

УДК 537.521

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ В ПРОСТРАНСТВЕ ДВУХ ЭЛЕКТРОДОВ**Ю.А. ЮДАЕВ***Рязанский государственный агротехнологический университет, г. Рязань**E-mail: yu.yudaev@mail.ru***MODEL OF FORMATION OF LOW-TEMPERATURE PLASMA IN SPACE OF TWO ELECTRODES****Y.A. YUDAEV***Ryazan State Agrotechnological University, Ryazan***Аннотация**

Рассматривается модель формирования низкотемпературной плазмы в пространстве двух электродов. Предлагаемая модель основана на рассмотрении поведения потоков заряженных частиц электронов и ионов в электрическом поле.

Ключевые слова: Низкотемпературная плазма, поток заряженных частиц.

Summary

A model of the formation of low-temperature plasma in the space of two electrodes. The proposed model is based on the analysis of the behavior of charged particle fluxes of electrons and ions in an electric field.

Key words: Low-temperature plasma, stream of charged particles.

Введение

Предлагаемая модель основана на рассмотрении поведения потоков заряженных частиц электронов и ионов в электрическом поле [1–3].

Применение данного метода в системах, в которых расстояние между электродами соизмеримо с диаметром разрядного канала и наполненных однокомпонентным газом при низком давлении, позволяет получать количественные результаты, которые хорошо согласуются с экспериментальными.

1. Основные допущения модели

При моделировании предполагалось, что основным источником свободных электронов в газе является накаленный катод. Процессы образования низкотемпературной плазмы газового разряда рассматривались для следующих условий: расстояние между катодом и анодом $d_{ka} \approx 1$ см, давление $p \leq 66$ Па; диаметры электродов $D > d_{ka}$. Минимальная длина свободного пробега электронов в этих условиях составляет $\lambda_e \approx 5$ мм.

При создании вычислительного алгоритма учитывалось, что:

- разрядный ток не превышает тока эмиссии с катода $i_p \leq i_{kmax}$;
- величина межэлектродного тока ограничивается объемным зарядом электронов у катода $\left. \frac{dU}{dz} \right|_{z=0} = 0$;

- скорость движения ионов и электронов определяется электрическим полем и процессами взаимодействия между частицами;
- ионизация газа осуществляется электронами, вышедшими с поверхности накаливаемого катода;
- распределение потенциала в межэлектродном пространстве определяется напряжением на электродах и объемными зарядами $\rho_e(\mathbf{r})$, $\rho_i(\mathbf{r})$ компонентов формирующейся плазмы газового разряда;
- электрический ток в промежутке в любой момент времени согласован с током во внешней цепи;
- импульс прикладываемого к аноду напряжения имеет конечную скорость нарастания во фронте;
- изменения параметров формирующейся плазмы по осям r и φ пренебрежимо малы ($\text{grad}_r(f(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n)) \rightarrow 0$; $\text{grad}_\varphi(f(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n)) \rightarrow 0$).

2. Математическая модель

Моделирование осуществлялось при использовании следующих взаимосвязанных уравнений, записанных в общепринятых обозначениях:

$$\frac{\partial^2 U(z)}{\partial z^2} = -\frac{\rho(z)}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (1)$$

$$\rho(z) = \rho_i(z) + \rho_e(z) = e(n_i(z) - n_e(z)), \quad (2)$$

$$j(z) = j_e(z) + j_i(z), \quad (3)$$

$$j_e(z) = en_e(z)\bar{V}_e(z), \quad (4)$$

$$j_i(z) = en_i(z)\bar{V}_i(z). \quad (5)$$

Распределение электрического поля на каждом временном шаге Δt подчиняется уравнению Пуассона (1). Пространственный заряд электронов и ионов $\rho_e(z)$, $\rho_i(z)$ в процессе моделирования изменяется в пространстве и времени. Отрицательный пространственный заряд создают электроны, вышедшие с катода – ρ_{e1} , и образовавшиеся в результате ионизации молекул газа – ρ_{e2} , (вторичные электроны):

$$\rho_e(z) = \rho_{e1}(z) + \rho_{e2}(z), \quad \rho_{e1}(z) = j_e(t)/\bar{V}_e, \quad (6)$$

где \bar{V}_e – средняя скорость электронов.

На этапе формирования разряда учитывалось, что $j_e(z) \gg j_i(z)$, поэтому $j \approx j_e$.

Средняя скорость электронов, вышедших с катода, определяется выражением:

$$\bar{V}_e = k_e(2eU(z)/m_e)^{1/2}, \quad (7)$$

где e и m_e – заряд и масса электрона соответственно; k_e – поправочный коэффициент, определяемый методом Монте-Карло и учитывающий процессы взаимодействия электронов с молекулами газа. В зависимости от давления газа и распределения электрического поля k_e имеет значения от 0,05 до 1,0.

