

МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЛЕНГМЮРОВСКОЙ ВОЛНЫ В УСКОРИТЕЛЯХ НА БИЕНИЯХ

Я.Л.Богомолов, А.Г.Литвак, А.М.Фейгин

Показано, что развитие модуляционной неустойчивости ленгмюровских колебаний, возбуждаемых на частоте биений двух электромагнитных волн, существенно снижает эффективность ускорения электронов в лазерном ускорителе.

1. В настоящее время активно обсуждается возможность создания ускорителей, в которых увеличение энергии электронов происходит вследствие их резонансного взаимодействия с ленгмюровской волной, возбуждаемой копланарными пучками лазерного излучения с близкими частотами ¹. Интерес к этому предложению настолько велик, что наряду с теоретическим рассмотрением уже проведены первые демонстрационные эксперименты ².

По-существу, эффективность такой схемы ускорения определяется двумя параметрами: максимальным значением амплитуды плазменной волны E_m и ее "временем жизни" t_l . В пионерских работах ограничение амплитуды связывается с опрокидыванием волны (возникновением многопоточкового движения осциллирующих в поле волны электронов). В данной работе исследовано влияние модуляционной неустойчивости на процесс возбуждения быстрой ленгмюровской волны (БЛВ). Показано, что развитие неустойчивости может разрушить БЛВ раньше, чем произойдет ускорение захваченных волной электронов.

2. Рассмотрим возбуждение БЛВ двумя плоскими электромагнитными волнами

$$E_1 = E_1 y^0 \exp \left[\omega_1 \left(t - \frac{x}{c} \right) \right], \quad E_2 = E_2 y^0 \exp \left[\omega_2 \left(t - \frac{x}{c} \right) \right], \quad (1)$$

распространяющимися в однородной плазме, ленгмюровская электронная частота которой ω_0 равна частоте биений: $\omega_0 = \omega_1 - \omega_2 \ll \omega_1, \omega_2$.

Источником возбуждения потенциальной плазменной волны $\vec{E} = [E(r, t)\exp(i\omega_0 t + \text{к.с.})]$, $|\partial E/\partial t| \ll \omega_0 |E|$, является нелинейный ток на частоте ω_0 , плотность которого j определяется выражением $j = x^0 i e \omega_0^2 E_1 E_2 \exp(-ikx) / \pi m (\omega_1 + \omega_2)^2 c$. Здесь $k \approx \omega_0/c$, c — скорость света, e и m — заряд и масса покоя электрона, $v_T = (T/m)^{1/2}$, T — электронная температура плазмы. Ограничимся рассмотрением чисто одномерной ситуации, когда нелинейность плазмы связана только с зависимостью массы электронов от скорости их осцилляций в поле волны¹⁾. В этом случае в приближении слабого релятивизма $E \ll E_r = \sqrt{\frac{2}{3}} m \omega_0 c / e$ процесс возбуждения БЛВ внешним полем (1) описывается уравнением

$$i \frac{\partial e}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 e}{\partial \xi^2} - |e|^2 e = d - i \gamma e. \quad (2)$$

В (2) учтены дисперсионные и диссипативные свойства плазмы и введены безразмерные величины

$$e(\xi, \tau) = E(x, t) / E_r, \quad d = 4\pi |j| / \omega_0 F_r, \quad (3)$$

$$\tau = \omega_0 t / 2, \quad \xi = x \omega_0 / \sqrt{3} v_T, \quad \gamma = 2\hat{\nu} / \omega_0,$$

оператор $\hat{\nu}$ описывает диссипацию энергии БЛВ. При выводе (2) предположено, что безразмерное волновое число БЛВ $\kappa' = \sqrt{3} v_T / c = 0^2$, т. е. БЛВ в (2) отвечает нулевой пространственной фурье-гармонике поля $e_0 = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L e d\xi$. Уравнение (2) является частным случаем

исследованной в работе⁴ математической модели, описывающей развитие модуляционной неустойчивости и возбуждение сильной ленгмюровской турбулентности в плазме, нелинейные свойства которой определяются стрикцией. В⁴ показано, в частности, что главной особенностью турбулентности, возбуждаемой источником с заданной величиной электрической индукции "d", является фазовый механизм взаимодействия турбулентности с накачкой: эффективность "усвоения" энергии источника определяется разностью фаз нулевой ленгмюровской гармоники $e_0 = a_0 \exp(i\varphi_0)$ (a_0 и φ_0 — действительные величины) и накачки. По этой причине модуляционная неустойчивость однородного поля e_0 , формирующая солитонную пространственную структуру ленгмюровских волн, автоматически приводит к появлению нелинейного сдвига фазы φ_0 и "отключает" ленгмюровские колебания от внешнего источника. Вследствие этого величина a_0 при "включении" модуляционной неустойчивости резко уменьшается.

Справедливость приведенных результатов для поля БЛВ, возбуждаемого двумя заданными ВЧ-волнами с близкими частотами, подтверждает исследование решений уравнения (2) с помощью ЭВМ. На рисунке приведены зависимости от времени энергии БЛВ a_0^2 и полной энергии W , запасенной в турбулентности³⁾. Видно, что отличительная особенность модели (2) состоит в том, что модуляционная неустойчивость развивается в осциллирующем во времени (а не в монотонно растущем, как в⁴) поле e_0 . Эти осцилляции вызваны нелинейным ("релятивистским") сдвигом частоты БЛВ и могут быть исследованы аналитически, для чего в (2) следует пренебречь пространственной дисперсией ($\partial/\partial \xi = 0$).

