

УДК 537.525, 533.9.03
DOI: 10.18799/29495407/2025/4/108
Шифр специальности ВАК: 1.3.9
Научная статья



Формирование протяженных пучково-плазменных образований в полом катоде с распылителями металлической плазмы

Д.Д. Зайцев[✉], М.В. Савчук, Т.В. Коваль, В.В. Денисов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, г. Томск

[✉]danzay7@yandex.ru

Аннотация. Проведено численное и экспериментальное исследование генерации плазмы в несамостоятельном режиме горения тлеющего разряда в протяженном полом катоде с генераторами металлической плазмы. Результаты численного моделирования отражают основные закономерности формирования газо-металлических пучково-плазменных образований, полученных в эксперименте. Установлено, что при работающих генераторах по сравнению с выключенными уменьшается продольная неоднородность распределения концентрации плазмы, а температура электронов увеличивается (с 0,9 до 3 эВ). Полученные результаты важны для дальнейших исследований генерации протяженных газо-металлических пучково-плазменных образований и для проектирования протяженных генераторов газо-металлических пучково-плазменных образований.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, несамостоятельный тлеющий разряд, полый катод, газо-металлическая плазма, пучково-плазменное образование, дрейфово-диффузионное приближение

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2022-0001.

Для цитирования: Формирование протяженных пучково-плазменных образований в полом катоде с распылителями металлической плазмы / Д.Д. Зайцев, М.В. Савчук, Т.В. Коваль, В.В. Денисов // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2025. – Т. 3. – № 4. – С. 29–37. DOI: 10.18799/29495407/2025/4/108

UDC 537.525, 533.9.03
DOI: 10.18799/29495407/2025/4/108
Scientific paper



Formation of extended beam-plasma formations in a hollow cathode with metal plasma evaporators

D.D. Zaytsev[✉], M.V. Savchuk, T.V. Koval, V.V. Denisov

Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russian Federation

[✉]danzay7@yandex.ru

Abstract. The paper presents the results of numerical and experimental study of plasma generation in the non-self-sustained glow discharge mode in an extended hollow cathode with metal plasma generators. The numerical simulation results reflect the main experimentally obtained patterns of gas-metal beam-plasma formation. It was found that, when the generators are operating, compared to when they are turned off, the longitudinal non-uniformity of the plasma density distribution decreases, while the electron temperature increases (from 0.9 to 3 eV). These results are important for further research of the generation of extended gas-metal beam-plasma formation and for the design of extended generators of gas-metal beam-plasma formations.

Keywords: computer modeling, non-self-sustained glow discharge, hollow cathode, gas-metal plasma, beam-plasma formation, drift-diffusion approximation

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (subject FWRM-2022- 0001).

For citation: Zaytsev D.D., Savchuk M.V., Koval T.V., Denisov V.V. Formation of extended beam-plasma formations in a hollow cathode with metal plasma evaporators. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2025, vol. 3, no. 4, pp. 29–37. DOI: 10.18799/29495407/2025/4/108

Введение

Эксплуатационные свойства изделия (твёрдость, абразивная и химическая стойкость, износостойкость) в целом определяет поверхностный слой. Методы ионно-плазменной модификации поверхности являются современными и технологичными для формирования функциональных покрытий с требуемым комплексом свойств. Условия воздействия ионов и нейтральных частиц на поверхностный слой обрабатываемого изделия оказывают определяющее влияние на структурно-фазовый состав, микроструктуру покрытия и скорость осаждения покрытия [1–4].

Внедрение в промышленное производство вакуумно-дугового плазменно-ассистированного метода [5–7], используемого для модификации поверхности протяженных крупногабаритных изделий, требует решения задачи генерации объёмно-однородной плазмы в больших ($\approx 1 \text{ м}^3$) протяженных вакуумных объёмах. Одним из наиболее перспективных способов формирования объёмно-однородных плазменных образований при низком давлении ($\approx 1 \text{ Па}$) является их генерация в несамостоятельном тлеющем разряде низкого давления при инжекции плазмы или электронов в полый катод основного разряда.

Математическое моделирование газового разряда является необходимым инструментом при оптимизации существующих и проектировании новых плазменных источников. Одномерные модели тлеющего разряда с полым катодом, основанные на ряде допущений, при условии их верификации экспериментальными данными позволяют описывать закономерности протекания процессов в разряде, оценивать характеристики плазмы. Характерной особенностью разряда низкого давления является наличие отрицательного потенциального барьера вблизи анода [8, 9]. Плазма внутри катодной полости представляет собой потенциальную ловушку для электронов [10–12]. Инжекция в катодную полость электронов, ускоряемых в катодном падении потенциала, позволяет понизить давление и напряжение горения тлеющего разряда [13, 14].

Различные кинетические [15, 16] и гибридные методы [17, 18], а также подходы с использованием аналитических формулировок нелокальной

ионизации [19] сложны и трудоемки, что затрудняет их широкое распространение при моделировании практических устройств. Гидродинамический подход к моделированию газовых разрядов обеспечивает возможность получения как качественных, так и количественных характеристик разряда с использованием экспериментально-расчётных методик. Гидродинамические расчеты с использованием имеющихся коммерческих и свободных программных пакетов, учитывая при этом слабые места модели, имеют преимущество перед реализацией трудоемких гибридных подходов в сложной геометрической конфигурации. На сегодняшний день хорошим согласием между расчетом и экспериментом (будь то зондовые или оптические методы) считается различие результатов примерно в два раза. Значимым является воспроизводимость основных экспериментальных закономерностей, то есть согласие в изменении параметров разряда в расчете и на эксперименте при изменении внешних условий (давления газа, тока и т. д.), научную ценность представляют подходы, позволяющие получать описание параметров разряда на количественном уровне. В работах [20, 21] в дрейфово-диффузионном приближении осуществлена численная реализация моделирования генерации плазмы в полых катодах больших объемов с применением пакета Comsol Multiphysics [22].

