

Письма в ЖЭТФ, том 13, стр. 498 – 503

5 мая 1971 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОДУЛИРОВАННЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПУЧКОВ С ПЛАЗМОЙ

*А. К. Березин, Я. Б. Файнберг, Л. И. Болошин,
А. М. Езоров, В. А. Киселев*

Изучение коллективных процессов взаимодействия релятивистских электронных пучков с плазмой представляет большой интерес для физики плазмы и многочисленных приложений. Линейная теория этого взаимодействия рассматривалась в [1, 2], нелинейная – в [3].

Основной вывод линейной теории заключается в том, что благодаря релятивистскому возрастанию продольной и поперечной массы электронов пучка инкременты возбуждаемых колебаний сильно уменьшаются. Из

этого справедливого утверждения было бы неправильно делать заключение о понижении эффективности плазменного пучкового взаимодействия при релятивистских энергиях электронного пучка. Как показывает нелинейная теория [3] пучок остается моноэнергетическим и при значительном разбросе по импульсам, обусловленном обратным влиянием возбуждаемых колебаний на пучок, учитываемых естественно только нелинейной теорией.

Благодаря резонансному характеру взаимодействия моноэнергетического пучка с плазмой, "гидродинамическая" стадия этого взаимодействия затягивается, что приводит к сильному возрастанию части энергии, передаваемой от пучка к плазме.

Таким образом, эффективность взаимодействия, определяемая как относительная величина энергии, передаваемой от пучка к плазме, не только не уменьшается, но и возрастает. Для экспериментального обнаружения эффектов необходимо увеличивать либо токи пучков, либо длину взаимодействия при не очень больших токах.

Значительное усиление эффекта достигается в условиях, когда становится возможным когерентное торможение релятивистского электронного пучка плазмой, являющегося обратным эффектом когерентного ускорения В.И.Векслера [4]¹⁾. Для этого необходимо использовать модулированные пучки и эффекты накопления электромагнитной энергии [6].

Широкий круг вопросов, связанных с особенностями взаимодействия сильноточных релятивистских пучков с плазмой в экспериментах с токами $1 - 10$ а, остается естественно не исследованным. Вместе с тем физические особенности коллективных взаимодействий на релятивистской стадии по условиям эксперимента легче исследовать при не очень больших токах.

В нашей работе исследуется взаимодействие цуга релятивистских электронных сгустков, полученных из линейного ускорителя обычного типа, с плазмой, т. е. взаимодействие сильно промодулированного релятивистского электронного пучка с плазмой. Целью работы является обнаружение когерентных потерь энергии электронного пучка в результате коллективных взаимодействий с плазмой. Эксперименты проводились на распадающейся плазме, плотность которой изменялась в пределах от 10^{14} до 10^{10} см⁻³. Так как фазовая ширина сгустка составляет 60° [9], то взаимодействие должно быть когерентным для отдельного сгустка только для плотностей до $5 \cdot 10^{12}$ см⁻³. Когерентность между сгустками должна иметь место только для плотности $\sim 10^{11}$ см⁻³, когда электронная плазменная частота ω_p близка к частоте следования сгустков $\omega_{\text{мод}}$ ($\omega_p \sim \omega_{\text{мод}}$). При этом на длине системы в нашем случае существует 20 сгустков. Для плотностей, при которых размер сгустка превышает половину плазменной волны $L > \lambda_p / 2$ имеет место взаимодействие немодулированного пучка с плазмой.

¹⁾ Отметим, что эффект когерентного черенковского излучения нерелятивистских пучков в диэлектриках был впервые исследован В.Л.Гинзбургом и И.М.Франком [5].

Следует отметить, что попытка обнаружить коллективное взаимодействие модулированного пучка с плазмой, приведшая к отрицательному результату, была сделана в работе [7].

