

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
СТОХАСТИЧЕСКОГО УСКОРЕНИЯ ИОНОВ
В ИНТЕНСИВНОМ ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОМ РАЗРЯДЕ**

Г.П.Березина, А.К.Березин, В.Н.Зейдлиц

Как показано в работе [1] в интенсивном импульсном плазменно-пучковом разряде можно различить два режима возбуждения низкочастотных (НЧ) колебаний: первый режим (относительно малые давления) характеризуется возбуждением ионно-звуковых колебаний [2], которые со временем (через 30–40 мксек) переходят в колебания, относящиеся ко второму режиму. К этому режиму относятся также колебания, генерируемые по всей длительности токового импульса при более высоком давлении газа в системе (выше $6 \cdot 10^{-4}$ тор), так как для них первый режим продолжается всего лишь несколько микросекунд.

В данной работе приведены результаты исследования стохастического ускорения ионов при возбуждении НЧ колебаний во втором режиме.

Эксперименты проводились на установке [2] со следующими параметрами: ток электронного пучка 5 а, энергия 10–12 кэв, длительность импульса тока 110 мксек, электронная плотность образованной пучком плазмы составляла $5 \cdot 10^{12} \pm 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, напряженность продольного магнитного поля до 2 кэ, рабочий газ – водород.

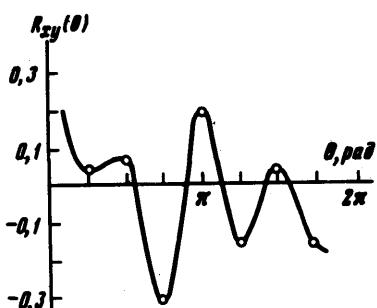


Рис. 1

Используя методику обработки на ЭВМ экспериментально полученных реализаций [1] были определены следующие характеристики: функция взаимной корреляции колебаний по азимуту, пространственно-временная корреляционная функция, частотный спектр и спектральная плотность энергии возбуждаемых колебаний, изучено изменение во времени фазы исследуемых колебаний.

Колебания во втором режиме, в отличие от первого, являются аксиально-несимметричными. На рис. 1 приведена функция взаимной корреляции возбуждаемых колебаний по азимуту, снятая с помощью антенн, расположенных снаружи плазменной камеры в одной плоскости и ориентированных на H_ϕ -компоненту НЧ поля (напряженность про-

дольного магнитного поля 1700 э , давление $2 - 3 \cdot 10^{-4} \text{ тор}$). Видно, что на длине окружности укладывается 4 максимума. Для давления $6 \cdot 10^{-4} \text{ тор}$ эта кривая имеет аналогичный характер со сдвигом максимумов примерно на 45° .

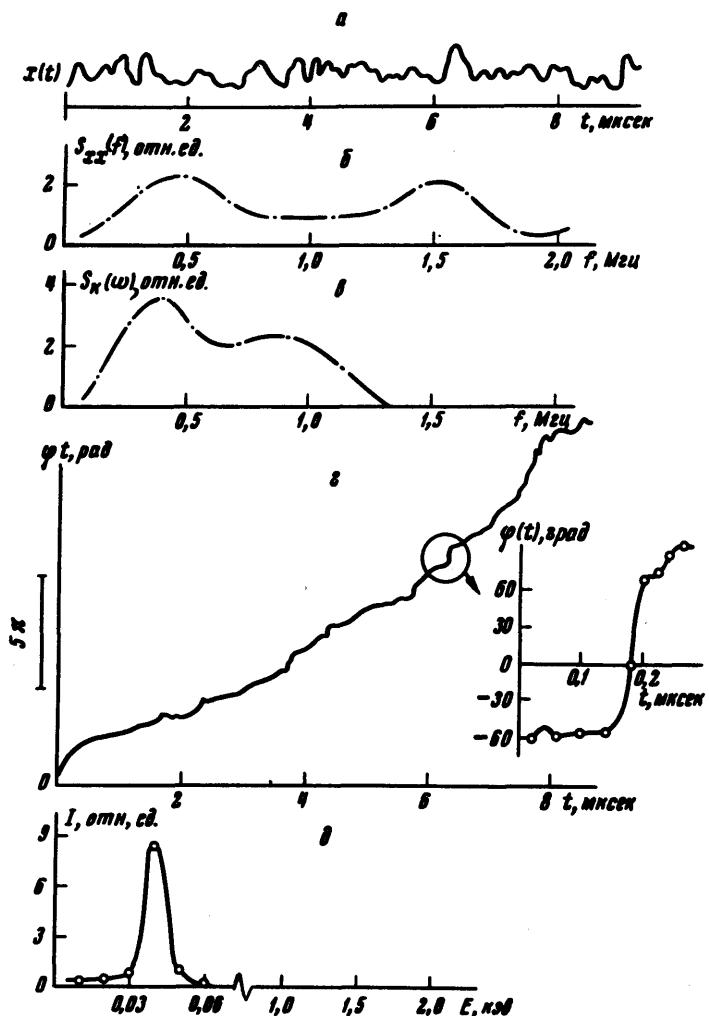


Рис. 2

На рис.2 приведены: а) одна из реализаций $x(t)$ колебаний, возбуждаемых во втором режиме, б) частотный спектр $S_{xx}(f)$, в) спектральная плотность энергии этих колебаний $S_k(\omega)$ для $k = 0,1 \text{ см}^{-1}$, г) изменение во времени фазы исследуемых колебаний $\phi(t)$, д) энергетический спектр ионов, генерируемых при возбуждении НЧ колебаний в условиях второго режима.

