

ЗОНДОВАЯ ДИАГНОСТИКА ЯДЕРНО-ВОЗБУЖДАЕМОЙ ПЛАЗМЫ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

С.К. Кунаков

Алматинский технологический университет, г.Алматы

Представлены результаты зондовых измерений и методика обработки результатов электростатического зонда в ядерно-возбуждаемой плазме гексафторида урана. Рассмотрены случаи малого, умеренного и большого потенциала зонда.

Экспериментальная установка

Расположение экспериментального канала для зондовой диагностики плазмы, образованной продуктами ядерных реакций, схематически приведено на рис. 1. Диагностический канал выполнен из стальной трубы. На этом же рисунке изображена диагностическая ячейка, которая имеет форму цилиндра диаметром 40 мм. с одним из оснований под корпус с патрубком для заполнения исследуемым газом. В центре другого основания ячейки вваривается гермоввод с тремя выводами, к которым с помощью контактной сварки крепятся зонды различной конфигурации: цилиндрический, сферический и плоский. Зонды крепятся на керамических державках. Нерабочая часть зонда защищена от контакта с плазмой изолятором, изготовленным из кварцевых трубок. Откачка, прогрев и заполнение ампул исследуемой смесью проводится на высоковакуумной установке. После заполнения ампул хвостовик ячейки, где вставлена медная трубка, пережимается на специальном пережимном устройстве и обрезается. Толщина пережима экспериментально подбирается с расчетом сохранения герметичности ячейки. Затем в образованную часть хвостика вставляют патрубок из нержавеющей стали и производится заваривание верхней части хвостика. После сварки сохранения герметичности проверяется течеискателем. К внешним выводам гермовводов крепятся нихромовые провода в керамической изоляции. Керамическая изоляция необходима для обеспечения надежной изоляции в области активной зоны реактора. Система регистрации вольтамперных характеристик зондов состоит из генератора пилообразного напряжения, соединенного с двухкоординатным самописцем, блока питания, реостата и двух цифровых вольтметров.

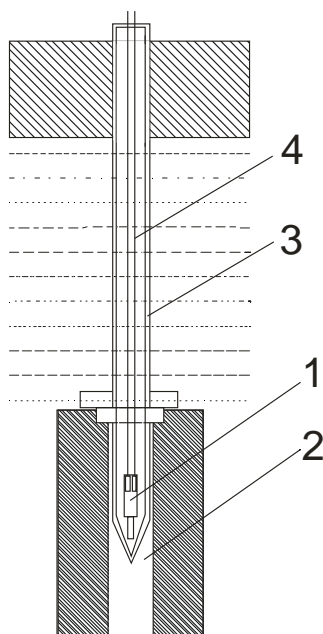


Рис.1 Экспериментальная установка для зондовой диагностики плазмы смесей в поле излучения стационарного ядерного реактора: 1 - ампула с исследуемой смесью; 2 - активная зона реактора; 3 - диагностический канал; 4 - сигнальные провода

Наиболее простой из перечисленных выше диагностических методик в ряде случаев является методика, основанная на использовании линейного участка электронной ветви вольт-амперной характеристики, который соответствует небольшим положительным потенциалам зонда, когда основной вклад в полное падение напряжения зонд-плазма вносит область с невозмущенной концентрацией заряженных частиц.

Согласно теории, предложенной в работе [1] в области малых потенциалов зонда (примерно 1 В) относительно плазмы основное падение потенциала происходит в квазинейтральной области. ВАХ при этом является линейной и описывается следующим уравнением

$$I = 4\pi\delta C\varphi_p, \quad (1)$$

где I – ток на зонд, δ – невозмущенная проводимость плазмы, C – электро-емкость зонда, определяемая его геометрией, φ_p – потенциал зонда относительно плазмы.

Учитывая, что проводимость плазмы может быть оценена по формуле

$$\delta = eb_en_{e\infty} \quad (2)$$

где b_e и $n_{e\infty}$ – подвижность и концентрация электронов в гелиевой плазме, то по наклону линейного участка измерений в эксперименте ВАХ можно определить концентрацию электронов

Рассмотрим случай малых потенциалов зонда, а именно, когда показатель $m=1$, или что то же самое: $|\varphi_p| = \omega kT / e$.

Сумма плотностей электрического тока обусловленных переносом положительных ионов, отрицательных ионов и электронов равна нулю. В слое объемного заряда по прежнему сохраняется условия квазинейтральности. Учитывая это, имеем

$$\bar{\Gamma}^+ - \bar{\Gamma}^- - \bar{\Gamma}^e = 0, \quad (3)$$

где

$$\bar{\Gamma}^+ = \frac{\bar{J}^+}{\frac{D_a^+}{S} N_\infty^+}, \quad (4)$$

$$J^+ = -D_a^+ \frac{d}{dx} N^+, \quad (5)$$

$$D_a^+ = \frac{(1-\gamma)(D^+b^- + D^-b^+) + \gamma(D^eb^+ + D^+b^e)}{(b^+ + (1-\gamma)b^- - \gamma b^e)}, \quad (6)$$

$$J^- = -D_a^- \frac{d}{dx} N^-, \quad (7)$$

$$D_a^- = \frac{(1-\gamma)(D^-b^+ + D^+b^-) + \gamma(1-\gamma)(D^-b^e + D^+b^e)}{(b^+ + (1-\gamma)b^- - \gamma b^e)}, \quad (8)$$

$$J^e = -D_a^e \frac{d}{dx} N^e, \quad (9)$$

$$D_a^e = \frac{\gamma(D^eb^+ + D^+b^e) + (1-\gamma)\lambda(D^eb^- + D^-b^e)}{(b^+ + (1-\gamma)b^- - \gamma b^e)}, \quad (10)$$

