

С.13

14

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

препринт 126

О.Я.Савченко

**Предельная характеристика
цилиндрического зонда**

г.Новосибирск 1967

А Н Н О Т А Ц И Я

Приводится предельная вольт-амперная характеристика цилиндрического зонда в бесстолкновительной и квазинейтральной плазме, частицы которой имеют максвелловское распределение по скоростям, и условия, при которых действительная характеристика зонда совпадает с предельной.

Экспериментально определенные характеристики цилиндрического зонда в плазме водородной дуги при положительных потенциалах зонда совпадают с расчетной предельной характеристикой. Однако, при большом отрицательном потенциале ионные токи оказались значительно меньше предельных ионных токов. Предполагается, что этот экспериментальный результат связан с наличием значительного орбитального движения электронов и отсутствием (из-за перезарядки) орбитального движения ионов.

В статье обсуждаются экспериментально полученные вольт - амперные характеристики цилиндрического зонда в плазме водородной дуги /1/. Обсуждение результатов проводится в рамках модели бесстолкновительной изотропной плазмы с максвелловским распределением скоростей частиц. Анализ в этом случае удобно проводить, заменяя реальный зонд эквивалентным ему зондом, который не искажает движение частиц плазмы. Рис. I иллюстрирует использование такой модели для случая I и II. Как следует из рисунка, если потенциал зависит только от r , радиус эквивалентного зонда определяется в случае I только скоростью частиц в плоскости, перпендикулярной оси зонда и потенциалом зонда /2/, в случае II - скоростью частицы и ходом потенциала, характер поведения которого вблизи зонда определяет максимальный угол входа частиц на поверхность зонда. При одном и том же потенциале зонда радиус эквивалентного зонда в случае I всегда больше радиуса эквивалентного зонда в случае II.

Следовательно, в случае I при заданном потенциале имеет место предельный (максимальный) ток на зонд. Из рисунка видно, что на траектории, которые кончатся на поверхности зонда в предельном случае (в случае I), удовлетворяется следующее неравенство:

$$\frac{\partial j}{\partial r} < 0. \quad (1)$$

В свою очередь (I) всегда будет осуществляться, если /2/

$$\frac{\partial^2 |V_2|}{\partial r^2} \geq 0; \quad (2)$$

r - расстояние до оси зонда, V_2 - потенциал в точке r . Поток частиц (с изотропным распределением скоростей) на единицу длины эквивалентного зонда равен /2/:

$$N = \frac{1}{2} \pi n_0 (\overline{uv}) \quad (3)$$

$\langle \bar{v} \rangle$ - усредненное произведение абсолютных скоростей частиц на радиус эквивалентного зонда, Π_0 - плотность частиц. Предельный же радиус эквивалентного зонда легко определяется из закона сохранения импульса:

$$\langle \bar{v} \rangle = z_0 \sqrt{v^2 + 2\mu^{-1}V_{z_0}} \quad (4)$$

μ - приведенная масса частицы. Поэтому предельные ионные и электронные токи в бесстолкновительной и квазинейтральной плазме определяется выражениями:

$$i_p = \frac{1}{2} \pi r z_0 e \int f_e(v) \sqrt{v^2 + 2\mu_e^{-1}V_{z_0}} dv,$$

$$i_e = -\frac{1}{2} \pi r z_0 e \int f_p(v) \sqrt{v^2 + 2\mu_p^{-1}V_{z_0}} dv; \quad (5)$$

