

ДЕФОРМАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА ПРИ РАЗВИТИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В СЛОЕ ПЛАЗМЫ

*Г.М.Жислин, А.Г.Литвак, Н.А.Митяков, В.И.Петрухина
В.О.Рапопорт, В.Ю.Трахтенгерц*

Численно и аналитически рассмотрена модифицированная распадная неустойчивость в ограниченном слое плазмы. Показано, что на выходе слоя плазмы возникает глубокая амплитудная модуляция падающей волны, а также удлинение электромагнитного импульса, обусловленное "высвечиванием" накопившейся в слое плазменной турбулентности после выключения волны накачки.

В последнее время в связи с ионосферными экспериментами [1–4] возрос интерес к исследованию самовоздействия электромагнитного импульса в слое плазмы при развитии параметрической неустойчивости. Этому способствовало обнаружение эффектов аномального ослабления, амплитудной модуляции и удлинения [1–3] электромагнитных импульсов при отражении от F-слоя ионосферы.

Возможное объяснение ряда указанных выше эффектов было предложено в работах [4, 5].

В данной статье, в отличие от [4, 5] рассматривается случай достаточно сильных полей

$$\frac{W}{NT_e} > \left(\frac{m}{M} \right)^{1/2} \quad (1)$$

($W = E_0^2 / 8\pi$ – плотность энергии волны накачки, N и T_e – концентрация и температура электронов, m и M – масса электронов и ионов), когда выполняются условия для развития модифицированной распадной неустойчивости [6]. Как показывают оценки, именно этот случай реализовался в экспериментах [3], где наиболее четко проявились эффекты амплитудной модуляции и удлинения электромагнитного импульса.

Для иллюстрации принципиальной возможности объяснения отмеченных выше эффектов мы исследуем простейшую модельную задачу о развитии модифицированной распадной неустойчивости в однородном прозрачном слое плазмы на примере двухмодового режима, когда во взаимодействии участвуют падающая в направлении оси z электромагнитная волна и плазменная волна с максимальным инкрементом параметрической неустойчивости.

Уравнения, описывающие такое взаимодействие, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial \tau} + v_1 \frac{\partial A_1}{\partial \xi} + \gamma A_1 &= -i A_2 s l^i \Delta r, \\ \frac{\partial A_2}{\partial \tau} + v_2 \frac{\partial A_2}{\partial \xi} + \gamma A_2 &= -i A_1 s^* l^{-i} \Delta r, \\ \frac{\partial^2 s}{\partial \tau^2} + \Gamma s &= -A_1 A_2^* e^{-i \Delta r}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $E_{1,2} = E_0 A_{1,2} \exp\{i\omega_{1,2}t - ik_{1,2}z\}$ электрические поля высокочастотных волн, $A_{1,2}(\xi, \tau)$ — нормированные медленные меняющиеся комплексные амплитуды, $s = n\delta/N$, n — низкочастотные возмущения плотности плазмы, $\delta = \omega_{pe}^2/4\gamma_N(\omega_1 \cdot \omega_2)^{1/2}$, $\omega_{pe} = 4\pi e^2 N/m_e$, $v_{\Phi} = (k_1 - k_2)/\omega_1$, $\gamma_N = \omega_1(v_{\sim}^2/v_{\Phi}^2)(\omega_{pe}^2/\omega_1^2)^{1/3}$, $\kappa = k_1 - k_2$, $v_{\sim} = eE_0/m\omega_1$, $\tau = \gamma_N t$, $v_{1,2} = v_{\Gamma p}^{(1,2)}/c$, — проекция групповых скоростей волн на ось z , $\xi = z\gamma_N/c$, z — координата поперек слоя, $\gamma = v_{eff}/\gamma_N$ — декремент затухания, $\Delta = (\omega_1 - \omega_2)/\omega_1$, $\Gamma = 2\kappa^2 v_s^2/\gamma_N^2$, $v_s = 2T_e/M$.

Система (2) решалась на ЭВМ при выборе различных параметров задачи и следующих начальных и граничных условиях:

$$\begin{aligned} \tau = 0 \quad |A_1| = 1, \quad |A_2| = A_{20} \ll 1, \quad 0 \leq \xi \leq 1, \quad s = \arg A_{1,2} = 0, \\ \xi = 0 \quad |A_1| = 1(v_1 \tau) - 1[v_1(\tau - \tau_0)] \quad 1(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (3) \\ s = \arg A_{1,2} = 0, \quad |A_2| = A_{20} \ll A_1 \quad v_2 = 0,01 v_1. \end{aligned}$$

Некоторые примеры численного счета при $\gamma = 0$ и $\Delta = 0$ приведены на рис. 1, а, б. Наиболее характерной чертой является резко неоднородное по слою распределение интенсивности плазменных волн и низкочастотных возмущений плотности (рис. 1, а). Четко проявляются эффекты накопления плазменной турбулентности в слое ($|A_2|_{max} \approx 5$). На рис. 1, б построена зависимость амплитуды волны накачки от времени на выходе слоя $\xi = 1$. Типичным является глубокая амплитудная модуляция, обусловленная динамическим характером процесса, а также эффекты удлинения импульса, связанные с высвечиванием плазменной турбулентности из слоя после выключения волны накачки. Значительную роль играет затухание ($\gamma \neq 0$), которое существенно увеличивает концентрацию

энергии плазменных волн и возмущений плотности на передней кромке слоя, а также ослабляет эффекты накопления энергии и удлинения импульса после выключения.