На временном шаге Δt , величина которого связана со скоростью электронов и протяженностью рассматриваемой области, приведенный к промежутку $z_i - z$ объемный заряд, создаваемый вторичными электронами, определяется выражением:

$$\rho_{e2} = \int_{z_i}^z \frac{j_{ek} Q_{i0}(\bar{V}_e(z)) p}{k_e (2eU(z)/m_e)^{1/2}} dz, \quad \text{при } z \geq z_i, \quad (8)$$

где Q_{i0} – приведенное сечение ионизации газа при единичном давлении: $Q_{i0} > 0$, при $z \geq z_i$ и $Q_{i0} = 0$ при $z < z_i$; p – давление газа.

При разбиении пространства катод-анод на n участков Δz и с учетом того, что каждый участок характеризуется своим средним значением \bar{Q}_{i0} , количество заряженных частиц одного знака, образовавшихся на участке с площадью S :

$$N(\Delta z_n) = \frac{j_e \bar{Q}_{i0} (\bar{V}_e(z)) p S}{e k_e (2eU(z)/m_e)^{1/2}} \Delta z^2. \quad (9)$$

Учитывая время воздействия электронного потока на молекулы газа на участке $\Delta z_n = V_e \Delta t$, (9) преобразуется к виду:

$$N_{2e,i}(\Delta z_n) = \frac{j_e \bar{Q}_{i0} (\bar{V}_e(z)) p S \Delta z \Delta t}{e} \quad (10)$$

или

$$n_{2e}(\Delta z_n) = \frac{j_e \bar{Q}_{i0} (\bar{V}_e(z)) p \Delta t}{e}, \quad (11)$$

$$\rho_{2e}(\Delta z_n) = j_e \bar{Q}_{i0} (\bar{V}_e(z)) p \Delta t. \quad (12)$$

Концентрация образовавшихся ионов n_i на интервале Δt_k принималась равной концентрации вторичных электронов n_{2e} , образовавшихся в n -ом элементе Δz_n :

$$n_i(\Delta z_n) = n_{2e}(\Delta z_n). \quad (13)$$

Уравнение (1) с учетом различных условий, приведенное к текущему k -му квазистационарному состоянию на временном шаге Δt_k принимает вид:

$$\frac{\partial^2 U_k(z)}{\partial z^2} = \frac{1}{\varepsilon_0} \left\{ \frac{j_{ek}}{k_e (2eU_k(z)/m_e)^{1/2}} \right\}, \text{ при } W_e < W_i,$$

$$\frac{\partial^2 U_k(z)}{\partial z^2} = \frac{1}{\varepsilon_0} \left\{ \frac{j_{ek}}{k_e (2eU_k(z)/m_e)^{1/2}} + j_{ek} \bar{Q}_{i0} (\bar{V}_e(z)) p \Delta t_k - \sum_{m=1}^k j_{em} \bar{Q}_{i0} (\bar{V}_e(z)) p \Delta t_k \right\}, \text{ при } W_e > W_i, \quad (14)$$

где W_e – энергия электронов, W_i – энергия ионизации газа.

Решение полученных уравнений осуществлялось численным методом для квазистационарных состояний. Время формирования разряда t_ϕ суммировалось с учетом переменного временного шага Δt_k :

$$t_\phi = \sum_{k=1}^K \Delta t_k. \quad (15)$$

При моделировании учитывалось накопление объемного заряда, возникающего на каждом временном шаге и перемещение координаты точки ионизации z_i .

Решение уравнения (14) считалось найденным, когда распределение потенциала в пространстве между катодом и анодом удовлетворяло граничному и дополнительному условиям, (рис. 1):

$$U_k(z)|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{U_k(z)}{dz} \right|_{z=0} = 0, \quad (16)$$

а значение тока $i(t)$, протекающего через газоразрядный промежуток, согласовывалось с током во внешней цепи.

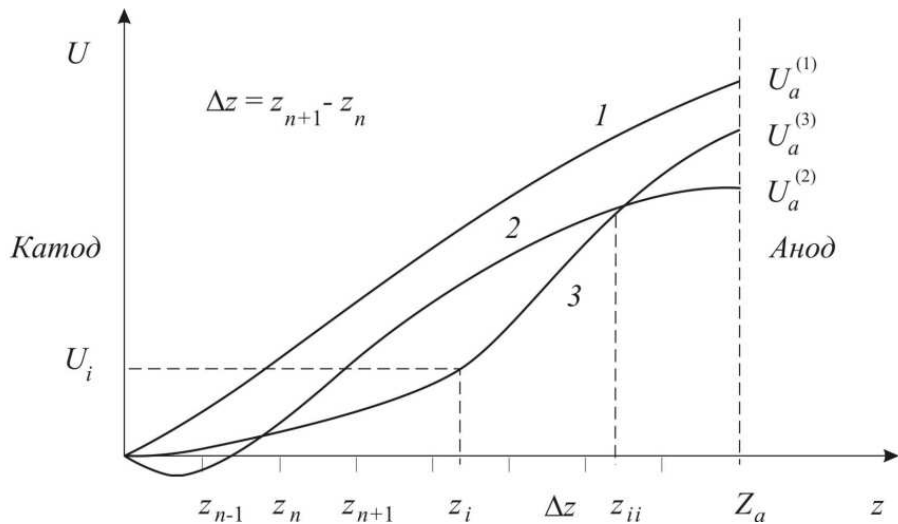


Рис. 1: Распределение потенциала между электродами. 1 – $E(0) > 0$; 2 – $E(0) < 0$; 3 – $E(0) = 0$ (решение уравнения (14)).