$f_p(v)$, $f_e(v)$ - функции распределения скоростей ионов и электронов в плоскости перпендикулярной оси зонда, ρ - плотность плазмы. Интегрирование в (5) производится только в области действительных значений подинтегрального выражения. В случае максвелловского распределения по скоростям (5) в обозначениях /2/ переписывается следующим образом /3/:

$$i_p = \frac{1}{2} \pi e r z_0 \bar{v}_p \exp(-eV_{z_0}/kT_p),$$

$$i_e = -\frac{1}{2} \pi e r z_0 \bar{v}_e f_1(eV_{z_0}/kT_e), \quad \text{при } V_{z_0} \geq 0; \quad (6.1)$$

$$i_p = \frac{1}{2} \pi e r z_0 \bar{v}_p f_1(-eV_{z_0}/kT_p),$$

$$i_e = -\frac{1}{2} \pi e r z_0 \bar{v}_e \exp(eV_{z_0}/kT_e), \quad \text{при } V_{z_0} \leq 0; \quad (6.2)$$

$$f_1(x) = [1 - \Phi(\sqrt{x})] \exp x + 2\sqrt{\pi} x,$$

$$\Phi(\sqrt{x}) = 2\pi^{-1/2} \int_0^{\sqrt{x}} \exp(-y^2) dy \quad (6.3)$$

Так как предельные токи по абсолютной величине больше (или равны) реальным токам, для зондовых токов такой плазмы должны выполняться неравенства:

$$i_p > i > i_e \quad (7.1)$$

i - реальный ток на единицу длины зонда.

Если напряженность электрического поля вне зонда не меняет знака, (7), можно заменить неравенством:

$$i \geq i_e + i_p \quad \text{при } V_z \geq 0 \quad (8.1)$$

и

$$i \leq i_e + i_p \quad \text{при } V_z \leq 0 \quad (8.2)$$

Из (6) вытекают следующие свойства предельных характеристик -

ТИК:

1. Ферма предельной характеристики определяется отношением температуры плазмы к потенциалу зонда.

2. Предельный ток при заданной температуре и потенциале на зонде пропорционален плотности плазмы.

3. При больших потенциалах на зонде квадрат предельного тока пропорционален потенциалу зонда.

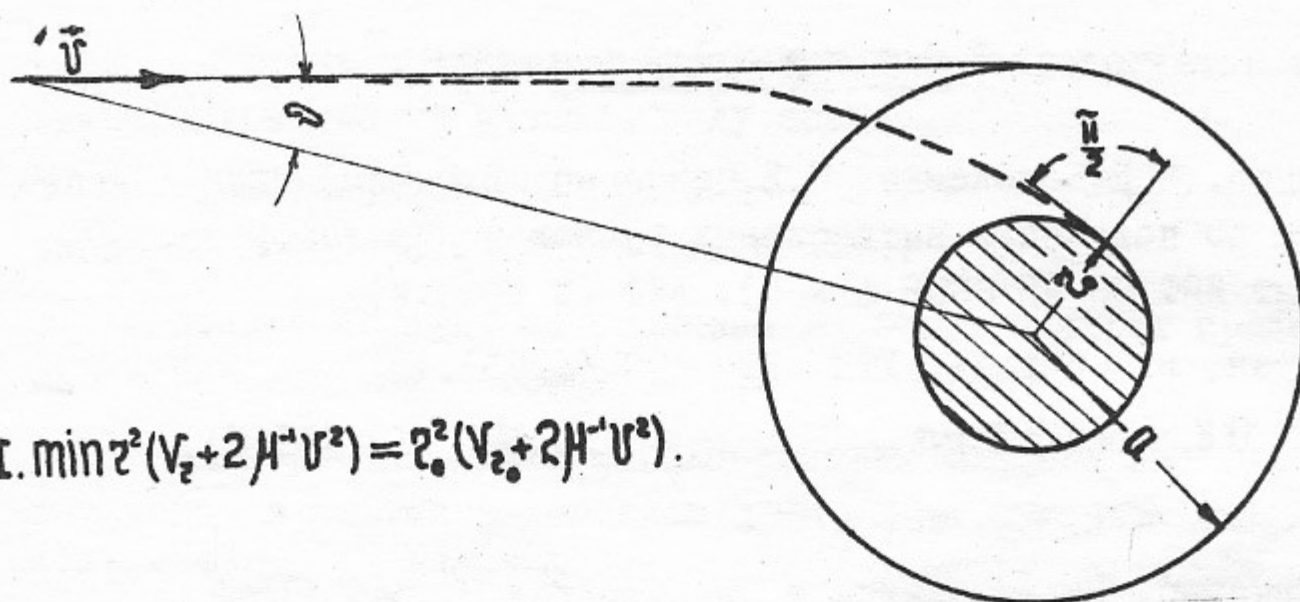
Экспериментальные характеристики зонда в области электронных токов в плазме водородной дуги /1/ и ртутного разряда /4/ представлены на рис.3-6. Эти характеристики совпадают с предельной характеристикой зонда. Экспериментальные точки отложены в системе координат, подчеркивающей перечисленные свойства предельной характеристики.

