УДК 533.9.08

Теория электростатического зонда в плазме, образованной продуктами ядерных реакций

А.Е. Шапиева[1,3], Э.Е. Сон[1,2], С.К. Кунаков[3]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)

[2]Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)

[3]Международный университет информационных технологий (МУИТ), Казахстан

В данной работе представлена зондовая теория для плазмы высокого давления, где справедливо гидродинамическое приближение в присутствии отрицательных ионов и даны методические рекомендации для определения концентрации заряженных частиц в плазме $^3He+UF_6$, образованной продуктами реакции $^3He+n \to p+T+0,76Mev$ на основе численных расчетов.

Рассмотрим случай стационарной плазмы и зонд, помещенный в плазму с потенциалом отличным от потенциала плазмы.

Принимая расстояния от зонда до любой точки в возмущенной зондом области как основную координату в безразмерном виде система уравнений, описывающая работу зонда в гидродинамическом приближении может быть представлена в следующем виде:

$$\omega^+ \frac{d}{d\xi}\left(-\frac{dn^+}{d\xi}+\gamma n^+\frac{d\psi}{d\xi}\right)=1-an^+n^e-bn^-n^+ \qquad (1)$$

$$\omega^- \frac{d}{d\xi}\left(-\frac{dn^-}{d\xi}+\gamma n^-\frac{d\psi}{d\xi}\right)=cn^e-bn^-n^+ \qquad (2)$$

$$\omega^e \frac{d}{d\xi}\left(-\frac{dn^e}{d\xi}+n^e\frac{d\psi}{d\xi}\right)=1-cn^e-an^en^+ \qquad (3)$$

$$\varepsilon\frac{d^2\psi}{d\xi^2}=n^e-n^-+n^+, \qquad (4)$$

где $\omega^+=\frac{D_a^{\ +}(n_\infty^{\ +})^2}{Sr_p^{\ 2}}$, $\omega^e=\frac{D_a^{\ e}(n_\infty^{\ +})^2}{Sr_p^{\ 2}}$, $\omega^-=\frac{D_a^{\ -}(n_\infty^{\ +})^2}{Sr_p^{\ 2}}$, $t_{ion}=\frac{n_\infty}{S}$, $\xi_1=\frac{r}{r_p}$, $\psi=\frac{\varphi_p}{\frac{kT_e}{e}}$, $S=\frac{n_{He_3}\Phi\sigma_f E_0}{\Omega}$, $t_{D^+}=\frac{r_p^{\ 2}}{D^+}$, $t_{D^-}=\frac{r_p^{\ 2}}{D^-}$, $t_{D^e}=\frac{r_p^{\ 2}}{D^e}$, $\delta=\frac{n_\infty^{\ e}}{n_\infty^{\ +}}$, $\varepsilon=(\frac{r_d}{r_p})^2=\frac{kT_e}{4\pi e^2 n_\infty^{\ +} r_p^{\ 2}}$, $\gamma=\frac{T_e}{T}$, $a=\frac{\alpha_e(n_\infty^{\ +})^2}{S}$, $\mathrm{b}=\frac{\alpha_i(n_\infty^{\ +})^2}{S}$, $\mathrm{c}=\frac{\beta n_\infty^{\ +}}{S}$, n^+,n^-,n^e - концентрации положительных, отрицательных ионов и электронов, D^+,D^-,D^e - коэффициенты диффузии и подвижности положительных и отрицательных ионов, электронов, β - коэффициент прилипания [1], определяющий формирование отрицательных ионов, r_p - радиус зонда, S - скорость ионизации, Φ - плотность нейтронного потока, σ_f - сечение деления изотопа гелия-3 при поглощении теплового нейтрона, E_0 - энергия осколков деления, ω - энергетическая цена образования пары электрона и иона, n_{He^3} - концентрация изотопного газа –гелия-3.

Граничные условия определяются на поверхности зонда и на границе возмущенной зондом области:

$$n^+(1)=\mathrm{n}^-(1)=n^e(1)=0, \psi(\mathrm{r}_p)=\psi_p \qquad (5)$$

$$n^+(\xi_1)=1, \mathrm{n}^-(\xi_1)=1-\delta, n^e(\xi_1)=\delta, \psi(\xi_1)=0, \qquad (6)$$

где ξ_1 - граница возмущенной зондом области.

Следуя работе [2], разделим возмущенную зондом плазму на две области: слой объемного заряда $1\le\xi\le\xi_0$, слой амбиполярной диффузии $\xi_0\le\xi\le\xi_1$.

Из уравнений (1-4) размеры слоя объемного заряда в этом случае для зонда плоской, цилиндрической и сферической формы имеют следующий вид:

для плоского зонда:

$$r_0=r_p\left[1+\kappa_+^{\ -0.5}r_p^{\ -2}\left(\varphi_p-\varphi_0\right)^{0.5}\right] \qquad (11)$$

для цилиндрического зонда:

$$r_0 = r_p\left[1+\sqrt{2}\kappa_+^{-0.5} r_p^{-2}\left(\varphi_p - \varphi_0\right)^{0.5}\right] \qquad (12)$$

для сферического зонда:

$$r_0 = r_p\left[1+\sqrt{3}\kappa_+^{-0.5} r_p^{-2}\left(\varphi_p - \varphi_0\right)^{0.5}\right], \qquad (13)$$

где $\kappa_+ = (\frac{4\pi eS}{b_+})^{\frac{1}{2}}$.

