ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1987. Т. 28, № 4

УДК 533.951.2

ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В РЕЖИМЕ КОЛЛЕКТИВНОГО ЭФФЕКТА ЧЕРЕНКОВА

А. Ф. Александров, М. В. Кузелев, А. Н. Халилов

(кафедра электроники)

При взаимодействии электронных пучков с плазмой наблюдается множество интересных как с практической, так и с теоретической точек зрения процессов [1—3], исследование которых позволяет решить проблему управления пучково-плазменным взаимодействием, важную при генерации СВЧ, в коллективных методах модуляции и ускорения пучков и т. д. Линейная теория взаимодействия «тонких» пучка и плазмы в волноводе рассматривалась в работе [4]. Настоящая работа посвящена аналитической теории одного из важных случаев пучково-плазменного взаимодействия — коллективного эффекта Черенкова.

Электромагнитные свойства «тонких» полностью замагниченных пучка и плазмы определяются в потенциальном приближении следующей системой нелинейных интегро-дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
&\frac{d^2y_b}{dt^2}+\frac{1}{2}i\Omega_b^2\sum_{l=1}^{\infty}\frac{1}{l}R_{bl}\left(\rho_{bl}e^{ily_b}-\text{к. с.}\right)=-\frac{1}{2}i\Omega_p^2\sum_{l=1}^{\infty}\frac{1}{l}G_l\left(\rho_{pl}e^{ily_b}-\text{к. с.}\right),\\
&\frac{d^2y_p}{dt^2}+\frac{1}{2}i\Omega_p^2\sum_{l=1}^{\infty}\frac{1}{l}R_{pl}\left(\rho_{pl}e^{ily_p}-\text{к. с.}\right)=-\frac{1}{2}i\Omega_b^2\sum_{l=1}^{\infty}\frac{1}{l}G_l\left(\rho_{bl}e^{ily_p}-\text{к. с.}\right),
\end{aligned}\qquad(1)$$

где $\Omega_\alpha^2=\left(\frac{4\pi e^2 n_\alpha}{m}\cdot\frac{S_\alpha}{S_W}\right)$ — величины, пропорциональные погонной плотности частиц сорта α; S_W и S_α — соответственно площади поперечного сечения волновода и системы частиц сорта α; $R_{\alpha l}$ и G_l — геометрические факторы, определяющие соответственно частоты плазменных колебаний частиц и взаимодействие пучковых и плазменных волн; $y_\alpha=k_\parallel z_\alpha$ — продольные координаты частиц сорта α; $y_0=k_\parallel z_0$;

$$\rho_{\alpha l}=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}e^{-ily_\alpha}\,dy_0$$

— амплитуды фурье-компонент возмущений плотности частиц, нормированные на невозмущенную плотность. Факторы $R_{\alpha l}$ и G_l были получены и исследованы в работах [4, 5]. Важно отметить, что при разведении пучка и плазмы величины G_l монотонно уменьшаются вплоть до нуля, т. е. при определенной геометрии пучково-плазменной системы G_l могут быть малыми параметрами. В линейном приближении из (1) получаем следующее дисперсионное уравнение:

$$[(\omega-k_\parallel u)^2-\widetilde{\Omega}_b^2](\omega^2-\widetilde{\Omega}_p^2)=\widetilde{G}^2\widetilde{\Omega}_b^2\widetilde{\Omega}_p^2,\qquad(2)$$

где $\widetilde{\Omega}_\alpha^2=\Omega_\alpha^2R_{\alpha1}$, $\widetilde{G}=G_1(R_{b1}R_{p1})^{-1/2}$, а u — скорость пучка. Это дисперсионное уравнение и проанализируем для случая коллективного эффекта Черенкова. Общий же анализ уравнения (2) имеется в работе [4].

