

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В ГАЗЕ (Ar, N<sub>2</sub>) НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В ПОЛОМ КАТОДЕ

Нгуен Бао Хынг

Томский политехнический университет

[baohung.ng@gmail.com](mailto:baohung.ng@gmail.com)

### Введение

Создание новых технологий модификации поверхности и разработка нового эффективного оборудования для ионно-плазменной обработки поверхности материалов и изделий основано на получении низкотемпературной плазмы тлеющего разряда в газе низкого давления с полым катодом большой площади [1, 2].

При тлеющем газовом разряде эмиссия электронов является результатом бомбардировки катода ионами, образующимися в разрядной плазме. Если длина релаксации энергии быстрого электрона ( $\lambda = u\lambda$ ) превышает эффективную ширину камеры  $a = 4V/S_c$ , то имеет место эффект электростатической ловушки (ЭЭЛ);  $V$  и  $S_c$  – объем и площадь поверхности полого катода;  $\lambda$  – ионизационный пробег электрона,  $u$  – среднее число свободных электронов, образованных на пути быстрого электрона. Разряд отличается от обычного тлеющего разряда, а скорость ионизации быстрыми электронами значительно превышает скорость ионизации плазменными электронами.

В работе с помощью теоретической модели, в которой процесс рождения заряженных частиц в плазме в полем катоде обусловлен быстрыми электронами, получены зависимости напряжения горения разряда от давления и сорта газа, от геометрических размеров полого катода и обрабатываемых деталей.

### Теоретическая модель газового разряда в полем катоде

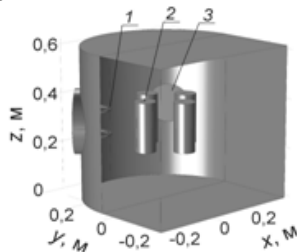


Рис. 1 Модель полого катода; 1 – анод; 2 – образцы; 3 – окно дополнительного разряда

Газовый разряд рассматривается внутри катодной полости, в которой анод (в виде двух трубок общей площадью  $S_a$ ) располагается на боковой стенке катода (рис. 1),  $S_a = 125 \dots 500 \text{ см}^2$ , объем полости катода  $V_c = 2 \times 10^5 \text{ см}^3$ .

Разряд в полем катоде описывается системой уравнений баланса энергии и заряженных частиц, непрерывности тока. В режиме самостоятельного горения основного разряда (дополнительной инжекции электронов) уравнение баланса быстрых электронов имеет вид:

$$\frac{\gamma I_i}{e} + \frac{I_{ext}}{e} = \frac{n_f V v_i}{u} + \frac{S_a}{4} n_f \langle v \rangle. \quad (1)$$

Здесь  $\gamma$  – коэффициент ионно-электронной эмиссии, зависящий от напряжения горения и сорта газа,  $I_i = e v_i n_f V$  – ионный ток,  $V = (V_c - V_d)(1 - h/2D)$ ,  $h$  – высота анода,  $V_d$  – объем деталей,  $D$  – длина и диаметр катодной полости,  $n_f$  и  $\langle v \rangle$  – концентрация и средняя скорость быстрых электронов,  $v_i = n_g \sigma_i v$  – частота ионизации,  $e$  – заряд электрона. Из уравнения (1) можно получить условие основного разряда в несамостоятельном режиме горения

$$u = \frac{P}{P(\gamma + \delta) - 1}, \quad (2)$$

связывающее безразмерное напряжение горения  $u = e U_c / W$  и давление газа  $P = (p/kT_e) \sigma_i L$ ;  $L = 4V/S_a$  – эффективная длина катодной полости;  $W$  – полные затраты энергии электрона при ионизации газа,  $\delta = I_{ext}/I_i$ . На рис. 2 показаны зависимости напряжения горения от давления аргона и азота в самостоятельном режиме горения при  $I_p = 30 \text{ А}$ .

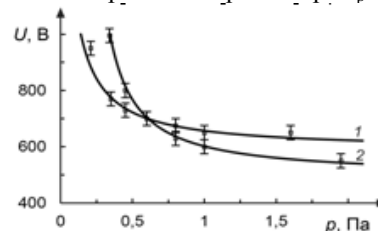


Рис. 2. Зависимость напряжения горения от давления газа: 1 – азот, 2 – аргон, □ – эксперимент [1], линии – расчет

Как следует из соотношения (2), выполнение сохранения плотности ионного тока и напряжения горения осуществляется изменением давления газа и тока внешней инжекции. Дополнительная инжекция электронов в катодную полость позволяет уменьшить напряжения горения разряда, при этом уменьшается энергия, получаемая электроном в катодном слое разряда, и количество проведенных им ионизаций.

Оценить концентрацию плазмы  $n_i$  можно в равновесном состоянии из баланса между скоростью ионизации газа быстрыми электронами  $\Psi = (I_i / S_c e) \gamma u n_g \sigma_i$  и скоростью потерь заряженных частиц  $n_i / T_i$ :  $n = (I_i / e) (T_i / S_c \lambda)$ ,  $T_i$  – время выхода ионов на катод. Рассматривая полый катод без деталей ( $a = 40 \text{ см}$ ) при токе самостоятельного режима горения 30 А, напряжении горения 500 В

и давлении газа  $p = 0,65$  Па, получим  $n_i = 5,4 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ , экспериментальные значения концентрации плазмы в центре полого катода соответственно для аргона  $6,7 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ .

