

ФИЗИКА

УДК 537.523.4

Р. П. Баберцян, Д. А. Бадалян, В. М. Гаспарян, Ц. А. Минасян, А. К. Чобанян

О бесстолкновительном движении ионов в высоковольтном пеннинговском разряде

(Представлено академиком АН Армении Д. М. Седракяном 12/VII 1990)

Одним из основных преимуществ пеннинговского разряда при низких давлениях является его широкое применение в различных областях науки и технологических установках. В связи с этим большое значение имеет изучение характера движения ионов в разрядном промежутке, где имеется неоднородное электрическое и однородное магнитное поле. Однако при конструировании приборов на основе разряда Пеннинга (магниторазрядные насосы, ионные и электрические источники, ионные двигатели и т. д.) влияние распределения полей на профиль траектории ионов не учитывается.

В работе (1) рассмотрена кинетика положительных ионов для различных режимов разряда. При расчете использовано распределение потенциала, приведенное в работах (2-4), которое сильно расходится с экспериментальными кривыми в прикатодных частях пеннинговского разряда.

В настоящей статье вычисляется уравнение траектории положительных ионов с учетом нового аппроксимированного распределения потенциала по оси разряда. Отметим, что выбранная форма распределения потенциала более точно описывает имеющуюся экспериментальную кривую распределения потенциала для данного разряда.

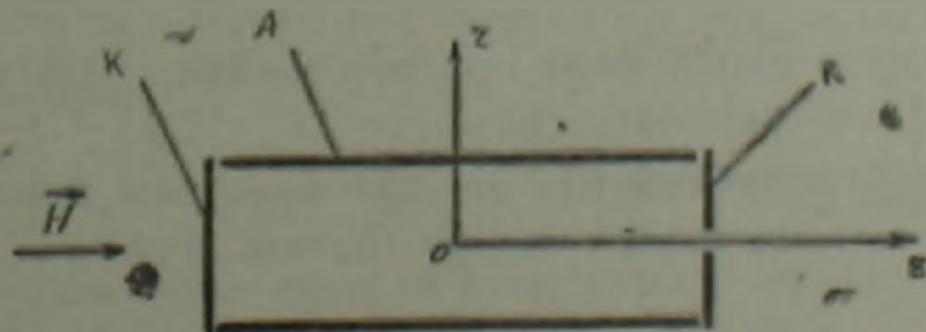


Рис. 1. Принципиальная схема пеннинговского источника ионов

На рис. 1 показан полый цилиндрический анод (А). Два плоских катода (К) расположены на расстоянии порядка 2 мм от краев анода.

Длина анода $L \approx 2d \gg 2r_a$ (d — расстояние катода от центра разряда, r_a — радиус анода). Начало координатной системы совпадает с центром симметрии разрядного промежутка (O). Однородное магнитное поле направлено по оси z . Распределение потенциала по оси разряда z и по радиусу r можно представить в следующем виде:

$$\varphi(z) = \frac{2V_a}{1 + \left(\frac{z}{d}\right)^2} - V_0; \quad (1)$$

$$\varphi(r) = \frac{V_a - V_0}{r_a^2} r^2 + V_0, \quad (2)$$

где V_a — потенциал анода, V_0 — потенциал центра разрядного промежутка (при $r = 0$, $z = 0$) и определяется экспериментально. Потенциалы катодов равны нулю.

Следует отметить, что распределение потенциала (1) в предельном случае $(z/d) \ll 1$ совпадает с распределением потенциалов, исследованных в работах (2, 3).

Предположим, что разряд работает в режиме слабого пространственного заряда при низких давлениях ($P \leq 10^{-4}$ Тор), где длина свободного пробега атомов и ионов превышает линейные размеры электродной системы разряда. Движение ионов по этой причине будет бесстолкновительным и из-за сильного электрического поля они быстро достигают катодов. При этих условиях можно пренебречь также кулоновским взаимодействием между ионами.

С учетом этих предположений уравнение движения однозарядных положительных ионов в цилиндрической координатной системе представим в виде:

$$m\ddot{z} = -e \frac{d\varphi(z)}{dz}; \quad (3)$$

$$m(r - r\dot{\theta}^2) = -e \frac{d\varphi(r)}{dr} - e \frac{H}{c} r\dot{\theta}; \quad (4)$$

$$m \frac{1}{r} \frac{d}{dt} (r^2 \dot{\theta}) = e \frac{H}{c} \dot{r}, \quad (5)$$

где m и e — масса и заряд иона соответственно, H — напряженность магнитного поля, c — скорость света.

При решении уравнений (3–5) для простоты предположим, что начальные тепловые скорости ионов равны нулю, т. е. при $t = 0$ имеем

$$\begin{aligned} r &= r_1, & z &= z_1, & \theta &= \theta_1, \\ \dot{r}_1 &= 0, & \dot{z}_1 &= 0, & r_1 \dot{\theta}_1 &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Согласно работе (1) решение уравнений (4) и (5) с начальными условиями (6) имеет окончательный вид

$$r = r_1 \left\{ \frac{1 - M}{2} \cos \left[\frac{2 \sqrt{\omega_n^2 + \omega_s^2}}{v} \left[\sqrt{d^2 + z_1^2} (F(\varphi, k) - E(\varphi, k)) + z^{-1} \sqrt{(z^2 + d^2)(z^2 - z_1^2)} \right] \right] + \frac{1 + M}{2} \right\}^{1/2}, \quad (7)$$

