

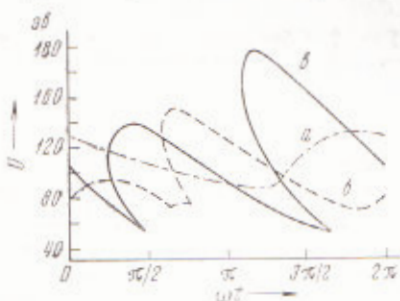
М. Д. ГАБОВИЧ, В. П. КОВАЛЕНКО

О ХАРАКТЕРЕ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ПЛАЗМОЙ

(Представлено академиком Б. Б. Кадомцевым 25 I 1971)

Теоретические рассмотрения нелинейного взаимодействия электронного пучка с плазмой проводились, в основном, в квазилинейном приближении, основанном на предположении о хаотичности фаз возбуждаемых волн (^{1,2}). Однако известны результаты численного решения этой задачи (^{3,4}) без использования указанного допущения. Было показано, что на нелинейной стадии плазменно-пучкового взаимодействия следует ожидать возникновения эффектов искажения профиля волны, аналогичных рассмотренным в (⁵). Выполненные до последнего времени эксперименты не

Рис. 1. Зависимость энергии пучка U от времени ωt в различных условиях: a — ускоряющее напряжение $U_0 = 110$ в; ток пучка $I = 10$ ма; частота модуляции $f = 440$ Мгц; расстояние от анализатора до модулятора $z = 1,8$ см; b — $U_0 = 110$ в; $I = 10$ ма; $f = 440$ Мгц; $z = 3,4$ см; c — $U_0 = 118$ в; $I = 8,5$ ма; $f = 395$ Мгц; $z = 3,3$ см



позволяли однозначно ответить на вопрос, какие нелинейные явления имеют место в реальных пучково-плазменных системах. В частности, наблюдаемое размытие усредненной за большой промежуток времени функции распределения электронов пучка по энергиям не может расцениваться (вопреки тому, как это обычно делается) как подтверждение квазилинейной теории, поскольку вопрос о применимости той или иной теории не может быть решен без знания вида «мгновенной» функции распределения.

В настоящей работе исследовалось взаимодействие предварительно модулированного и немодулированного пучков с создаваемой ими плазмой (аргон, $p = 10^{-3} - 10^{-2}$ мм рт. ст.). При этом экспериментальные условия были таковы, что на некотором расстоянии от катода в электронном пучке возникает резко очерченная зона рассеяния пучка, «мениск», в которой расположен максимум амплитуды колебаний, богатых высшими гармониками. Анализ экспериментальных зависимостей координаты зоны рассеяния от амплитуды и частоты модуляции, а также от энергии пучка приводит к выводу, что образование этой зоны связано с фазовой фокусировкой электронов пучка при взаимодействии с плазмой (⁶).

Для анализа энергии модулированного пучка использовался электронно-лучевой анализатор (⁷), позволяющий производить «мгновенные» (за время, много меньшее периода колебаний) измерения продольной скорости пучка. Полученные при помощи этого анализатора зависимости энергии пучка от времени, соответствующие положениям анализатора до и после фазового фокуса, приведены на рис. 1. Вид этих зависимостей согласу-

ется с результатами машинного эксперимента (⁴). Несмотря на сильное взаимодействие пучка с плазмой, «мгновенная» функция распределения электронов пучка по энергиям оказывается не размытой. Зависимости (1, б) и (1, в), полученные при положении анализатора за фазовым фокусом, четко свидетельствуют об «опрокидывании» волны и образовании



Рис. 2. Образование зоны рассеяния при взаимодействии модулированного (а) и немодулированного (б) пучков с плазмой. $U_0 = 1,35$ кв; $I = 60$ ма

многоскоростного потока. Важно отметить, что применение обычного способа измерения усредненной функции распределения и в нашем случае приводит к выводу о ее размытии.

Полная аналогия между образованием «мениска» в искусственно модулированном и немодулированном пучках (существование резко локализованной зоны колебаний, наличие высших гармоник, расширение пучка за «мениском», внешний вид последнего и ряд существенных деталей) позволяет сделать вывод, что во втором случае также имеют место указанные нелинейные явления, которые ведут систему к релаксации, минуя квазилинейную стадию.

Для выяснения общности полученных результатов следует, в частности, дать ответ на два вопроса: а) возникает ли «менисковый» разряд со всеми указанными выше явлениями при больших значениях тока и энергии пучка, б) существуют ли в немодулированном пучке условия для его автомодуляции.

На рис. 2 приведены фотографии пучка, взаимодействующего с образованной им плазмой, при внешней модуляции (2а) и без нее (2б). Энергия пучка в обоих случаях была близка к 1,5 кэв, но четкий «мениск» наблюдался в обоих случаях. Эти данные опровергают мнение (⁴), что «мениск» — явление, характерное только для пучков с энергией, лишь в несколько раз превышающей энергию ионизации. Следует добавить, что в наших экспериментах не было замечено каких-либо признаков того, что при дальнейшем росте энергии пучков «мениск» нельзя будет наблюдать. Больше того, можно думать, что в ряде экспериментов с мощными электронными пучками на фактическое образование «мениска» не было обращено внимания.

Ответ на второй вопрос в определенной мере можно дать, основываясь на следующем. На входе немодулированного пучка в плазму (с помощью расположенного здесь резонатора) обнаружено переменное электрическое

поле, возбуждаемое колебаниями заряда в «мениске». Это поле неизбежно является источником модуляции пучка в начале участка взаимодействия. Учет этого приводит к выводу, что при достаточной величине тока пучка плазменно-пучковая система переходит в автоколебательный режим, при котором стационарные значения частоты колебаний, положения максимума переменного тока («мениска») и соответственно амплитуды модуляции являются самосогласованными величинами. Представления о существовании в плазменно-пучковой системе обратной связи находятся в соответствии с высокой степенью регулярности колебаний⁽⁵⁾.

Таким образом, новые экспериментальные факторы приводят к выводу о необходимости критического анализа распространенных представлений о характере нелинейной стадии взаимодействия пучка с плазмой, а также о необходимости учета указанных нелинейных эффектов, связанных с фазовой фокусировкой электронов пучка.

Институт физики
Академии наук УССР
Киев

Поступило
10 I 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. А. Веденов, Е. П. Велихов, Р. З. Сагдеев, Ядерный синтез, 1, № 2, 82 (1961).
- ² W. E. Drummond, D. Pines, Nucl. Fusion, Suppl. 2, Part 3, 1049 (1962).
- ³ J. Dawson, Nucl. Fusion, Suppl. 2, Part 3, 1033 (1962); И. М. Гельфанд, Н. М. Зуева и др., Журн. вычислит. матем. и матем. физики, 7, № 2, 322 (1967).
- ⁴ J. A. Davis, A. Bers, Proc. of Symposium on Turbulence of Fluids and Plasmas, Brooklyn, 1968, p. 87.
- ⁵ Р. З. Сагдеев, В сборн. Вопросы теории плазмы, в. 4, 1964.
- ⁶ М. Д. Габович, В. П. Коваленко, ЖЭТФ, 57, в. 9, 716 (1969).
- ⁷ М. Д. Габович, В. П. Коваленко, Укр. физ. журн., 15, № 11, 1893 (1970).
- ⁸ A. K. Berezin, Ja. B. Fainberg et al. Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fus. Res., 1, Vienna, 1966, p. 515; В. А. Лавровский, В. Н. Деев и др., ЖТФ, 39, № 9, 1586 (1969).