

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИЙ НА ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПУЧКА С ПЛАЗМОЙ

*В. А. Лавровский, Е. Г. Шустин, И. Ф. Харченко*

Из развитой в последние годы нелинейной теории взаимодействия электронного пучка с плазмой [1 - 3], учитывающей эффекты группировки электронов пучка (образование "макрочастиц") и захват электронов пучка полем волны, следует, что функция распределения пучка по скоростям должна иметь сложную форму многогорбой кривой, изменяющейся в процессе релаксации электронного пучка. Однако, в многочисленных экспериментах наблюдалась гладкая форма функции распределения, в пределе переходящая в плато, предсказываемое квазилинейной теорией.

Ранее экспериментально показано, что даже в условиях стационарной инъекции пучка в плазму взаимодействие носит нестационарный характер, выражающийся в быстром изменении амплитуды, частотного спектра и структуры возбуждаемых колебаний и обусловленный, в частности, возбуждением различных типов низкочастотных колебаний [4, 5]. Следует ожидать, что осцилляции на функции распределения, предсказываемые нелинейной теорией, также носят в экспериментах нестационарный характер, так как их характер определяется амплитудой и частотным спектром волн. Такая нестационарность при большой постоянной времени измерения должна привести к усреднению функции распределения, наблюдаемой экспериментально.

Даже в случае взаимодействия пучка с монохроматической волной заданной амплитуды временное усреднение, как показал проведенный нами расчет<sup>1)</sup>, приводит к сглаживанию осцилляций на функции распределения и в конечном итоге, при достаточно большом интервале усреднения, к образованию плато.

<sup>1)</sup> Изложение решения будет дано в подробной статье.

Следует отметить, что время измерения функции распределения в проводившихся до сих пор экспериментах было всегда больше характерного периода нестационарности, что неизбежно приводило к усреднению измеряемой величины и сглаживанию наблюдаемой функции распределения.

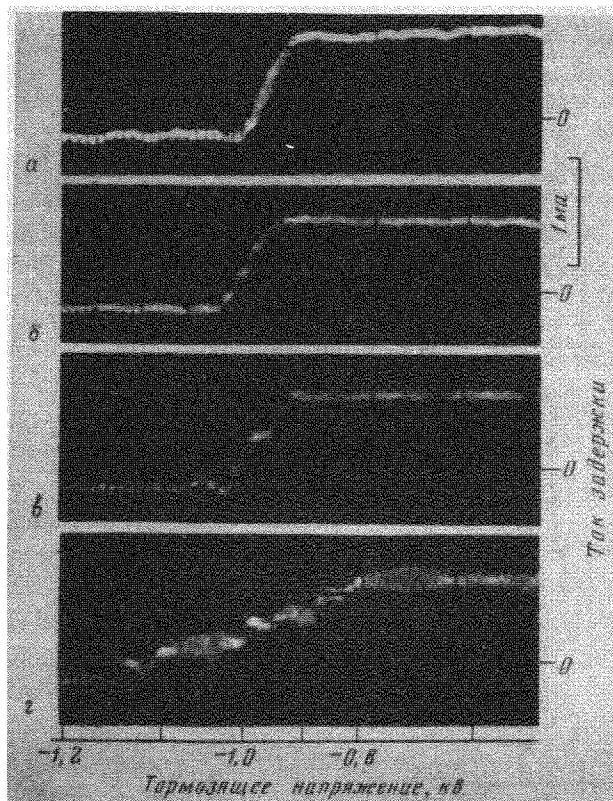


Рис. 1. Осциллограммы тока задержки. Длительность развертки  $2 \cdot 10^{-7}$  сек. а -  $\rho = 5 \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст.; б -  $\rho = 1,3 \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст.; в -  $\rho = 2 \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст.; г -  $\rho = 2,7 \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст.

Таким образом, чтобы обеспечить наблюдение тонкой структуры функции распределения в эксперименте, необходимо проводить измерения за времена малые по сравнению с периодом нестационарности. Ниже представлены результаты такого эксперимента.

Эксперимент проводился на плазменно-пучковом разряде в водороде в продольном магнитном поле  $0,2$  тл с начальной энергией электронного пучка  $1$  кэв при токе  $20 - 40$  ма [ 6 ]. Для анализа электронов по скорости использовался сеточный анализатор в коаксиальном исполнении, который позволял проводить регистрацию кривой тока задержки за времена порядка десятков наносекунд. В качестве тормозящего напряжения использовался пилообразный импульс амплитудой  $1,5$  кэв при скорости нарастания  $6 \cdot 10^9$  в/сек. Верхняя граница полосы пропускания измерительных трактов была не менее  $200$  Мгц. Измерительная схема работала в режиме однократного запуска при стационарной инжекции пучка.

В такой системе наблюдалось возбуждение ВЧ колебаний в диапазоне  $1000 \text{ МГц}$  и НЧ колебаний с частотами до  $600 \text{ кГц}$ . Таким образом, выбранное время анализа было существенно меньше периода НЧ колебаний.