Инкремент возникающей в режиме коллективного эффекта Черенкова неустойчивости

$$\delta\omega=\frac{1}{2}i\left(\widetilde{G}^2\widetilde{\Omega}_b\widetilde{\Omega}_p\right)^{1/2}\qquad(3)$$

при малых $\widetilde{G}$, а точнее при

$$\widetilde{G}^2\ll 4\min\left\{\frac{\widetilde{\Omega}_b}{\widetilde{\Omega}_p},\ \frac{\widetilde{\Omega}_p}{\widetilde{\Omega}_b}\right\},\qquad(4)$$

удовлетворяет неравенствам

$$|\delta\omega| \ll \widetilde{\Omega}_b,\ \widetilde{\Omega}_p. \tag{5}$$

Можно сказать, что при выполнении условия (5) пучок и плазма эквивалентны высокодобротным колебательным системам. Следовательно, для высокоэффективного взаимодействия в такой модели необходимо точное выполнение условия резонанса между системами или же условия синхронизма между медленной пучковой и плазменной волнами (для быстрой пучковой волны взаимодействие с плазменной волной не приводит к неустойчивости)

$$\widetilde{\Omega}_p = k_{\parallel} u - \widetilde{\Omega}_b. \tag{6}$$

Однако (6) может нарушиться из-за таких нелинейных факторов, как изменение средней скорости частиц и зависимость плазменных частот от амплитуд волн. Если резонанс волн нарушится уже при малой глубине модуляции частиц по плотности, то возможно провести аналитическое решение задачи. Воспользуемся для этого методом разложения по траекториям частиц [6].

Будем искать решения уравнений (1) в виде

$$y_\alpha = y_0 + W_\alpha + \frac{1}{2}\sum_{l=1}^{\infty}(a_{\alpha l} e^{ily_0} + \text{к. с.}), \tag{7}$$

где W_α и $a_{\alpha l}$ — функции времени, описывающие соответственно изменение средней скорости системы частиц сорта α и возбуждение в ней волн. Предположим следующую иерархию малостей величин: $a_{\alpha 1}$ — первого порядка; $a_{\alpha 2}$ — второго и т. д. Тогда, ограничившись вкладом вплоть до вторых гармоник волн, используя условие синхронизма (6), пренебрегая всеми членами в разложении, содержащими параметр взаимодействия G в степени более высокой, чем 3/2, и применив метод медленных амплитуд, после громоздких вычислений получим для амплитуд волн пучка и плазмы в приближении кубической нелинейности следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{d\widetilde{a}_{1b}}{dt} &= \frac{1}{4}\, i\widetilde{\Omega}_b \frac{3(R_{b1}-R_{b2})}{R_{b2}-4R_{b1}} |\widetilde{a}_{1b}|^2\, \widetilde{a}_{1b} + \frac{1}{2}\, i\Omega_p^2 \widetilde{\Omega}_b^{-1} G_1 \widetilde{a}_{1p} e^{i(W_b - W_p)}, \\ \frac{d\widetilde{a}_{1p}}{dt} &= -\frac{1}{4}\, i\widetilde{\Omega}_p \frac{3(R_{p1}-R_{p2})}{R_{p2}-4R_{p1}} |\widetilde{a}_{1p}|^2\, \widetilde{a}_{1p} - \frac{1}{2}\, i\Omega_b^2 \widetilde{\Omega}_p^{-1} G_1 \widetilde{a}_{1b} e^{i(W_p - W_b)}, \end{aligned} \tag{8}$$

где $\widetilde{a}_{1\alpha}$ — медленные амплитуды волн. Далее, вводя новые переменные

$$a = \widetilde{a}_{1b} e^{i(W_p - W_b)},\quad b = \widetilde{a}_{1p},$$

и учитывая первый интеграл системы уравнений (8), сведем ее к виду

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} &= \frac{1}{4}\, i\widetilde{\Omega}_b C_b |a|^2 a + \frac{1}{2}\, i\,(\widetilde{\Omega}_p |b|^2 + \widetilde{\Omega}_b |a|^2)\, a + \frac{1}{2}\, i\Omega_p^2 \widetilde{\Omega}_b^{-1} G_1 b, \\ \frac{db}{dt} &= -\frac{1}{4}\, i\widetilde{\Omega}_p C_p |b|^2 b - \frac{1}{2}\, i\Omega_b^2 \widetilde{\Omega}_p^{-1} G_1 a, \end{aligned} \tag{9}$$

где $C_\alpha = 3(R_{\alpha 1} - R_{\alpha 2})/(R_{\alpha 2} - 4R_{\alpha 1})$.

