

## БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ИОННОГО ПУЧКА В ПЛАЗМЕ С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

*С.А.Алиев, А.Г.Борисенко, Г.С.Жириченко*

Экспериментально обнаружена эффективная бесстолкновительная потеря энергии быстрого ионного пучка,  $\epsilon_0 \gg T_e$ , в плазме с высокочастотным ( $\omega_{pi} \ll \omega_0 \ll \omega_{pe}$ ) электрическим полем ( $\epsilon_0$  — начальная энергия пучка;  $T_e$  — температура электронов плазмы;  $\omega_{pi}$ ,  $\omega_{pe}$  — ионная и электронная плазменные частоты;  $\omega_0$  — частота поля).

Термализация в плазме инжектированных извне пучков ионов может достигаться не только за счет столкновительных механизмов. Известно, что ионный пучок эффективно релаксирует в плазме при возбуждении пучком ионно-звуковой турбулентности [1 – 4]. Однако, это имеет место при относительно низких энергиях пучка,  $\epsilon_0 \sim T_e$  (если массы ионов пучка и плазмы равны). В настоящей работе показано, что наложение на плазму высокочастотного электрического (ВЧ) поля приводит к быстрой термализации ионного пучка при существенно больших его начальных энергиях.

Аргонная плазма создавалась разрядом низкого давления,  $(1 \div 2) \times 10^{-4}$  мм. рт. ст., с накаливаемым катодом в металлической вакуумной камере диаметром 10 см. Катод и анод размещались на расстоянии 25 см. Многоэнергетический пучок ионов калия, полученный с помощью пористого плоского вольфрамового эмиттера диаметром 16 мм, вводился в плазму поперек разрядного столба в его средней части. Параметры плазмы определялись одиночными ленгмюровскими зондами, характеристики пучка — подвижным многосеточным электростатическим анализатором. Условия экспериментов: концентрация плазмы  $n_e = (2 \div 5) \times 10^9 \text{ см}^{-3}$ ,  $\epsilon_0 = 50 \div 300$  эВ, ток пучка  $I_0 = 0 \div 4$  мА, пролетное расстояние в плазме — 10 см, отношение плотностей ионов пучка и плазмы —  $n_0/n_e \approx 0,1 \div 0,5$ . В области распространения пучка создавалось ВЧ поле (частота генератора  $\omega_0 / 2\pi = 15$  МГц) с помощью двух погруженных в плазму плоско-параллельных сетчатых электродов (размеры сеток  $10 \times 6,5 \text{ см}^2$ , расстояние между ними — 8 см). Проникновения электрического поля в плазменный объем между сетками удалось достигнуть путем наложения вдоль плазменного столба относительно слабого ( $H \sim 100$  э) магнитного поля, параллельного сетчатым электродам. Величина переменного электрического поля в плазме ( $\tilde{E}$ ) оценивалась из результатов зондовых измерений в различных точках описанного плазменного конденсатора. Максимально достижимые в работе величины  $\tilde{E}$  составляли  $\tilde{E} \approx 10 \text{ В/см}$ . В типичных условиях отношения характерных частот составляли:  $\omega_{pe} / \omega_{He} \approx 3$ ,  $\omega_{He} / \omega_0 \approx 15$ ,  $\omega_0 / \omega_{pi} \approx 6$  ( $\omega_{He}$  — циклотронная частота электронов).

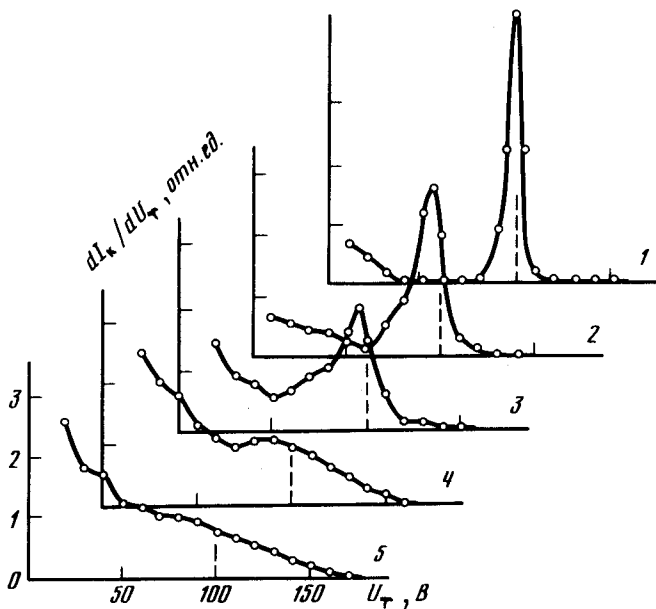


Рис. 1. Функции распределения скоростей ионов пучка при различных величинах напряженности ВЧ поля:  $H = 80$  э,  $\epsilon_0 = 100$  эВ,  $I_0 = 3$  мА; 1 —  $\tilde{U} = 0$ , 2 —  $\tilde{U} = 60$  В, 3 —  $\tilde{U} = 90$  В, 4 —  $\tilde{U} = 120$  В, 5 —  $\tilde{U} = 135$  В