В данной работе приводятся результаты экспериментальных измерений и компьютерного моделирования горения несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления в протяженной электроразрядной системе с полым катодом, определяется влияние распылителей металлической плазмы на продольную неоднородность распределения концентрации и температуру плазмы.

Экспериментальная установка

Исследование равномерности распределения концентрации плазмы в протяженном полой катод (высота 1200 мм и диаметр 600 мм) проводилось на экспериментальном стенде (рис. 1). Источники электронов, инжектируемых в тлеющий разряд через ячейки сеточных электродов, расположены на верхнем и нижнем основаниях полого катода. Стенки вакуумной камеры и сеточный эмиссионный электрод имели потенциал катода. Четыре

кольцевых анода одинаковой площади являются анодом для тлеющего и вакуумно-дуговых разрядов. Два анода расположены в области геометрической тени к потоку эмитируемых электронов из близлежащего источника электронов. Два других располагались соосно с катодно-дуговыми испарителями, обеспечивающими генерацию металлической плазмы с титановых катодов с током дугового разряда каждого из катодно-дуговых испарителей 80 А. Отношение площадей анода к катоду 1:17. Рабочее давление в вакуумной камере составляло $\approx 0,5$ Па за счет напуска аргон-азотной рабочей газовой смеси при соотношении Ar/N_2 , равном 1/9.

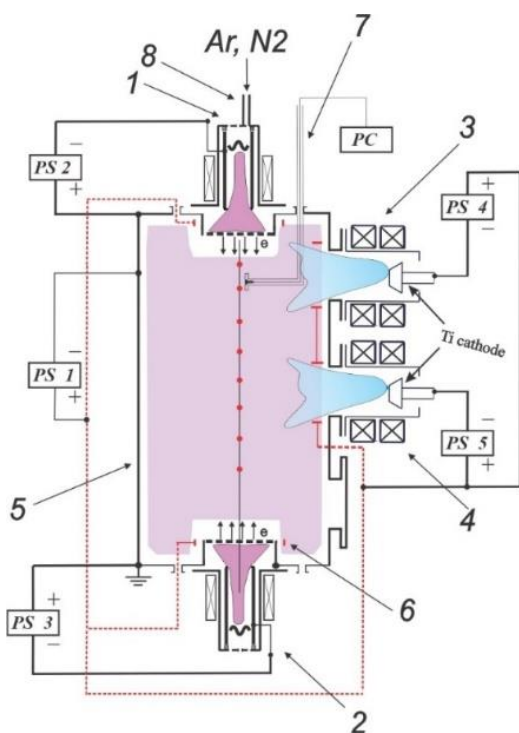


Рис. 1. Экспериментальная разрядная схема в протяженном полой катоде с генераторами металлической плазмы: 1, 2 – источники газовой плазмы; 3, 4 – электродуговые испарители; 5 – вакуумная камера; 6 – анодные кольца; 7 – зонд Ленгмюра; 8 – ввод подачи газа

Fig. 1. Experimental discharge circuit in an extended hollow cathode with metal plasma generators: 1, 2 – gas plasma sources; 3, 4 – electric arc evaporators; 5 – vacuum chamber; 6 – anode rings; 7 – Langmuir probe; 8 – gas supply inlet

Определение закономерностей генерации протяженных газо-металлических пучково-плазменных образований (ППО) проводилось с использованием одиночного цилиндрического зонда Ленгмюра. Измерительный щуп зонда располагался на центральной оси вакуумной камеры. Перемещение зонда осуществлялось в аксиальном направлении с

интервалом в 10 см. Измерения проводились в восьми пространственных точках и в четырех различных режимах. Во всех режимах два источника газовой плазмы – 1 и 2, расположенные на верхнем и нижнем основании вакуумной камеры, функционировали непрерывно, обеспечивая инжекцию электронов в полый катод тлеющего разряда.

Значения концентрации плазмы в каждой точке были рассчитаны по электронной ветви зондовой вольтамперной характеристики. Из этих же данных определялась температура электронов полуграфическим методом. Измерения проводились для четырех различных режимов (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики исследуемых режимов

Table 1. Characteristics of the studied modes

№ режима Mode number	Вакуумно-дуговой испаритель № 1 Vacuum arc evaporator no. 1	Ток дугового испарителя, А Arc evaporator current, A	Вакуумно-дуговой испаритель № 2 Vacuum arc evaporator no. 2	Ток дугового испарителя, А Arc evaporator current, A
1	Выкл/Off	0	Выкл/Off	0
2	Вкл/On	80	Выкл/Off	0
3	Выкл/Off	0	Вкл/On	80
4	Вкл/On	80	Вкл/On	80

Напряжение тлеющего разряда составляло 66 В, а ток был равен 3 А при выключенных дуговых испарителях и 16 А при включенных. Плазменный источник с накалимым катодом (ПИНК) имел одинаковые характеристики во всех режимах: $I_p=15$ А, $U_p=30$ В.