Принимая во внимание качественное сходство процессов возникающих в двухмодовом и многомодовом режимах [7], можно предполагать, что описанная выше картина в основных чертах сохранится и в более общем случае многомодового взаимодействия, когда учитывается рождение пространственных гармоник поля плазменных волн.

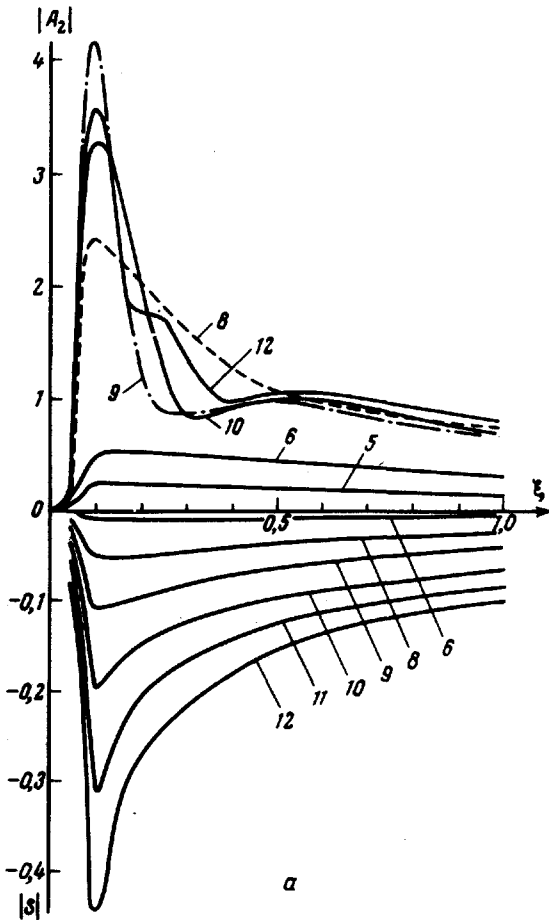


Рис. 1 а. Распределение амплитуды плазменных колебаний $|A_2|$ и возмущений плотности $|s|$ по слою плазмы в разные моменты времени

Для выявления качественных особенностей рассмотренного взаимодействия было исследовано аналитическое решение первых двух уравнений системы (2) при заданной периодической структуре возмущений плотности $s = s_0$. Такая постановка задачи подсказывается монотонным поведением и уменьшением относительной скорости роста возмущений $|s|$ в численном счете (см. рис. 1, а), а также оправдана физически, так как в реальных экспериментах при многократном или длительном зондировании, по-видимому, происходит накопление возмущений плотности в области взаимодействия до некоторого стационарного уровня.

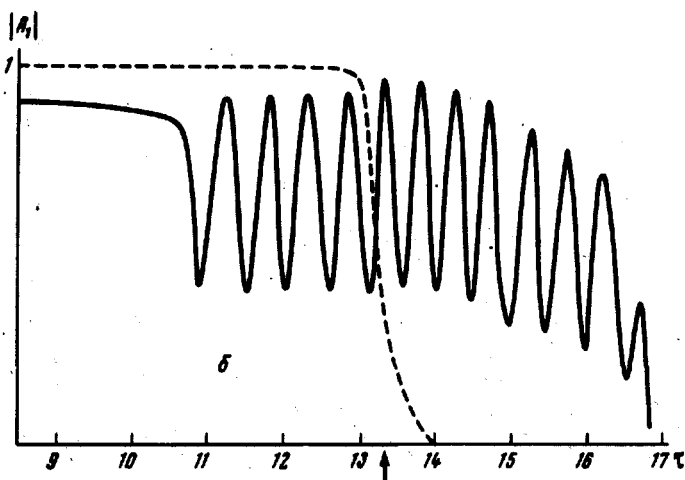


Рис.16. Эффекты амплитудной модуляции и удлинения электромагнитного импульса (численный счет). Пунктиром показан исходный импульс

