

ОБНАРУЖЕНИЕ ВОЛН В ОГРАНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ С ЗАКРИТИЧЕСКОЙ НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТЬЮ

А.С.Бакай, С.С.Кривоуля, В.Д.Федорченко, В.И.Муратов

Впервые обнаружено, что при некоторой конечной амплитуде внешнего сигнала, система плазма– электронный пучок, со скоростью больше максимальной фазовой скорости волны в системе, становится неустойчивой. Экспериментально полученные значения амплитуд, при которых начинает развиваться неустойчивость, хорошо совпадают с теоретическими.

1. Как известно, бесконечно малые возмущения в ограниченной пучково-плазменной системе не нарастают, если начальная скорость пучка превышает критическую скорость, примерно равную максимальной фазовой скорости волн объемного заряда

$$V_B > V_C = \omega_p / k_{\perp}, \quad k_{\perp} = \pi / d \quad (1)$$

d – поперечные размеры системы, ω_p – электронная плазменная частота. Однако, как показано в [1], где теоретически исследована возможность возбуждения волн пучками с закритическими начальными скоростями, такая система неустойчива относительно начальных возмущений конечной амплитуды, а именно, когда начальная амплитуда превышает пороговое значение, для случая моноэнергетического пучка определяемое соотношением:

$$e\phi_C = \frac{m}{4} (V_B - V_{\Phi})^2 \quad (2)$$

Смысл этого соотношения ясен: когда начальная амплитуда волны превышает ϕ_C , происходит захват частиц волной, в процессе которого они резко тормозятся (асимптотически средняя скорость захваченных частиц стремится к V_{Φ}), передавая энергию волне. Теряемая быстрым пучком энергия в результате развития неустойчивости может во много раз превосходить энергию, теряемую медленным пучком ($V_B < V_C$) равной плотности, поскольку

$$\Delta \epsilon = \frac{m}{2} (V_B^2 - V_{\Phi}^2) \quad (3)$$

и для медленного пучка

$$V_B^2 - V_{\Phi}^2 \approx V_{\Phi}^2 (n_B / n)^{1/2}, \quad (4)$$

где $(n_B / n)^{1/2}$ малый параметр для слабых пучков. Для пучков с закритической скоростью легко может быть выполнено

$$V_B^2 - V_{\Phi}^2 \gg V_{\Phi}^2 (n_B / n)^{1/2}; \quad (5)$$

что и доказывает наше утверждение.

Заметим, что эффективное возбуждение волн пучком, скорость которого заметно превышает фазовую скорость возбуждаемой волны, при конечной амплитуде последней, возможно в любой замедляющей системе.

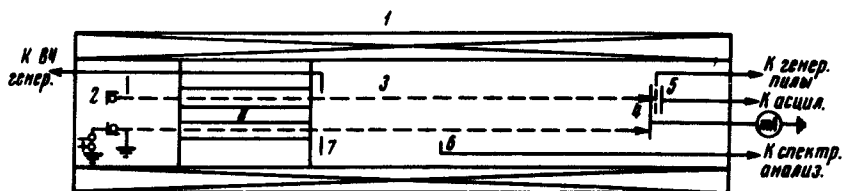


Рис. 1.

2. Экспериментальные исследования выполнены на установке, схема которой представлена на рис.1. Диаметр камеры 5 см, длина 100 см, диаметр электронного пучка 2 см. Плотность плазмы, образующейся благодаря столкновениям электронов пучка с нейтральным газом, равна $2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$. Энергию частиц пучка можно было выбрать в пределах 300 – 1000 эв. Система находится в постоянном продольном магнитном поле 600 э. В таком поле электроны пучка являются замагниченными: $\omega_{ce} \gg \omega_p$.

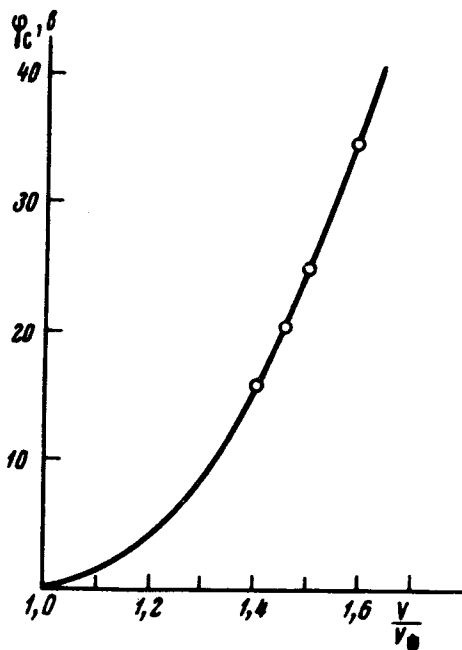


Рис. 2.

