

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ  
И ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ**

УДК 533.922.01 : 621.372.853.3

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С НЕОДНОРОДНЫМ  
ПЛАЗМЕННЫМ ВОЛНОВОДОМ С УЧЕТОМ СТРИКЦИОННОЙ  
НЕЛИНЕЙНОСТИ**

*В. А. Балакирев, А. П. Толстолужский*

Известно, что неоднородность плазмы может приводить к срыву гидродинамической пучковой неустойчивости [1]. Этот эффект особенно сильно проявляется в условиях, когда плотность плазмы растет вдоль движения пучка. Физически это обусловлено тем, что в этом случае фазовая скорость плазменной волны растёт, и поэтому она быстро выходит из резонанса с пучком, не успев заметно усилиться

В данной работе обращается внимание на то, что стрикционная нелинейность плазмы может оказывать существенное влияние на процесс взаимодействия «холодного» электронного пучка с неоднородной плазмой. Действительно, вытеснение плазмы ВЧ полем приведет к уменьшению градиента плотности и, соответственно, к улучшению синхронизма между пучком и волной. Таким образом, следует ожидать, что влияние стрикционной нелинейности плазмы может повысить эффективность возбуждения монохроматической волны в неоднородной плазме. Отметим, что в случае однородной плазмы влияние стрикционной нелинейности плазмы на плазменно-пучковое взаимодействие исследовано в работах [2-4]

Рассмотрим цилиндрический плазменный волновод радиуса  $a$ , окруженный проводящим кожухом такого же радиуса. Будем считать, что плотность плазмы растет по линейному закону  $n_p = n_0(1 + z/L)$ . Пусть вдоль оси такого волновода движется моноэнергетический релятивистский пучок электронов радиуса  $b$  ( $b \ll a$ ). Система помещена в сильное магнитное поле, так что электроны пучка и плазмы можно считать замагниченными

Будем считать, что плотность плазмы медленно меняется вдоль волновода, так что для колебаний волновода справедливо ВКБ-приближение. Ниже мы ограничимся случаем, когда в окрестности области инжекции пучка в волновод ( $z = 0$ ) пучок находится в синхронизме с волной, имеющей минимальное волновое число  $k_{\perp} = \lambda_0/a \approx 2,4/a$ .

Безразмерная система уравнений, описывающая стационарное усиление электронным пучком монохроматической волны неоднородного плазменного волновода, с учетом стрикционной нелинейности плазмы имеет вид

$$\frac{dc}{d\xi} = f(\xi) \int_0^1 \frac{\exp(2\pi i \tau)}{(1 - \nu \theta)^2} d\tau_0 + i\delta(1 + \alpha\xi) F(\xi) C |C|^2; \tag{1}$$

$$\frac{d\nu}{d\xi} = \frac{1}{\gamma_0} \sqrt{\gamma_0^2 - 1 + \frac{1}{(1 - \nu \theta)^2} F^{1/4}(\xi) \operatorname{Re} C \exp(-2\pi i \tau)}; \tag{2}$$

$$\frac{d\tau}{d\xi} = \frac{\gamma_0}{2\pi\theta} \left[ \sqrt{\gamma_0^2 - 1 + \frac{1}{(1 - \nu \theta)^2}} - \frac{\gamma_0}{f(\xi)} \right], \tag{3}$$

где  $C = A_0 \varepsilon_{\parallel}(z)/A_* \varepsilon_{\parallel}(0)$ ,  $A_* = m\omega V_0 \theta^2 / e\gamma_0$ ,  $\theta = [\Pi/\gamma_0 \lambda_0^2 J_1^2(\lambda_0)]^{1/3}$ ,  $\Pi = \omega_b^2 b^2 / V_0^2$ ,  $A_0$  — амплитуда продольной компоненты электрического поля волны,  $V_0$  — равновесная скорость пучка,  $\varepsilon_{\parallel} = 1 - [\omega_p^2(z)/\omega^2]$ ,  $\omega_b^2$ ,  $\omega_p^2$  — ленгмюровские частоты пучка и плазмы,  $\gamma_0$  — релятивистский фактор пучка,  $\xi = \omega \theta z / V_0 \gamma_0^2$ ,  $\nu = (P_0 - P)/P_0 \theta$ ,  $\tau = (\omega t - \int k(z) dz) / 2\pi$ ,  $k = \sqrt{\omega^2 / c^2 - \lambda_0^2 / a \varepsilon_{\parallel}}$ ,

$$f(\xi) = \sqrt{\frac{k(0)}{k(\xi)}} = \left( \frac{1 + \rho^2 \alpha \xi}{1 + \beta_0^2 \alpha \rho^2 \xi} \right)^{1/4}, \quad F(\xi) = \frac{f^4}{(1 + \rho^2 \alpha \xi)^4},$$

$$\alpha = \gamma_0 V_0 / \omega \theta L, \quad \rho^2 = P_e / \lambda_0^2 (\gamma_0^2 - 1), \quad \beta_0 = V_0 / c,$$

$P_e$  — погонная плотность плазмы,  $\delta = \frac{\alpha}{4} \frac{\gamma_0 + 1}{\gamma_0^3} \frac{W_b}{W_{Te}} \rho^4$ ,  $\alpha = \frac{1}{\lambda_0^4 J_1^4(\lambda_0)} \int_0^1 J_0^4(\lambda_0 \xi) \xi d\xi$ ,

$W_b = N_b m c^2 (\gamma_0 - 1)$  — кинетическая энергия единицы длины пучка,  $W_{Te}$  — тепловая энергия единицы длины волновода.