Из этого рисунка видно, что для колебаний во втором режиме характерно размытие частотного спектра, увеличение относительной полуширины кривой спектральной плотности $S_k(\omega)$ ($\Delta\omega/\omega \sim 1,2 + 1,5$), при-

существие скачков фаз электрического поля ($\sim 150^\circ$). Время корреляции $\tau_k \sim 1/\Delta\omega$ составляет $1,5 + 2 \cdot 10^{-6}$ сек, а среднее время между скачками фаз $\tau' \sim 1 + 1,5 \cdot 10^{-6}$ сек.

Как известно, частота дрейфовых колебаний определяется следующим образом

$$\omega_{dp} = \frac{k_1 T_e c}{eH} \frac{\nabla n}{n}, \quad (1)$$

где k_1 – поперечное волновое число, T_e – температура электронов плазмы, c – скорость света в вакууме, e – заряд электрона, H – напряженность продольного магнитного поля, n – плотность плазмы и ∇n – градиент плотности.

Из проведенных экспериментов следует, что частоты возбуждаемых колебаний $f \sim H^{-1}$ и пропорциональны электронной температуре плазмы T_e . Следует отметить, что для наших условий при изменении давления от $2 \cdot 10^{-4}$ до $6 \cdot 10^{-4}$ тор T_e изменяется от 80 – 100 до 20 – 30 эв [3].

Приведенные зависимости позволяют сделать вывод о том, что во втором режиме возбуждаются дрейфовые НЧ колебания.

Ранее было показано [3], что в условиях второго режима наблюдалось генерирование низкоэнергетичных ионных потоков (энергия 40 эв, ток ~ 2 а, плотность ионов $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ при плотности плазмы $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$).

Из сравнения времени пролета частицей со скоростью v длины системы L ($r \sim L/v$, $L \sim 70$ см) со средним временем (τ') между соседними скачками фаз можно сделать заключение о модели, лежащей в основе предполагаемого механизма ускорения. Если $\tau \sim \tau'$ (что характерно для колебаний первого режима) можно предполагать, что ускорение ионов осуществляется электрическим полем ионно-звуковой волны с фиксированной фазой. Если $\tau > \tau'$ (второй режим возбуждения НЧ колебаний), то ускорение ионов можно объяснить, используя модель стохастического ускорения (волна со случайной фазой). При этом скорость ускоренной частицы выражается следующим соотношением [4]

$$v = \frac{4e^2}{M^2} \frac{kE^2 \omega r^3 \Delta t}{(1 + \omega^2 r^2)^2}, \quad (2)$$

где e и M – заряд и масса иона, k – волновое число, ω – частота колебаний, E – напряженность электрического поля, Δt и r – времена пролета и корреляции.

Соответствующий расчет напряженности поля для нашего случая ($\omega \sim 3 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$, $\Delta t \sim 8 \cdot 10^{-6}$ сек, $r \sim 2 \cdot 10^{-6}$ сек, $v \sim 9 \cdot 10^6 \text{ см/сек}$) дает $E \sim 15 \text{ в/см}$. Экспериментально определенное значение $E \sim 20 \text{ в/см}$, что подтверждает возможность высказанного выше предположения.

Таким образом, в данной работе проведено изучение НЧ колебаний и механизмов передачи энергии от электронного пучка ионам плазмы во втором режиме интенсивного плазменно-пучкового разряда.

В заключение авторы выражают благодарность Я.Б.Файнбергу, Л.И. Болотину, В.И.Курилко и В.Д.Шапиро за интерес к работе и ценные дискуссии, а также М.В.Лодянуому за помощь в измерениях.

Физико-технический институт
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
24 мая 1971 г.

Литература

- [1] Г.П.Березина, А.К.Березин, В.И.Зейдлиц. Экспериментальное исследование нелинейной стадии развития ионно-звуковой неустойчивости в плазменно-пучковом разряде. Письма в ЖЭТФ, **14**, 13, 1971.
 - [2] А.К.Березин, Я.Б.Файнберг, Л.И.Болотин, Г.П.Березина, И.А.Безъязычный, Ю.М.Ляпкало, Е.В.Лифшиц. Plasma Phys. and Control Nucl. Fusion Research, I, 515, 1966.
 - [3] Г.П.Березина, Я.Б.Файнберг, А.К.Березин. Phenomena in Ionized Gases, Vienna, 370, 1967; Атомная энергия, **24**, 465, 1968.
 - [4] Ф.Г.Басс, Я.Б.Файнберг, В.Д.Шапиро. ЖЭТФ, **49**. 329, 1965.
-