

### ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ И ОБЪЕМНОЙ ИОНИЗАЦИИ НА ПРИЭЛЕКТРОДНЫЕ ПАДЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА

Г. В. Бабкин, А. В. Потанов

(Москва)

Рассмотрено изменение потенциала электрического поля в слое «свободного падения» у электродов в зависимости от характеристик поверхностной и объемной ионизации. Проведены систематические расчеты приэлектродных падений потенциала для вольфрамовых катода и анода в плазме лития и цезия. Получены зависимости потенциала электрического поля от давления плазмы, степени объемной ионизации, электронной температуры, температуры электродов и плотности тока.

Наиболее сильное изменение потенциала в газовом разряде происходит вблизи твердых поверхностей. Обычно считают, что приэлектродное изменение потенциала заключено в двух прилегающих к электроду областях плазмы. В первой, непосредственно примыкающей к металлической поверхности зоне, характеризующейся малой толщиной порядка дебаевского радиуса (меньше длины свободного пробега заряженных частиц), отсутствует квазинейтральность, т. е. имеется существенный объемный заряд. Во второй зоне, имеющей толщину, значительно большую длины свободного пробега заряженных частиц, поддерживается квазинейтральность. В области квазинейтральности расчет изменения потенциала электрического поля может быть выполнен посредством решения обычных уравнений динамики плазмы гидродинамического типа. Изменение потенциала в слое свободного падения непосредственно у электродов должно рассчитываться с учетом специфики бесстолкновительного движения частиц в электрическом поле.

Ниже исследуются приэлектродные падения потенциала в бесстолкновительном слое. Вопрос о потоках частиц решается приближенно. Исследование проводится для электродов, имеющих отрицательный потенциал относительно прилегающего объема плазмы. Случай положительного потенциала электродов требует более сложного рассмотрения с целью получения необходимых выражений для потока электронов. К тому же расчеты показали, что положительная величина потенциала электрода существует в сравнительно небольшой области изменения параметров разряда.

Принимается, что температура тяжелых частиц в слое объемного заряда равна температуре поверхности электрода. Определение потенциала в приэлектродном слое должно производиться на основе уравнений [1, 2]

$$j = j_e + j_i \quad (1)$$

$$j_e = \frac{\xi_{es}^-}{4} en_{es} v_{es} \exp \left[ -\frac{e\Delta U_w}{kT_{es}} \right] - j_w, \quad j_i = -\frac{\xi_{is}^-}{4} en_{is} v_{is} + \frac{\xi_{is}^+}{4} en_{is} v_{is}$$

$$j_w = A_0 T_w^2 \exp \left[ -\frac{e\Phi_w - e\sqrt{eE_w}}{kT_w} \right], \quad p = kn_{es} \left( T_e + \frac{1}{\alpha_s} T_w \right)$$

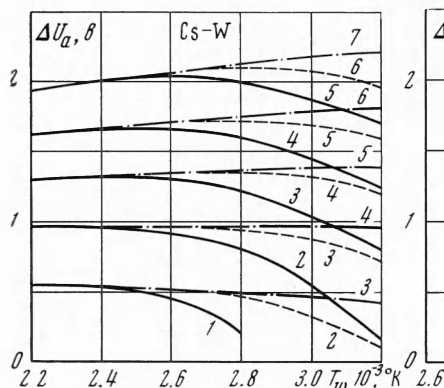
Здесь  $j$  — плотность электрического тока разряда (за положительное направление тока принимается направление от электрода);  $j_e, j_i$  — плотности составляющих электрического тока за счет движения электронов и ионов соответственно;  $j_w$  — плотность термоэлектронного тока;  $p$  — давление;  $n_{es}, n_{is}$  — концентрация частиц;  $v_{es}, v_{is}$  — тепловая скорость частиц;  $T_w$  — температура поверхности;  $\Delta U_w$  — разность потенциалов между плазмой на границе слоя объемного заряда ( $s$ ) и электродом ( $w$ );  $\alpha_s$  — степень объемной ионизации;  $e$  — абсолютная величина заряда электрона;  $E_w$  — напряженность электрического поля у поверхности;  $k$  — постоянная Больцмана;  $\xi_{es}^-, \xi_{is}^-, \xi_{is}^+$  — поправочные коэффициенты (индекс  $s$  внизу — значение величин на внешней границе слоя свободного падения; индекс минус соответствует движению частиц из плазмы к электроду, плюс — от электрода в плазму), приближенные выражения для которых можно получить из рассмотрения баланса частиц на внешней границе ( $s$ ) слоя свободного падения

$$\xi_{es}^- = \frac{2 - j_w / (1/4 en_{es} v_{es})}{2 - \exp[-e\Delta U_w / kT_{es}]}, \quad \xi_{is}^- = 2 - \frac{\beta_s}{\alpha_s}, \quad \xi_{is}^+ = \frac{\beta_s}{\alpha_s} \quad (2)$$

