

ЭФФЕКТ ПЛАЗМЕННОГО МАЗЕРА И ПУЧКОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ

С. В. Владимиров, С. И. Попель*, Минг Ю**

Рассмотрено влияние эффекта плазменного мазера на развитие пучковой неустойчивости. Найдены условия, при выполнении которых такое влияние оказывается существенным.

В неизотермической плазме ($T_i \ll T_e$, где T_i , T_e — соответственно температура ионов и электронов) существенное влияние на развитие пучковой неустойчивости может оказать ионно-звуковая турбулентность. Нелинейные процессы, в которых участвуют ионно-звуковые волны, такие как распадное взаимодействие ленгмюровских и ионно-звуковых волн, индуцированное рассеяние ленгмюровских волн на электронах с превращением в ионно-звуковые, могут приводить /1/ к стабилизации пучковой неустойчивости. Важными при описании пучковой неустойчивости в случае пучков низкой плотности оказываются /2/ и радиационно-резонансные взаимодействия (РРВ) ионно-звуковых волн и электронов плазмы. Согласно /3, 4/, нелинейное взаимодействие резонансных (ленгмюровских) и нерезонансных (ионно-звуковых) с пучком волн — эффект плазменного мазера /5, 6/ — может приводить к ускорению электронов пучка, причем темп увеличения энергии электронов за счет этого эффекта может оказаться выше темпа изменения энергии электронов, обусловленного квазилинейным взаимодействием. Таким образом, влияние эффекта плазменного мазера на динамику пучковой неустойчивости может оказаться существенным.

Пусть в бесстолкновительной плазме, помещенной во внешнее магнитное поле $B_0 = (0, 0, B_0)$, имеются ионно-звуковые волны и одномерный пучок электронов с функцией распределения $\Phi_v^{(b)}$, концентрацией $n_b = \int \Phi_v^{(b)} dv$ и характерной скоростью $v_0 = (0, 0, v_0)$. Считаем магнитное поле B_0 достаточно сильным для выполнения следующих неравенств: $\omega_{Be(i)} \gg \{\omega_{pe(i)}, |k|v_{Te(i)}, |q|v_{Te(i)}\}$, где $\omega_{Be(i)} = |e|B_0/m_{e(i)}c$ — электронная (ионная) циклотронная частота, $\omega_{pe(i)} = (4\pi n_b e^2/m_{e(i)})^{1/2}$ —

* Институт динамики геосфер РАН.

** Институт теоретической физики 1, Рурский университет, Бохум, ФРГ.

электронная (ионная) плазменная частота, $\nu_{Te(i)} = (T_{e(i)}/m_{e(i)})^{1/2}$, n — концентрация электронов плазмы, e — заряд электрона (предполагается, что ионы однозарядны), $m_{e(i)}$ — масса электрона (иона), c — скорость света; q и k волновые вектора соответственно ионно-звуковых и ленгмюровских волн. Предполагаем, что выполнены неравенства $n_b/n \ll 1$, $\nu_{Te} \ll \nu_0 \ll c$, условие применимости кинетического описания $\Delta v/\nu_0 \gg (n_b/n)^{1/3}$ (где Δv — разброс по скоростям электронов в пучке, $\Delta v \ll \nu_0$), а также, что в области скоростей пучка функция распределения электронов плазмы пренебрежимо мала по сравнению с $\Phi_v^{(b)}$. Кроме того, полагаем, что спектр ионно-звуковых волн сосредоточен в области $q = (0, 0, q)$, подчиняющейся условиям $(4m_e/9m_i)^{1/2} + 2\nu_{Te}/\nu_1 < |q|v_{Te}/\omega_{pe} \ll 1$, где ν_1 — наименьшая скорость электронов в пучке. При этом запрещены распадные взаимодействия ленгмюровских и ионно-звуковых волн /2/, а также несущественен /1/ эффект индуцированного рассеяния, соответствующий резонансу $\omega - \Omega - (k_{||} - q_{||})v_{||} = 0$ (где Ω , ω — частоты соответственно ионно-звуковых и ленгмюровских волн, индекс $||$ обозначает компоненту вектора, параллельную внешнему магнитному полю).