Модель несамостоятельного тлеющего разряда в полой катоде

Процессы разряда описываются системой гидродинамических уравнений для электронной плотности n_e и средней энергии электронов n_ε , уравнением Пуассона для электростатического потенциала и многокомпонентным диффузионным соотношением:

$$\frac{\partial n_{e,\varepsilon}}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_{e,\varepsilon} + a_{e,\varepsilon} \mathbf{E} \cdot \Gamma_e = R_{e,\varepsilon},$$

$$\Delta \varphi = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_i - n_e),$$

$$\rho \frac{\partial w_m}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{j}_m + R_m.$$

Здесь $\Gamma_{e,\varepsilon} = -\mu_{e,\varepsilon} \mathbf{E} n_{e,\varepsilon} - \nabla (D_{e,\varepsilon} n_{e,\varepsilon})$ – потоки электронов и энергии; $\mathbf{E} = -\nabla \varphi$; $\mu_{e,\varepsilon}$ и $D_{e,\varepsilon}$ – подвижности и коэффициенты диффузии электронов и энергии (индексы e, ε обозначают величины, описывающие электроны и их среднюю энергию); $a_e=0$, $a_\varepsilon=1$; m –

номера компонент (ионов, нейтралов и возбужденных атомов); \mathbf{j}_k – вектор потока диффузии; R_m и w_m – константа скорости реакции и массовая доля k -ой компоненты; ρ – плотность смеси; $R_{e,\varepsilon}$ – источники элементарных процессов и неупругих столкновений.

На границе полого катода учитывается вторичная эмиссия электронов и потери на стенках электронного потока и электронной плотности энергии:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Gamma}_e = \frac{1}{4} v_{ch} n_e - 2\gamma \mathbf{\Gamma}_i \cdot \mathbf{n},$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Gamma}_\varepsilon = \frac{1}{4} v_{ch} n_\varepsilon - 2\gamma \mathbf{\Gamma}_i \cdot \mathbf{n}.$$

Здесь \mathbf{n} – единичный вектор нормали; v_{ch} – средняя хаотическая скорость электрона; γ – коэффициент вторичной электронной эмиссии; $\mathbf{\Gamma}_i$ – поток положительных ионов на стенку. На эмиссионной границе источника электронов задаются потоки электронов и плотности энергии, соответствующей потенциалу плазмы дугового разряда дополнительного источника:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Gamma}_e = -\frac{j_b}{e}, \quad \mathbf{n} \cdot \mathbf{\Gamma}_\varepsilon = -\frac{j_b}{e} \varepsilon_{b0}.$$

Катодная область является важнейшей частью тлеющего разряда, где сосредоточены все процессы, ответственные за его существование. Здесь на границе появляются электроны за счет ионно-электронной эмиссии и электроны внешнего источника, происходит их ускорение, а также имеют место поверхностные реакции. На границе испарителей инжектируется поток электронов с энергией, соответствующей напряжению дугового разряда.

В полом катоде геометрия и местоположение анода оказывают существенное влияние на распределение концентрации плазмы. Анод кольцевой формы, расположенный в области геометрической тени по отношению к инжектируемым электронам, обеспечивает максимальную длину траектории быстрых электронов в полом катоде до момента ухода на анод и распределение концентрации плазмы в полом катоде с максимумом вблизи эмиссионной поверхности в условиях квазинейтральности плазмы. Экспериментально и численно показано [21], что два противоположно расположенных источника электронов и кольцевых анода в протяженном полом катоде уменьшают неоднородность распределения концентрации плазмы. В разрядной схеме полого катода (рис. 1) с испарителями металлической плазмы влияние их на характеристики газовой плазмы является предметом исследования.

Для упрощения численной реализации математической модели расчеты проведены для двухмерной аксиально-симметричной геометрии системы при

равной площади экспериментальных и расчетных кольцевых анодов испарителей металлической плазмы.

Численные расчеты проводились в модуле *Plasma* программного комплекса *Comsol Multiphysics* [23]. При расчётах учитывались элементарные реакции для смеси азота и аргона, а также соответствующие им потери энергии (табл. 2). Сечения взаимодействия электронов с нейтральными атомами и молекулами брались из базы данных IST-LISBON [24].

Таблица 2. Элементарные реакции для смеси азота и аргона

Table 2. Elementary reactions for a mixture of nitrogen and argon

Реакций Reactions	Тип реакции Type of reaction	Потеря энергии, $\Delta\varepsilon$ (эВ) Energy loss, $\Delta\varepsilon$ (eV)
$e+N_2 \rightarrow N_2+e$	Рассеяние/Scattering	–
$e+N_2 \rightarrow N_2^++2e$	Ионизация/Ionization	15,7
$e+N_2 \rightarrow N_2(A)+e$	Возбуждение/Excitation	6,17
$e+N_2(A) \rightarrow N_2^++2e$	Ионизация/Ionization	8,56
$e+Ar \rightarrow Ar+e$	Рассеяние/Scattering	–
$e+Ar \rightarrow Ar^++2e$	Ионизация/Ionization	15,8
$e+Ar \rightarrow Ar^*+e$	Возбуждение/Excitation	11,5
$e+Ar^* \rightarrow Ar^++2e$	Ионизация/Ionization	4,42

Экспериментальные и численные результаты

Для более детального рассмотрения распределения плазменных характеристик на рис. 2 представлены зависимости концентрации и температуры электронов вдоль центральной оси вакуумной камеры. Экспериментальные измерения проводились вдоль оси симметрии вниз от верхнего источника электронов, на графиках отсчет идет в положительном направлении, начало координат соответствует границе верхнего источника.

Из данных на рис. 2 видно, что концентрация электронов газовой плазмы уменьшается в центральной области из-за наличия кольцевых анодов для дуговых испарителей, при этом температура электронов практически не изменяется. При включении одного из двух испарителей неравномерность в распределении концентрации электронов уменьшается, но возрастает их температура. Когда включены оба источника металлической плазмы, имеется характерный максимум концентрации электронов напротив дугового испарителя № 1.