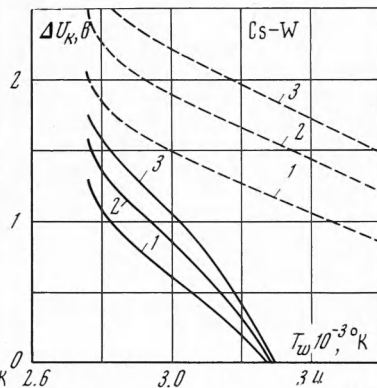
$$\beta_s = \frac{\exp[-e\Delta U_w / kT_w]}{(1/\beta_w) - 1 + \exp[-e\Delta U_w / kT_w]}, \quad \beta_w = \frac{\alpha^*}{1 + \alpha^*},$$

$$\alpha^* = A_i \exp \left[ \frac{e(\Phi_i - V_i)}{kT_w} \right] \quad (3)$$

В этих выражениях  $\beta_s$  — эффективный коэффициент поверхностной ионизации, отнесенный к условиям на границе;  $\beta_w$  — коэффициент поверхностной ионизации атомов на электроде;  $\alpha^*$  — степень поверхностной ионизации;  $V_i$  — потенциал ионизации атомов;  $A_i$  и  $\varphi_i$  — параметры в формуле Саха — Лэнгмюра [1].



Фиг. 1



Фиг. 2

В крайних случаях поток тяжелых частиц, идущих к электроду через поверхность  $s$ , может состоять либо из одних атомов, либо из одних ионов, поэтому степень объемной ионизации  $\alpha_s$  изменяется в пределах

$$\frac{1}{2}\beta_s \leq \alpha_s \leq \frac{1}{2}(1 + \beta_s) \quad (4)$$

При определении приэлектродного падения потенциала основными расчетными формулами, вытекающими из соотношений (1) — (3), являются

$$K = \frac{1}{L} \left[ 2 \left( kT_e + \frac{1}{\alpha_s} kT_w \right) \left( \frac{j + j_w}{e} \right) + p \left( 1 - \frac{\beta_s}{\alpha_s} \right) \left( \frac{8}{\pi} \frac{kT_w}{m_i} \right)^{1/2} \right]$$

$$L = p \left( \frac{8}{\pi} \frac{kT_e}{m_e} \right)^{1/2} - 2 \left( kT_e + \frac{1}{\alpha_s} kT_w \right) \quad \Delta U_w = -kT_e \ln \frac{2K}{1+K} \quad (5)$$

Здесь  $T_e$  — электронная температура,  $m_e$  и  $m_i$  — массы электрона и иона. В случае плазмы щелочных элементов и раскаленных тугоплавких электродов, когда на величине  $\Delta U_w$  может сказываться поверхностная ионизация, расчет ведется по формулам (3), (5), например, методом итераций.

На фиг. 1—4 представлены результаты расчетов  $\Delta U_w$ , проведенных на основе характеристик термоэлектронной эмиссии и поверхностной ионизации, взятых из [3—9], для вольфрамовых электродов без учета эффекта Шоттки.

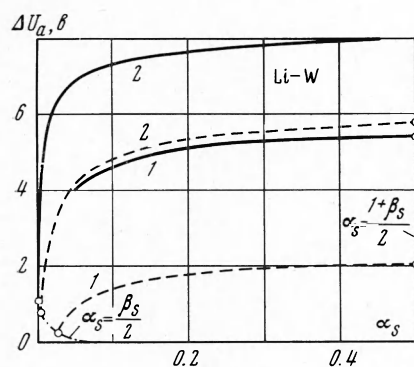
На фиг. 1 приведена зависимость прианодного падения потенциала  $\Delta U_a$  от  $T_w$  [°K], давления цезиевой плазмы (кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 соответствуют  $p = 10^1, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5, 10^6, 10^7$  мкбар) и плотности разрядного тока  $j$  ( $j = 3, 30, 300$  а/см<sup>2</sup> обозначены сплошными, пунктирными и штрих-пунктирными линиями соответственно) для электронной температуры  $T_e = 5000^\circ\text{K}$  и  $\alpha_s = \frac{1}{2}\beta_s$ . При заданной температуре  $T_w$  величина  $\Delta U_a$  повышается с ростом  $p$  и падает при увеличении  $j$ . Можно заметить, что изменение знака  $\Delta U_a$  произойдет в области высоких  $T_w$ , низких  $T_e$  и больших  $j$ . Нетрудно показать, что с ростом  $\alpha_s$  величина  $\Delta U_a$  будет возрастать.

На фиг. 2 дана зависимость прикатодного падения потенциала  $\Delta U_k$  от  $T_w$ , давления цезиевой плазмы  $p$  ( $p = 10^2, 10^4$  мкбар обозначены сплошными и пунктирными линиями соответственно) и  $T_e$  (кривые 1, 2, 3 соответствуют  $T_e = 5000, 10000$  и  $20000^\circ\text{K}$ ) при  $j = -3$  а/см<sup>2</sup> и  $\alpha_s = \frac{1}{2}\beta_s$ . С ростом  $T_w$  величина  $\Delta U_k$  на графике снижается, повышение  $T_e$  и  $p$  вызывает возрастание  $\Delta U_k$ . Приэлектродная разность потенциалов  $\Delta U_k$  изменяет знак в области высоких температур электрода и низких давлений плазмы.

