

СТАЦИОНАРНАЯ ЛЕНГМИРОВСКАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ПЛАЗМЫ

В. Ю. Быченко, В. В. Пустовалов, В. П. Силин, В. Т. Тихончук

УДК 533.951

Исследован вопрос об устойчивости плазмы при наличии в ней пакета ленгмировских волн конечной ширины и амплитуды. Найдена зависимость от ширины пакета пороговой интенсивности плазменных волн, определяющей по порядку величины уровень стационарной ленгмировской турбулентности плазмы.

В последнее время широко ведутся исследования параметрической турбулентности плазмы. Их главной целью является отыскание уровня плазменных турбулентных флуктуаций, определяющего эффективность нелинейной параметрической трансформации электромагнитного излучения накачки в энергию колебаний и частиц плазмы. Детальное изучение отдельных нелинейных механизмов насыщения параметрических неустойчивостей, инициирующих турбулентное состояние плазмы, указывает на единую природу механизмов насыщения /1/ и параметрической неустойчивости /2/. В самом деле, при достаточно высокой интенсивности внутренних полей плазма может быть неустойчива относительно раскачки собственных колебаний самим внутренним турбулентным полем. Примером такой неустойчивости является процесс распада монохроматической плазменной волны на два волновых возмущения, рассмотренный в работе /3/. Нелинейные механизмы насыщения проявляются в перераспределении энергии плазменных волн по спектру, что, в частности, приводит к конечной спектральной ширине линии плазменных волн. В сочетании с установленным в работе /4/ положением о большей устойчивости пакета плазменных волн конечной спектральной ширины по сравнению с монохроматической волной, результаты исследования параметрической турбулентности /1/ позволяют сделать вывод о том, что параметрические неустойчивости, развивающиеся в плазме под действием первоначального узкого спектрального распределения плазменных волн, могут привести к уширению их спектра (которой при достаточно боль-

шой ширине окажется устойчивым), т.е. к насыщению уровня шума. При этом пороговое для раскачки значение интенсивности пакета волн должно по порядку величины определять верхнюю границу стационарного уровня параметрической турбулентности, который может устанавливаться в плазме за счет различных нелинейных процессов, приводящих к уширению спектра волн. Данная работа посвящена изучению устойчивости пакета плазменных волн с целью именно такой оценки величины стационарного уровня параметрической турбулентности.

Рассмотрим пакет плазменных волн с характерной частотой ω_0 , близкой к плазменной частоте ω_p ($\omega_p = \sqrt{\omega_{Le}^2 + \omega_{Li}^2}$; $\omega_{Le(1)}$ - ленгмюровская частота электронов (ионов)), волновым вектором $\vec{k}_0$ и шириной спектра $\Delta\omega \ll \omega_0$. Предполагая флуктуации стационарными, запишем правило статистического усреднения парных произведений фурье-компонент электрического поля пакета $\vec{E}(\omega, \vec{k})$ в виде $\langle \vec{E}(\omega + \omega_0, \vec{k} + \vec{k}_0) \vec{E}(\omega' \pm \omega_0, \vec{k}' \pm \vec{k}_0) \rangle = \frac{1}{4} E^2 u_{\pm}(\omega, \vec{k}) \delta(\omega + \omega') \delta(\vec{k} + \vec{k}')$. Для исследования вопроса об устойчивости плазмы при наличии в ней пакета высокочастотных волн достаточно ограничиться линейной по возмущениям флуктуационного поля $\delta\vec{E}$ теорией. При этом будем интересоваться таким случаем, когда корреляция полей $\delta\vec{E}$ и $\vec{E}$ не существенна, $\langle \vec{E}(\omega, \vec{k}) \delta\vec{E}(\omega', \vec{k}') \rangle = 0$. Используя эти правила, можно получить дисперсионные уравнения для низкочастотных $\delta\vec{E}(\omega, \vec{k})$ и высокочастотных $\delta\vec{E}(\omega \pm \omega_0, \vec{k} \pm \vec{k}_0)$ возмущений ($|\omega| \ll \omega_0$). Спектры таких возмущений и пороги отвечающих им неустойчивостей существенно зависят от задания корреляционных функций $u_{\pm}$. В частности, приближению хаотических фаз соответствует $u_{\pm} = 0$. С другой стороны, для монохроматической волны $u_{+}(\omega, \vec{k}) = u_{-}(\omega, \vec{k}) = \delta(\omega)\delta(\vec{k})$. В этом случае имеем обычные результаты теории параметрического резонанса [2]. Имея в виду, во-первых, что при $u_{+} = 0$ пороги неустойчивостей выше, чем при $u_{+} = u_{-}$, во-вторых, обобщение теории параметрического резонанса на случай немонохроматической волны накачки, рассмотрим $u_{+}(\omega, \vec{k}) = u_{-}(\omega, \vec{k}) \neq \delta(\omega)\delta(\vec{k})$. Для определенности будем считать, что в плазме имеется пакет ленгмюровских волн $\omega_0 = \omega_p \left(1 + \frac{3}{2} k_0^2 r_{De}^2\right)$ (r_{De} - дебаевский радиус электронов), распределение которого зададим в виде $u_{\pm}^{-1} = \pi^2 \Delta\omega \Delta k \left[1 + (\omega/\Delta\omega)^2\right] \times$