В табл. 3 приведено сравнение расчетных и экспериментальных характеристик плазмы для всех режимов.

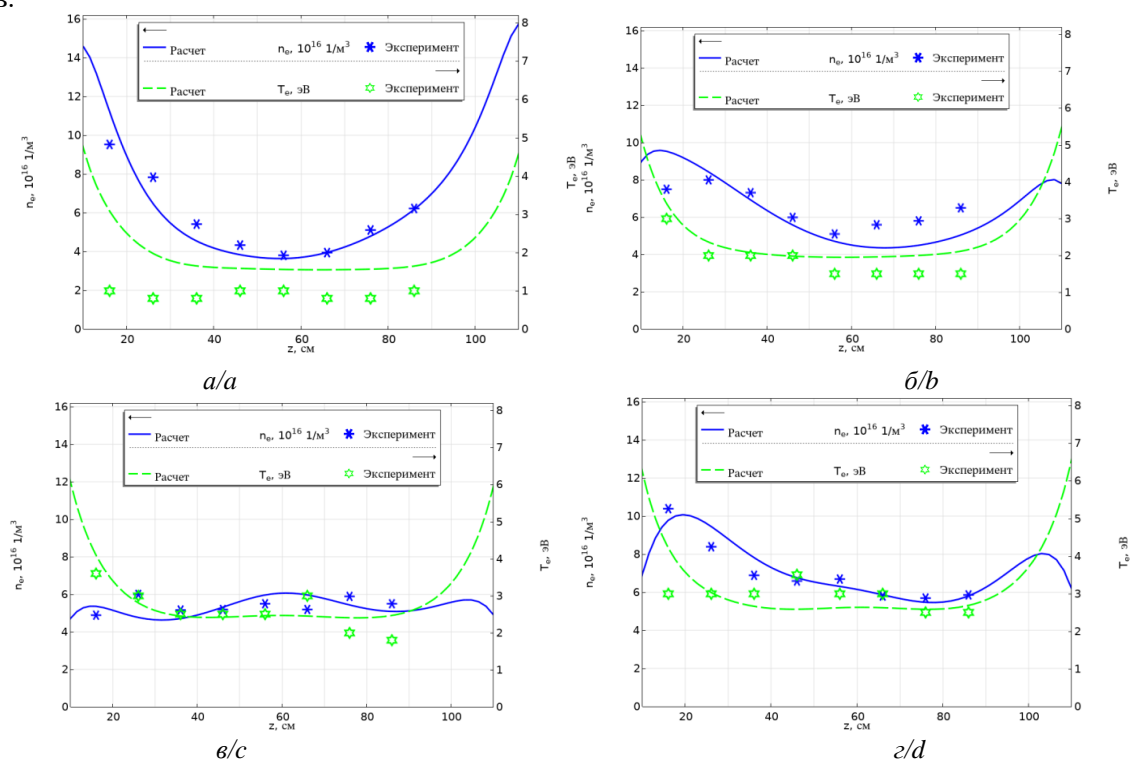


Рис. 2. Распределение концентрации (сплошная линия) и температуры (пунктирная линия) электронов вдоль оси вакуумной камеры для режима: а) № 1 (источники металлической плазмы выключены); б) № 2 (горит источник металлической плазмы № 1); в) № 3 (горит источник металлической плазмы № 2); г) № 4 (оба источника металлической плазмы включены)

Fig. 2. Distribution of electron concentration (solid line) and temperature (dotted line) along the axis of the vacuum chamber for mode: a) no. 1 (metal plasma sources are turned off); b) no. 2 (metal plasma source no. 1 is on); c) no. 3 (metal plasma source no. 2 is on); d) no. 4 (both metal plasma sources are switched on)

Таблица 3. Результаты расчетов параметров плазмы

Table 3. Results of calculations of plasma parameters

Режим Mode	Тип результатов Result type	Среднее значение концентрации плазмы Mean plasma concentration	Максимальное значение концентрации плазмы Maximum plasma concentration value	Коэффициент неравномерности Unevenness coefficient	Средняя температура электронов Average electron temperature
		$n_{cp}, 10^{16} \text{ м}^{-3}$	$n_{max}, 10^{16} \text{ м}^{-3}$	$(n_{max}-n_{cp})/n_{cp}, \%$	$T_{cp}, \text{ эВ}$
1	Эксперимент Experiment	5,8	9,5	65	0,9
	Расчет Calculation	5,6	11,2	101	1,8
2	Эксперимент Experiment	6,5	8,0	24	1,9
	Расчет Calculation	6,1	9,5	55	2,2
3	Эксперимент Experiment	5,4	5,9	9	2,6
	Расчет Calculation	5,3	6,0	12	2,7
4	Эксперимент Experiment	7,0	10,4	48	2,9
	Расчет Calculation	7,2	9,8	37	2,9

Из данных в табл. 3 следует, что расчетные характеристики плазмы соответствуют экспериментальным данным. Полученные экспериментальные данные показывают, что электроны, эмитируемые вакуумно-дуговыми испарителями не способны эффективно ионизировать плазму в разрядном промежутке. Концентрация заряженных частиц в таком случае составляет $9,4 \cdot 10^{15} \text{ 1/м}^3$, что на $\approx 80\%$ ниже, чем концентрация заряженных частиц при работающих источниках газовой плазмы, равная $5,9 \cdot 10^{16} \text{ 1/м}^3$. При этом температура электронов значительно возросла от 0,9 до 2,9 эВ, соответственно. Кроме того, коэффициент неравномерности для газовой плазмы крайне высок, но при включении дуговых испарителей он сильно снижается, вплоть до значений 9 % (при работе только дугового испарителя № 2). В случае, когда функционируют оба источника металлической плазмы, коэффициент неравномерности меньше, чем в газовой плазме, но несущественно.

