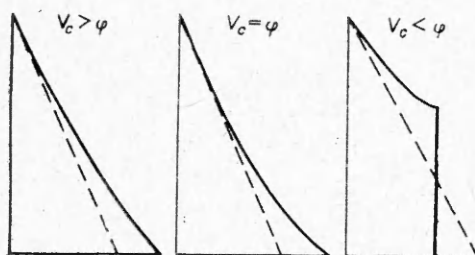


## АВТОЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМУ

А. А. Поротников, Б. Б. Родневич

(Москва)

При вычислении плотности тока на катоде дугового разряда, работающего в режиме автоэлектронной эмиссии, обычно используют выражения [1—3]. Однако эти выражения для плотности тока автоэмиссии в вакуум получены в предположении, что электрическое поле вблизи катода постоянно. В случае же эмиссии с катода дугового разряда часто реализуется случай, когда непосредственно перед катодом находится слой нескомпенсированного объемного заряда ионов. В этих случаях изменение потенциала становится сугубо нелинейным и картина потенциального барьера вблизи катода резко меняется, изменяется прозрачность барьера и, следовательно, плотность тока эмиссии электронов,



Фиг. 1

прошедших сквозь него. Произведем расчет плотности тока автоэмиссии электронов, прошедших сквозь такой потенциальный барьер.

Распределение потенциала в прикатодной области дугового разряда обычно получают из решения уравнения Пуассона в предположениях Ленгмюра — Маккоуна. В случае, когда концентрация ионов в слое  $n_+$  больше концентрации электронов  $n_- (n_+ \gg n_-)$ , т. е. когда отношение плотности тока ионов  $j_+$  к плотности тока электронов  $j_-$  примерно равно единице, распределение потенциала имеет вид

$$(1) \quad V_1 = -V_c + \left( V_c^{3/4} - \frac{3}{4} \frac{E_K}{V_c^{1/4}} x \right)^{4/3},$$

где  $V_c$  — прикатодное падение потенциала;  $x$  — расстояние от катода;  $E_K$  — напряженность электрического поля на катоде.

Учитывая (1), для потенциального барьера на границе металл — плазма получим

$$V_2 = \phi - e/4x - V_c + \left( V_c^{3/4} - \frac{3}{4} \frac{E_K x}{V_c^{1/4}} \right)^{4/3}.$$

Отметим, что в случае эмиссии электронов в вакуум потенциальный барьер имеет вид

$$V_2' = \phi - e/4x - eE_K x,$$

где  $\phi$  — работа выхода.

Распределение потенциала для  $V_c > \phi$ ;  $V_c = \phi$ ;  $V_c < \phi$  показано на фиг. 1, штриховыми линиями показан потенциальный барьер для эмиссии в вакуум, сплошными линиями — на границе металл — плазма.

Вычислим прозрачность потенциального барьера  $Q$ , следуя [4,5]. При этом для простоты вычислений в первом приближении не будем учитывать член  $e/4x$ , чтобы наглядней подчеркнуть разницу между эмиссиями электронов в вакуум и в плазму. В случае учета члена  $e/4x$  выражения для прозрачности потенциального барьера  $Q$  для  $V_c > \varphi$ ,  $V_c = \varphi$  и  $V_c < \varphi$  будут иметь вид

$$Q_1 = \frac{2\pi \sqrt{2m}}{h} \frac{4V_c}{3E_K} \sqrt{V_c - \varphi} \alpha_1(a_1; b_1),$$

$$Q_2 = \frac{2\pi \sqrt{2m}}{h} \frac{4V_c^{3/2}}{3E_K} \alpha_2(b_2),$$

$$Q_3 = \frac{2\pi \sqrt{2m}}{h} \frac{4V_c}{3E_K} \sqrt{\varphi - V_c} \alpha_3(a_1; b_1),$$

где

$$\alpha_1 = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{a_1(1-t)^{4/3} - \frac{b_1}{t} - 1} dt;$$

$$\alpha_2 = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{(1-t) - \frac{b_2}{t}} dt;$$

$$\alpha_3 = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{1 + \frac{b_1}{t} - a_1(1-t)^{4/3}} dt;$$

$$a_1 = V_c/V_c - \varphi; b_1 = 3eE_K/4V_c (V_c - \varphi); b_2 = 3eE_K/4V_c^2.$$

Зная  $Q$ , можно определить плотность тока  $j_{F-P}$

$$(2) \quad Q = \frac{2\pi \sqrt{2m}}{h} \int_0^{x_2} \sqrt{\varphi - V_c - \left( V_c^{3/4} - \frac{3}{4} \frac{E_K x}{V_c^{1/4}} \right)^{4/3}} dx,$$

где  $x_2$  определяется из выражения

$$x_2 = [V_c - V_c^{1/4} (V_c - \varphi)^{3/4}] \frac{4}{3E_K} \quad \text{при } V_c > \varphi$$

или  $x_2 = (4/3)V_c/E_K$  при  $V_c \leq \varphi$ .