а угол падения α ионов на катоды определяется условием

$$\operatorname{tg} \alpha = \left. \frac{dr}{dz} \right|_{z=d}$$

где $F(\varphi, k)$ и $E(\varphi, k)$ — эллиптические интегралы I и II рода,

$$M = \frac{\omega_n^2}{\omega_n^2 + \omega_s^2}, \quad v = \sqrt{\frac{4eV_0 d^2}{m(d^2 + z_1^2)}}, \quad \omega_n = \frac{eH}{2mc}$$

$$\omega_s = [2e(V_0 - V_0)/mr_1^2]^{1/2}.$$

В случае слабых магнитных полей $H \ll 10^5$ эрстед и для тяжелых ионов $M \ll 1$ и $\omega_n^2 \ll \omega_s^2$. Для этого случая уравнение (7) принимает более простой вид

$$r = r_1 \cos \left\{ \frac{\omega_s}{v} \left[\sqrt{d^2 + z_1^2} (F(\varphi, k) - E(\varphi, k)) + z^{-1} \sqrt{(z^2 + d^2)(z^2 - z_1^2)} \right] \right\}.$$

Ион, образовавшийся в точке (r_1, z_1) , передвигается в сторону катода, совершая колебание в радиальном направлении относительно оси разряда (анода). Как видно из формулы (7), чем дальше от оси образовался ион, тем больше будет амплитуда колебания.

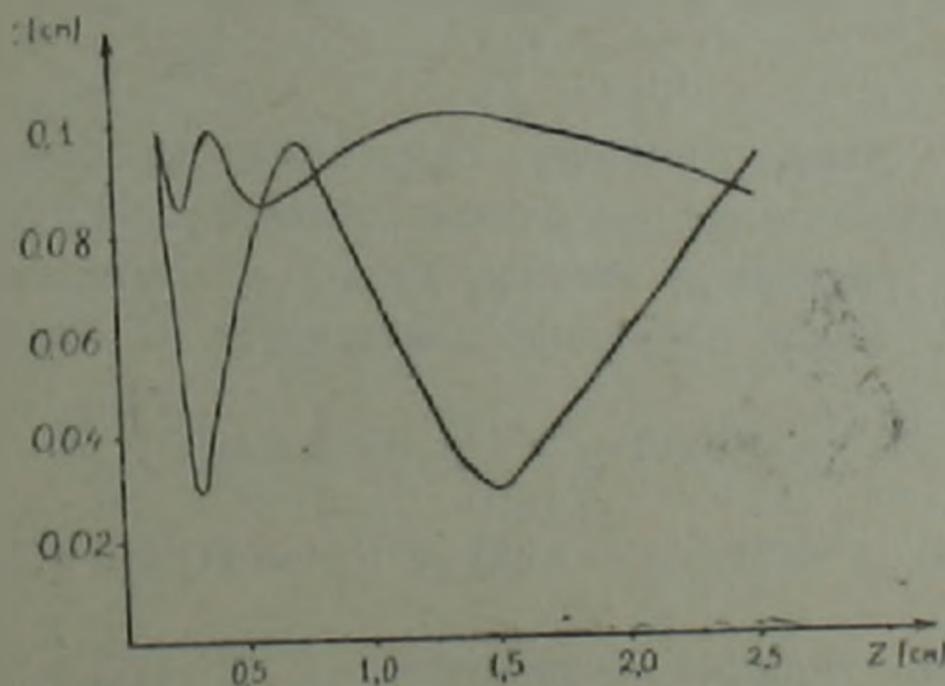


Рис. 2. Траектория ионов водорода в плоскости (r, z) при $V_0 = 3,3$ CGSE, $V_n = 2,5$ CGSE: 1 — $r_1 = 0,1$ см, $z_1 = 0,2$ см, $H = 10^4$ Гс; 2 — $H = 2 \cdot 10^4$ Гс, $r_1 = 0,1$ см, $z_1 = 0,2$ см

Для иллюстрации влияния магнитного поля на траекторию иона водорода на рис. 2 (а, б) изображены расчетные траектории в плос-

кости (r, z) по формуле (7) для двух значений магнитного поля. Из кривых видно, что чем больше магнитное поле, тем меньше амплитуда колебания иона. Это приводит к тому, что угол падения иона на катод при больших магнитных полях будет меньше, что приводит к уменьшению углового разброса ионов в ионном пучке.

Ереванский государственный университет

Ռ. Պ. ԲԱՐԵՐՅԱՆ, Դ. Ն. ԲԱԴԱԼՅԱՆ, Վ. Մ. ԴԱՍՊԱՐՅԱՆ, Ց. Ա. ՄԻՆԱՍՅԱՆ, Ա. Յ. ՉՈՐԱՆՅԱՆ

Իոնների առանց բախումային շարժումը բարձր լարման Պեննինգի պարպումում

Այս աշխատանքում հաշված է դրական իոնների հետագծի հավասարումը պարպման առանցքով պոտենցիալի նոր ապրոքսիմացված բաշխման կիրառմամբ: Պոտենցիալի ընտրված բաշխման ձևը ավելի ճիշտ է նկարագրում տրված պարպման համար գոյություն ունեցող փորձնական կորը:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

- 1 Г. В. Смирницкая, Р. П. Баберцян, ЖТФ, т. 36, № 7, с. 1217 (1966).
- 2 Э. М. Рейхрудель, Г. В. Смирницкая, Р. П. Баберцян, ЖТФ, т. 36, № 7, с. 1226 (1966)
- 3 Э. М. Рейхрудель, А. В. Чернетский, Вестн. МГУ, № 6, с. 47, 1954