Следует отметить, что при дрейфово-диффузионном подходе тяжело достичь условий, при которых средняя температура электронов будет на уровне 1 эВ. Однако при использовании больших мощностей в плазменных генераторах наблюдается лучшее соответствие между результатами моделирования и эмпирическими данными. В эксперименте это может быть связано с влиянием на характеристики газовой плазмы не только электронов, выходящих из катодов испарителей, но и электронов металлической плазмы. В модели не рассматривается металлическая плазма, заполняющая пространство вакуумной камеры, энергия дрейфа которой может быть эквивалентна напряжению горения разряда.

На рис. 3 приведены расчетные совмещенные для наглядности пространственные распределения концентрации и температуры электронов по всему объему вакуумной камеры для всех режимов.

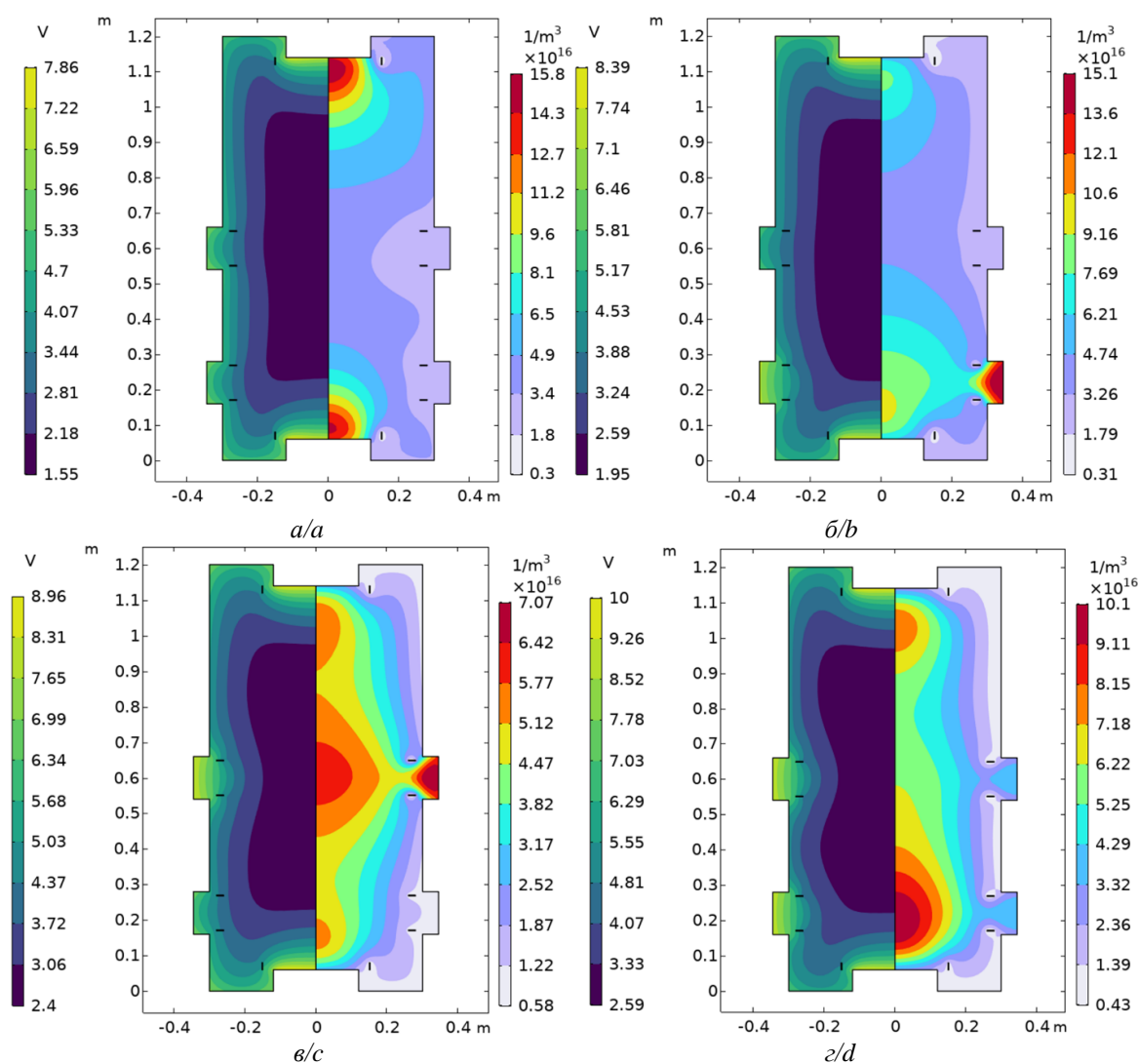


Рис. 3. Пространственное распределение концентрации и температуры электронов для режима: а) № 1 (источники металлической плазмы выключены); б) № 2 (горит источник металлической плазмы № 1); в) № 3 (горит источник металлической плазмы № 2); г) № 4 (оба источника металлической плазмы включены)

Fig. 3. Spatial distribution of electron concentration and temperature for mode: a) no. 1 (metallic plasma sources are off); b) no. 2 (metallic plasma source no. 1 is on); c) no. 3 (metallic plasma source no. 2 is on); d) no. 4 (both sources of metallic plasma are switched on)

Из результатов пространственного распределения плазменных характеристик видно, что в распределении концентрации электронов имеется не только аксиальная асимметрия, но и радиальная. Наименьшая равномерность распределения электронов наблюдается в случае чисто газовой плазмы (режим № 1), а наибольшая – в режиме № 4, когда включены оба дуговых испарителя. Вероятно, что добавление третьего испарителя, симметрично расположенного относительно центра, позволит получить ещё более однородное распределение n_e . При этом распределение температуры электронов достаточно однородное в центральной области вакуумной камеры и плавно увеличивается вблизи приэлектродных областей плазменных генераторов.