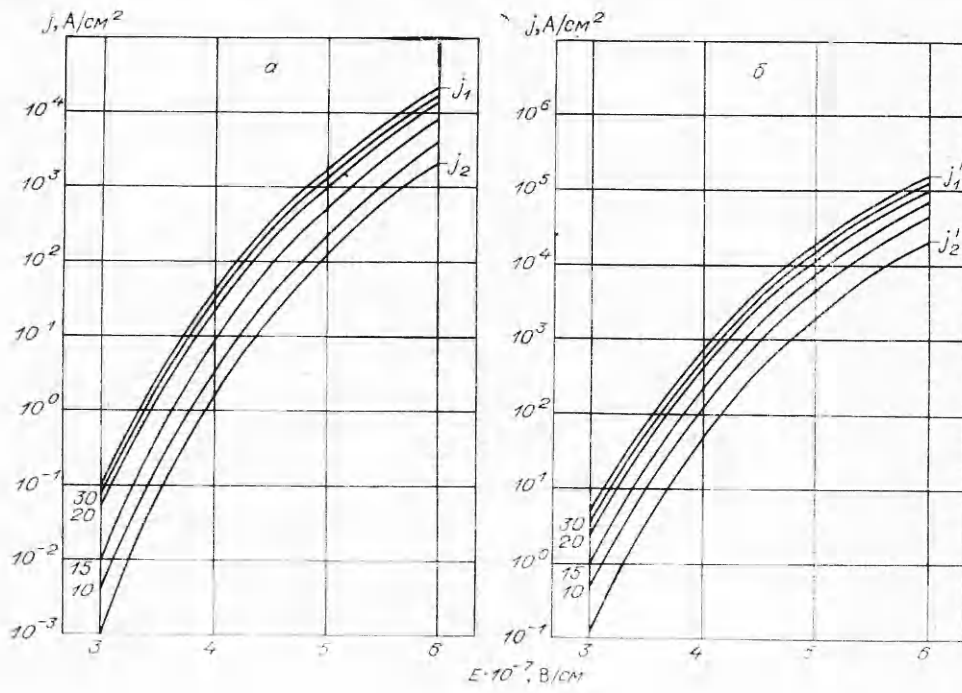
Для вычисления (2) рассмотрим три случая.

1.  $V_c > \varphi$ , тогда

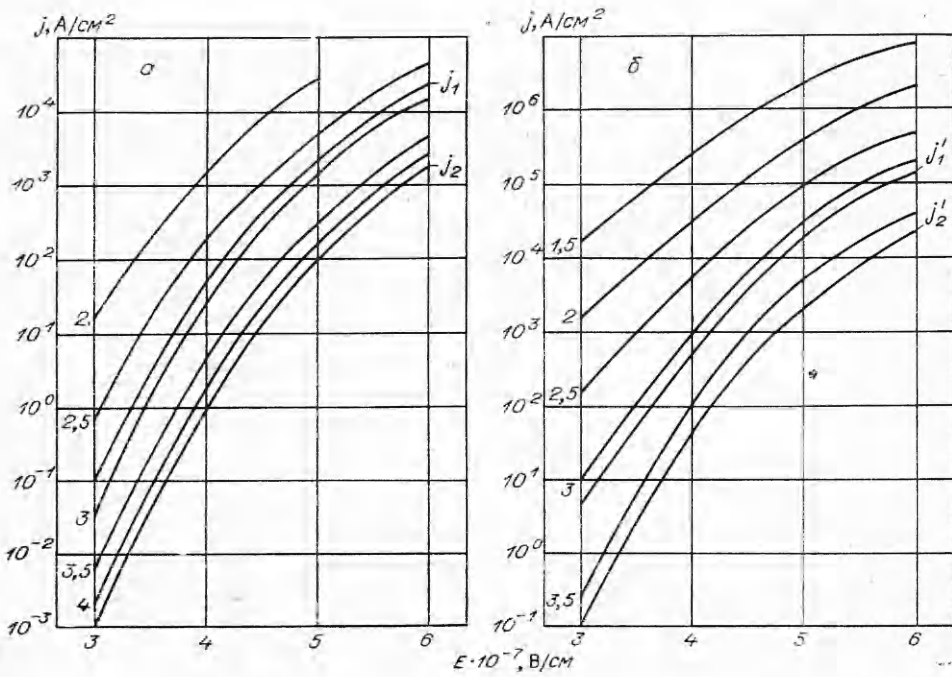
$$Q = \frac{2\pi \sqrt{2m}}{h} \frac{V_c^{1/4}}{E_K} (V_c - \varphi)^{5/4} \int_0^{\frac{\varphi}{V_c - \varphi}} t^{1/2} (1+t)^{-1/4} dt =$$