Уравнения (9) имеют решения

$$|a|^2 = \frac{|a_{\max}|^2}{\operatorname{ch}(2|\delta\omega|\, t)},\quad |b|^2 = \frac{|b_{\max}|^2}{\operatorname{ch}(2|\delta\omega|\, t)},\quad -\infty < t < \infty. \tag{10}$$

Максимальные значения амплитуд пучковой и плазменной волн даются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} |a_{\max}| &= 4\left\{\frac{|\delta\omega|}{\widetilde{\Omega}_b}\left[2 + C_b + \frac{\Omega_b^2}{\Omega_p^2}(2 + C_p)\right]^{-1}\right\}^{1/2}, \\ |b_{\max}| &= 4\left\{\frac{|\delta\omega|}{\widetilde{\Omega}_p}\left[2 + C_p + \frac{\Omega_p^2}{\Omega_b^2}(2 + C_b)\right]^{-1}\right\}^{1/2}, \end{aligned} \tag{11}$$

где $\delta\omega$ — инкремент, определяемый формулой (3).

Результаты (10)—(11) имеют силу при выполнении условий

$$|a_{1b}| \ll 1, \quad |a_{1p}| \ll 1,$$

которые в итоге сводятся к условию (4), т. е. к требованию малости $\widetilde{G}$.

Таким образом, механизм насыщения пучково-плазменной неустойчивости в режиме коллективного эффекта Черенкова обусловлен нелинейным сдвигом частот, который возникает из-за изменения средней скорости частиц и возбуждения высших гармоник волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Файнберг Я. Б.//Атомная энергия. 1961. 11. С. 313—335. [2] Незлин М. В.//УФН. 1976. 120, № 3. С. 481—495. [3] Богданов В. В., Кузелев М. В., Рухадзе А. А.//Физика плазмы. 1984. 10, № 3. С. 548—553. [4] Александров А. Ф., Кузелев М. В., Халилов А. Н. Препринт физ. фак. МГУ. № 17/1986. М., 1986. [5] Кузелев М. В., Панин В. А.//Изв. вузов. Физика. 1985. № 3. С. 120—123. [6] Кузелев М. В. и др.//ЖЭТФ. 1986. 91, № 5(11). С. 1620—1632.

Поступила в редакцию
25.11.86

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1987. Т. 28, № 4

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 621.373.826

СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД В НЕПРЕРЫВНОМ ЛАЗЕРЕ НА КРАСИТЕЛЕ С НЕСТАЦИОНАРНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

А. С. Абубакиров, Н. В. Кравцов, В. П. Протасов, В. А. Сидоров

(НИИЯФ)

Лазеры на красителях используются для получения сверхкоротких импульсов излучения. При непрерывной накачке синхронизация мод обычно реализуется при помещении внутрь резонатора такого лазера пассивного нелинейного элемента [1]. Однако при этом ограничиваются возможности перестройки длины волны излучения лазера.

Ниже рассмотрен способ синхронизации мод в непрерывном лазере на красителе, основанный на методе кинематической модуляции и лишенный указанного недостатка.

Кинематическая синхронизация мод (КСМ) является эффективным методом получения сверхкоротких импульсов излучения (СКИ) в непрерывных твердотельных лазерах. Полученные экспериментальные результаты [2—4] в этом случае хорошо описываются теорией [5, 6].

Отметим, что непосредственное использование результатов теоретических работ [4, 5] применительно к лазерам на красителях некорректно ввиду большого различия в параметрах активных сред и невыполнения ряда ограничивающих допущений, сделанных в этих работах.

В настоящей работе приводятся первые экспериментальные результаты, демонстрирующие возможность получения СКИ в непрерывных лазерах на красителях с нестационарным резонатором и наличие существенных особенностей в динамике излучения такого лазера по сравнению с твердотельными лазерами в режиме КСМ.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Исследовался непрерывный струйный лазер, активная среда которого представляла собой раствор родамина 6Ж в этиленгликоле. Возбуждение активной среды производилось непрерывным аргоновым лазером мощностью около 1,5 Вт. Перестройка длины волны генерации производилась в пределах 580—630 нм с помощью внутрирезонаторного селектора. Одно из зеркал резонатора лазера на красителе крепилось на вибраторе, что обеспечивало периодическое изменение длины резонатора с частотами $f_к = 260$ Гц или 22 кГц. Относительное изменение длины резонатора составляло величину порядка 10^{-4}.

Исследования показали, что в обычном линейном резонаторе КСМ в лазере на красителе не возникает. Для реализации режима КСМ в таком лазере оказалось необходимым введение в резонатор дополнительных селектирующих элементов, обеспе-