$\times [1 + (k/\Delta k)^2]$, где $\Delta\omega = \Delta kv_g$ (v_g - групповая скорость плазменных волн) при $\Delta k \ll k_0$ и $\Delta\omega = \frac{3}{2} \omega_p (\Delta k r_{De})^2$ при $\Delta k \gg k_0$.

Поскольку наибольший интерес представляет вопрос о том, какой максимально возможный уровень плазменного шума является устойчивым во всем интервале волновых чисел, рассмотрим область длин волн, отвечающую столкновительной диссоциации высокочастотных колебаний, так как, согласно теории параметрического резонанса [2], именно в этой области пороги неустойчивостей минимальны. Тогда высокочастотная диссипация определяется частотой столкновений электронов с ионами ν_{ei} при $k_0, \Delta k < k_{st} \approx r_{De}^{-1} \ln^{-1/2} \omega_{Le}^2 / \nu_{ei}$.

Остановимся сначала на вопросе об устойчивости плазмы относительно нарастания высокочастотных возмущений. В случае достаточно коротковолнового пакета $k_0 r_{De} \gg \omega_{Li} / \omega_{Le}$ с шириной $\Delta k \gg \nu_{ei} v_g^{-1}$, $\gamma_s v_g^{-1}$ (γ_s - декремент затухания ионного звука) для порогового поля $E_{пор}^2$ получаем $\Lambda \sim \Delta k r_{De} \nu_{ei} / \omega_{Li}$ ($\Lambda \equiv E_{пор}^2 / 8 \ln \epsilon_0 \epsilon_e$). Если $E^2 > E_{пор}^2$, то при $\Delta k \ll k_0$ неустойчивыми оказываются возмущения

со спектром $\omega = kv_g - \frac{3}{2} \omega_p k^2 r_{De}^2$ и длиной волны, сравнимой с длиной волны пакета $k_{пор} \sim k_0$, а при $\Delta k \gg k_0$ плазма модуляционно неустойчива ($\omega = kv_g$, $k_{пор} \ll k_0$). В длинноволновом пределе $k_0 r_{De} \ll \omega_{Li} / \omega_{Le}$ при любой ширине пакета имеет место модуляционная неустойчивость с этим же порогом при $\Delta k r_{De} \gg \omega_{Li} / \omega_{Le}$, а при $\Delta k r_{De} \ll \omega_{Li} / \omega_{Le}$ пороговое поле практически не меняется по сравнению с порогом для монохроматической волны [2] $\Lambda \sim \nu_{ei} / \omega_{Le}$.