В частности для отрицательного потенциала зонда зондовые токи для плоской, цилиндрической и сферической геометрии уравнения для зондовых токов представлены в следующем виде:

для плоского зонда:

$$I_p = eSAr_0 \qquad (14)$$

для цилиндрического зонда:

$$I_p = eS\frac{\varphi_p - \varphi_0}{\sqrt{\kappa_+}}L \qquad (15)$$

для сферического зонда:

$$I_p = \frac{4}{3}\pi eSr_p^{\,3}\left[1+\sqrt{\frac{3}{\kappa_+}\frac{\varphi_p-\varphi_0}{r_p^{\,2}}}\right]^{\frac{3}{2}}, \qquad (16)$$

где A - площадь плоского зонда, L - длина цилиндрического зонда, а величина длины слоя объемного заряда для зондов различной геометрии соответственно равны.

В случае, когда падение потенциала происходит преимущественно в слое объемного заряда концентрация положительных ионов и параметр δ определяются из ионной и электронной ветви вольтамперной характеристики по следующим формулам (сферический зонд) [3]:

$$n_\infty^{\ +} = \frac{I_{np}^{\ +}\left(1+\frac{3}{4}\frac{I_{np}^{\ +}}{\pi eSr_p^{\,3}}\right)^{\frac{1}{3}} - 1}{\varphi_{np}r_p\left(1+\frac{3}{4}\frac{I_{np}^{\ +}}{\pi eSr_p^{\,3}}\right)^{\frac{2}{3}}}, \qquad \delta = \frac{I_{np}^{\ -} - 4\pi er_p b^- n_\infty^{\ +}\varphi_{pp}\left(1+\frac{I_{np}^{\ -}}{4\pi eSr_p^{\,3}}\right)^{\frac{1}{3}}}{4\pi er_p\left(b^e - b^-\right)\varphi_{pp}\left(1+\frac{I_{np}^{\ -}}{4\pi eSr_p^{\,3}}\right)^{\frac{1}{3}}}, \qquad (18)$$

где $I_{np}^{\ +}$ φ_{np} - зондовый ток и потенциал на ионную ветвь, $I_{pp}^{\ -}$ φ_{pp} - зондовый ток и потенциал на электронную ветвь.

В диффузионном слое величина n_0 на границе для отрицательного и положительного зонда определяется соответствующими выражениями:

$$(\frac{r_p}{r_d})^2 n_0^{\ +} = \upsilon\left[\left(\frac{2}{\omega^+}\frac{1}{(n_0^+)^2}\right)\left(1-\frac{\rho}{3}-n_0^+ + \frac{\rho(n_0^+)^3}{3}\right) - \frac{1}{n_0^+}(1-\rho(n_0^+)^2)\right],$$

$$(\frac{r_p}{r_d})^2 n_0^{\ e} = \upsilon\left[\left(\frac{2}{\omega^e}\frac{1}{(n_0^e)^2}\right)\left(\delta-\frac{\delta\rho}{3}-n_0^e + \frac{\rho(n_0^e)^3}{3}\right) - \frac{1}{n_0^e}(1-\rho(n_0^e)^2)\right] \qquad (36)$$

Если основное падение потенциала в основном происходит в диффузионном слое, то соответственно

$$n_0^{\ +} = \left(\frac{\upsilon\varepsilon}{\omega^+}\right)^{\frac{1}{3}}\left[2\left(1-\frac{1}{3}\rho\right)\right]^{\frac{1}{3}}, \qquad n_0^{\ e} = \left(\frac{\upsilon\varepsilon}{\omega^e}\right)^{\frac{1}{3}}\left[2\delta\left(1-\frac{1}{3}\rho\right)\right]^{\frac{1}{3}}, \qquad (38)$$

где $(\upsilon) = \left(\frac{D^+ - (1-\delta)D^- - \delta D^e}{b^+ + (1-\delta)b^- + \delta b^e}\right)\left(\frac{kT_e}{e}\right)^{-1}$, $\rho = \frac{a(n_\infty^{\ +})^2}{S}\delta + \frac{\mathrm{b}(n_\infty^{\ +})^2}{S}(1-\delta)$.

Выводы:

Полученные решения уравнений электростатического зонда ядерно-возбуждаемой плазмы позволяют определить концентрацию положительных ионов, электронов и отрицательных ионов при заданных условиях скорости ионизации и состава газовой смеси.

Литература:

[1] *Compton R.N.*, On the formation of positive and negative ions in gaseous UF6//The Journal of Chemical Physics, 1977, V. 66, N 10, pp.4478-4486.

[2] *Ульянов К.Н.,* Теория электрических зондов в плотной плазме//Журнал технической физики, 1970, Т. XL, в. № 4, стр. 790.

[3] *Kunakov S.K., Son E.E., Shapiyeva A.* Probe diagnostics of 3He+UF6 plasma, generated in the core of nuclear reactor WWW-K//International Journal of Mathematics and Physics, 2015, V. 6, N 1, pp.69-74.