

УДК 537.523 (575.2) (04)

ФОРМИРОВАНИЕ ВНЕШНЕЙ ГРАНИЦЫ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРОДНОГО СВЧ-РАЗРЯДА

Ю.А. Лебедев – докт. физ.-мат. наук

А.В. Татаринов – канд. физ.-мат. наук

И.Л. Эпштейн – канд. физ.-мат. наук

Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН

Modification of quasi-static model of microwave discharge quasi-neutral plasma is offered.

Введение. Электродный СВЧ-разряд является ярким примером самоорганизации плазмы, в результате этого у поверхности электрода, по которому подводится СВЧ энергия, в разрядной камере в молекулярных газах образуются шарообразные плазменные структуры [1].

Зондовое и оптическое исследование разряда при давлениях 0.5–15 Тор показало, что внешняя граница плазменного образования является резкой и на ней концентрация электронов уменьшается более чем на порядок величины [2, 3]. На основе анализа экспериментальных результатов был сделан вывод о том, что внешняя граница может объясняться присутствием пограничного электрического слоя с пространственным разделением заряда [2, 3].

В настоящей работе квазистатическая модель квазинейтральной плазмы [4] была модифицирована для исследования возможности возникновения областей разделения зарядов в пространстве между электродами.

Модель. Экспериментальная разрядная камера представляет собой закороченный отрезок коаксиальной линии с обрезанным центральным электродом. Разряд в такой системе в различных газах горит в виде шара, окружающего торец центрального электрода, и обладает некой симметрией, близкой к сферической (рис. 1а). Поэтому для описания разряда в качестве первого шага была разработана стационарная одномерная модель в камере со сферической симметрией (рис. 1б). Расчеты проводились для разряда в водороде, $T_g = 300$ К. Считалось, что амплитуда поля в плазме с диэлектрической проницаемостью ε определяется формулой [5]

$$E(r) = \bar{E}_{micr} / \varepsilon = E_0 \left(\frac{r_{el}}{r} \right)^2 \left\{ (1-n)^2 + \frac{v_{en}^2}{\omega^2} \cdot n^2 \right\}^{-1/2}, \quad (1)$$

где $n = n_e / n_c$ – концентрация электронов, отнесенная к критическому значению $n_c = (v_{en}^2 + \omega^2) m / 4\pi e^2$; $\omega = 1.54 \cdot 10^{10} c^{-1}$ – круговая частота СВЧ поля; $v_{en} = v_{en}(E)$ – частота столкновений электронов с молекулами; E_0 – амплитуда поля, установившегося на поверхности внутреннего электрода радиуса r_{el} .

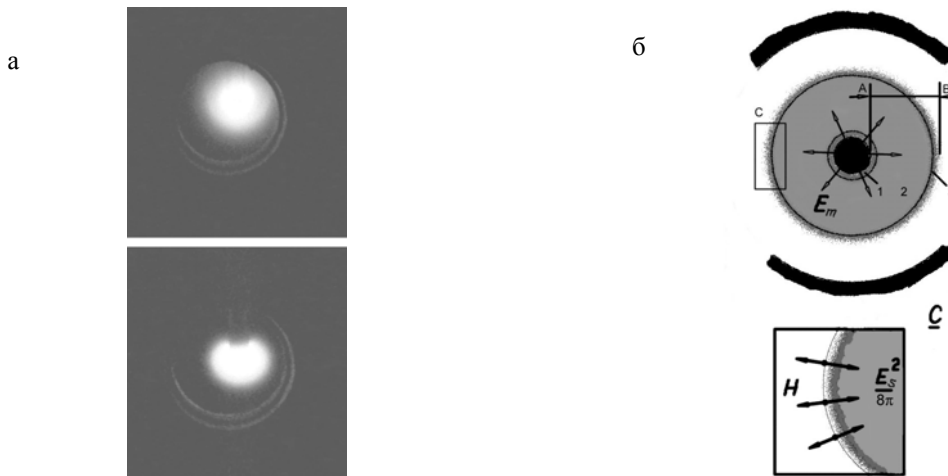


Рис. 1. Фотографии электродного СВЧ-разряда (а): сверху – водород, $p = 4 \text{ Тор}$; внизу – азот, $p = 2 \text{ Тор}$. Схема типичной плазменной структуры, используемой в расчетах со сферической симметрией (б). Центральный электрод и стенки камеры показаны черным цветом. Линии СВЧ поля E_m – стрелками. В плазме зоны 1 и 3 соответствуют приэлектродному и внешнему пограничному слоям, область 2 – квазинейтральная плазма. AB – путь интегрирования. Фрагмент плазмы C показан внизу с условием баланса напряжений на внешней границе.

