются не только из приэлектродной плазмы, но и из средней зоны разряда. Последнее указывает на то, что пары металла успевают проникнуть вглубь разрядного промежутка.

Атомарная линия алюминия Al 394,4 нм достигает максимального значения через 20–30 нс с момента резкого роста тока разряда. При этом концентрация электронов в катодном факеле, оцененная по полуширине спектральной линии HeII $\lambda = 468,6$ нм для двух значений времени 30 нс, 20 нс, составляет соответственно $\sim 10^{19}$ см⁻³ и $2 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Температура электронов в катодном факеле через 30–40 нс, оцененная по методу относительных интенсивностей спектральных линий Al I 396,1 нм, 394,4 нм, составляет 4–5 эВ.

Расчетно-теоретическое рассмотрение динамики расширения плазмы катодного пятна

Разлет плазмы ЛТР в фоновый газ описывается системой одномерных (1D) уравнений Эйлера:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_v u)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_{ab} \frac{\partial \omega_v}{\partial x} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (p + \rho u^2) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(E + \frac{u^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho u \left(E + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right) \right] = 0. \quad (4)$$

Здесь ρ – полная плотность газа, ρ_v – плотность фонового газа, $\omega_v = \rho_v/\rho$, u – скорость, p – давление, D_{ab} – коэффициент бинарной диффузии, E – внутренняя энергия.

Система (1)–(4) решается относительно плотности ρ , импульса ρu и плотности внутренней энергии ρE .

Расчеты выполнены в гелии для сантиметрового промежутка, когда в качестве материала катода используется алюминий. Получены характерные распределения в межэлектродном промежутке для концентрации электронов n_e , ионов алюминия Al⁺, температуры, давления P , плотности газа ρ и скорости расширения катодной плазмы.

На рисунке 4 приведены результаты расчета концентраций электронов (а) и ионов алюминия (б) в разрядном промежутке.

Полученные данные позволяют проследить за динамикой расширения катодного факела и ее характерными параметрами. Установлено, что пары металла за время 0.8 мкс проникают вглубь промежутка на расстояние свыше 0,7 см, что подтверждают результаты исследования спектра излучения разряда. Результаты расчета скорости расширения катодного факела находятся в удовлетворительном согласии с данными экспериментов.

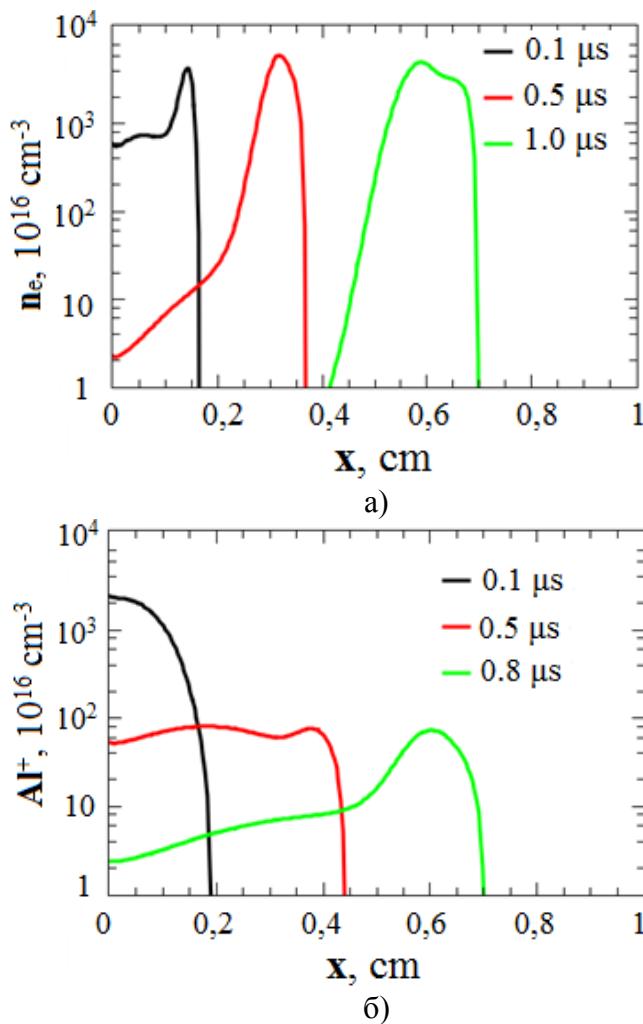


Рис. 4. Характерные распределения концентрации электронов (а) и ионов алюминия (б) в разрядном в промежутке (давления газа $p = 1$ атм)

Кроме того, обнаруживается немонотонная зависимость рассчитанных параметров от давления газа.

По мере расширения катодного факела, распространения паров металла вглубь разрядного промежутка их концентрация уменьшается.

Из сравнения результатов расчета (рис. 4) и экспериментальной зависимости для скорости расширения катодного факела от времени видим, что они находятся в удовлетворительном согласии.

Конечно, в общем случае требуется решить двух- или трехмерную задачу, поскольку одномерное рассмотрение не позволяет учесть все факторы и процессы и не может дать полную картину исследуемого явления. Поэтому данная работа будет продолжена.