В рассматриваемых условиях ионно-звуковые волны имеют закон дисперсии $\Omega = |q_{||}|v_s = |q|v_s$, где $v_s = (T_e/m_i)^{1/2}$, поэтому для них не может быть выполнено условие черенковского резонанса с частицами пучка $\Omega = q_{||}v_{||}$ (ввиду $v_{||} \approx \nu_0 \gg v_s$). В свою очередь, такое условие $\omega = k_{||}v_{||}$ может быть выполнено для ленгмюровских волн (циклотронные резонансы типа $\omega - k_{||}v_{||} - \nu\omega_{Be} = 0$, $\omega - \Omega - (k_{||} - q_{||})v_{||} - \nu\omega_{Be} = 0$ при $\nu \neq 0$ вносят пренебрежимо малый вклад при рассматриваемых здесь значениях B_0 и поэтому не учитываются). Таким образом, ионно-звуковые волны могут трактоваться в терминах /3 — 7/ как нерезонансные с частицами пучка, а ленгмюровские — как резонансные. Вычисление наиболее существенных членов нелинейного инкремента раскочки резонансных (в данной ситуации ленгмюровских) волн /7/, обусловленного эффектом плазменного мазера, в применении к рассматриваемой ситуации при $k \sim \omega_{pe}/\nu_0$ (здесь и ниже обозначено $k = k_{||}$) дает:

$$\gamma_k^{nl} \approx \frac{\pi}{8} \frac{W^s}{nT_e} \frac{\partial^3 \Phi_v}{\partial v^3} \Big|_{v = \omega_{pe}/k} \frac{\nu_{Te}^4}{n} \omega_{pe} + \gamma_k^{nl(pol)}, \quad (1)$$

где W^s — плотность энергии ионно-звуковых волн; Φ_v — одномерная функция распределения электронов, включающая в себя как распределение частиц пучка, так и плазмы ($n + n_b = \int \Phi_v dv$); при $k \approx \omega_{pe}/\nu_0$ очевидно $\Phi_v \approx \Phi_v^{(b)}$, $\gamma_k^{nl(pol)}$ — слагаемое в нелинейном инкременте, обусловленное

вкладом от токов второго порядка по полю в нелинейную диэлектрическую проницаемость резонансных волн /7/, имеющее при $k \sim \omega_{pe} / v_0$ порядок: $\gamma_k^{nl(pol)} \sim \gamma_k^L (n_b / n) (W^3 / n T_e) (\omega_{pe}^3 / q_s^3 v_{Te}^3) (m_i / m_e)^{1/2} (v_{Te} / v_0)^4 \times (v_{Te} / \Delta v)^2$, где γ_k^L — обычный квазилинейный инкремент /1/, q_s — характерное значение $|q|$ в спектре ионно-звуковых волн. Приведенная выше оценка $\gamma_k^{nl(pol)}$ дает лишь абсолютную величину $\gamma_k^{nl(pol)}$, но не позволяет определить знак этой величины в общем случае. Если распределение частиц пучка имеет вид

$$\Phi_v^{(b)} = (n_b / \sqrt{2\pi} v_{Tb}) \exp[-(v - v_0)^2 / 2v_{Tb}^2], \quad (2)$$

то более точное вычисление дает $\gamma_k^{nl(pol)} \simeq \gamma_k^L [1 - J(x^2)] (m_i / m_e)^{1/2} (n_b \omega_{pe}^3 / 2n q_s^3 v_{Te}^3) (W^3 / n T_e) \times v_{Te}^6 / v_0^4 v_{Tb}^2$, где $J(x^2) = 2xF(x)$, $F(x) = \exp(-x^2) \int_0^x \exp(t^2) dt$, $x^2 = (\omega_{pe} - kv_0)^2 / 2k^2 v_{Tb}^2$. Поскольку $F'(x) = 1 - J(x^2)$, а максимальное значение $F(x) \approx 0,54$ достигается при $x = x_0 \approx 0,92$, то знак $\gamma_k^{nl(pol)}$ совпадает со знаком γ_k^L при $x^2 < x_0^2 \approx 0,85$ и противоположен ему при $x^2 > x_0^2$.

Предположим, что

$$n_b / n \ll (m_e / m_i)^{1/2} (q_s^3 v_{Te}^3 / \omega_{pe}^3) v_0^2 / v_{Te}^2. \quad (3)$$

В этом случае второе слагаемое в (2) оказывается пренебрежимо малым по сравнению с первым. Условие преобладания γ_k^{nl} над γ_k^L при этом имеет вид

$$1 \ll (W^3 / n T_e) v_{Te}^4 / v_0^2 \Delta v^2 \quad (4)$$

и совпадает с условием преобладания нелинейного взаимодействия резонансных и нерезонансных волн над квазилинейным при описании темпа изменения энергии частиц пучка /4/. Если одновременно выполняются неравенства (3) и (4), то характер развития пучковой неустойчивости определяется нелинейным взаимодействием. Например, при симметричном распределении частиц пучка $\Phi^{(b)}(v - v_0) = \Phi^{(b)}(v_0 - v)$ (причем $\partial \Phi^{(b)} / \partial v > 0$, а $\partial^3 \Phi^{(b)} / \partial v^3 < 0$ при $v < v_0$) и выполнении