Для описания плазмы используются уравнения баланса заряженных частиц, уравнение Пуассона и выражение для поглощенной в разряде мощности:

$$\frac{d(n_e D_e)}{dr} = -\Phi - \mu_e n_e E_s, \quad (2)$$

$$\frac{d(n_p D_p)}{dr} = -\Phi + \mu_p n_p E_s, \quad (3)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 \Phi) = \nu_i n_e - \alpha_r n_e n_p. \quad (4)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 E_s) = 4\pi e (n_p - n_e). \quad (5)$$

$$P = \int_V \sigma E_m^2 dV. \quad (6)$$

Коэффициенты в уравнениях являлись функциями локального значения СВЧ поля $E_m(r)$ и рассчитывались с помощью однородного уравнения Больцмана. В балансе заряженных частиц учитывались процессы объемной ионизации однократным электронным ударом и диссоциативной рекомбинации, а также диффузия и дрейф.

Идея, заложенная в процедуру расчетов, заключалась в следующем. Если начать интегрирование уравнений (1)–(5) с поверхности электрода в направлении внешней стенки разрядной камеры, то профили плотности плазмы всегда будут иметь следующую структуру: вблизи электрода возникает пограничный слой разделения заряда, затем протяженная область квазинейтральной плазмы и затем снова возникает тонкий слой разделения разряда. В последнем, вследствие разделения заряда, возникает электрическое напряжение, препятствующее диффузионному расширению плазмы.

Известно, что ширина пограничного слоя – порядка нескольких длин Дебая. Плазму в нем можно считать условно бесстолкновительной. Положение внешней границы разряда определяется

условием [6, 7], при котором давление электростатического поля E_s в точности уравнивает давление, производимое разлетающимися заряженными частицами

$$\frac{E_s^2}{8\pi} \approx n_e \{kT_e + m_e v_e^2\} + n_p \{kT_p + m_p v_p^2\} = H(E_s) \quad (A),$$

где v_e, v_p – направленные скорости электронов и ионов у поверхности раздела.

Расчет начинался с поверхности электрода S , на которой в силу идеальной каталитичности и отсутствия эмиссии заряженных частиц $n_e(S) = n_p(S) = 0$. Потоки ионов и электронов на стенке равны. Известно, что поток электронов из плазмы на стенку равен тепловому. Такое же условие справедливо и для внешней границы плазмы S^* : $\Phi(S^*) = 1/2 n_e v_{Te}$ (B), где v_{Te} – тепловая скорость электронов. Значение амбиполярного поля на электроде подбиралось в зависимости от задаваемого потока и СВЧ поля. При других значениях амбиполярного поля, отличающегося от выбранного, решение не существовало.

Интегрирование системы (1)–(6) проводилось методом перескока от поверхности центрального электрода до такого значения радиуса, при котором будут одновременно выполняться условия (A) и (B).

Результаты. При заданном значении напряженности СВЧ поля на электроде существует решение, в нем на некотором расстоянии от поверхности центрального электрода образуется пограничный слой. Его положение не зависит от положения внешней стенки камеры.

