

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Е. Ф. Прозоров, Я. И. Лондер, К. П. Новикова,
К. Н. Ульянов, Зондовый метод диагностики плазмы
несамостоятельного разряда, *ТВТ*, 1980, том 18,
выпуск 1, 164–168

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru
подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским согла-
шением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.238.202.29

11 ноября 2024 г., 17:13:51



УДК 533.082.76

ЗОНДОВЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА

*Прозоров Е. Ф., Лондер Я. И., Новикова К. П.,
Ульянов К. Н.*

Получено выражение для ионной части зондовой характеристики плазмы несамостоятельного разряда для случая, когда зондовый ток целиком образуется в слое. Рассмотрены зонды плоской, цилиндрической и сферической конфигурации. Решения найдены для режимов слабой и сильной подвижности ионов. Экспериментально снимались зондовые характеристики для разряда в азоте при различных плотностях тока пучка и давлениях газа. Отмечено удовлетворительное совпадение теории и эксперимента. Сделан вывод о возможности определения скорости несамостоятельной ионизации и концентрации электронов в плазме с помощью предлагаемой методики.

В настоящее время в различных устройствах газовой электроники широкое применение находит несамостоятельный разряд, плазма в котором создается электронным пучком. В связи с этим приобретают несомненный интерес вопросы, связанные с диагностикой разрядов такого типа. В [1] вычислен ионный ток на зонд в несамостоятельном разряде. Задача решалась по аналогии со случаем самостоятельного разряда [2]. При этом предполагалось, что слой пространственного заряда около зонда мал, ионизацией в нем можно пренебречь и весь зондовый ток рождается в плазме. Однако возможна ситуация, когда величина зондового тока, образующегося в слое, существенно превышает ток из плазмы на границу слоя. Этот случай и рассматривается в предлагаемой работе.

Теория. Для нахождения зондовой характеристики воспользуемся следующей системой уравнений:

$$\operatorname{div} \mathbf{j}_i = eq, \quad (1)$$

$$\mathbf{j}_i = \rho_i v_i, \quad (2)$$

$$v_i = b_{i\alpha} E^\alpha, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi \rho_i, \quad (4)$$

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi. \quad (5)$$

Здесь j_i — плотность ионного тока; q — скорость несамостоятельной ионизации; ρ_i — плотность ионного заряда в слое; v_i — скорость ионов; $b_{i\alpha}$ — подвижность ионов; α — коэффициент, определяющий характер подвижности ионов ($\alpha=1$ — режим слабой подвижности, $\alpha=0,5$ — режим сильной подвижности); E , φ — напряженность и потенциал электрического поля. Граничными условиями для (1) и (4) являются $j_i(r_0)=0$, $E(r_0)=0$, где r_0 — граница слоя и плазмы. Отсчет r ведется от центра зонда (для плоского зонда положение начала координат произвольно). За положительное направление оси r принято направление от зонда. Вводя безразмерную переменную $x=r/r_s$ (r_s — радиус зонда), получим для (1)

$$-\frac{1}{x^m} \frac{\partial}{\partial x} x^m j_i = eq r_s. \quad (6)$$

Здесь $m=0, 1, 2$ для плоского, цилиндрического и сферического зондов соответственно. Интегрируя (6) в пределах от x до x_0 , имеем

$$x_0 = (1 + \beta_m)^{1/(m+1)}, \quad \beta_m = \frac{m+1}{eqr_3 S_{3,m}} I_i, \quad I_i = j_i(r_3) S_{3,m}, \quad (7)$$

где I_i — ионный ток на зонд; $S_{3,m}$ — площадь поверхности зонда. Размер слоя положительного объемного заряда $\delta = (r_0 - r_3)$ определяется выражением

$$\delta = r_3 [(1 + \beta_m)^{1/(m+1)} - 1]. \quad (8)$$

Подставляя (1) в (2), с учетом (3) и (4) находим

$$\frac{1}{r^m} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^m b_{i\alpha} E^\alpha \frac{1}{4\pi} \frac{1}{r^m} \frac{\partial}{\partial r} (r^m E) \right] = eq. \quad (9)$$