условий (3) и (4), ленгмюровские волны с $k > \omega_{pe} / v_0$ затухают, тогда как волны с $k < \omega_{pe} / v_0$ раскачиваются. В аналогичной ситуации при выполнении условия противоположного (4), когда реализуется режим развития пучковой неустойчивости, обусловленный квазилинейным взаимодействием, происходит раскачка волн с $k > \omega_{pe} / v_0$. Также возможна ситуация, когда происходит стабилизация пучковой неустойчивости за счет эффекта плазменного мазера. Такая ситуация реализуется, например, если пучок не симметричен относительно $v = v_0$, и, наряду с (3), (4), выполнены следующие условия: $\partial \Phi^{(b)} / \partial v > 0$, $\partial^3 \Phi^{(b)} / \partial v^3 < 0$ при $v_1 < v < v_0$; $\partial \Phi^{(b)} / \partial v < 0$, $\partial^3 \Phi^{(b)} / \partial v^3 \leq 0$ при $v_0 < v < v_2$ (здесь v_1, v_2 — соответственно наименьшая и наибольшая скорости частиц пучка). Примером распределения, удовлетворяющего этим условиям, может служить следующее: $\Phi_v^{(b)} = A(v_0 - v_1)^m [1 - (v_0 - v)/(v_0 - v_1)]^m$ при $v_1 \leq v \leq v_0$ и $\Phi_v^{(b)} = A(v_0 - v_1)^m [1 - (v - v_0)/(v_2 - v_0)]^n$ при $v_0 \leq v \leq v_2$, где $1 < m < 2$, $n > 2$, а положительная постоянная A определяется из условия нормировки функции распределения.

Предположим, что выполнено условие противоположное (3). В этом случае $\gamma_k^{nl} \simeq \gamma_k^{nl(pol)}$. Выше отмечалось, что в случае распределения частиц пучка (2) знак $\gamma_k^{nl(pol)}$ противоположен знаку γ_k^L при

$$|\omega_{pe} - kv_0| / \sqrt{2} kv_{Tb} > 0,92. \quad (5)$$

Таким образом, если выполнено также и условие

$$(n_b/n) (W^s/nT_e) (v_{Te}^4/v_0^2 v_{Tb}^2) \gg (m_e/m_i)^{1/2} (q_s v_{Te} / \omega_{pe})^3 v_0^2 / v_{Te}^2, \quad (6)$$

то $|\gamma_k^{nl}| \gg |\gamma_k^L|$, и эффект плазменного мазера приводит к раскачке ленгмюровских волн с $k < \omega_{pe} / v_0$, подчиняющихся условию (5), тогда как ленгмюровские волны с $k > \omega_{pe} / v_0$ (k удовлетворяют (5)) не могут быть возбуждены. Отметим также, что в случае, когда выполнены (6) и условие, противоположное (3), волны с волновыми векторами $k > \omega_{pe} / v_0$, не удовлетворяющими (5), раскачиваются с инкрементом $\gamma_k \simeq \gamma_k^{nl(pol)}$.

Итак, если в плазме присутствуют достаточно интенсивные ионно-звуковые волны, эффект плазменного мазера может оказывать существенное влияние на развитие пучковой неустойчивости.

Один из авторов (С. В. Владимиров) выражает признательность фонду Гумбольдта, стипендиатом которого он является.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цытович В. Н. Нелинейные эффекты в плазме, М., Наука, 1967.
2. Попель С. И. Физика плазмы, **19**, 60 (1993).
3. Krivitsky V. S., Vladimirov S. V. J. Plasma Phys., **46**, 219 (1991).
4. Владимиров С. В., Кривицкий В. С. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 1, 37 (1990).
5. Tsytovich V. N., Stenflo L., Wilhelmsson H. Phys. Scripta, **11**, 251 (1975).
6. Krivitsky V. S., Tsytovich V. N., Vladimirov S. V. Phys. Reports, **218**, 141 (1992).
7. Popel S. I., Vladimirov S. V., Yu M. Y. Phys. Scripta, **47**, № 1 (1993).

Институт общей физики РАН

Поступила в редакцию 25 ноября 1992 г.