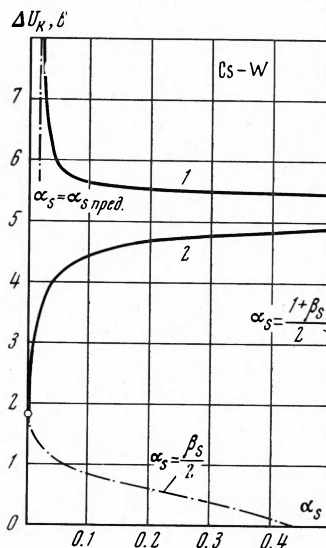
На фиг. 3 показано изменение  $\Delta U_a$  в зависимости от  $\alpha_s$ , давления литиевой плазмы  $p$  (кривые 1, 2 соответствуют  $p = 10^2$  и  $10^3$  мкбар) и  $j$  ( $j = 3$  и  $30$  а/см<sup>2</sup> обозначены сплошными и пунктирными линиями соответственно) при  $T_w = 2600^\circ\text{K}$ . Величина  $\alpha_s$  принимает ограниченные значения в соответствии с неравенством

(4). С ростом  $\alpha_s$  величина  $\Delta U_a$  также растет, в области низких значений  $\alpha_s$  — довольно сильно и при  $\alpha_s \geq 0.1$  — незначительно. Увеличение  $p$  и уменьшение  $j$  приводит к повышению  $\Delta U_a$ , как и в случае цезиевой плазмы.

На фиг. 4 изображена зависимость  $\Delta U_k$  от  $\alpha_s$  цезиевой плазмы и  $T_w$  при  $p = 10^4$  мкбар и  $j = -3$  а/см<sup>2</sup>. Температура  $T_w = 2400^\circ$  К (кривая 1) соответствует  $j_w < |j|$ ,  $T_w = 3000^\circ$  К (кривая 2) —  $j_w > |j|$ . Характер изменения  $\Delta U_k$  от  $\alpha_s$  при  $T_w = 3000^\circ$  ( $j_w > |j|$ ) тот же, что и у  $\Delta U_a$  (фиг. 3). В первом случае ( $j_w < |j|$ ) с ростом  $\alpha_s$  прикатодное падение  $\Delta U_k$  снижается. Снизу  $\alpha_s$  ограничено предельным значением  $\lim \alpha_s \approx 1.91 \cdot 10^{-2}$ , ниже которого  $\Delta U_k$ , по аналитическим зависимостям неограниченно возрастает. При  $\alpha_s < \lim \alpha_s$  количество ионов, приходящих на катод, становится недостаточным, чтобы дополнить ток термоэмиссии до заданного тока разряда.



Фиг. 3



Фиг. 4

Проведенное исследование показало связь приэлектродных падений потенциала с объемной и поверхностной ионизацией. Установленную зависимость приэлектродных падений потенциала  $\Delta U_w$  от степени объемной ионизации  $\alpha_s$  и коэффициента поверхностной ионизации  $\beta_w$  следует иметь в виду при разработке и расчетах плазменных устройств.

Поступила 20 I 1970

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В. Эмиссионная электроника. М., «Наука», 1966.
2. Лебедев А. Д. К вопросу о приэлектродных явлениях в газовом разряде. Ж. техн. физ., 1968, т. 38, вып. 10, стр. 1719.
3. Зандберг Э. Я., Ионов Н. И. Поверхностная ионизация. Усп. физ. н., 1959, т. 67, № 4, стр. 581.
4. Зандберг Э. Я., Тонтегоде А. Я. Термоэмиссионные постоянные проволочек из молибдена, тантала и вольфрама. Ж. техн. физ., 1965, т. 35, № 8, стр. 1501.
5. Garvin H. L., Wilson R. G. Electrode materials for cesium contact ion engines. AIAA Journal, 1965, vol. 3, No. 10, p. 1867.
6. Wilson R. G. Vacuum thermionic work functions of polycrystalline Nb, Mo, Ta, W, Re, Os and Ir. J. Appl. Phys., 1966, vol. 37, No. 8, p. 3170.
7. Wilson R. G., Wolf E. D. Electron and ion emission from iridium in lithium vapor. J. Appl. Phys., 1966, vol. 37, No. 12, p. 4458.
8. Алексеев Н. И., Каминский Д. Л. Ионизация некоторых редкоземельных элементов на поверхностях вольфрама, рения и иридия. Ж. техн. физ., 1964, т. 34, № 8, стр. 1521.
9. Moore Sh. E. Atomic Energy Levels. Washington, 1949.