Введем $y = \frac{E}{E^*}$, $E^* = \left[\frac{4\pi eqr_3^2}{b_{i\alpha}(m+1)} \right]^{1/(\alpha+1)}$. Тогда, интегрируя (9) в пределах от x до x_0 , получаем

$$\frac{d}{dx} y^{\alpha+1} + \frac{m(\alpha+1)}{x} y^{\alpha+1} + (\alpha+1) \frac{x_0^{m+1} - x^{m+1}}{x} = 0, \quad y(x_0) = 0. \quad (10)$$

Решение уравнения (10) имеет вид

$$y = (\alpha+1)^{1/(\alpha+1)} x^{-m} \left\{ \frac{x_0^{m+1}}{m\alpha+1} (x_0^{m\alpha+1} - x^{m\alpha+1}) + \frac{1}{m(\alpha+1)+2} [x^{m(\alpha+1)+2} - x_0^{m(\alpha+1)+2}] \right\}^{1/(\alpha+1)}. \quad (11)$$

Интегрируя (5) в пределах $1-x_0$, с учетом (7) и (11) получаем уравнение, связывающее напряжение, приложенное к слою $(\varphi_0 - \varphi_3)$ и ионный ток на зонд I_i

$$I_i^{-1} (\varphi_0 - \varphi_3)^{\alpha+1} (1+\alpha)^{-1} (4\pi)^{-1} b_{i\alpha} S_{3,m} r_3^{-(2+\alpha)} = F_{m,\alpha}^{\alpha+1}, \quad (12)$$

$$F_{m,\alpha} = \frac{1}{m+1} \beta_m^{-1/(1+\alpha)} (1+\beta_m)^{\alpha+3/(\alpha+1)(m+1)} \int_1^{1+\beta_m} x^{-2/(m+1)} dx.$$

$$\left\{ \frac{m+1}{(m\alpha+1)[(\alpha+1)m+2]} - \frac{x^{-(m\alpha+1)/(m+1)}}{m\alpha+1} + \frac{x^{-[m(\alpha+1)+2]/(m+1)}}{m(\alpha+1)+2} \right\}^{1/(\alpha+1)} dx. \quad (13)$$

Правая часть (12) зависит только от β_m , а левая может быть вычислена по результатам эксперимента. Таким образом, зная значение $F_{m,\alpha}(\beta_m)$, можно определить β_m , а, следовательно, и q .

Выражения (12) и (13) определяют вольт-амперную характеристику зонда.

Получим конкретный вид вольт-амперных зондовых характеристик при различных m и α .

Плоский зонд ($m=0$). В этом случае (13) интегрируется в элементарных функциях при любом α

$$F_{0,\alpha} = 2^{-1/(\alpha+1)} (1+\alpha) (3+\alpha)^{-1} \beta_0^{(2+\alpha)/(1+\alpha)}. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (12), получаем

$$I_i = \left(\frac{0,5}{\pi} b_{i\alpha} \right)^{1/(3+\alpha)} (1+\alpha)^{-(2+\alpha)/(3+\alpha)} (eq)^{(2+\alpha)/(3+\alpha)} \times \\ \times (3+\alpha)^{(1+\alpha)/(3+\alpha)} S_{3,0} (\varphi_0 - \varphi_s)^{(1+\alpha)/(3+\alpha)}. \quad (15)$$

Приведем выражения для $\alpha=1$ и $\alpha=0,5$ *

$$I_i = \left(\frac{b_{i1}}{\pi} \right)^{0,25} (eq)^{0,75} S_{3,0} (\varphi_0 - \varphi_s)^{0,5} \quad (\alpha=1), \quad (16)$$

$$I_i = 0,76 b_i^{3/4} (eq)^{3/4} S_{3,0} (\varphi_0 - \varphi_s)^{3/4} \quad (\alpha=0,5). \quad (17)$$

Цилиндрический зонд ($m=1$). Из (12) и (13) находим

$$(\varphi_0 - \varphi_s) = 2r_s (b_i L_s)^{-0,5} I_i^{0,5} F_{1,1} \quad (\alpha=1), \quad (18)$$

$$F_{1,1} = 0,25 \beta_1^{-0,5} [(1+\beta_1) \ln(1+\beta_1) - \beta_1]$$

$$(\varphi_0 - \varphi_s) = \left(\frac{3I_i}{b_i L_s} \right)^{2/3} r_s F_{1;0,5}, \quad (\alpha=0,5), \quad (19)$$

$$F_{1;0,5} = 0,5 \beta_1^{-2/3} (1+\beta_1)^{1/6} \int_1^{1+\beta_1} x^{-1} \left(\frac{2}{7} x^{-7/4} - \frac{2}{3} x^{-3/4} + \frac{8}{21} \right)^{2/3} dx.$$

График функции $F_{1;0,5}(\beta_1)$ приведен на рис. 1. При $\beta_1 \ll 1$ цилиндрический зонд работает как плоский, при этом $F_{1,1} \rightarrow 0,125 \beta_1^{1,5}$, $F_{1;0,5} \rightarrow 0,085 \beta_1^{1/2}$ и формулы (18) и (19) переходят соответственно в (16) и (17).

