

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ВРЕМЕННАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В СЛАБОТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛАЗМЕ

Е.А.Корнилов, Я.Б.Файнберг, О.Ф.Ковшик

Экспериментальные исследования процессов перехода к турбулентному состоянию плазмы и установившейся турбулентности представляет интерес для физики плазмы и разнообразных приложений. Эти процессы могут быть изучены на примере наиболее простой и весьма распространенной пучковой неустойчивости.

Наиболее важной характеристикой турбулентного состояния является спектральная плотность энергии электрического поля E_k^2 .

Целью настоящей работы является ее определение с помощью измерения пространственных автокорреляционных функций электрических полей высокочастотных колебаний, возбуждаемых в плазменнопучковом разряде.

Как известно, при развитии пучковой неустойчивости имеет место сильный нагрев электронов и ионов плазмы и ускорение значительного числа электронов до энергии существенно превосходящих энергий электронов пучка. По-видимому, в рассматриваемых условиях имеет место механизм стохастического ускорения [1-3]. Для того чтобы выяснить этот вопрос, необходимо определить степень стохастичности колебаний, измерить длину и время корреляции электрических полей, которыми в значительной степени определяется эффективность стохастического ускорения. Такого рода измерения дадут возможность установить, насколько приближение "случайных фаз" [4], используемое в существующих нелинейных теориях волноводных и колебательных свойств плазмы, применимо в условиях эксперимента. Поэтому в работе также проведены измерения времени корреляции электрических полей и временной автокорреляционной функции.

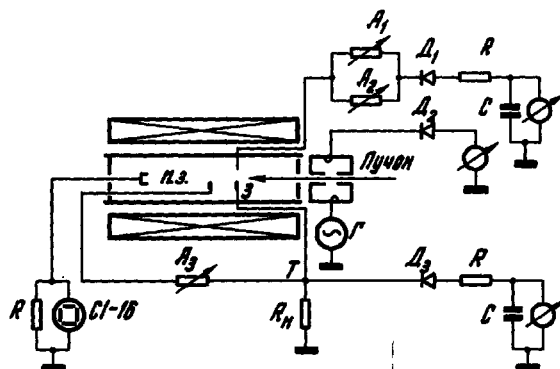


Рис. I. Схема измерений

Эксперимент проводился с электронным пучком с энергией до 5 кэв, током $20 + 100$ ма в магнитном поле до 2000 гс при давлении 10^{-4} мм рт.ст. В этих условиях создается плазма с плотностью до $6 \cdot 10^{11}$ эл./см³. С помощью цилиндрического резонатора, помещенного перед камерой взаимодействия, пучок мог быть промодулирован на частоте 3000 Мгц (рис. I).

Пространственная автокорреляционная функция $R(\ell)$ определялась путем сложения колебаний (600 + 6000 Мгц), принимаемых в различных

точках разряда на квадратичном детекторе с последующим усреднением во времени

$$\langle R(\ell) \rangle_t = 2 \sum_k |E_k|^2 (1 + e^{-ik\ell}),$$

где ℓ - расстояние между зондами. Важным условием при снятии кривых автокорреляционных функций является то, чтобы частоты измеряемых колебаний входили в область характерных частот плазмы. Из вида функции $\langle R(\ell) \rangle_t$ можно оценить длину корреляции, а воспользовавшись соотношением

$$S_k = |E_k|^2 = \frac{1}{4\pi\ell} \int_{-\infty}^{+\infty} R(\ell) e^{ik\ell} d\ell = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\ell) d\ell,$$

и спектральную плотность энергии электрического поля.

На рис. 2,а изображена автокорреляционная функция для случая максимальной амплитуды возбуждаемых колебаний. Из рис.2,а следует, что высокочастотные колебания коррелируют на длине 8 см, т.е. на расстоянии $8 + 10$ длин волн. С уменьшением амплитуды колебания из стохастических переходят в регулярные. Это хорошо видно из рис.2,б, где изображена функция корреляции $R(\ell)$ для колебаний с амплитудой в 10 раз меньшей, чем в условиях рис.2,а.