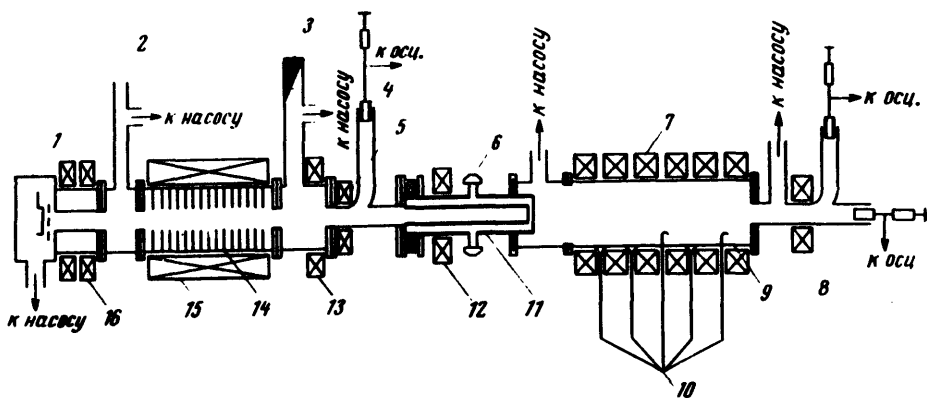


Рис. 1. Блок-схема установки: 1 – электронная пушка, 2 – вакуумная волноводная линия, 3 – СВЧ нагрузка, 4 – цилиндр Фарадея, 5, 8, 12, 13, 16 – системы коррекции и фокусировки пучка, 6 – электродинамический клапан, 7, 15 – соленоиды, 9 – камера взаимодействия, 10 – элементы СВЧ диагностики, 11 – плазменная пушка, 14 – диафрагмированный волновод

На рис. 1 представлена блок-схема установки. Для получения релятивистского пучка нами используется инжекторный линейный ускоритель (ИЛУЭ) с постоянной фазовой скоростью волны, близкой к c , разработанный И.А.Гришаевым, А.И.Зыковым, Е.К.Островским, В.А.Вишняковым, аналогичный описанному в [8, 9], но с увеличенным током. Ускоряющая секция – отрезок диафрагмированного волновода. Параметры пучка: энергия – 2 Мэв, ток в импульсе – 1 а, длительность импульса – 2 мксек, диаметр пучка – 10 мм, фазовая ширина сгустка $\sim 60^\circ$. Камера взаимодействия представляет собой стеклянную трубу диаметром $d \sim 100$ мм и длиной $l \sim 2$ м, помещенную в постоянное продольное магнитное поле с напряженностью до 2000 э. Источник плазмы – коаксиальная плазменная пушка, аналогичная описанной в [10]. Внутренний электрод пушки полый с отверстием ϕ 20 мм для ввода релятивистского электронного пучка в камеру взаимодействия. Начальное давление в системе 10^{-6} тор. Плотность плазмы контролируется СВЧ зондированием 10-см, 3-см, 8-мм сигналами.

Измерение энергетического спектра электронов пучка, прошедшего через камеру взаимодействия, как с плазмой, так и без плазмы проводилось следующим образом. На магнитном анализаторе, смонтированном на выходе камеры взаимодействия, устанавливалось определенное значение тока, что соответствовало заданной энергии частиц, проходящих через анализатор. При этом значении энергии проводились многократные измерения тока частиц с плазмой и без плазмы. Среднеквадра-

тичная ошибка измерений тока для заданной энергии составляла 2 – 3% (см. рис. 2, 3). Перестраивая анализатор, мы определяли функцию распределения электронов пучка по энергиям для различных значений тока пучка и плотности плазмы.

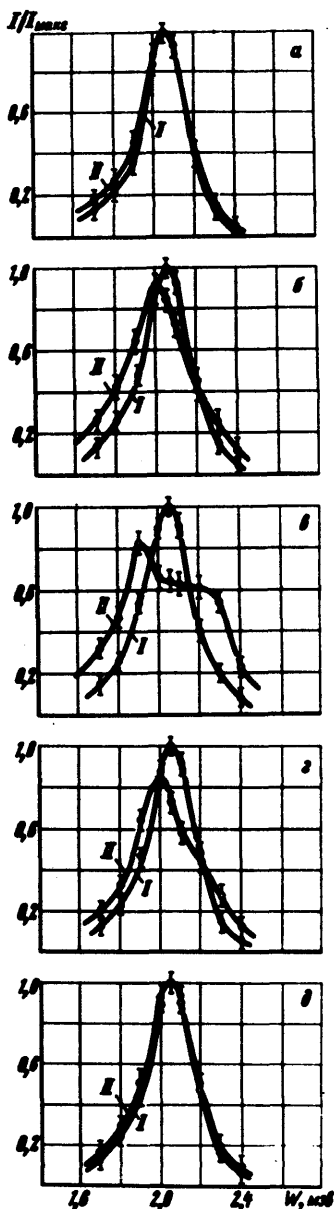


Рис. 2. Энергетические спектры электронов при токе пучка 1 а. Кривая I – без плазмы, кривая II – с плазмой; а – $n_p \sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, б – $n_p \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$, в – $n_p \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$, г – $n_p \sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$, д – $n_p \sim 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$