Сферический зонд ($m=2$). Из (12) и (13) находим

$$(\varphi_0 - \varphi_s) = 2^{0,5} b_{i1}^{-0,5} r_s^{0,5} I_i^{0,5} F_{2,1},$$

$$F_{2,1} = 0,61 \beta_2^{-0,5} \left[\frac{2}{3} \beta_2 - (1+\beta_2)^{2/3} + 1 \right] \quad \text{при } \alpha=1, \quad (20)$$

$$(\varphi_0 - \varphi_s) = (1,5 I_i)^{2/3} b_{i;0,5}^{-2/3} r_s^{1/6} F_{2;0,5},$$

$$F_{2;0,5} = 1/3 \beta_2^{-2/3} (1+\beta_2)^{1/6} \int_1^{1+\beta_2} x^{-2/3} (0,2x^{-2/3} - 0,5x^{-2/3} + 0,3)^{2/3} dx \quad \text{при } \alpha=0,5. \quad (21)$$

График функции $F_{2;0,5}(\beta_2)$ приведен на рис. 1. При $\beta_2 \ll 1$ сферический зонд работает как плоский, при этом $F_{2,1} \rightarrow (\beta_2/6)^{2/3}$, $F_{2;0,5} \rightarrow 0,043 \beta_2^{2/3}$ и формулы (20), (21) переходят в (16), (17) соответственно.

Эксперимент. Снимались зондовые характеристики в несамостоятельном импульсном разряде в азоте при различных давлениях газа и плотностях тока пучка. Пучок электронов с энергией 95 кэВ вводился через алюминиевую фольгу толщиной 18 мкм и сечением $9,5 \times 2,6$ см² в разрядную камеру с размерами $9,5 \times 2,6 \times 1,9$ см³ (расстояние между анодом и катодом составляло 1,9 см). Использовался цилиндрический зонд из вольфрама с радиусом $r_s = 0,008$ и длиной $L_s = 0,4$ см. Зонд ориентирован перпендикулярно пучку и располагался в центре камеры.

Длительность импульсов тока пучка составляла $6 \cdot 10^{-3}$ с и значительно превышала характерное время рекомбинации ($\sim 10^{-5}$ с). В этом случае задачу можно считать квазистационарной.

* Задача о протекании несамостоятельного тока между плоскими электродами для случая $\alpha=1$ рассмотрена в [3]. В [4] получена формула, аналогичная (16).

Полученные в результате экспериментов зависимости зондового тока от напряжения, приложенного к слою для $p=2,7; 3,3; 20$ кПа и тока пучка $j_n=100; 200$ мкА/см², приведены на рис. 2. Здесь также показаны теоретические кривые для цилиндрического случая. Соотношения (15)–(21) описывают ионную часть зондового тока. На зонд идет также прямой ток пучка $I_{en}=j_n \times S'_z$ (S'_z – теньевая поверхность зонда), поэтому зондовые характеристики рассчитывались по формуле $I_3=I_i-2r_3L_3j_n$, где I_i определяется (18). Для построения зондовой характеристики использовались

Рис. 1. Графики функций: 1 – $F_1; 0,5(\beta_1)$; 2 – $F_2; 0,5(\beta_2)$

Рис. 2. Зондовые вольт-амперные характеристики: кривые – теория, точки – эксперимент: а – $j_n=100$ мкА/см², $p=3,3$ кПа; б – 100 мкА/см², 20 кПа; в – 200 мкА/см², $2,7$ кПа