Заключение

Экспериментально и численно определены закономерности влияния распылителей металлической плазмы на формирование протяженных газо-металлических пучково-плазменных образований. Наименьшим коэффициентом неравномерности, равным 9 %, для газо-металлического пучково-плазменного образования является режим с источником металлической плазмы, расположенным посередине полого катода длиной 1,2 м.

Включение двух электродуговых испарителей с током разряда 80 А характеризуется повышенной в 2–3 раза температурой электронов, составляющей $\approx 2,9$ эВ, нехарактерной для систем генерации дуговой плазмы с полым анодом. При этом неоднородность аксиального распределения концентрации плазменных электронов связана с асимметрией, вносимой двумя испарителями, которая должна будет уменьшиться при наличии дополнительного третьего испарителя. Результаты численных расчетов согласуются с экспериментальными измерениями и отражают основные факторы влияния генераторов металлической плазмы на характеристики газовой плазмы.

Представляет интерес дальнейшее совершенствование численной модели с учетом процессов многокомпонентного взаимодействия заряженных частиц металлической плазмы с электронами внешнего источника и газовой плазмой. Такой подход позволит обеспечить более точное прогнозирование характеристик газо-металлических пучково-плазменных образований в установках, предназначенных для упрочнения поверхности конструкционных и функциональных материалов в составе современных технологических циклов производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thornton J.A. Influence of apparatus geometry and deposition conditions on the structure and topography of thick sputtered coatings // Journal of Vacuum Science and Technology. – 1974. – Vol. 11. – №. 4. – P. 666–670. DOI: 10.1116/1.1312732
2. Anders A. A structure zone diagram including plasma-based deposition and ion etching // Thin solid films. – 2010. – Vol. 518. – Iss. 15. – P. 4087–4090. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.10.145 EDN: NXFJLX
3. Gas pressure distribution in ion plasma deposition system / V.A. Volpyas, R.A. Platonov, V.V. Karzin, T.K. Legkova // Technical Physics Letters. – 2024. – Vol. 50. – № 2. – P. 70–72. DOI: 10.61011/TP.L.2024.02.57990.19744
4. Синтез и структурные свойства преимущественно ориентированных пленок (Sr,Ba)Nb₂O₆ на поликоре / А.В. Тумаркин, А. Богдан, А.Р. Карамов, Е.Н. Сапего // Письма в Журнал технической физики. – 2025. – Т. 51. – № 7. – С. 50–54. DOI: 10.61011/PJTF.2025.07.60076.20185 EDN: QDCDME
5. Исследование структуры и свойств поверхности штамповой стали 4X5МФС после азотирования в плазме самостоятельного тлеющего разряда с полым катодом / Ю.А. Денисова, А.А. Леонов, В.В. Денисов, Е.В. Островерхов, А.П. Ласковнев, А.В. Басалай // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. сборник научных трудов. – Минск: Государственное научное учреждение "Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси", 2020. – С. 41–47. EDN: WKBVUV
6. Properties of intermetallic Ti-Al based coatings deposited on ultrafine grained martensitic steel / E.L. Vardanyan, K.N. Ramazanov, R.Sh. Nagimov, A.Yu. // Nazarov Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 389. – 125657. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125657 EDN: PWJHDQ
7. Strong amorphization of AlCrNiTiV high-entropy alloy films deposited by cofilter cathode vacuum arc deposition / S.N. Chen, W.Q. Yan, Y.M. Zhao, Q. Li, L. Chen, X. Ouyang, Q.S. Hua, X.Y. Wu, Y.F. Zhang, B. Liao, X.P. Ouyang // Applied Surface Science. – 2022. – Vol. 592. – 153318. DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.153318 EDN: CUZSNL
8. Korolev Y.D., Koval N.N. Low-pressure discharges with hollow cathode and hollow anode and their applications // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2018. – Vol. 51. – № 32. – 323001. DOI: 10.1088/1361-6463/aac10 EDN: YCAXOX
9. Распределение тока по поверхности полого катода для тлеющего разряда низкого давления / Н.В. Ландль, Ю.Д. Королёв, О.Б. Франц, В.Г. Гейман, Г.А. Аргунов, В.О. Нехорошев // Известия вузов. Физика. – 2021. – Т. 64. – № 7. – С. 3–9. DOI: 10.17223/00213411/64/7/3 EDN: KNLHNN