Типичные функции распределения приведены на рис. 2. Как видно из приведенных графиков, наблюдается коллективное взаимодействие релятивистского электронного пучка с плазмой, которое резонансным образом зависит от плотности плазмы. Максимальное взаимодействие наблюдается при плотности плазмы $n_p \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (рис. 2, в). Максимумы в спектрах смещены примерно на 150 – 250 кэв. При этом заметная часть электронов ускоряется на 100 кэв. Заметим, что некоге-

рентные боровские потери энергии для рассматриваемого случая составляют всего 10^{-6} эв. Для плотностей плазмы $n_p \sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $n_p \sim 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ взаимодействие не наблюдается (рис. 2, а и 2, д). При плотностях $\sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ взаимодействие существенно ослабляется (рис. 2, б и 2, з).

Следовательно, максимальное взаимодействие наблюдается при плотности плазмы, для которой длина возбуждаемой плазменной волны λ_p равна расстоянию между сгустками, т. е. когда $\omega_p \sim \omega_{\text{мод}}$.

Эффективность взаимодействия сильно зависит от тока пучка. На рис. 3 приведена функция распределения электронов пучка по энергиям для тока $0,5 \text{ а}$ и плотности плазмы $n_p \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (кривая II). Как видно из рис. 3, при уменьшении тока пучка даже при оптимальном значении плотности плазмы взаимодействие сильно уменьшается.

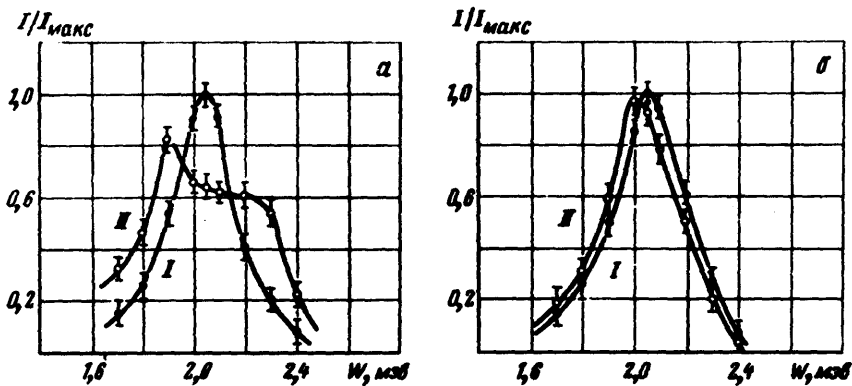


Рис. 3. Энергетические спектры электронов: а — для тока 1 а и б — для тока $0,5 \text{ а}$, $n_p \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Кривая I — без плазмы, кривая II — с плазмой

Большие величины энергий, теряемой и приобретаемой частицами, и резонансный характер зависимости потерь от плотности плазмы (рис. 2, в) несомненно свидетельствует о когерентном коллективном характере взаимодействия релятивистских электронных пучков с плазмой.

Отметим, что отрицательный результат работы [7], возможно, объясняется тем, что в ней не были обеспечены условия когерентного взаимодействия ($\omega_p \sim \omega_{\text{мод}}$) и ток пучка был слишком мал ($\sim 0,15 \text{ а}$).

Физико-технический институт
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
29 марта 1971 г.

Литература

- [1] К.М. Watson, S.A. Bludman, M.N. Risenbluth. Phys. Fluids, 3, 741, 1960.
- [2] Е.Е. Ловецкий, А.А. Рухадзе. ЖЭТФ, 48, 514, 1965.
- [3] Я.Б. Файнберг, В.Д. Шапиро, В.И. Шевченко. ЖЭТФ, 57, 966, 1969.

- [4] В.И.Векслер. *Proceedings Symposium CERN*, 1, 80, 1956.
- [5] В.Л.Гинзбург, И.М.Франк. *ДАН СССР*, 54, 699, 1947.
- [6] В.И.Курилко. *ЖТФ*, 57, 885, 1969.
- [7] J.S.Mendell, E.M.Holt, *J. of Appl. Phys.*, 38, 5416, 1967.
- [8] В.М.Грижко, В.А.Вишняков, И.А.Гришаев и др. *ЖТФ*, 34, 1903, 1964.
- [9] Г.Д.Крамской, И.А.Гришаев, А.И.Зыков и др. *ЖТФ*, 39, 2054, 1969.
- [10] И.М.Золототрубов, В.А.Киселев, Ю.Н.Новиков. *ЖТФ*, 34, 998, 1964.
-