3. Результаты моделирования

На рис. 2 и рис. 3 приведены результаты численного эксперимента развития газового разряда с образованием низкотемпературной плазмы для различного давления при расстоянии катод-анод 0,01 м, давление водорода: 1 – 20 Па; 2 – 33 Па; 3 – 66 Па.

Приведенные зависимости и временные диаграммы согласуются с результатами лабораторных экспериментов с погрешностью не превышающей 10 %.

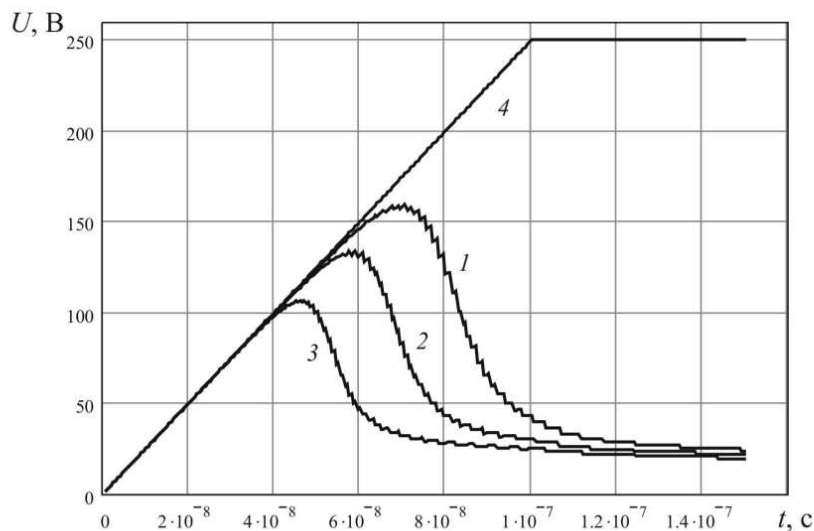


Рис. 2: Напряжение на аноде и источнике питания

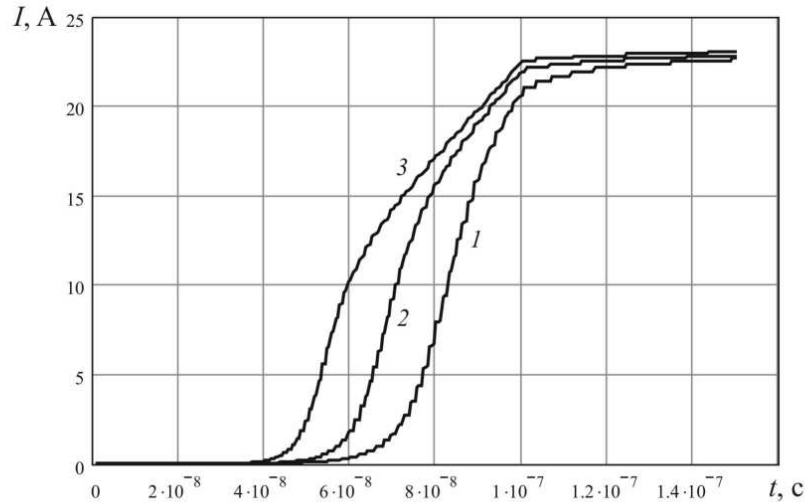


Рис. 3: Ток анода

ЛИТЕРАТУРА

1. Бэдсел Ч., Ленгтон А. Физика плазмы и численное моделирование. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 452 с.
2. Вычислительные методы в физике плазмы / Под ред. Б. Олдера, С. Фернбаха, М. Ротенберга. — М.: Мир, 1974. — 242 с.
3. Юдаев Ю.А. Численные исследования процесса формирования разряда в управляемых газоразрядных коммутаторах тока низкого давления // Известия АН, серия физическая. — 2000. — Т. 64, № 7. — С. 1307–1316.

REFERENCES

1. Birdsall Charles K., Langdon A. Bruce. Plasma physics via computer simulation. — New York : McGraw-Hill, 1985. — 479 p.
2. Methods in Computational Physics. Advances in Research and Applications. V. 9. Plasma Physics / Eds. Older B., Fernbah S., Rotenberg M. — New York and London: Academic Press, 1970.
3. Юдаев Ю.А. Numerical study of the formation of the discharge in controlled discharge current low pressure switches // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2000. — V. 64, № 7. — P. 1307–1316.