Как известно, эффективность взаимодействия электронного пучка с плазмой в плазменно-пучковом разряде зависит от давления нейтрального газа в области взаимодействия. При достаточно низком давлении ( $p = 5 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$ ) кривая задержки (рис. 1, а) имеет вид ступенчатого импульса, и ее дифференцирование дает колоколообразную функцию распределения электронного пучка с начальным разбросом  $40 \text{ эв}$ . При увеличении давления до  $p = (1 \div 3) \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$  наблюдается изменение формы кривой задержки (1б, в, г) и возбуждение ВЧ и НЧ колебаний. Уменьшение среднего наклона кривой свидетельствует о размытии функции распределения по скоростям. Одновременно в токе пучка наблюдаются ВЧ колебания, характер которых по диапазону частот и форме огибающей соответствует ВЧ полям, возбуждаемым в такой системе [4].

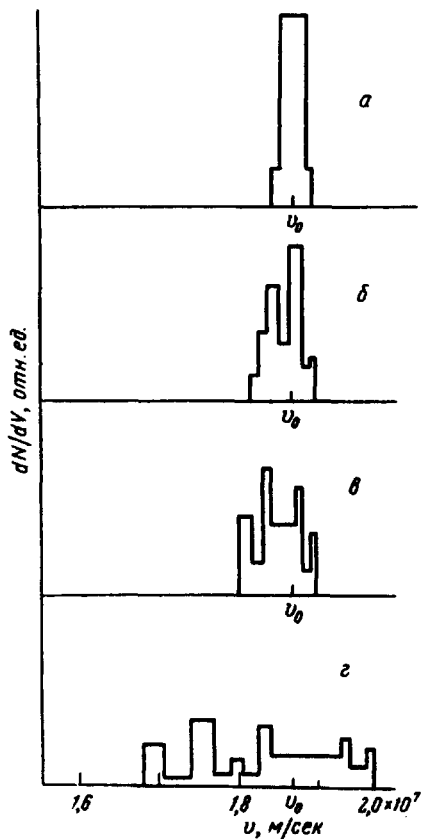


Рис. 2. Распределение электронов по скоростям, соответствующее рис. 1

Наиболее существенным фактом является немонотонное изменение наклона кривой задержки с изменением тормозящего напряжения, свидетельствующее о многогорбости функции распределения электронов (рис. 2). Отдельные группы электронов имеют разброс по энергиям в пределах  $20 - 100 \text{ эв}$ . Наблюдается одновременно несколько таких групп. При дальнейшем повышении давления в системе многогорбость

кривых распределения сохраняется, но наблюдается общее смещение кривой в сторону низких скоростей и появление частиц со скоростями большими  $v_0$ .

Характер трансформации функции распределения при увеличении плотности плазмы (что соответствует росту  $u$  или  $t$  в модели работ [1 — 3]) качественно согласуется с предсказаниями теории. Действительно, число пиков на функции распределения возрастает с ростом плотности плазмы. Обработка кривых задержки, соответствующих достаточно большому размытию функции распределения, дает, как правило, "полочку" в окрестности  $v_0$ , где прежде всего следует ожидать проявления кулоновских столкновений, вызывающих диффузию в пространстве скоростей и сглаживание пиков на функции распределения [3].

В той же системе при большой постоянной времени регистрирующей аппаратуры ( $\tau \approx 10$  мсек) наблюдаются сглаженные функции распределения без осцилляций с образованием плато в режимах возбуждения наиболее интенсивных ВЧ колебаний.

Следует отметить, что функции распределения для одного и того же режима при сохранении общей ширины спектра скоростей имеют различную структуру. Как указано выше, это, очевидно, связано с нестационарностью плазменно-пучкового разряда во времени. "Мгновенный" вид функции распределения не совпадает с ее усредненным видом, а имеет более сложную и меняющуюся во времени структуру. Аналогично и мгновенные спектры возбуждаемых колебаний содержат узкополосные дискретные полосы частот, а усредненные спектры имеют равномерную структуру в широкой полосе частот [4].

Таким образом, при помощи скоростного анализа функции распределения электронного пучка обнаружен эффект образования многогорбого распределения электронов при релаксации электронного пучка в плазме, что подтверждает предсказываемое нелинейной теорией образование в пространстве скоростей отдельных групп электронов ("макрочастиц") за счет захвата электронов пучка полем возбуждаемой волны.

Институт радиотехники  
и электроники  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
6 декабря 1971 г.

### Литература

- [1] Л.М.Альтшуль, В.И.Карлман. ЖЭТФ, 49, 515, 1965.
- [2] O'Neil Phys. Fluids, 8, 2255, 1965.
- [3] Б.Б.Кадомцев, О.П.Погуце. Phys. Rev. Lett., 25, 1155, 1970.
- [4] В.А.Лавровский, И.Ф.Харченко и др. ЖТФ, 39, 1586, 1969.
- [5] R.V Neidich, I.Alexeff et al. Plasma Phys. a Contr. Nucl. Fus. Research, Proc conf., Vienna, 1969, II, p 693.
- [6] Е.Г.Шустин, В.П.Попович, И.Ф.Харченко. ЖТФ, 39, 993, 1969.