Эксперименты были проведены в условиях когда ионный пучок вводился в плазму перпендикулярно направлению магнитного поля, а ВЧ поле направлено либо вдоль направления инъекции пучка, либо перпендикулярно последнему. В обоих случаях получены идентичные эффекты взаимодействия пучка с плазмой.

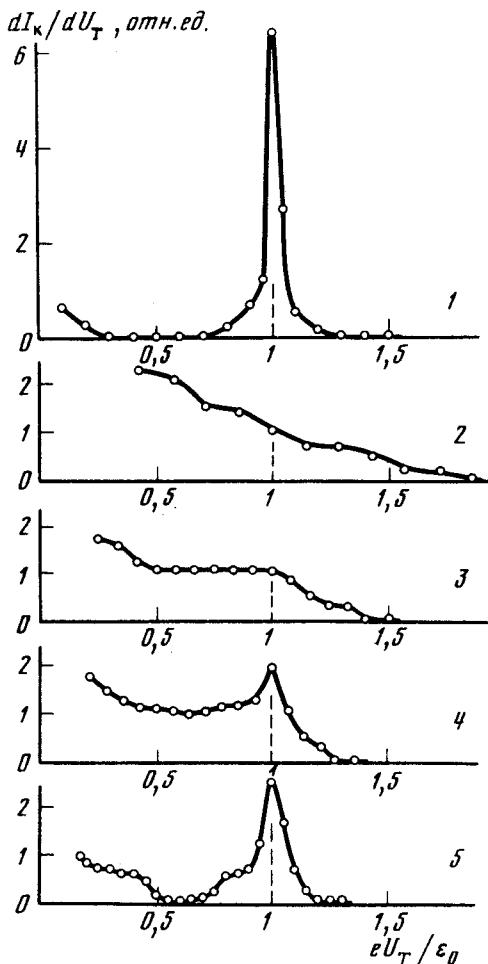


Рис. 2. Функции распределения скоростей ионов пучка с различными энергиями: 1 —  $\tilde{U} = 0$ ,  $\epsilon_0 = 100$  эВ; кривым 2, 3, 4, 5 соответствуют  $\epsilon_0 = 70, 120, 140, 200$  эВ при  $\tilde{U} = 120$  В

Эксперименты показали, что наложение на плазму ВЧ поля приводит к быстрому (на указанном пролетном расстоянии) рассеянию энергии инжектируемого ионного пучка. На рис.1 представлены функции распределения скоростей ионов пучка  $f(v)$ , измеренные в конце пролетного пути. Параметром кривых является амплитуда ВЧ напряжения,  $\tilde{U}$ , приложенного к электродам плазменного конденсатора. Величина  $dI_k/dU_T$ , пропорциональная функции распределения скоростей ионов, получена путем графического дифференцирования кривых задержки анализатора — зависимостей тока коллектора  $I_k$  от тормозящего потенциала  $U_T$ . В области малых значений  $U_T$  анализатор фиксирует наличие плазменных ионов. Кривая 1 показывает, что в данных условиях в отсутствие ВЧ поля ионный пучок проходит через плазменный объем практически

ки без взаимодействия. С ростом  $\tilde{U}$  имеет место уширение спектра скоростей ионов и торможение пучка. При больших значениях поля формируется распределение скоростей, близкое к равновесному ( $\partial f(v)/\partial v < 0$ ), т.е. достигается термализация пучка в плазме с потерей 70 – 80% начальной энергии. Исследования с помощью подвижного миниатюрного анализатора показали, что процесс торможения пучка развивается вдоль его пути движения в плазме. Пучковый характер взаимодействия подтверждается тем, что уменьшение тока пучка ( $I_0 \leq 0,3$  мА) приводит к восстановлению невозмущенного распределения скоростей ионов потока.