Такой же характер кривой наблюдается и в случае наложения внешней модуляции на пучок. Это подтверждает предположение о том, что внешняя модуляция приводит к сужению спектра по волновым числам и переходу от стохастических колебаний к регулярным.

На рис. 2,в приведена спектральная плотность энергии электрического поля E_k^2 для функции $R(\ell)$ рис. 2,а. Экспериментально определенная зависимость E_k^2 близка к рассчитанной по квазилинейной теории в работе В.Д.Шапиро [4]. В кривой спектральной плотности наблюдается смещение максимума от ожидаемого $k = 8$ в область $k = 10-11$. По всей вероятности, это связано с тем, что пучок теряет часть своей энергии, в результате чего его скорость и, следовательно, фазовые скорости волн уменьшаются.

На рис. 3, а-в приведены временные автокорреляционные функции электрических полей. Для их определения высокочастотный сигнал, принимаемый антенной, делится пополам и пропускается по двум коаксиальным линиям различной длины. Изменением относительной длины линий задается временная задержка сигналов. Амплитуды сигналов поддерживаются одинаковыми с помощью аттенваторов. Сдвинутые по времени сигналы суммируются на квадратичном детекторе и затем интегрируются RC цепочкой ($RC = 0,1 + 2$). Таким образом, на выходе схемы имеем сигнал, равный

$$u_{\tau} \approx \langle f(t)f(t+\tau) \rangle = R(\tau).$$

$R(\tau)$ - временная автокорреляционная функция сигнала.

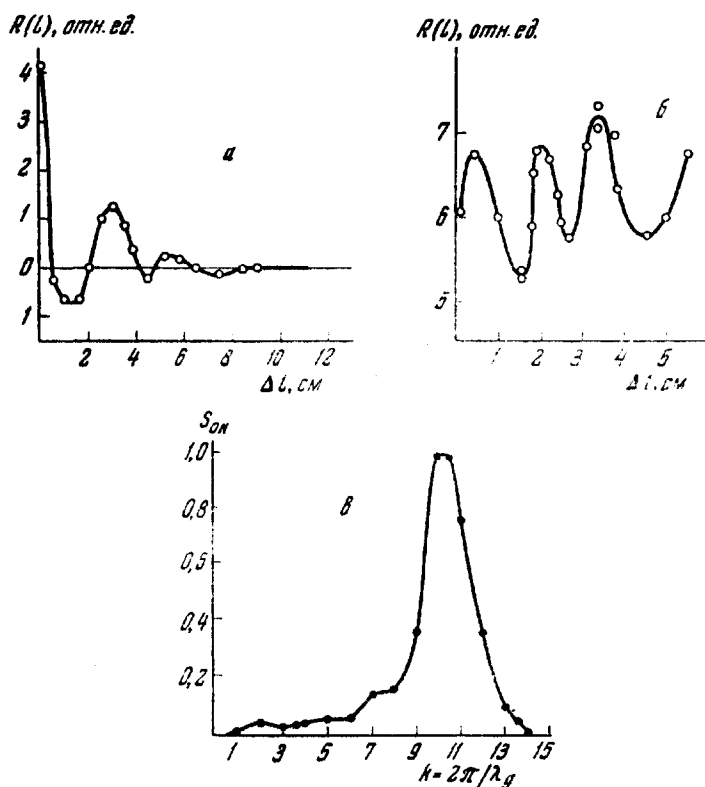


Рис.2. Пространственные автокорреляционные функции колебаний и спектральная плотность энергии электрического поля

На рис. 3, а изображена функция $R(\tau)$ в условиях наибольшей амплитуды, когда из области взаимодействия пучка наблюдается интенсивное рентгеновское излучение с энергией 20 кэв. Автокорреляцион-

ная функция имеет аперiodический затухающий вид, что указывает на стохастический характер колебаний. Время корреляции составляет величину 3 нсек, т.е. порядка 10 колебаний. Уменьшение амплитуды колебаний (достигаемое путем изменения давления в области взаимодействия пучка) приводит к сильному изменению автокорреляционной функции. При малой амплитуде сигнала она имеет характер периодической незатухающей кривой (рис.3,б). Такой же характер носит временная автокорреляционная функция и в условиях внешней модуляции пучка (рис.3,в), т.е. как при малой амплитуде колебаний, так и при внешней модуляции колебания носят регулярный характер.