10. Метель А.С., Григорьев С.Н. Тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов: физика, техника, применения. – М.: ИЦ МГТУ «Станкин», 2005. – 394 с.
11. High-current stages in a low-pressure glow discharge with hollow cathode / Yu.D. Korolev, O.B. Frants, N.V. Landl, I.A. Shemyakin, V.G. Geyman // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2013. – Vol. 41. – Iss. 8. – P. 2087–2096. DOI: 10.1109/TPS.2013.2266675 EDN: RFRUWX
12. Метель А.С. Расширение рабочего диапазона давлений тлеющего разряда с полым катодом // *Журнал технической физики*. – 1984. – Т. 54. – № 2. – С. 241–247. EDN: PYWCDD
13. Несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом для широкоапертурных ионных источников / А.В. Визирь, Е.М. Окс, П.М. Щанин, Г.Ю. Юшков // *Журнал технической физики*. – 1997. – Т. 67. – № 6. – С. 27–31. EDN: RYMZGF
14. Nikulin S.P. Influence of the emission of charged particles on the characteristics of glow discharges with oscillating electrons // *Russian physics journal*. – 2001. – Vol. 44. – P. 969–976. DOI: 10.1023/A:1014314107391 EDN: LGLCIV
15. On the accuracy and limitations of fluid models of the cathode region of dc glow discharges / A. Derzsi, P. Hartmann, I. Korolov, J. Karacsony, G. Bánó, Z. Donkó // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2009. – Vol. 42. – № 22. – 225204. DOI: 10.1088/0022-3727/42/22/225204 EDN: MZZZWF
16. Parker G.J., Hitchon W.N.G., Lawler J.E. Self-consistent kinetic model of an entire DC discharge // *Physics Letters A*. – 1993. – Vol. 174. – Iss. 4. – P. 308–312. DOI: 10.1016/0375-9601(93)90144-O
17. Surendra M., Graves D.B., Jellu G.M. Self-consistent model of a direct-current glow discharge: Treatment of fast electrons // *Physical Review A*. – 1990. – Vol. 41. – № 2. – 1112. DOI: 10.1103/PhysRevA.41.1112
18. Boeuf J.P., Pitchford L.C. Pseudospark discharges via computer simulation // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2002. – Vol. 19. – Iss. 2. – P. 286–296.
19. Rafatov I., Bogdanov E.A., Kudryavtsev A.A. Account of nonlocal ionization by fast electrons in the fluid models of a direct current glow discharge // *Physics of Plasmas*. – 2012. – Vol. 19. – № 9. – 093503. DOI: 10.1063/1.4752419 EDN: RGJCCD
20. Nguyen Bao Hung, Koval T.V., Tran My Kim An. Mathematical modeling of discharge plasma generation and diffusion saturation of metals and alloys // *Proceedings of the 2016 Conference on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM 2016)* – Tomsk: SST, 2016. – P. 39–44. DOI: 10.2991/itsmssm-16.2016.93
21. Koval T.V., Denisov V.V., Ostroverkhov E.V. Computer simulation of high-current non-selfsustained glow discharge plasma in hollow cathode at low pressure // *Russian Physics Journal*. – 2023. – Vol. 66. – № 10. – P. 1114–1121. DOI: 10.1007/s11182-023-03051-7 EDN: RNVBPK
22. Comsol Multiphysics v. 6.2. URL: <https://www.comsol.com/> (дата обращения: 13.10.2025).
23. Comsol Multiphysics, The Plasma Module User's Guide, Version 6.2. URL: <https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.plasma/PlasmaModuleUsersGuide.pdf> (дата обращения: 13.10.2025)
24. Alves L.L. The IST-LISBON database on LXCat // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2014. – Vol. 565. – № 1. – 012007. DOI: 10.1088/1742-6596/565/1/012007

Информация об авторах

Даниил Дмитриевич Зайцев, инженер лаборатории пучково-плазменной инженерии поверхности, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3; danzay7@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0008-9445-0964>

Михаил Викторович Савчук, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории пучково-плазменной инженерии поверхности, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3; mixail96@bk.ru

Тамара Васильевна Коваль, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории пучково-плазменной инженерии поверхности, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3; tvkoval@mail.ru

Владимир Викторович Денисов, доктор технических наук, заведующий лабораторией пучково-плазменной инженерии поверхности, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3; volodyadenisov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5446-2337>

Поступила в редакцию: 09.09.2025

Поступила после рецензирования: 20.11.2025

Принята к публикации: 27.12.2025

REFERENCES

1. Thornton J.A. Influence of apparatus geometry and deposition conditions on the structure and topography of thick sputtered coatings. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1974, vol. 11, no. 4, pp. 666–670. DOI: 10.1116/1.1312732
2. Anders A. A structure zone diagram including plasma-based deposition and ion etching. *Thin solid films*, 2010, vol. 518, Iss. 15, pp. 4087–4090. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.10.145 EDN: NXFJLX
3. Volpyas V.A., Platonov R.A., Karzin V.V., Legkova T.K. Gas pressure distribution in ion plasma deposition system. *Technical Physics Letters*, 2024, vol. 50, no. 2, pp. 70–72. DOI: 10.61011/TP.L.2024.02.57990.19744
4. Tumarkin A.V., Bogdan A.R., Karamov E.N. Sapego E.N. Synthesis and structural properties of predominantly oriented (Sr,Ba)Nb₂O₆ films on alumina substrate. *Technical Physics Letters*, 2025, vol. 51 (7), pp. 50–54. DOI: 10.61011/PJTF.2025.07.60076.20185 EDN: QDCDME