$$= \frac{V_c^{1/4}}{E_K} (V_c - \varphi)^{5/4} \frac{2\pi \sqrt{2m}}{h} \left( \frac{\varphi}{V_c - \varphi} \right)^{3/2} \frac{2}{3} {}_2F_1 \left( 1/4; 3/2; 5/2; -\frac{\varphi}{V_c - \varphi} \right),$$

где  ${}_2F_1(1/4; 3/2; 5/2; -\varphi/(V_c - \varphi))$  — гипергеометрическая функция Гаусса. Зная прозрачность потенциального барьера, можно определить плотность тока автоэмиссии в плазму  $j_{F-P}$ . На фиг. 2, а приведены зависимости плотности тока  $j_{F-P}$  от  $E_K$  для  $\varphi = 4.5$  В и  $V_c = 10; 15; 20$  и 30 В, на фиг. 2, б для  $\varphi = 4$  В и  $V_c = 10; 15; 20$  и 30 В.



Ф и г. 2



Ф и г. 3

2.  $V_c = \varphi$ . В этом случае выражение (2) упрощается и можно получить

$$Q = -\frac{4}{5} \frac{2\pi \sqrt{2m} \varphi^{3/2}}{h e E_K}.$$

Выражение для плотности тока  $j_{F-P}$  имеет вид

$$(3) \quad j_{F-P} = \frac{1,55 \cdot 10^{-6} E^2}{\varphi} \exp \left[ -1,2 \frac{6,85 \cdot 10^7 \varphi^{3/2}}{E_K} \right],$$

в то время как выражение для плотности тока автоэлектронной эмиссии в вакуум  $j_F$  имеет вид

$$(4) \quad j_F = \frac{1,55 \cdot 10^{-6} E^2}{\varphi} \exp \left[ -\frac{6,85 \cdot 10^7 \varphi^{3/2}}{E_K} \right].$$

Зависимости (3), (4) приведены на фиг. 2, а, б (кривые  $j_2$  и  $j_2'$ ;  $j_1$  и  $j_1'$ ).

Видно, что плотности токов  $j_{F-P}$  и  $j_F$  могут отличаться при одних и тех же значениях  $\varphi$  и  $E_K$  более чем на порядок.

3.  $V_c < \varphi$ , тогда

$$Q = \frac{2\pi \sqrt{2m} (\varphi - V_c)^{5/4} V_c^{1/4}}{h E_K} \int_0^{\frac{V_c}{\varphi - V_c}} \frac{\sqrt{1+t}}{t^{1/4}} dt =$$

$$= \frac{2\pi \sqrt{2m} (\varphi - V_c)^{5/4} V_c^{1/4}}{h E_K} {}_2F_1 \left( -1/2; 3/4; 7/4; -\frac{V_c}{\varphi - V_c} \right).$$

Аналогично случаю 1, зная  $Q$ , можно определить плотность тока автоэмиссии в плазму  $j_{F-P}$ .

На фиг. 3, а приведены зависимости плотности тока  $j_{F-P}$  от  $E_K$  для  $\varphi = 4,5$  В и  $V_c = 4; 3,5; 3; 2,5$  и 2 В и на фиг. 3, б для  $\varphi = 4$  В и  $V_c = 3,5; 3; 2,5; 2$  и 1,5 В.

В заключение отметим, что в случае  $V_c \geq \varphi$  плотность тока автоэмиссии в плазму  $j_{F-P}$  может быть только меньше плотности тока автоэмиссии в вакуум и при стремлении  $V_c$  к  $\varphi$  приближается к своему минимуму, определяемому из выражения (3). В случае  $V_c < \varphi$  плотность тока  $j_{F-P}$  может быть как больше, так и меньше  $j_F$ .

Поступила 9 I 1976

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Fowler R. H., Nordheim L. W. Electron emission in intense electric field.— «Proc. Roy. Soc.», 1928, vol. A119, p. 173.
2. Nordheim L. W. Über Feldemission.— «Z. Phys.», 1929, Bd 30, N 4, S. 177.
3. Раховский В. И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. М., «Наука», 1970.
4. Елинсон М. И., Васильев Г. Ф. Автоэлектронная эмиссия. М., Физматгиз, 1958.
5. Шпольский Э. В. Атомная физика. М., Физматгиз, 1963.