

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПОТЕНЦИАЛА В КАТОДНОМ СЛОЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

А. П. Коржавый, В. И. Крестя

Для расчета энергетических спектров частиц, распыляющих катод в тлеющем разряде, необходимо знать распределение электрического потенциала $\varphi(z)$ в области катодного падения потенциала (ОКП) [1,2]. В работах [3,4] построены степенные аппроксимации $\varphi(z)$ вида

$$\varphi = -U_c \left(\frac{z}{d_c} \right)^b, \quad (1)$$

где d_c — ширина ОКП; U_c — катодное падение потенциала; z — координата, отсчитываемая от границы между ОКП и квазинейтральной плазмой; показатель степени b зависит от $\delta = d_c/\lambda$ — отношения ширины ОКП к длине перезарядки ионов в газе.

Найденные в [3,4] значения b заключены между $4/3$ при $\delta \ll 1$ (бесстолкновительное движение ионов в ОКП) и $5/3$ при $\delta \gg 1$ (движение ионов в ОКП в режиме подвижности).

Использованное в [3,4] предположение об отсутствии ионизации газа в ОКП справедливо при $\delta \sim 10$ и нарушается при значениях $\delta \sim 10^2$, характерных для рабочих режимов многих газоразрядных приборов. Моделирование ОКП с учетом ионизации проводилось в [5-7] для нескольких конкретных разрядных условий.

В данной работе рассчитаны распределения $\varphi(z)$, а также найдены их степенные аппроксимации в интервале $50 < \delta < 200$, когда существенная часть ионов образуется в ОКП и их движение происходит в режиме подвижности [8].

Уравнения ОКП в этом случае имеют вид

$$\begin{aligned} j'_e &= -\alpha j_e, & j'_i &= \alpha j_e, \\ \varphi'' &= -\frac{j_i}{\varepsilon_0} \sqrt{\frac{\pi M}{-2e\lambda\varphi'}} \end{aligned} \quad (2)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} \varphi(0) &= 0, & \varphi'(0) &= 0, \\ \varphi(d_c) &= -U_c, & j_e(d_c) &= \gamma j_i(d_c), \end{aligned} \quad (3)$$

где j_i и j_e — плотности ионного и электронного тока; e и M — заряд и масса иона; γ — коэффициент ионно-электронной эмиссии; α — коэффициент ионизации газа электронами, являющийся нелокальной функцией напряженности электрического поля $E = -\varphi'$.

Аналитическое выражение для α предложено в [9].

Вводя безразмерные величины

$$\Psi = \frac{\varphi}{-U_c}, \quad \mathfrak{E} = \frac{d_c}{U_c} E, \quad Z = \frac{z}{d_c}, \quad J = \frac{j}{j_0}, \quad \mathfrak{A} = \alpha d_c, \quad (4)$$

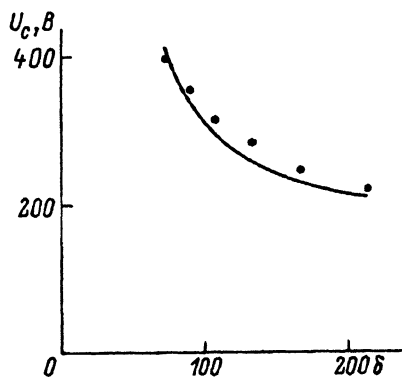
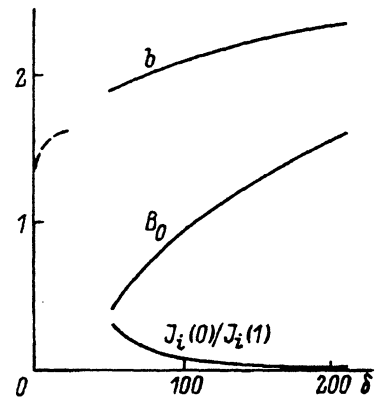


Рис. 1.

Рис. 2.