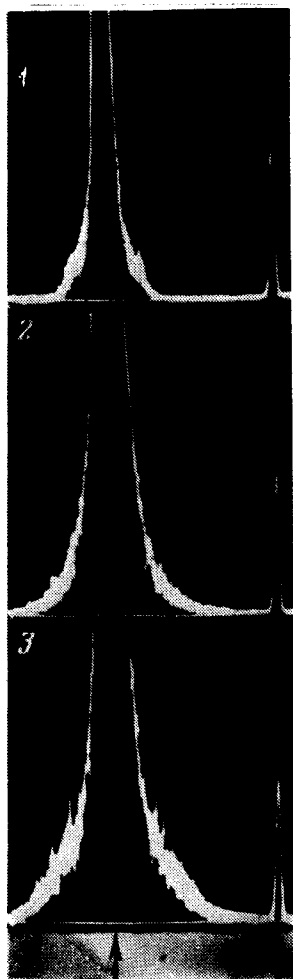


Рис. 3. Низкочастотные спектры колебаний тока ионного пучка:  $H = 80$  э,  $I_0 = 3$  мА,  $\epsilon_0 = 240$  эВ,  $n_e \approx 3 \cdot 10^9$  см $^{-3}$ ; 1 —  $\tilde{U} = 0$ , 2 —  $\tilde{U} = 60$  В, 3 —  $\tilde{U} = 150$  В

Изменение функции распределения ионного потока по скоростям для разных начальных энергий инжектируемого пучка представлено на рис. 2 (по оси абсцисс отложен потенциал тормозящей сетки анализатора  $U_T$  в приведенных единицах  $eU_T/\epsilon_0$ ). Кривая 1 демонстрирует функцию распределения скоростей пучка, не взаимодействующего с плазмой ( $\tilde{U} = 0$ ). Из последующих кривых видно, что платообразная, либо с отрицательной производной, функция распределения в описанных экспериментальных условиях формируется при  $\epsilon_0 \leq 120$  эВ. Однако, эф-

фактивное торможение пучка в плазме наблюдается вплоть до его начальных энергий  $150 \div 160$  эВ.

Исследования показали, что при наложении ВЧ поля в плазме возрастает уровень низкочастотных шумов. В этих условиях в результате прохождения плазменного объема наблюдается модуляция тока ионного пучка в области частоты ВЧ поля и  $\omega < \omega_{pi}$ . Низкочастотные спектры колебаний тока ионного пучка, полученные в цепи коллектора анализатора скоростей ионов при различных величинах  $\tilde{U}$ , представлены на рис.3.

Прямое влияние приложенного ВЧ поля на распределение скоростей ионов пучка либо исключалось условиями эксперимента (когда  $\tilde{E} \perp V_0$ , где  $V_0$  — скорость ионов пучка), либо было пренебрежимо мало (при  $\tilde{E} \parallel V_0$  максимальное изменение скорости иона  $\Delta \tilde{v} = \frac{e \tilde{E}}{M \omega_0} \approx 2 \cdot 10^3$  см/сек  $\ll V_0$ ,  $M$ ,  $e$  — масса и заряд иона). Таким образом, торможение частиц пучка очевидно обусловлено их резонансным взаимодействием с колебаниями плазмы.

Возбуждение в плазме резонансных с ионным пучком волн может иметь место в предположении увеличения скорости ионного звука, т.е. появления обусловленной ВЧ полем "эффективной" температуры электронов. Такой эффект в интересующем диапазоне частот ( $\omega_0 \ll \omega_{pe}$ ) и в определенной постановке задачи предсказан теорией [5]. Резонансные с пучком колебания, по-видимому, могут также возбуждаться в результате распада "волны накачки", т.е. высокочастотного электрического поля.

Обнаруженные эффекты сильного взаимодействия пучка ионов с плазмой могут иметь место в плазменных системах с инъекцией быстрых частиц и одновременным высокочастотным нагревом плазмы.

Институт ядерных исследований  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
21 февраля 1979 г.

### Литература

- [1] А.Ф.Борисенко, Г.С.Кириченко. ЖЭТФ, 60, 384, 1971.
- [2] R.J.Taylor, F.V.Coroniti. Phys. Rev. Lett., 29, 34, 1972.
- [3] Y.Kiwamoto. J.Phys. Soc. Jap., 37, 466, 1974.
- [4] А.А.Иванов. Физика сильнонеравновесной плазмы. М., Атомиздат, 1977.
- [5] K.Papadopoulos, J.B.McBride. Phys. Fluids., 16, 711, 1973.