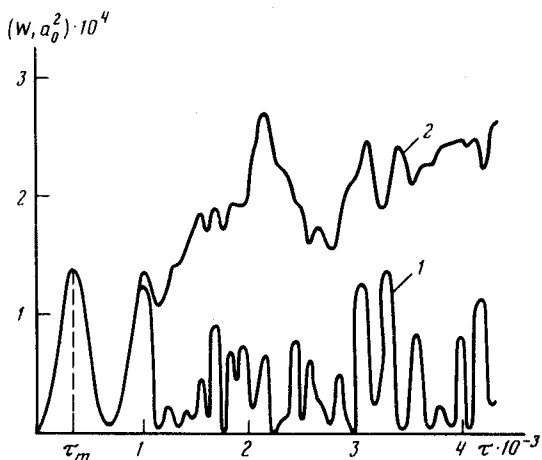
1) Мы имеем в виду случай достаточно сильных волн E_1 и E_2 , когда релятивистская нелинейность "срабатывает" (с точки зрения развития модуляционной неустойчивости) быстрее, чем стрикция. Соответствующее условие на величину накачки имеет вид $d > (m/16M)^{1/2}$, где M — масса иона.

2) Это ограничение не вносит качественных изменений в процесс возбуждения БЛВ, а в случае не слишком малой накачки $d > 16(v_T/c)^3$ не сказывается и на количественных характеристиках БЛВ.

3) В численных расчетах полагалось, что диссипация энергии ленгмюровских волн связана с линейным затуханием Ландау.

Соответствующий анализ, проведенный в ^{5 4)}, показывает, что амплитуда БЛВ достигает максимальных значений $a_0 = a_{0m}$ в моменты времени $\tau = n\tau_m$ ($n = 1, 2, \dots$),

$$a_{0m} = (4d)^{1/3}, \quad \tau_m \approx 4,8(4d)^{-2/3}.$$



Зависимость от времени энергии БЛВ (кривая 1) и полной энергии ленгмюровских волн (кривая 2), $d = 4 \cdot 10^{-4}$

3. На рисунке видно, что "время жизни" τ_l БЛВ (до начала развития модуляционной неустойчивости) равно ⁵⁾ $\tau_l \approx 3\tau_m$. Сравнивая τ_l с временем ускорения электрона БЛВ τ_a ¹, $\tau_a = \pi\omega_1^2/\omega_0^2$, получаем, что в достаточно сильной волне биений

$$d \gtrsim d_a, \quad d_a = (\omega_0/\omega_1)^3, \quad (4)$$

разрушение БЛВ из-за модуляционной неустойчивости произойдет раньше, чем ускорятся захваченные БЛВ электроны.

С учетом того, что постоянное магнитное поле $\mathbf{B}_0 = B_0 \mathbf{y}^0$, $B_0 \lesssim a_{0m} E_r \omega_0/\omega_1$, не влияет на динамику БЛВ ⁵, произведем аналогичную оценку для серфатрона ¹. Сопоставляя время ускорения электрона в серфатроне τ_{as} ⁶, $\tau_{as} \approx \omega_1^2/(\omega_0^2 a_{0m})$, с τ_l найдем, что модуляционная неустойчивость воспрепятствует набору энергии электроном при

$$d > d_s, \quad d_s = (4\omega_0/\omega_1)^6/4. \quad (5)$$

С помощью (3) условия (4), (5) удобно переписать в виде

$$q > q_a, \quad \lambda^2 q_a = 10^{18} (\omega_0/\omega_1)^3, \quad (6)$$

$$q > q_s, \quad \lambda^2 q_s = 10^{21} (\omega_0/\omega_1)^6. \quad (7)$$

Здесь q — плотность потока излучения (в Вт/см²), λ — длина волны (в мкм). Для условий эксперимента ² ($\lambda = 10$ мкм, $\lambda_p = (2\pi/\kappa) = 100$ мкм) "граничные" значения плотности потока излучения (6), (7) невелики: $q_a \approx q_s \approx 10^{13}$ Вт/см². Для сравнения укажем, что опрокидывание БЛВ с амплитудой $E_{0m} = a_{0m} E_r$ происходило бы в этих условиях только при потоках $q \gtrsim 3 \cdot 10^{16}$ Вт/см².

Литература

1. Dawson J.M. Proceedings of the ICPP, Lausanne, 1984, v. II, p. 837.
2. Clayton C. et al. Phys. Rev. Lett., 1985, 54, 558.

4) В том числе исследование с помощью ЭВМ случая релятивистски сильной БЛВ ⁵.

5) а) Можно показать, что в отсутствие диссипации ($\hat{\gamma} = 0$) отношение (τ_l/τ_m) не зависит от величины накачки d ; б) строго говоря, модель (2) позволяет определить только время жизни БЛВ, а нелинейная стадия модуляционной неустойчивости может протекать иначе, нежели это описывается (2). Так, при $d > (v_T/c)^{3/2}$ нелинейная стадия должна сопровождаться опрокидыванием возникающей солитонной структуры.

3. *Литвак А.Г.* Изв. высш. уч. зав., сер. Радиофизика, 1964, 7, №3.
4. *Vogomolov Y.L.et al.* Proceedings of the XV ICPIG, Minsk, 1981, part 1, p. 211.
5. *Tang C., Sprangle P., Sudan K.* Phys. Fluids, 1985, 28, 1974.
6. *Грибов Б.Э., Сагдеев Р.З., Шапиро В.Д., Шевченко В.И.* Письма в ЖЭТФ, 1985, 42, 54.

Институт прикладной физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
15 октября 1986 г.