

ОБ УСКОРЕНИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ ВОЛНАМИ, ВОЗБУЖДАЕМЫМИ В ПЛАЗМЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЬНОГО СВЧ ПОЛЯ

Д.М. Карфидов, К.Ф. Сергейчев

УДК 533.951

В условиях существования кинетической параметрической неустойчивости плазмы рассмотрена возможность захвата электронов в высокочастотную потенциальную волну с фазовой скоростью, в $3 \div 4$ раза превышающей тепловую скорость электронов. Проведено сравнение оценок ускорения с данными эксперимента.

В [1] экспериментально были исследованы потоки надтепловых (ускоренных) электронов, возникающих под действием сильного СВЧ поля в однородной неизотермической плазме с концентрацией, меньшей критической $n < n_c = m\omega_0^2/4\pi e^2$, где ω_0 — круговая частота поля; m, e — масса и заряд электрона. Параметр неизотермичности, определяемый отношением температур электронов и ионов, $T_e/T_i > 10$. Показано, что пороговое значение амплитуды внешнего СВЧ поля по отношению к появлению тока надтепловых электронов E_0 пор в зависимости от концентрации плазмы отвечает зависимости порога кинетической параметрической неустойчивости плазмы от концентрации [2, 3]. При этом пороги ускорения не зависели от частоты столкновений электронов ν (в исследованных пределах ее изменения $10^4 \lesssim \nu/\omega_0 \lesssim 10^{-2}$) и от массы ионов (плазма создавалась в аргоне или гелии). Было также получено удовлетворительное соответствие измеренных и расчетных зависимостей от концентрации плазмы показателя экспоненциального роста тока надтепловых электронов и инкремента неустойчивости: расхождение не превышало двух раз при изменении их величин в пределах двух порядков, причем установлена пропорциональность показателя и инкремента плазменной ионной ленгмюровской частоте.

Согласно [2, 3], под действием сильного электромагнитного поля, в котором скорость осцилляций электронов $v_E = eE_0/m\omega_0$ сравнима с их средней тепловой скоростью $v_{Te} = (\kappa T_e/m)^{1/2}$, в разреженной плазме $n < n_c$ при $T_e/T_i > n_c/n$ происходит раскачка потенциальных волн на частоте приложенного поля и на частоте, близкой к частоте ионно-звуковых колебаний

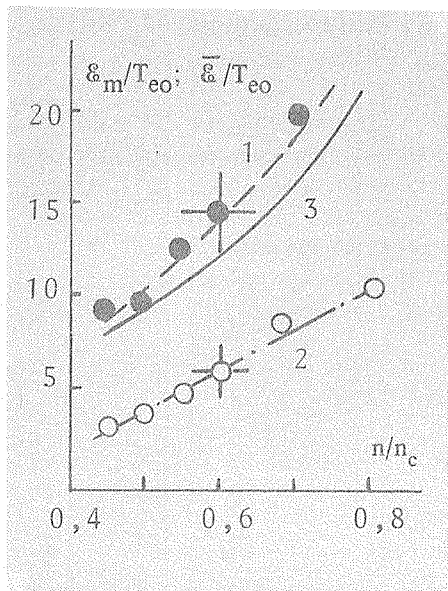
неизотермической плазмы. Развитие этой неустойчивости определяется черенковским взаимодействием волн с электронами, баланс поглощения и излучения волн определяет пороговое значение приложенного переменного электрического поля.

В /1/ высказывалось предположение о бесстолкновительном механизме ускорения электронов вследствие кинетического затухания волн на электронах (затухание Ландау). Однако, поскольку величина фазовой скорости волны v_ϕ в $3 \div 4$ раза /3/ превышает среднюю тепловую скорость электронов v_{Te} , для объяснения ускорения заметной доли электронов необходимо привлечь представление о захвате электронов плазмы сильной нелинейной потенциальной волной с амплитудой потенциала $\varphi_l \sim m(v_\phi - v_r)^2/2e$, где $v_r = v_{Te} [- \ln(J/J_0)]^{1/2}$ — нижняя граница скорости, начиная с которой электроны из исходной функции распределения захватываются волной; J — плотность тока ускоренных электронов; $J_0 = env_{Te}$.

Оценка φ_l по данным /1/ для $n/n_c = 0,6$, $T_{e0} = 7,5$ эВ, $E_0 = 1$ кВ/см и $J/J_0 = 0,1$ составляет 17 В, что для волн с характерным значением волнового числа $k \approx k_{пор} \approx 60$ см⁻¹, полученным из условия $k_{пор} r_{De} \approx 0,3$ /3/, соответствует амплитуде поля волн $E_l \sim 1$ кВ/см, практически достигающей уровня напряженности вакуумного поля E_0 .