Из /2/ следует, что ионные токи при $T_p' = T_e$ при $T_p'' \ll T_e$ различаются незначительно, если плотности плазм совпадают. Если нет орбитального (замкнутого) движения частиц из условий подобия многокомпонентных систем заряженных частиц, что при $T_e = T_p$ распределение потенциала не зависит от знака /5/. Поэтому, если для электронного тока выполняются условия, при которых реальная характеристика совпадает с предельной, то те же условия будут выполняться для ионных токов и следует ожидать в области, где электронными токами можно пренебречь, совпадение реального и предельного ионного тока. Однако измеренный нами в плазме водородной дуги реальный ионный ток много меньше предельного ионного тока (рис.2). Следуя /6/ можно предположить, что это различие в поведении характеристики цилиндрического зонда в области электронных и ионных токов объясняется наличием значительного орбитального движения электронов и отсутствием (из-за перезарядки) орбитального движения ионов. Это нарушает условия подобия в движении электронов и ионов, что и вызывает разное поведение характеристики в зависимости от знака потенциала.

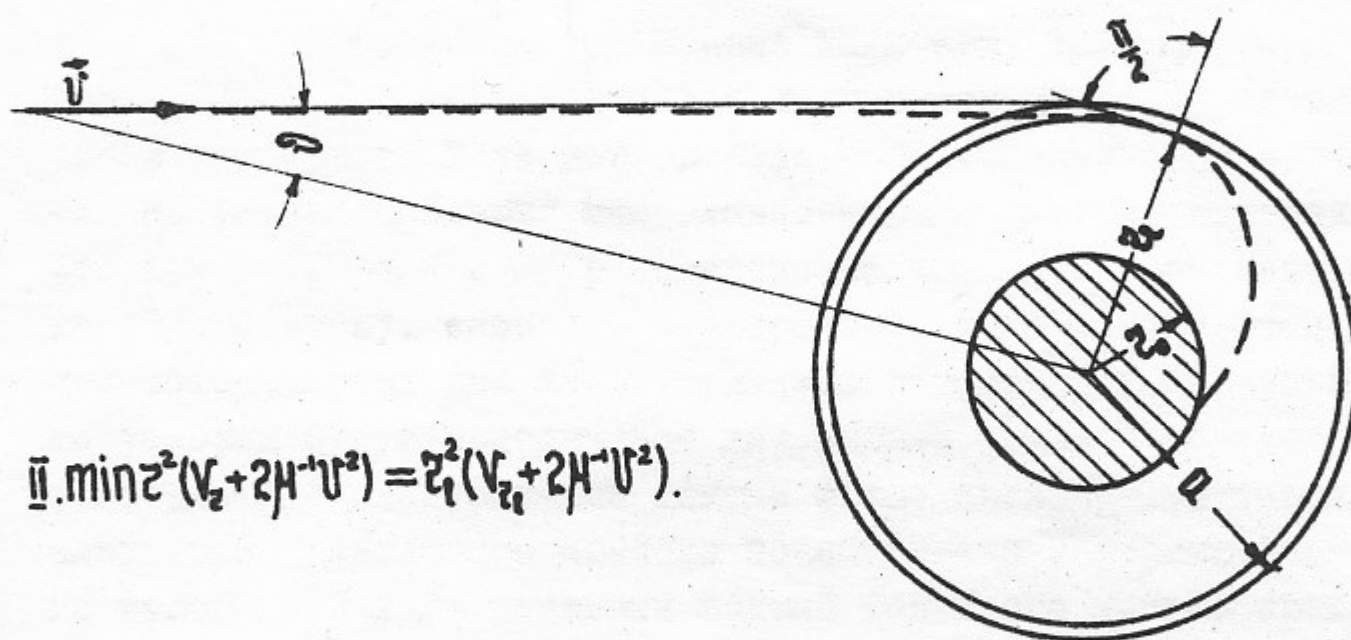
В связи с экспериментальной работой, результаты которой отражены на рис. 2,3,5,6, автор благодарит П.А.Журавлева за изготовление зондов, Б.В.Князева и В.Г.Черепкова - за помощь при получении зондовых характеристик и при обработке результатов измерений; автор благодарит также Г.И.Димова за неоднократное обсуждение этой работы.

Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Димов, Ю.Г.Кононенко, О.Я.Савченко, В.Г.Шамовский. Эксперименты по получению интенсивных пучков ионов водорода. Препринт ИЯФ СО АН СССР (1966), ЖТФ (в печати).
2. Ю.М.Коган, В.И.Перель, УФН, 81, 409 (1963).
3. Mawazdi O.K. Amer. J. Phys. 34, 112 (1966).
4. Л.Г.Гусева, ЖТФ, 21, 421 (1951).
5. О.Я.Савченко. Радиотехника и электроника 9, 349 (1964).
6. J. Bernstein, J. Rabinowitz, Phys. Fluids.. 2, 112 (1959).



$$I. \min z^2 (V_z + 2\mu^{-1}V^2) = z_0^2 (V_{z_0} + 2\mu^{-1}V^2).$$



$$II. \min z^2 (V_z + 2\mu^{-1}V^2) = z_1^2 (V_{z_1} + 2\mu^{-1}V^2).$$

Рис. I

r_0 - радиус зонда, a - радиус эквивалентного зонда,
 r_1 - лимитационный радиус.

— — — — траектория частицы

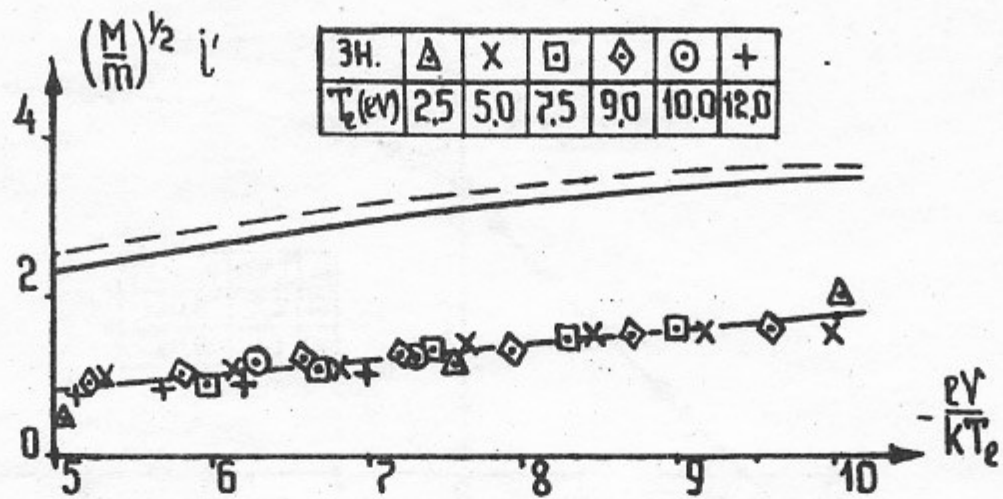


Рис. 2

$$i' = 2i / \pi e r z_0 \bar{v}_e$$

----- $i'_e + i'_p$ при $T_p = T_e$

————— $i'_e + i'_p$ при $T_p \ll T_e$

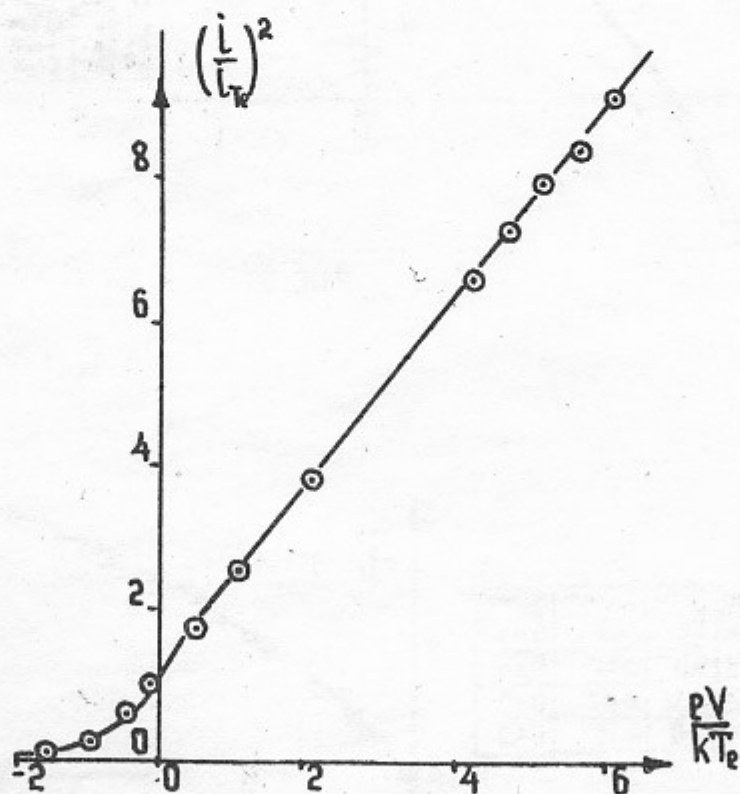


Рис. 3

$z_0 = 0,40 \text{ мм}, T_e = 14 \text{ eV}, n = 8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$

