

04  
©1995

## О НАРУШЕНИИ “ГЛОБАЛЬНОЙ ИЗОДРЕЙФОВОСТИ” В КАНАЛЕ ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ С АНОДНЫМ СЛОЕМ (УАС)

*А.В.Пильников*

В теоретических и экспериментальных работах по исследованию физического процесса в плазменных ускорителях типа УЗДП [1-5] указывается на реализацию в их канале режима “глобальной изодрейфовости”, когда скорость азимутального дрейфа медленных электронов  $U_\theta = \Omega_0 r$ , где  $\Omega_0 = \text{const}$  во всем плазменном объеме. Иными словами, медленная электронная компонента вращается, в первом приближении, как твердое тело. При этом в основу теоретического анализа был положен факт о пропорциональности осевой составляющей напряженности электрического поля  $E_z$  радиальной составляющей индукции магнитного поля  $B_r$  в канале, т. е.  $E_z \sim B_r$ .

Однако экспериментальные исследования распределений индукции магнитного поля  $B_r$  и локальных параметров плазмы в канале (потенциала пространства  $\varphi_{\text{пр}}$ , средней энергии медленных электронов  $\bar{\epsilon}$ , электронной концентрации  $n_e$ ) одноступенчатого плазменного ускорителя с анодным слоем (УАС), описанного в [6], в диапазоне разрядных напряжений  $U_p = 80-180$  В показали, что условие  $E_z \sim B_r$  не выполняется.

Исследования локальных параметров плазмы проводились с помощью плоского торцевого зонда диаметром  $d_z = 0.15$  мм и керамики диаметром  $d_{\text{кер}} = 0.8$  мм по методике, применяемой для диагностики канала УЗПД. На рис. 1 представлены распределения радиальной составляющей индукции магнитного поля  $B_r(z)$  и осевой составляющей напряженности электрического поля  $E_z(z)$  на средней линии канала ( $r = 20$  мм) для  $U_p = 145$  В, расхода ксенона, выраженного в единицах силы тока:  $I_{\text{ин}} = 1.1$  А. Как видно из рисунка, зависимость  $E_z(z)$  не повторяет  $B_r(z)$ , а ее максимум соответствует зоне канала с максимальным значением градиента радиальной составляющей индукции магнитного поля  $\nabla_z B_r$ . Скорость азимутального дрейфа медленных электронов для  $r = \text{const}$  будет  $U_\theta(z) = \Omega(z)r$ , где  $\Omega(z) = E_z(z)/B_r(z)$  в каждом сечении канала. Или, согласно

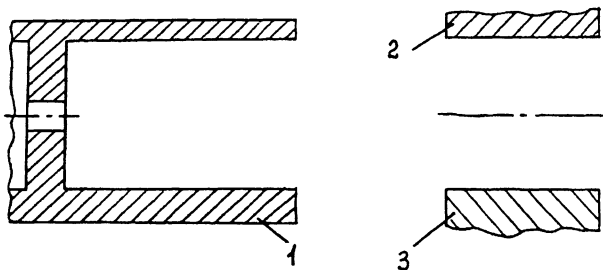
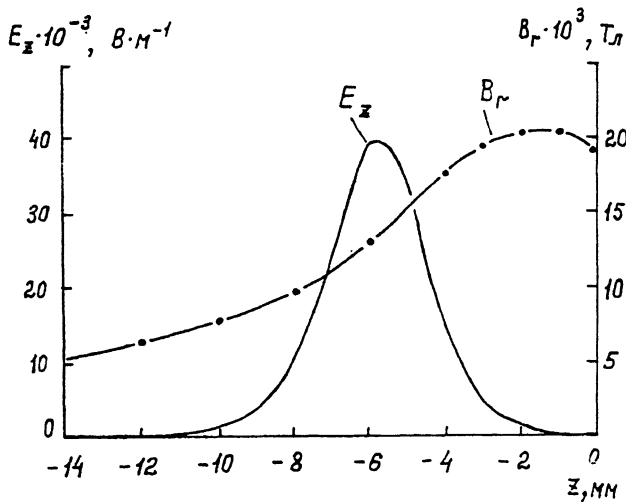


Рис. 1. Распределение  $F_z$  и  $B_r$  на оси канала ( $r = 20$  мм): 1 — анод; 2, 3 — полюса магнитной системы.

[<sup>3,4</sup>], более точно  $\Omega(z) = d\varphi_{\text{пр}}(z)/d\psi_r(z)$ . Здесь

$$\psi_r(z) = -r \int_{-\infty}^z B_r(z) dz \quad (1)$$

является функцией магнитного потока и рассчитывается для каждого сечения канала вдоль средней линии. Функция  $\varphi_{\text{пр}}(z)$  для  $r = \text{const}$  определялась из зондовых характеристик. Приведенная полная энергия медленных электронов, согласно [<sup>4,5</sup>], определялась как

$$\mu = e(\varphi_{\text{пр}} - \Omega\psi) + \frac{m(\Omega r)^2}{2} + \beta, \quad (2)$$

где  $m(\Omega r)^2/2$  представляет собой энергию азимутального дрейфа медленных электронов  $\varepsilon_\theta$ ,  $\beta$  — потери энергии на ионизацию.