Рассмотрим теперь неустойчивости, связанные с нарастанием в плазме низкочастотных возмущений. Длинноволновый пакет $k_0 r_{De} \ll \omega_{Li} / \omega_{Le}$ приводит к модуляционной неустойчивости при $\Delta k \ll k_0$ с порогом $\Lambda \sim \Delta kv_g / \omega_{Le}$, а при $\Delta k \gg k_0$ эта неустойчивость переходит в неустойчивость со спектром $\omega \sim \omega_p (k r_{De})^2$, для которой пороговые значения волнового числа и поля определяются соотношениями $k_{пор} \sim \Delta k$, $\Lambda \sim (\Delta k r_{De})^2$. Однако при $\Delta k r_{De} \gg \omega_{Li} / \omega_{Le}$ имеется возможность для возбуждения ионно-звуковой неустойчивости $\omega = \omega_{Li} k r_{De}$ с $k_{пор} \sim \Delta k$, порог которой $\Lambda \sim (\Delta k r_{De})^2 \gamma_s / \omega_s$ в неизотермической плазме значительно ниже. В случае $k_0 r_{De} \gg \omega_{Li} / \omega_{Le}$ всегда имеет место ионно-звуковая неустойчивость с этим порогом, $k_{пор} \sim \Delta k$, если $\Delta k \gg k_0$, и порогом $\Lambda \sim (\Delta kv_g / \omega_{Le}) \gamma_s / \omega_s$, $k_{пор} \sim k_0$, если

$k_0 \gg \Delta k \gg \nu_{ei} \nu_g^{-1}$, $\gamma_g \nu_g^{-1}$. В работе /4/ было получено условие $E^2/8\pi n_e \omega_e^2 < (\Delta k \tau_{De})^2$, при котором раскачка ионного звука ленгмювскими волнами отсутствует. Это соответствует нашему результату в случае $\gamma_g \sim \omega_g$, что реализуется в изотермической плазме.

На основании вышеизложенного можно заключить, что при $\Delta k \sim k_0 \gg \nu_{ei}/M\tau_{De}^{-1}$ в плазме могут существовать устойчивые ленгмювские шумы с интенсивностью $E^2/8\pi n_e \omega_e^2 \sim k_0 \tau_{De} \min(\nu_{ei}/\omega_{Li}, k_0 \tau_{De} \gamma_g/\omega_g)$. Откуда для водородной лазерной плазмы с температурой электронов $T_e \sim 1$ кэВ, плотностью $n_e \sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$, $k_0 \sim k_{st}$ получаем $E^2/8\pi \sim 10^{-2} n_e \omega_e^2$.

Полученные ограничения на величину полной энергии ленгмювских шумов справедливы для плазменной турбулентности, спектр которой в k -пространстве лежит в области столкновительной диссипации высокочастотных волн $k < k_{st}$. Спектральная перекачка энергии колебаний в область коротких длин волн $k > k_{st}$, обусловленная параметрическим механизмом насыщения, открывает возможность и более интенсивного устойчивого шума $E^2/8\pi \sim n_e \omega_e^2$, захватывающего коротковолновый диапазон, в котором существенна черенковская диссипация. Возникновение такой турбулентности указывает на существенное увеличение передачи энергии плазменных волн частицам.

Поступила в редакцию
26 июля 1976 г.

Л и т е р а т у р а

1. В. Ю. Быченко, В. В. Пустовалов, В. П. Силин, В. Т. Тихончук. Письма в ЖТФ, **2**, 847 (1976); Физика плазмы, **2**, 821 (1976).
2. В. П. Силин. Параметрическое воздействие излучения большой мощности на плазму. М., "Наука", 1973 г.
3. В. Н. Ораевский, Р. З. Сагдеев. ЖТФ, **32**, 1291 (1962).
4. А. А. Веденов, Л. И. Рудаков. ДАН СССР, **159**, 767 (1964).