Система уравнений (1)–(3) была проинтегрирована численно как для нерелятивистского ( $\gamma_0 = 1,3$ ), так и для релятивистского ( $\gamma_0 = 3$ ) пучков. В процессе численного счета варьировались безразмерные параметры  $\kappa$  и  $\delta$ , которые являются численными характеристиками влияния неоднородности и нелинейности плазмы на процесс усиления волны плазменного волновода. Начальные условия были выбраны следующими:  $\text{Re}C(0) = 0,01$ ,  $\text{Im}C(0) = 0$ ,  $\nu(0) = 0$ ,  $\tau(0) = \tau_0$ .

На рис. 1 представлены пространственные зависимости амплитуды волны при различных градиентах плотности для случая линейной плазмы ( $\delta = 0$ ) (а) —  $\gamma_0 = 1,3$ , б) —  $\gamma_0 = 3$ ). Из этого рисунка видно, что с ростом градиента уменьшается максимальное значение амплитуды  $C_m$ , а также увеличивается расстояние до первого максимума.

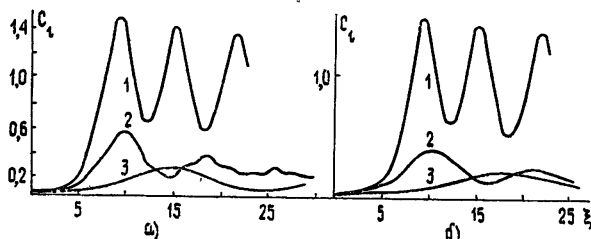


Рис. 1. Пространственное распределение амплитуды волны в линейной ( $\delta = 0$ ) неоднородной плазме:

а)  $\gamma_0 = 1,3$ ,  $\rho^2 = 1,4$ ,  $1 - \kappa = 0$ ,  $2 - \kappa = 0,03$ ,  $3 - \kappa = 0,09$ ;  
б)  $\gamma_0 = 3$ ,  $\rho^2 = 2,0$ ,  $1 - \kappa = 0$ ,  $2 - \kappa = 0,03$ ,  $3 - \kappa = 0,09$ .

На рис. 2 приведены зависимости  $C(\xi)$  при фиксированном градиенте  $\kappa = 0,03$  и различных значениях параметра нелинейности  $\delta$  (а) —  $\gamma_0 = 1,3$ , б) —  $\gamma_0 = 3$ ). Как следует из этого рисунка, с увеличением параметра  $\delta$  максимальная амплитуда  $C_m$  подрастает. При этом она может достигать большего значения, чем в однородной линейной плазме (рис. 2б).

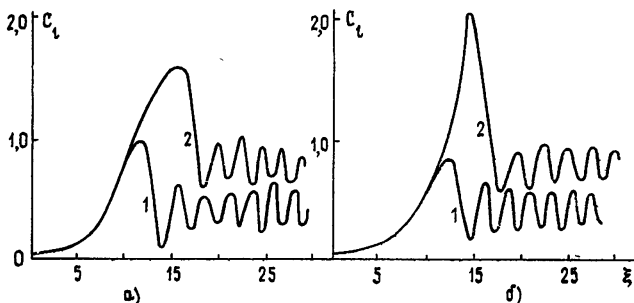


Рис. 2. Пространственное распределение амплитуды волны в нелинейной неоднородной плазме ( $\kappa = 0,03$ ):

а)  $\gamma_0 = 1,3$ ,  $\rho^2 = 1,4$ ,  $1 - \delta = 2,55$ ,  $2 - \delta = 2,71$ ;  
б)  $\gamma_0 = 3$ ,  $\rho^2 = 2,0$ ,  $1 - \delta = 9$ ,  $2 - \delta = 9,5$ .

Таким образом, мы показали, что стрикционная нелинейность может компенсировать влияние неоднородности на процесс усиления ВЧ волны электронным пучком.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Калмыкова С. С., Курилко В. И., Кучеров В. И., Толстолужский А. П. — ЖЭТФ, 1973, 64, с. 471.
2. Айзацкий Н. И. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 6, с. 859.
3. Лошков И. В. — Физика плазмы, 1979, 5, с. 1020.
4. Айзацкий Н. И., Балакирев В. А., Толстолужский А. П. — Изв. вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 3, с. 383.

Поступила в редакцию  
27 июня 1980 г.,  
после доработки  
15 апреля 1981 г.