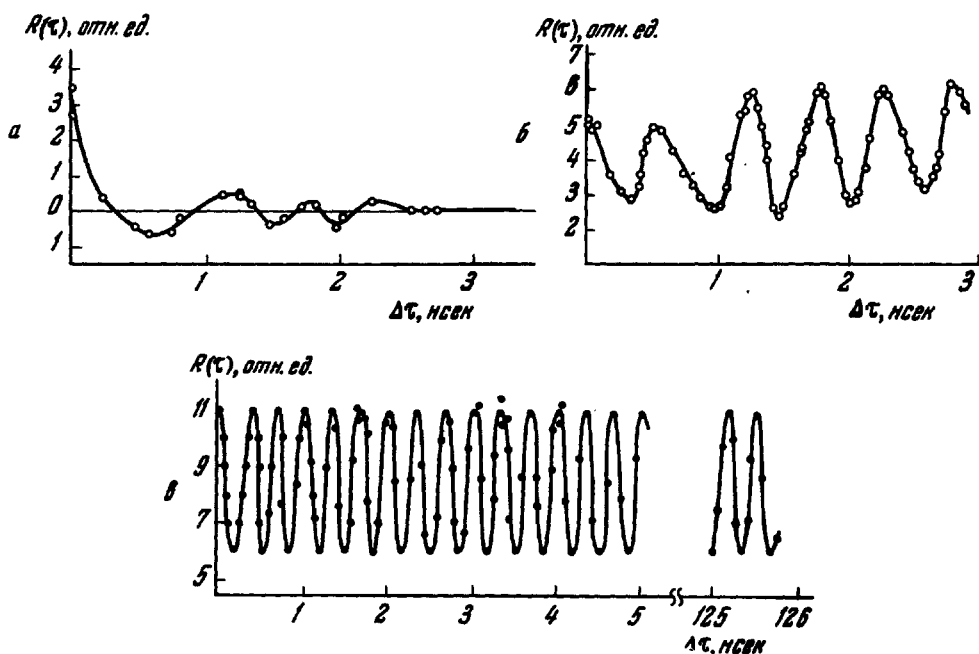


Рис.3. Временные автокорреляционные функции колебаний

Таким образом исследования колебаний плазменно-пучкового разряда корреляционным методом показали, что колебания носят нерегулярный стохастический характер.

Длина и время корреляции существенно зависят от амплитуды колебаний. Уменьшение амплитуды колебаний, также как и внешняя модуляция, приводит к увеличению длины, времени корреляции и переходу от нерегулярных к регулярным колебаниям.

Авторы выражают глубокую благодарность В.Д.Шапиро, В.И.Курдюко за обсуждение результатов, А.Г.Шевлякову за помощь в измерениях и Л.И.Болотину за интерес и помощь в работе.

Физико-технический институт
Академии наук Украинской ССР

Поступило в редакцию
II июня 1966 г.

Литература

- [1] Э.Л.Бурштейн, В.И.Векслер, А.А.Коломенский. Сб. "Некоторые вопросы циклических ускорителей", Изд. АН СССР, 1955, стр.3; В.Н.Цытович. Докл. АН СССР, 142, 319, 1962.
- [2] J.Stix. Phys. Fluids, 1, 1960, 1964.
- [3] Ф.Г.Басс, Я.Б.Файнберг, В.Д.Шапиро. ЖЭТФ, 49, 329, 1965; В.Д.Шапиро. Письма ЖЭТФ, 2, 469, 1965.
- [4] А.А.Введенков, Е.К.Великов, Р.З.Сагдиев. Ядерный синтез, 1, 82, 1961. Дополнение, ч.2, стр.465, 1962; Б.Б.Кадомцев. Вопросы теории плазмы, т.4, стр. 188. Атомиздат, 1964; В.Д.Шапиро. ЖЭТФ, 44, 613, 1963.