а потенциал равен

$$\phi' = \varepsilon(\ln(n))', \quad (11)$$

где:

$$\varepsilon = \frac{D^+ \gamma + D^- (1 - \gamma) - D^+}{b^+ + (1 - \gamma)b^- + \gamma b^e},$$

$$n = n^+, n^- = (1 - \gamma)n, n^e = \gamma n.$$

Зондовый ток равен:

$$I_p - 4\pi e N_\infty^+ \left(1 + \frac{b^+}{(1 - \gamma)b^- + \gamma b^e}\right) D_a^+ r_p r_0^2 \frac{dn}{dx}(x_0), \quad (12)$$

где

$$\frac{dn}{dx}(x_0) = \sqrt{2\omega \left(\frac{\alpha_l N_0^2}{3S} - 1 + n_0 - \frac{\alpha_l N_0^2}{3S} n_0^3\right)}, \quad (13)$$

$$n_0 = \left[\frac{(1+x)\omega\delta x}{\beta N_\infty^+ N_{UF_6}}\right]^{\frac{1}{3}}, \quad x_p = (|\varphi_p|e)/kT, \quad (14)$$

$$\delta = \frac{kT}{4\pi e^2 N_\infty^2 r_p^2}, \quad \omega = [((N_\infty^+ D_+)) / S / r_p^2], \quad (15)$$

$$\gamma = \frac{N_{e\infty}}{N_{+\infty}}. \quad (16)$$

Для согласования с экспериментальными условиями по исследованию плазмы зондовым методом в представленных расчетах давление UF6 принято равным 20 Торр, поток тепловых нейтронов меняется от $3 \cdot 10^{11}$ до $1.5 \cdot 10^{13}$ нейтрон см-2с-1.

Далее, в виду того, что зондовые измерения проводились в течении 2-3 часов, полагаем, что в рассматриваемых условиях концентрация гексаф-торида урана UF6 в формуле (12) равна исходному содержанию.

В качестве примера в табл. 1 представлены результаты эксперимента.

Таблица1 Концентрация компонент плазмы гексафторида урана, см-3

n_e	UF_6^+	UF_6^-	UF_5^-	F^-	F	F_2	UF_5	UF_4
$5,9 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^{11}$	$2,6 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^4$	$7,7 \cdot 10^{13}$	$7,7 \cdot 10^{16}$	$3,9 \cdot 10^{14}$	$4,0 \cdot 10^4$

Как следует из таблицы, основным отрицательным ионом в данной смеси является ион UF_6^- . Его концентрация равна концентрации UF_6^+ (с точностью до пятого знака).

Содержание UF_6^+ определяется ионизацией и гибелью в реакциях рекомбинации с UF_6^- .

Концентрация электронов невелика. Результаты расчетов показывают, что отношение концентрации электронов к суммарной концентрации отрицательных ионов составляет величину порядка 10^{-4} . Из расчета следует также, что концентрация электронов определяется ионизацией и прилипанием к молекулам UF_6 .

Выводы

Представленные расчетные и экспериментальные значения концентраций положительных ионов UF_6^+ , вычислены из ВАХ по методикам [4]. Экспериментальные и расчетные значения концентраций UF_6^+ находятся в удовлетворительном согласии.

Параметр $\gamma = N_0/N$ равен соотношению невозмущенных концентраций электронов и положительных ионов и характеризует степень прилипания электронов к электрофитной добавке. При высокой скорости прилипания электронов величина $\gamma \ll 1$, что соответствует случаю электроотрицательной плазмы (в пределе содержащей положительные и отрицательные ионы), при скорости прилипания близкой к нулю величина $\gamma \approx 0(1)$, что соответствует случаю электроположительной плазмы, содержащей в пределе положительные ионы и электроны.

Литература:

1. Davis R.N., Davis J.F., Sohneider R.T. Nuclear pumping lasers, induced by pulsed reactors // Trans. Amer. Nucl. Soc. - 1976. - Vol. 23. - P. 520-523.
2. Дмитриевский В.А., Е.М. Воинов, Тетельбаум С.Д. Применение гексафторида урана в ядерных энергетических установках // Атомная энергия. - 1970. - Т. 29, № 4. - С. 45-52.
3. R. Bektursunova, S. Kunakov Singular Perturbation Model of Electric Probe in Slightly Ionised Plasmas with Negative Ions // Plasma Physics Reports 25. - 1999. - 21с.
4. Р. Бектурсунова, С. Кунаков Методы сингулярных возмущений в слабо ионизованной плазме с отрицательными ионами // Физика Плазмы. 1999. - Т. 25, № 10. - С. 1-5.

ГЕКСАФТОРИД УРАНА И ЯДРОЛЫЕ КОЗДЫРЫЛҒАН ПЛАЗМАСЫНЫҢ ЗОНД ДИАГНОСТИКАСЫ

С.К. Қонаков

Ядролық коздырылғын гексафторид уран плазмасында электростатикалық зондтың өлшеу нәтижесі және нәтижелерді өңдеу әдістемесі келтірілген.

PROBE DIAGNOSTICS OF THE HEXAFLUORIDE URANIUM PLASMA

S.K. Kunakov

Experimental probe investigations of hexafluoride uranium plasma of high pressure, created by nuclear fragments are obtained and analyzed.