где

$$j_0 = \sqrt{\frac{2e}{M} \frac{4\epsilon_0 U^3}{9d_c^2}},$$

и решая систему (2), (3), получим

$$\epsilon = \frac{f(Z)}{\int_0^1 f(Z) dZ}, \quad (5)$$

где

$$f(Z) = \left(\int_0^Z \left[1 - \frac{\gamma}{1+\gamma} \exp \left(\int_Z^1 \mathfrak{A}(Z_0) dZ_0 \right) \right] dZ \right)^{2/3},$$

причем, согласно [9],

$$\mathfrak{A} = A_0 \exp \left(-\frac{B_0}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \right), \quad \epsilon_{ef} = \int_Z^1 \epsilon(Z_0) F(Z_0 - Z) dZ_0,$$

$$F(Z) = \frac{2}{\lambda_0} \left(1 - \exp \left(-\frac{Z}{\lambda_0} \right) \right) \exp \left(-\frac{Z}{\lambda_0} \right),$$

$$A_0 = A \frac{kT}{\sigma} \sigma, \quad B_0 = B \sqrt{\frac{kT}{\sigma U_c}} \sigma, \quad \lambda_0 = \frac{\lambda_e}{\lambda_c}, \quad (6)$$

k — постоянная Больцмана; T — температура газа; σ — сечение перезарядки иона на атоме газа; λ_e — величина, имеющая порядок длины пробега электронов.

Уравнения (5) и (6), определяющие $\epsilon(Z)$ и $\Psi(Z) = \int_0^Z \epsilon(Z) dZ$, решались численно итерационным методом. Объемный заряд ионов, образующихся внутри ОКП, влияет на положение ее границы. Поэтому полученное

на каждой итерации распределение $\Psi(Z)$ аппроксимировалось зависимостью

$$\Psi = \left(\frac{Z - a}{1 - a} \right)^b \quad (7)$$

и подбиралось значение B_0 , обеспечивающее стремление к нулю коэффициента a .

Расчеты проводились для гелия при следующих значениях постоянных [9,10]: $T = 300$ К, $\sigma = 2 \cdot 10^{-19}$ м², $\gamma = 0.14$, $A = 2.71$ (м · Па)⁻¹, $B = 11.2$ (В/м · Па)^{1/2}, $\lambda_0 = 9.6/\delta$. Найденные зависимости от δ величины B_0 , показателя степени b для аппроксимации $\Psi = Z^b$, а также доли ионного тока $J_i(0)/J_i(1)$, приходящего в ОКП из плазмы, приведены на рис. 1 (штриховой линией показана полученная в [3] без учета ионизации газа в ОКП зависимость $b(\delta)$ для $\delta < 20$). Таким образом, при $\delta \sim 10^2$, когда в ОКП происходит существенное увеличение ионного тока вследствие ионизации газа электронами, величина b находится в интервале 1.9–2.3 (аналогичные результаты получаются и для ОКП в неоне), что согласуется с экспериментальными данными [8,11].

Следовательно, при расчете энергетических спектров частиц в ОКП при $\delta > 50$ может использоваться квадратичная зависимость потенциала от координаты.

Из соотношения для B_0 в (6) следует выражение для U_c

$$U_c = \frac{kT}{\sigma} \left(\frac{B}{B_0} \right)^2 \delta. \quad (8)$$

Расчитанная из (8) с использованием найденных значений B_0 (рис. 1) зависимость $U_c(\delta)$ приведена на рис. 2. Точками указаны значения U_c , полученные из приведенных в [11] экспериментальных зависимостей $E(z)$ для ряда плотностей разрядного тока. Удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных величин катодного падения потенциала подтверждает применимость используемой модели для расчета распределения потенциала в ОКП при $d_c > 50\lambda$.

Список литературы

- [1] Abril I., Gras-Marti A., Valles-Abarca J.A. // Phys. Rev. A. 1983. Vol. 28. N 6. P. 3677–3678.
- [2] Кучинский В.В., Сутомлинов В.С., Шейкин Е.Г. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 1. С. 67–72.
- [3] Jurgensen C.W., Shegfeh S.G. // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 64. N 11. P. 6200–6209.
- [4] Вольяс В.А., Гольман Е.К., Зайцев А.Г. и др. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 6. С. 154–156.
- [5] Ward A.L. // J. Appl. Phys. 1962. Vol. 33. N. 9. P. 2789–2794.
- [6] Neuringer J.L. // J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49. N 2. P. 590–592.
- [7] Швейгерт В.А., Швейгерт И.В. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. Вып. 3. С. 347–352.
- [8] Den Hartog E.A., Doughty D.A., Lawler J.E. // Phys. Rev. A. 1988. Vol. 38. N 5. P. 2471–2491.
- [9] Boeuf J.P., Davies A.J., Evans J.E. et al. // 7 Int. Conf. Gas Discharges and Appl. London, 1982. P. 367–370.
- [10] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
- [11] Warren R. // Phys. Rev. 1955. Vol. 98. N 6. P. 1650–1658.

Поступило в Редакцию 3 марта 1992 г.