Выпишем решение уравнений (2) для A_1 и A_2 при заданном значении $s = s_0$. В простейшем случае $\gamma = v_2 = A_{20} = 0$ с начальными и граничными условиями (3) для A_1 оно имеет следующий вид:

$$A_1 = J_0 \left[s_0 \gamma_N \sqrt{\frac{2z}{v_1} \left(t - \frac{z}{v_1} \right)} \right] - J_0 \left[s_0 \gamma_N \sqrt{\frac{2z}{v_1} \left(t - T - \frac{z}{v_1} \right)} \right] 1 \left(t - T - \frac{z}{v_1} \right) \quad (4)$$

$$A_2 = \left(\frac{t - \frac{z}{v_1}}{z/v_1} \right)^{\frac{1}{2}} J_1 \left[s_0 \gamma_N \sqrt{\frac{2z}{v_1} \left(t - \frac{z}{v_1} \right)} \right] - \left(\frac{t - T - \frac{z}{v_1}}{z/v_1} \right)^{\frac{1}{2}} J_1 \left[s_0 \gamma_N \sqrt{\frac{2z}{v_1} \left(t - T - \frac{z}{v_1} \right)} \right] \times \\ \times 1 \left(t - T - \frac{z}{v_1} \right), \quad (5)$$

где $J_{0,1}$ – функция Бесселя действительного аргумента, T – длительность импульса накачки, $1(x)$ – единичная функция Хевисайда.

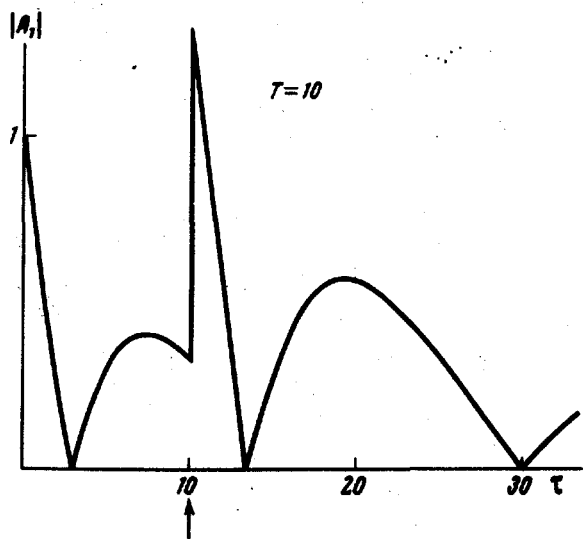


Рис. 2. То же, что и на рис. 16 (аналитический расчет). Стрелкой показан момент выключения исходного импульса

Согласно (4) – (5), на выходе слоя $z = z_0$ имеет место глубокая амплитудная модуляция импульса накачки с характерным периодом $T_M \approx v_1 / 2s_0^2 \gamma N^2 z_0 \approx 8v_1 / \epsilon^2 \omega_{pe}^2 z_0$, где $\epsilon = \bar{n}_0 / N$, z_0 – толщина слоя, n_0 – амплитуда возмущений. Внутри слоя со временем происходит накопление плазменной турбулентности. После выключения волны накачки возникает удлинение импульса на $\Delta T \sim T$ (рис. 2). Подобного рода эффекты наблюдались в экспериментах Шлюгера и др. [3].

Сделаем некоторые количественные оценки, взяв за основу наблюдавшийся на эксперименте [3] период модуляции $T_m \sim 2 \cdot 10^{-4}$ сек при длительности импульса $T \sim 6 \cdot 10^{-4}$ сек. Полагая $\omega_{pe} / 2\pi \approx f_0 \sim 1,4 \cdot 10^6$ гц, $T_m \approx 2 \cdot 10^{-4}$ сек и $v_1 \approx 10^{10}$ см/сек, получим вполне приемлемое для ионосферных условий значение $n_0 / N \approx 10^{-2}$ при $z_0 \approx 3$ км.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
21 августа 1974 г.

Литература

- [1] У.Ютло, Р.Козн. УФН, 109, 371, 1973.
- [2] Г.Г.Гетманцев, Г.П.Комраков, Ю.С.Коробков, Л.Ф.Мироненко, Н.А.Митяков, В.О.Рапопорт, В.Ю.Трахтенгерц, В.Л.Фролов, В.А.Череповицкий. Письма в ЖЭТФ, 18, 621, 1973.
- [3] И.С.Шлюгер. Письма в ЖЭТФ, 19, 274, 1974.
- [4] В.В.Васьков, А.В.Гуревич. ЖЭТФ, 64, 1272, 1973; 66, 1673, 1974.
- [5] Л.И.Альбер, З.Н.Кротова, Н.А.Митяков, В.О.Рапопорт, В.Ю.Трахтенгерц. ЖЭТФ, 66, 574, 1974.
- [6] А.Г.Литвак, В.А.Петрухина, В.Ю.Трахтенгерц. Письма в ЖЭТФ, 18, 190, 1973.
- [7] А.Г.Литвак, В.Ю.Трахтенгерц, Г.М.Фрайман, Т.Н.Федосеева. Письма в ЖЭТФ, 20, 544, 1974.