При энергии пучка до 400 – 450 эв (скорость пучка $V_B = 1,2 \cdot 10^9 \text{ см/сек}$) в системе осуществляется обычный пучково-плазменный разряд с генерацией электронных плазменных колебаний. Однако, уже при энергии пучка 500 эв (скорость $V_B = 1,33 \cdot 10^9 \text{ см/сек}$) и больше возбуждение волн пучком в системе при флуктуационных начальных возмущениях отсутствует. Для исследования вопроса об устойчивости волн конечной амплитуды в пучково-плазменной системе с критической начальной скоростью пучка на модулирующий электрон подавался СВЧ сигнал конечной амплитуды с частотой $\omega \leq \omega_p$.

При этом неустойчивость волны развивалась, когда начальная амплитуда волны достигала или превышала пороговое значение, с хорошей точностью определяемое соотношением (2). Об этом свидетельствуют результаты экспериментов, представленные на рис 2 — 4.

На рис.2 представлена зависимость пороговой начальной амплитуды волн от начальной скорости пучка. Сплошная кривая представляет теоретическую зависимость, экспериментально измеренные значения изображены кружочками.

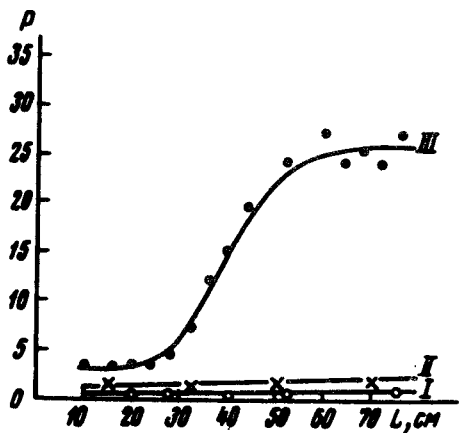


Рис. 3.

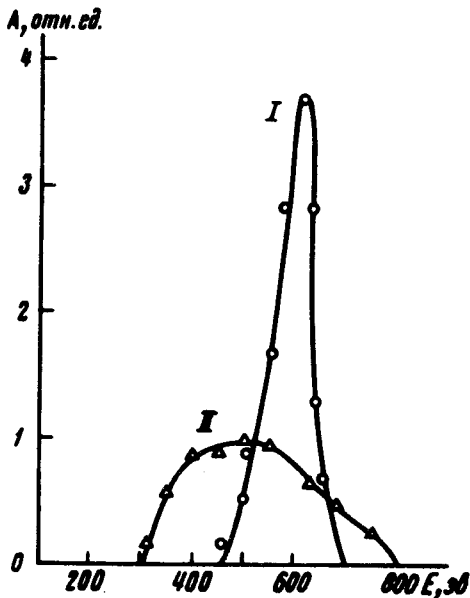


Рис. 4.

Поведение амплитуды волны по длине системы при различных начальных амплитудах волны и энергии пучка 600 эВ показано на рис.3. Хорошо видно, что пока начальная амплитуда волны не превышает критическое значение (в данном случае $\phi_c = 12,5 e$, измеренное значение фазовой скорости волны в системе $V_{\phi} = 1,15 \cdot 10^9$ см/сек) усиление волны практически отсутствует (кривые I $\phi = 1 e$, кривая II $\phi = 10 e$). При запороговой амплитуде (кривая III $\phi = 15 e$) быстро развивается пучковая неустойчивость.

На рис.4 представлена функция распределения частиц пучка по энергиям, измеренная в конце системы. Видно, что характерное размытие функции распределения, сопровождающее развитие пучковой неустойчивости, появляется, когда начальная амплитуда превышает пороговое значение. Здесь условия те же, что и для рис.3. Энергия пучка 600 эВ. Кривая I — начальная амплитуда ниже порога, кривая II — амплитуда выше порогового значения.