Для проверки возможности ускорения электронов до фазовых скоростей ленгмюровских волн было проведено сравнение ускорения, наблюдавшегося в /1/, с оценками фазовой скорости волн по данным /3/ в зависимости от концентрации плазмы n/n_c (рис. 1). Ускорение характеризуется двумя параметрами ξ_m/T_{e0} и ξ/T_{e0} , представляющими отношение максимальной и средней энергии ускоренных электронов к начальной температуре электронов плазмы (кривые 1 и 2), и сравнивается с аналогичным расчетным параметром $(v_\phi/v_{Te})^2$. Здесь v_ϕ принимается равной ее пороговому значению $v_{\phi пор}$, даваемому /3/. Отметим, что кривые 1 и 2 построены для некоторой фиксированной величины напряженности поля $E_0 = 3$ кВ/см, отношение которой к $E_{0 пор}$ в заданном диапазоне изменения n/n_c варьировалось в пределах от 1,5 до 10. Несмотря на это, сравнение ускорения с $v_{\phi пор}$ можно считать приемлемым в силу следующих причин. Во-первых, волновой вектор \vec{k} принимает вблизи порога минимальное из возможных значений и, следовательно, отвечает максимальному из возможных значений фазовой скорости $v_{\phi макс} = \omega_0/k_{пор}$. Во-вторых, в отсутствие модуляционной неустойчивости плазменных колебаний /4/ волновой вектор \vec{k} не должен сильно отличаться от $\vec{k}_{пор}$ при изменении параметра $E_0/E_{0 пор}$, по крайней мере, при $n/n_c > 0,4$. Последнее утверждение основано на отсутствии сильной зави-

симости величины $k_{\text{пор}}$ от параметра неизотермичности плазмы T_e/T_i ; при $T_e/T_i \gg 1$, оказывающего сильное влияние на затухание волн, и тем самым на величину пороговой напряженности поля.



Р и с. 1. Сравнение измеренного эффекта ускорения электронов, характеризуемого относительными величинами максимальной \mathcal{E}_m/T_{e0} и средней $\bar{\mathcal{E}}/T_{e0}$ энергии ускоренных электронов, в зависимости от концентрации плазмы n/n_c (кривые 1 и 2 соответственно) с расчетной зависимостью $v_{\phi}^2 \text{ пор}/v_{Te}^2 (n/n_c)$, показывающей относительный рост энергии электронов при их ускорении ленгмюровской волной (кривая 3).

Удовлетворительное соответствие расчетной и измеренной зависимостей для максимальных энергий ускоренных электронов доказывает связь ускорения с потенциальной волной, а также позволяет рассматривать скорость $v_{\phi} \text{ пор}$ как асимптотический предел ускорения. Обращает на себя внимание расхождение значений \mathcal{E}_m и $\bar{\mathcal{E}}$ в 2 ÷ 3 раза, что может означать отставание от волны большей части электронов плазмы. Однако необходимо учесть, что захваченные полем волны электроны совершают финитные движения в потенциальной яме, имеющей глубину, сравнимую с энергией резонансных электронов. Резкое затухание волны или же эффект размещивания /4/ может привести к более широкому спектру ускоренных электронов.

Можно показать, что захват всей массы электронов плазмы потенциальной волной с ускорением ее до фазовой скорости невозможен. Для этого воспользуемся законом сохранения энергии в процессе преобразования потока ленгмюровских волн в поток ускоренных электронов $v_{\text{гр}} E_{\text{гр}}^2/8\pi = J \bar{\mathcal{E}}$, где $v_{\text{гр}} = kr_{\text{De}}$; v_{Te} — групповая скорость волн. Положив $J = env_{\phi}$ и $\bar{\mathcal{E}} = mv_{\phi}^2/2$ с учетом $v_{\phi} = (kr_{\text{De}})^{-1} v_{\text{Te}} \sim 3v_{\text{Te}}$, получаем $E_{\text{гр}}^2/8\pi n_c T_{e0} \sim 10^2$,

что представляется маловероятным. Реально энергии ленгмюровской волны в случае E_i порядка E_0 должно хватать на ускорение не более 1% электронов плазмы до скоростей v_{Φ} , что обычно и наблюдается.

В случае развития модуляционной неустойчивости можно ожидать расширения спектра волн в сторону меньших фазовых скоростей v_{Φ} , что будет способствовать вовлечению в ускорение большего числа электронов из начальной функции распределения по скоростям.

Так как реально не все электроны ускоряются до v_{Φ} , то на увеличение доли электронов, вовлекаемых в ускорение ленгмюровскими волнами, остается необходимый запас энергии. При этом ускорение электронов пакетом волн будет иметь характер диффузии в пространстве фазовых скоростей волн, описываемой в рамках квазилинейного приближения [4].

Авторы благодарны Н.Е. Андрееву за полезные обсуждения работы.

Поступила в редакцию 2 августа 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карфидов Д.М., Лукина Н.А., Сергейчев К.Ф. Физика плазмы, 7, № 1, 136 (1981).
2. Силин В.П. ЖЭТФ, 51, № 6, 1842 (1966).
3. Андреев Н.Е. ЖТФ, 43, № 4, 850 (1973).
4. Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков. М., Атомиздат, 1979, с. 99, 119.