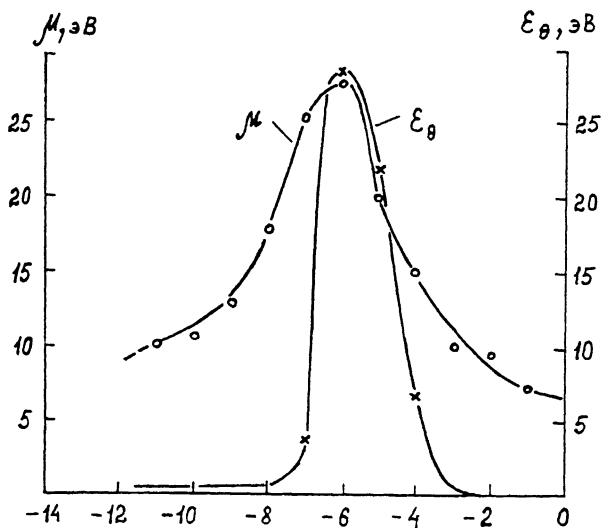


Рис. 2. Изменение приведенной полной энергии медленных электронов  $\mu$  и их энергии азимутального дрейфа  $\varepsilon_\theta$  вдоль оси канала.

Таким образом, по  $\Omega(z)$  для средней линии канала ( $r = \text{const}$ ) было получено распределение энергии азимутального дрейфа медленных электронов  $\varepsilon_\theta(z)$ , представленное на рис. 2. Здесь же представлено распределение  $\mu(z)$ , определенное по функции распределения медленных электронов из зондовых характеристик. Как видно, величина  $\varepsilon_\theta(z) = \text{const}$ , а соответственно и  $\Omega(z) = \text{const}$  только вдоль анодной полости, вблизи анода, а также в сечениях канала, близких к выходу. В области максимального градиента индукции магнитного поля  $\nabla_z B_r$  величина  $\Omega(z)$  возрастает на порядок. В этой зоне канала наблюдается максимальная энергия азимутального движения медленных электронов  $\varepsilon_\theta(z)$ . Величины  $\mu$  и  $\varepsilon_\theta$  здесь с точностью до погрешностей измерений совпадают. Таким образом, в рассматриваемой зоне приведенная полная энергия медленных электронов близка к их энергии азимутального дрейфа, а в соответствии с (2) потеря энергии на ионизацию  $\beta$  практически нет. Между тем анализ зондовых характеристик по всей длине канала показал сохранение линейного сплайна функции распределения медленных электронов аналогично каналу УЗПД [3,5], за исключением сечений в полости анода, близких к отверстиям подачи ксенона, где функция распределения близка к максвелловской.

В связи с этим возникает некоторое несоответствие между наличием линейного сплайна функции распределения медленных электронов по длине канала, полученного из предположения об их "глобальной изодрейфовости" в УЗДП [4,5], и экспериментальными результатами для низковольтного одноступенчатого УАС, где  $\Omega = \Omega(z)$ . Это противоречие можно объяснить тем, что одноступенчатый УАС в низковольтном режиме с высоким значением  $\nabla_z B_r$  работает, по-видимому, в режиме "локальной изодрейфовости", где, согласно [1], величина  $\Omega = \Omega(\psi)$ . И поскольку размеры зонда меньше ларморовского радиуса для электронов  $r_z < R_{ел}$ , линейный сплайн функции распределения сохраняется в пределах  $2R_{ел}$ .

Таким образом, в канале низковольтного одноступенчатого УАС с высоким значением  $\nabla_z B_r$  в отличие от УЗДП происходит отступление от режима "глобальной изодрейфовости" медленной электронной компоненты. Можно предположить, что переход электронов между квазизамкнутыми орбитами азимутального движения происходит дискретно, скачком, за счет столкновений либо за счет накопления электронов на орбите и возникновения электронного давления. Данный дискретный процесс условно можно представить, в рамках МГД-модели, как непрерывное течение по винтовой линии, шаг которой определяется изменением величины  $\Omega(z)$ . Для такого ускорителя скорость азимутального дрейфа электронов  $U_\theta = E_z/B_r = f(z)$ .

В заключение автор выражает благодарность А.И. Бугровой и А.В. Десяткову за помощь в реализации методики зондовых измерений.

### Список литературы

- [1] Морозов А.И. //ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 2. С. 396-399.
- [2] Морозов А.И. // ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 3. С. 650-655.
- [3] Бугрова А.И. // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 9. С. 1852-1854.
- [4] Бугрова А.И., Морозов А.И. //Ионные инжекторы и плазменные ускорители. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 42-56.
- [5] Бугрова А.И., Десятков А.В., Морозов А.И. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. В. 8. С. 963-965.
- [6] Баранников А.Л., Гришин С.Д., Маратханов М.К., Пильников А.В. // Тез. докл. VII Всесоюз. конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. Харьков, 1989. С. 208-209.

Ракетно-космическая  
корпорация "Энергия"  
Калининград  
Московской обл.

Поступило в Редакцию  
12 ноября 1994 г.