Для определения распределения концентрации плазмы, влияния геометрии, размеров деталей, помещаемых в полость катода, использовалось численное исследование с применением гидродинамической модели. Эта модель описывает электронные плотности заряженных частиц ( $n_e$ ) и их средние энергии ( $n_\epsilon$ ), как функцию времени и пространства [3]. Уравнения переноса электронов ( $e$ ) и плотности энергии ( $\epsilon$ ) имеют вид:

$$\frac{\partial n_{e,\epsilon}}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_{e,\epsilon} + E \cdot \Gamma_{e,\epsilon} = R_{e,\epsilon} - \Gamma_{e,\epsilon} = -(\mu_{e,\epsilon} \cdot E) n_{e,\epsilon} - D_{e,\epsilon} \cdot \nabla n_{e,\epsilon}$$

Здесь  $\Gamma_{e,\epsilon}$  – потоки электронов и энергии,  $\mu_{e,\epsilon}$  – подвижности,  $E$  – электрическое поле,  $D_{e,\epsilon}$  – коэффициенты диффузии,  $R_{e,\epsilon}$  – скорость ионизации и энергетические потери/приобретения из-за неупругих столкновений. Транспортные коэффициенты и коэффициенты разряда, зависящие от функции распределения электронов по энергии, являются входными данными для гидродинамической модели и вычисляются с помощью программы BOLSIG+. Моделирование режимов самостоятельного разряда и разряда с дополнительной инжекцией электронов осуществляется без рассмотрения прикатодной области при выполнении условия непрерывности тока на границах расчетной области.

На рис. 3 для несамостоятельного режима горения разряда показано влияние объема  $V_d$  четырех цилиндрических деталей, помещенных в катодную полость, на ток внешней инжекции, потенциал и температуру плазмы. Дополнительная инжекция электронов осуществлялась с поверхности катода при сохранении постоянства плотности ионного тока и напряжения горения (300 В). С увеличением суммарного объема деталей  $V_d$  от 0 до  $7 \times 10^4 \text{ см}^3$  ( $\sim V_c/3$ ) ток внешней инжекции  $I_{ext}$  изменяется от 4 до 7 А. С ростом суммарной площади деталей (количества деталей с тем же  $V_d$ ) ток  $I_{ext}$  увеличивается, при этом распределение концентрации в полости катода практически однородное.

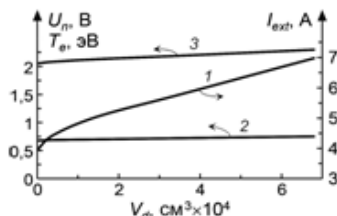


Рис. 3. Зависимость тока внешней инжекции (1), температуры (2) и потенциала плазмы (3) от относительного объема деталей

В эксперименте [1] эмиссия электронов в полый катод производилась через эмиссионное окно (рис. 1). Увеличение тока  $I_{ext}$  и градиента давления

(например, за счет напуска газа через источник электронов) приводит к росту градиента концентрации плазмы в области эмиссионного окна. На рис. 4 показаны расчетные линии уровня концентрации плазмы в двух сечениях полого катода [1],  $n_i = 6 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$  между деталями, разница концентраций плазмы в точках 1 и 2 составляет не более 1% при  $I_{ext} = 7$  А, при  $I_{ext} = 30$  А – 17%. Однородность распределения концентрации плазмы нарушается при неоднородной плотности тока дополнительной инжекции и градиенте давления газа.

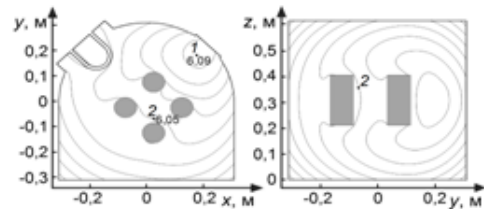


Рис. 4. Распределение концентрации плазмы ( $\text{см}^{-3} \times 10^{11}$ ) в поперечном и продольном сечениях полого катода

Теоретические и численные исследования показали, что напряжение горения уменьшается более чем в 2 раза за счет тока дополнительной инжекции электронов. При давлении газа (аргон) 0,65 Па и напряжениях горения 200–300 В, достигается концентрация плазмы  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  при температуре плазмы порядка 1 эВ.

#### Заключение

Проведено теоретическое исследование характеристик разряда низкого давления в полном катоде большого размера и сравнение с результатами эксперимента. Рассмотрены самостоятельный режим горения разряда и режим дополнительной инжекции электронов.

Показано, что независимо от площади поверхности и материала обрабатываемых деталей возможна независимая регулировка плотности ионного тока и напряжения его горения за счет тока дополнительной инжекции. Теоретическая и численная модели согласуются с экспериментальными данными.

#### Литература

1. Lopatin I.V., Akhmadeev Yu.Kh., Koval N.N., Schanin P.M., Yakovlev V.V. Generation of plasma in non-self-sustained glow discharge with hollow cathode // Proc. of 10th Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk, Russia. 2010, pp. 35–38.
2. Коваль Т.В., Лопатин И.В., Огородников А.С., Нгуен Б.Х. Исследование генерации низкотемпературной плазмы в тлеющем разряде с полым катодом большой площади // Изв. вузов. Физика. - 2014. -Т. 57. -№ 3-2. -С. 122-125.
3. Hagelaar G.J.M., Pitchford L.C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficient for fluid models // Plasma Sources Sci. Technol. 14 (2005) 722.