Выводы

Высоковольтный разряд в гелии высокого давления сопровождается распылением материала вещества электродов. Косвенными доказательствами служат наличие в спектре прикатодной плазмы линий испускания атомов паров материала вещества электрода. Результаты эксперимента и численного моделирования катодного факела

позволяют сделать вывод, что пары металла проникают вглубь разрядного промежутка и могут существенно повлиять на кинетику процессов в плазмы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00333а.

Литература

1. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. – М.: Наука, 1991. – 224 с.
2. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Арсланбеков М.А., Абакарова Х.М., Али Рафид А.А. Импульсный объемный разряд в гелии при высоких перенапряжениях // Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2, № 3. – С. 234–242.
3. Ломаев М.И., Белоплотов Д.В., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф. Спектральные и амплитудно-временные характеристики излучения плазмы импульсно-периодического разряда, инициируемого убегающими электронами // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 120, № 2. – С. 179–183.
4. Бахан П.А., Закревский Д.Э. Исследование продольного импульсно-периодического разряда в парогазовых смесях высокого давления // Журнал технической физики. – 1997. – Т. 67, № 4. – С. 25–31.
5. Курбанисмаилов В.С., Майоров С.А., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б. Оптические и кинетические характеристики импульсного разряда в гелии с парами железа при атмосферном давлении // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89, вып. 3. – С. 384–387.
6. Курбанисмаилов В.С., Майоров С.А., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Халикова З.Р. Кинетические и оптические характеристики импульсного разряда в гелии в режиме распыления материала катода // Вестник Дагестанского государственного университета Сер. 1: Естественные науки. – 2020. – Т. 35, вып. 4. – С. 51–62.
7. Baksh E.Kh., Blinova O.M., Karelina V.I., Erofeev M.V., Riperko V.S., Tarasenko V.F., Trenkin A.A., Shibitov Yu.M. Dynamics of formation of the spatial structure of pulse discharges in dense gases in the point-to-plane (cathode) gaps and their erosive effect on the surface of flat electrodes // Plasma physics. – 2016. – V. 9, № 42. – P. 859–870.
8. Trenkin A.A. Erosion effect of a microstructured spark channel on the surface of a flat copper electrode // Technical Physics. – 2019. – V. 89, № 2. – P. 189–191.
9. Almazova K.I., Belonogov A.N., Borovkov V.V., Gorelov E.V., Morozov I.V., Tren'kin A.A., Kharitonov S.Yu. Investigation of the dynamics of a spark discharge in the air in the point-plane interval using shadow photography // Technical Physics. – 2019. – V. 1, № 64. – P. 61–63.
10. Parkevich E.V., Medvedev M.A., Ivanenkov G.V., Khirianova A.I., Selyukov A.S., Agafonov A.V., Korneev Ph.A., Gus'kov S.Y and Mingaleev A.R. Extremely fast formation of anode spots in an atmospheric discharge points to a fundamental ultrafast breakdown mechanism // Plasma Sources Sci. Technol. – 2019. – V. 28. – P. 9103007.
11. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А. К вопросу о характере контрагирования объемного разряда в гелии атмосферного давления // ТВТ. – 1995. – Т. 33, № 3. – С. 346–350.
12. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Баирханова М.Г., Гаджиев М.Х., Рагимханов Г.Б., Ката А.Дж. Неустойчивость фронта волны ионизации катодонаправленного стримера в гелии высокого давления // Прикладная физика. – 2009. – № 5. – С. 62–66.

Поступила в редакцию 22 сентября 2021 г.

УДК 537.52; 537.533

DOI: 10.21779/2542-0321-2021-36-4-13-19

**Plasma and Gas-Dynamic Near-Electrode Processes in Pulsed Discharge
in Atmospheric Pressure Helium**

V.S. Kurbanismailov, G.B. Ragimkhanov, Z.R. Khalikova

*Dagestan State University; Russia, 367000, Makhachkala, M. Gadzhiev st., 43a;
vali_60@mail.ru*

Experimental and theoretical results of studying the process of cathode plasma expansion in a high-voltage discharge in high-pressure helium in short interelectrode gaps (1 cm) are presented. The dynamics of the development of the glow body of the near-cathode plasma was studied using the spatio-temporal patterns obtained with the use of a photoelectronic recorder (PED) with a nanosecond time resolution, and a characteristic time dependence of the expansion rate of the cathode flame plasma was obtained. It is shown that the emission spectrum of the discharge contains emission lines from the material of the electrode material both in the region of the cathode torch and from the central zone of the discharge gap. A one-dimensional physical and mathematical model of the expansion of the cathode torch plasma is proposed. The characteristic spatio-temporal distributions of the concentration of ions and atoms of metals (Al), electrons, pressure and density of matter, as well as the expansion rate of the near-cathode plasma are calculated. It is shown that metal vapors are able to penetrate deep into the discharge gap and thereby affect the kinetics of processes in the discharge volume. Satisfactory agreement between the calculation results and experimental data has been obtained.

Keywords: *gas discharge, near-cathode plasma, radiation spectrum.*

Received 22 September 2021