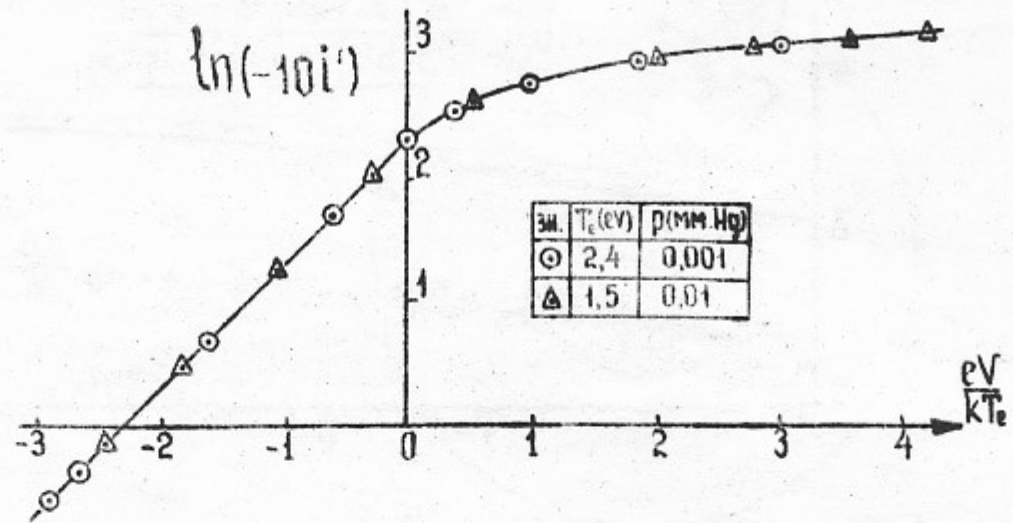


Рис. 4

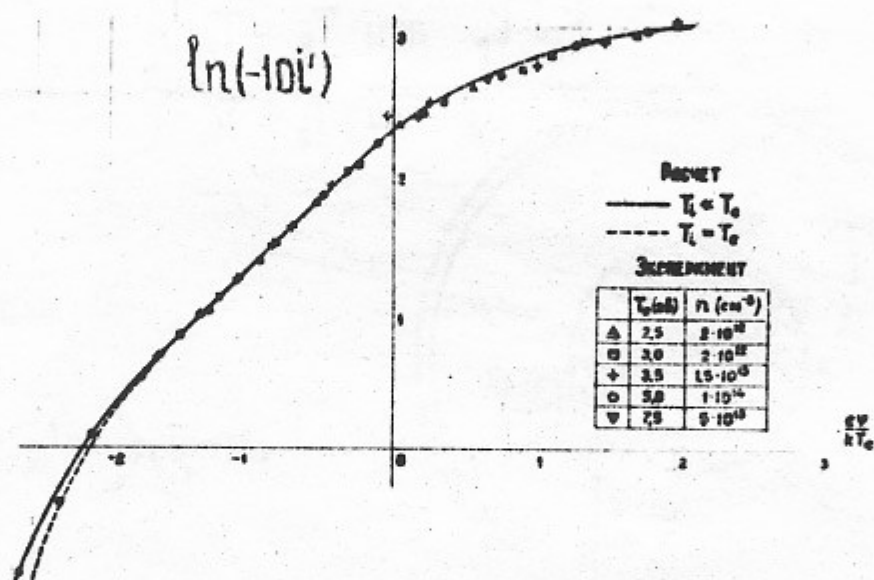


Рис. 5

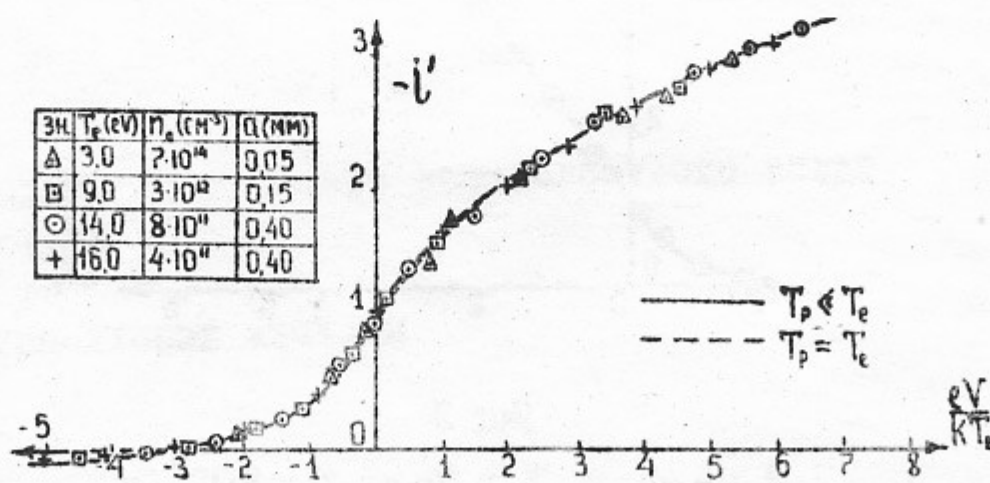


Рис. 6

Ответственный за выпуск Шунько Е.В.
Подписано к печати *май* 1967 г.
Усл.0,3 печ.л., тираж 150 экз. Бесплатно
Заказ № 126

Отпечатано на ротапинтере в ИЯФ СО АН СССР.