5. Denisova Yu.A., Leonov A.A., Denisov V.V., Ostroverkhov E.V., Laskovnev A.P., Basalai A.V. Study of the structure and properties of the steel 4cr5movsi surface after nitriding in non-self-sustained glow-discharge plasma with a hollow cathode. *Modern methods and technologies for the creation and processing of materials. A collection of scientific papers*. Minsk, State Scientific Institution "Physical and Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus" Publ., 2020. pp. 41–47. (In Russ.) EDN: WKBVUV
6. Vardanyan E.L., Ramazanov K.N., Nagimov R.Sh., Nazarov A.Yu. Properties of intermetallic Ti-Al based coatings deposited on ultrafine grained martensitic steel. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 389, 125657. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125657 EDN: PWJHDQ
7. Chen S.N., Yan W.Q., Zhao Y.M., Li Q., Chen L., Ouyang X., Hua Q.S., Wu X.Y., Zhang Y.F., Liao B., Ouyang X.P. Strong amorphization of AlCrNiTiV high-entropy alloy films deposited by cofilter cathode vacuum arc deposition. *Applied Surface Science*, 2022, vol. 592, 153318. DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.153318 EDN: CUZSNL
8. Korolev Y.D., Koval N.N. Low-pressure discharges with hollow cathode and hollow anode and their applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2018, vol. 51, no. 32, 323001. DOI: 10.1088/1361-6463/aacf10 EDN: YCAXOX
9. Landl N.V., Korolev Y.D., Frants O.B., Geyman V.G., Argunov G.A., Nekhoroshev V.O. Current distribution over the hollow-cathode surface for low-pressure glow discharge. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2021, no. 7, pp. 3–9. (In Russ.) DOI: 10.17223/00213411/64/7/3 EDN: KNLHNN
10. Metel A.S., Grigoriev S.N. *Glow discharge with electrostatic electron retention: physics, technology, applications*. Moscow, IC MSTU "Stankin" Publ., 2005. 394 p. (In Russ.)
11. Korolev Yu.D., Frants O.B., Landl N.V., Shemyakin I.A., Geyman V.G. High-current stages in a low-pressure glow discharge with hollow cathode. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, vol. 41, Iss. 8, pp. 2087–2096. DOI: 10.1109/TPS.2013.2266675 EDN: RFRUWX
12. Metel A.S. Increase of the working pressure range in a glow discharge with a hollow cathode. *Soviet Physics: Technical Physics*, 1984, vol. 29, no. 2, pp. 141–144. (In Russ.) EDN: PYWGHP
13. Vizir' A.V., Oks E.M., Shchanin P.M., Yushkov G.Yu. Non-self-sustained hollow-cathode glow discharge for large-aperture ion sources. *Technical Physics*, 1997, vol. 42, no. 6, pp. 611–614. (In Russ.) EDN: YQHBJE
14. Nikulin S.P. Influence of the emission of charged particles on the characteristics of glow discharges with oscillating electrons. *Russian physics journal*, 2001, vol. 44, pp. 969–976. DOI: 10.1023/A:1014314107391 EDN: LGLCIV
15. Derzsi A., Hartmann P., Korolov I., Karacsony J., Bánó G., Donkó Z. On the accuracy and limitations of fluid models of the cathode region of dc glow discharges. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, vol. 42, no. 22, 225204. DOI: 10.1088/0022-3727/42/22/225204 EDN: MZZZWF
16. Parker G.J., Hitchon W.N.G., Lawler J.E. Self-consistent kinetic model of an entire DC discharge. *Physics Letters A*, 1993, vol. 174, Iss. 4, pp. 308–312. DOI: [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(93\)90144-O](https://doi.org/10.1016/0375-9601(93)90144-O)
17. Surendra M., Graves D.B., Jellu G.M. Self-consistent model of a direct-current glow discharge: Treatment of fast electrons. *Physical Review A*, 1990, vol. 41, no. 2, 1112. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.41.1112>
18. Boeuf J.P., Pitchford L.C. Pseudospark discharges via computer simulation. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, vol. 19, Iss. 2, pp. 286–296.
19. Rafatov I., Bogdanov E.A., Kudryavtsev A.A. Account of nonlocal ionization by fast electrons in the fluid models of a direct current glow discharge. *Physics of Plasmas*, 2012, vol. 19, no. 9, 093503. DOI: 10.1063/1.4752419 EDN: RGJCCD
20. Nguyen Bao Hung, Koval T.V., Tran My Kim An. Mathematical Modeling of Discharge Plasma Generation and Diffusion Saturation of Metals and Alloys. *Proc. of the 2016 Conference on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM 2016)*. Tomsk, SST, 2016. pp. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.2991/itsmssm-16.2016.93>
21. Koval T.V., Denisov V.V., Ostroverkhov E.V. Computer simulation of high-current non-self-sustained glow discharge plasma in hollow cathode at low pressure. *Russian Physics Journal*, 2023, vol. 66, no. 10, pp. 1114–1121. DOI: 10.1007/s11182-023-03051-7 EDN: RNVBPK
22. *Comsol Multiphysics v. 6.2*. Available at: <https://www.comsol.com/> (accessed: 13 October 2025).
23. *Comsol Multiphysics, The Plasma Module User's Guide, Version 6.2*. Available at: <https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.plasma/PlasmaModuleUsersGuide.pdf> (accessed: 13 October 2025).
24. Alves L.L. The IST-LISBON database on LXCat. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 565, no. 1, 012007. DOI: 10.1088/1742-6596/565/1/012007

Information about the authors

Daniil D. Zaytsev, Engineer, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Science, 2/3, Academicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation; DanZay7@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0008-9445-0964>

Mikhail V. Savchuk, Postgraduate Student, Junior Researcher, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Science, 2/3, Academicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation; mixail96@bk.ru

Tamara V. Koval, Dr. Sc., Leading Researcher, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Science, 2/3, Academicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation; tkoval@mail.ru

Vladimir V. Denisov, Dr. Sc., Head of the Laboratory of Beam-Plasma Surface Engineering, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Science, 2/3, Academicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation; volodyadenisov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5446-2337>

Received: 09.09.2025

Revised: 20.11.2025

Accepted: 27.12.2025