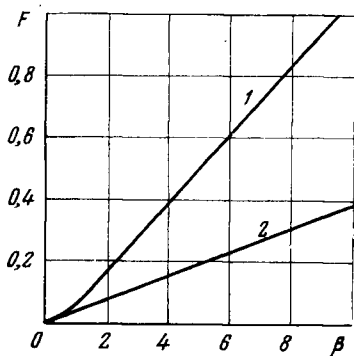


Рис. 1

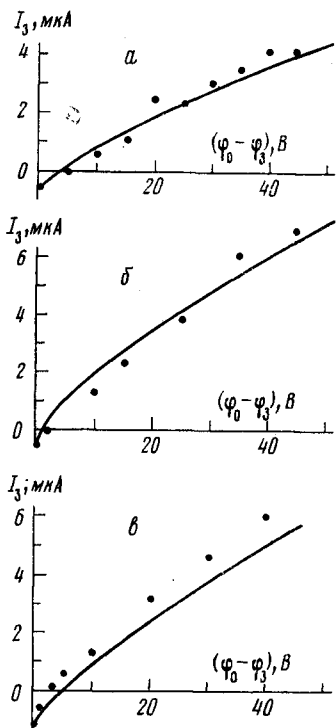


Рис. 2

значения $b_i=2,33$ см²/В·с [5] * и дифференциальной ионизации $n_e \sigma_n = 40$ см⁻¹ Па⁻¹ [8]. Отметим вполне удовлетворительное согласие теории с экспериментом.

Из выражений (15)–(21) видно, что в условиях самостоятельной ионизации I_i на зонды разной геометрии зависит лишь от q . Если в плазме преобладает рекомбинация, то $q=\alpha_k n_e^k$, и по измеренному ионному зондовому току можно определить либо коэффициент рекомбинации α_k , либо концентрацию электронов n_e . Отметим, что для случая формирования ионного зондового тока в плазменной области (когда частью ионного тока, формирующейся в слое у зонда, можно пренебречь) использование зондов разной геометрии позволяет определить α_k и n_e .

Таким образом, связь ионного зондового тока с параметрами плазмы зависит от того, в слое или в плазме формируется его основная часть. Для расчета параметров плазмы необходимо сделать соответствующее предположение, которое затем проверяется оценкой соотношения частей ион-

* В условиях нашего эксперимента ($T=300$ К, $p=0,1$ мПа) преобладают ионы N_4^+ [6, 7].

ного тока, формирующихся в слое $I_{сл}$ и в плазме $I_{пл}$ по формуле

$$\frac{I_{сл}}{I_{пл}} = \frac{r_0^{m+1} - r_3^{m+1}}{(m+1)r_0^m r_\alpha N' (r_0/r_\alpha)}. \quad (22)$$

Оценка этого соотношения для условий нашего эксперимента дает $I_{сл} \gg I_{пл}$, т. е. зондовый ток практически полностью формируется в слое объемного заряда.

При использовании этого метода для диагностики разряда необходимо, чтобы поле в слое превышало поле разряда [9]. Для разрядов в атомарных газах это условие выполняется практически всегда, а для разрядов в молекулярных газах необходима соответствующая оценка. Если поле разряда превышает поле в слое, обработка зондовых измерений должна проводиться с учетом результатов [9]. В данной работе измерение зондовых вольт-амперных характеристик проводилось при отсутствии разрядного напряжения.

В заключение отметим, что предложенная методика совместно с [1] позволяет производить измерение параметров плазмы несамостоятельного разряда с помощью зондового метода в широком диапазоне изменения параметров плазмы.

Всесоюзный электротехнический институт им. В. И. Ленина

Поступила в редакцию
8 XII 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Н. Ульянов. ЖТФ, 48, 920, 1978.
2. К. Н. Ульянов. ЖТФ, 40, 790, 1970.
3. J. J. Thomson, G. P. Thomson. Conduction of Electricity through Gases, I. Cambridge, 1928.
4. В. А. Данилычев, О. М. Керимов, И. Б. Ковш. Тр. ФИАН, 85, «Наука», 1976.
5. И. Мак-Даниэль, Э. Мэзон. Подвижность и диффузия ионов в газах. «Мир», 1976.
6. Л. С. Полак, И. А. Сефеев, Д. Н. Словецкий. ТВТ, 15, 15, 1977.
7. D. H. Douglas-Hamilton. J. Chem. Phys., 58, 11, 4820, 1973.
8. В. Л. Грановский. Электрический ток в газе, I. ПИТТЛ, М.-Л., 1952.
9. Ю. С. Акишев, А. П. Напартович. ДАН СССР, 242, № 4, 812, 1978.