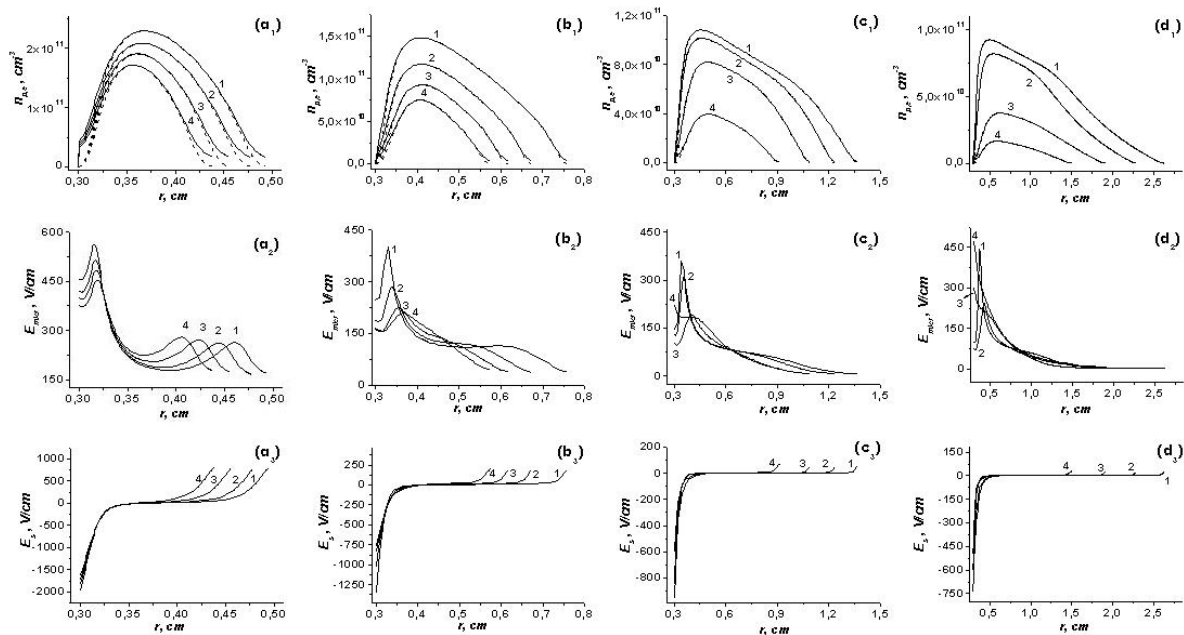


Рис. 2. (a₁), (b₁), (c₁), (d₁) – радиальные профили ионной и электронной плотностей, (a₂), (b₂), (c₂), (d₂) – профили СВЧ поля и (a₃), (b₃), (c₃), (d₃) профили электростатического поля при различных давлениях и поглощенной мощности (расчет при $T_g = 300 K$):

(a₁), (a₂), (a₃) – $p = 4 \text{ Top}$, числа 1, 2, 3, 4 соответствуют $P_{abs} = 26, 22, 18, 15 \text{ Вт}$;

(b₁), (b₂), (b₃) – $p = 2 \text{ Top}$, числа 1, 2, 3, 4 соответствуют $P_{abs} = 18, 11, 7, 5 \text{ Вт}$;

(c₁), (c₂), (c₃) – $p = 1 \text{ Top}$, числа 1, 2, 3, 4 соответствуют $P_{abs} = 14, 11, 7, 3 \text{ Вт}$;

(d₁), (d₂), (d₃) – $p = 0.5 \text{ Top}$, числа 1, 2, 3, 4 соответствуют $P_{abs} = 12, 7, 5, 2 \text{ Вт}$.

На рис. 2 показаны рассчитанные пространственные распределения концентраций заряженных частиц, СВЧ поля и поля пространственного заряда для разных давлений и поглощенных плазмой мощностей. Размер плазмы (см. рис. 3) растет при увеличении поглощенной мощности при неизменном давлении и при уменьшении давления при неизменной мощности, что качественно совпадает с данными экспериментов. При приведенном давлении 0,5 Тор результаты расчетов и экспериментов согласуются в пределах 50–60%, при больших давлениях различие достигает 20–30%. Отметим, что здесь решалась упрощенная модельная задача о возможности формирования плазмы, сосредоточенной вблизи электрода в камерах больших размеров.

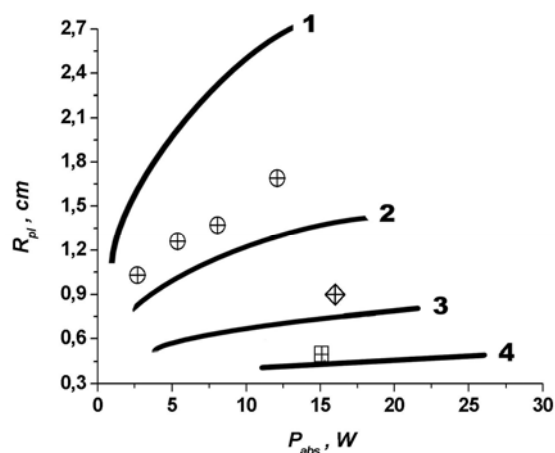


Рис. 3. Радиус плазмы от поглощенной в ней мощности при различных давлениях: сплошные линии — расчет, числа 1, 2, 3, 4 соотв. $p = 0,5, 1, 2, 4$ Тор, $T_g = 300$ К; ромб — $p = 4$ Тор, $T_g \approx 600$ К; квадрат — $p = 8$ Тор, $T_g \approx 600$ К.

Работа поддержана грантом РФФИ (№ 02-02-16021), Программой фундаментальных исследований Президиума РАН № 20 «Взаимодействие плазмы с высокоскоростными потоками газа» и грантом NWO-РФФИ 047.016.019.

Литература

1. Бардош Л., Лебедев Ю.А. // Физика плазмы. — 1998. — Т. 24. — № 10. — С. 956.
2. Лебедев Ю.А., Мокеев М.В. // ТВТ. — 2000. — Т. 38. — № 3. — С. 381.
3. Бардош Л., Лебедев Ю.А. // ТВТ. — 2000. — Т. 38. — № 4. — С. 552.
4. Lebedev Yu.A., Tatarinov A.V., Epstein I.L. // Plasma Sour. Sci&Technol. — 2002. — № 11. — P. 146.
5. Гильденбург В.Б., Марков Г.А. // Письма в ЖТФ. — 1982. — Т. 8. — Вып. 20.
6. Andrews J.G., Allen J.E. // Proc. Roy. Soc. Lond. A. — 1971. — V. 320. — P. 459.
7. Lapuerta V and Ahedo E. // Phys. Plasmas. — 2000. — V. 7. — P. 2693.