

УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛЬНЫХ СВЧ ПОЛЕЙ НА ИЗОТРОПНУЮ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНУЮ НЕОДНОРОДНУЮ ПЛАЗМУ

И.Р. Геккер

Рассматриваются экспериментальные зависимости энергии электронов, ускоренных при воздействии сильных СВЧ полей ($v_E/v_{Te} \geq 1$) на изотропную бесстолкновительную неоднородную плазму ($n/n_c \leq 1$), от концентрации плазмы и величины осцилляторной скорости. Дается сравнение результатов опытов с расчетами.

Экспериментальные исследования взаимодействия интенсивных СВЧ полей с изотропной бесстолкновительной неоднородной плазмой ($\nu/\omega_0 \ll 1$) показали наличие эффективного ускорения электронов как при р- /1-6/, так и s- /7-9/ поляризациях. Зарегистрированные в опытах максимальные энергии (экстраполированные значения) надтепловых электронов \mathcal{E}_{em} (на графиках отнесены к тепловой энергии $k_B T_e$) приведены на рис. 1. Видно, что энергии возрастают с увеличением концентрации (берется максимальное значение в области измерений) плазмы и, особенно резко, с приближением ее к критической $n/n_c \rightarrow 1$ ($n_c = m\omega_0^2/4\pi e^2$, $v_E = eE_0/m\omega_0$, $v_{Te} = \sqrt{k_B T_e/m}$). Следует отметить, что зависимости, полученные в экспериментах /1-8/ при значениях $v_E/v_{Te} = 0,5 \div 1$ (при р- и s-поляризациях), проходят сравнительно близко друг от друга. Кривая при $v_E/v_{Te} = 10$ располагается существенно выше. На рис. 2 даны зависимости $\mathcal{E}_{em}/k_B T_e$ от v_E/v_{Te} при значениях $n/n_c = 0,5$ и $0,35$.

Появление надтепловых электронов в плазме обычно связывается с возбуждением ленгмюровских волн /7-9/, возникающих вследствие линейной трансформации поперечных волн в продольные (при р-поляризации), и из-за параметрической неустойчивости плазмы в СВЧ полях (возможной и при s-поляризации) /10/. Взаимодействие волны с электронами приводит к деформации их функции распределения по скоростям, на которой может появиться "плато" с шириной, связанной с амплитудой волны, т. е. возрастает относительная доля электронов с большими скоростями. В этом случае максимальная скорость электронов $v_{em} = v_p + \Delta v$ и $\mathcal{E}_{em} = m(v_p + \Delta v)^2/2$, где $v_p = \omega/k$ — фазовая скорость; k — волновое число плазменной волны; Δv — добавка, зависящая от величины поля волны. "Среднюю" энергию электронов, находящихся в синхронизме с волной, можно получить из дисперсионного уравнения для плазменной волны*. Расчетные зависимости $\mathcal{E}_{em}/k_B T_e$ приведены на рис. 1 и 2 (кривые 1). Численные расчеты /11/ для кинетической неустойчивости /10, 11/ разреженной плазмы, помещенной в ВЧ поле, позволяют более точно определить фазовые скорости v_p для плазменной волны на пороге ее возбуждения ($\Delta v = 0$) (например, при $n/n_c = 0,8$ имеем $(v_E/v_{Te})_{th} \approx 0,05$, а при $n/n_c = 0,4$ — $(v_E/v_{Te})_{th} \approx 1$). Соответствующие расчетные зависимости $\mathcal{E}_{em}/k_B T_e$ также приведены на рис. 1 (кривая 4) и рис. 2 (кривая 2). Видно, что они, располагаясь выше кривых 1, лучше согласуются с экспериментальными данными (при $v_E/v_{Te} < 1$). Это свидетельствует о справедливости представлений о волновом характере ускорения электронов, рассмотренном в /7-9/. Отметим отсутствие зависимости расчетных кривых от величины поля (v_E/v_{Te}). При $v_E/v_{Te} \geq 1$ расчетные и экспериментальные зависимости существенно расходятся (рис. 2). Это вполне объяснимо, поскольку в условиях экспериментов обычно $v_E/v_{Te} > (v_E/v_{Te})_{th}$ и волна в плазме может иметь значительную амплитуду ($\Delta v > 0$), что не учитывалось в /9/.

Итак, при $v_E/v_{Te} \geq 1$, как следует из экспериментальных данных (рис. 1 и 2), появляется сильная зависимость $\mathcal{E}_{em}/k_B T_e$ от v_E/v_{Te} . Попытаемся объяснить ее на основании представлений о самопересече-

* Формула для энергии ускоренных электронов имеет вид: $\mathcal{E}_{em}/k_B T_e = (3/2)(1 - n/n_c)^{-1}$.

нии электронных траекторий и "выбросе" электронов со скоростями вплоть до $v_{em} = 2v_{Ep}$ при $v_E/v_{Te} \geq 1$ и $kr_E \approx 1$, где $v_{Ep} = eE_p/m\omega_0$, $E_p = E_0(1 - n/n_c)^{-1}$ — усиленное поле в плазме ($\vec{E} \parallel \nabla n$, $D_n = \text{const}$), $r_E = eE_p/m\omega_0^2/12-14/$. В этом случае для $\mathcal{E}_{em} = mv_{em}^2/2 = 2mv_{Ep}^2$ получаем следующее выражение:

$$\mathcal{E}_{em}/k_B T_e = 2(1 - n/n_c)^{-2} (v_E/v_{Te})^2. \quad (1)$$

Кривые, построенные по формуле (1) (рис. 1, кривые 2,3 и рис. 2, кривые 3, 4), близки к экспериментальным данным, что свидетельствует о правильности предположений.

Существенным для обеспечения "выброса" быстрых осциллирующих в СВЧ поле электронов является нарушение "адиабатичности" их движения. Например, в условиях экспериментов /2,3/ в сильных полях (при $v_E/v_{Te} \geq 1$) и при сильной неоднородности плазмы ($L/\lambda_0 \ll 1$) амплитуда колебаний электронов r_E сравнивается с размером имеющейся в плазме неоднородности L , что и обеспечивает выполнение необходимого условия.

Формула (1) имеет прямое отношение к экспериментальным условиям только тогда, когда $\vec{E} \parallel \nabla n$ и возможно усиление поля /2-4/ (отметим, что в /2,3/ имеет место неоднородное поле вблизи ячеек сетки). Для сопоставления со случаем /1/ требуется учет распределения поля в волноводе, заполненном плазмой. Данные /7,8/, когда $\vec{E} \perp \nabla n$, не могут быть описаны строго формулой (1), хотя и лежат рядом с другими. Однако при $v_E/v_{Te} \gtrsim 1$ в условиях эксперимента /8/ значение kr_E приближается к единице.

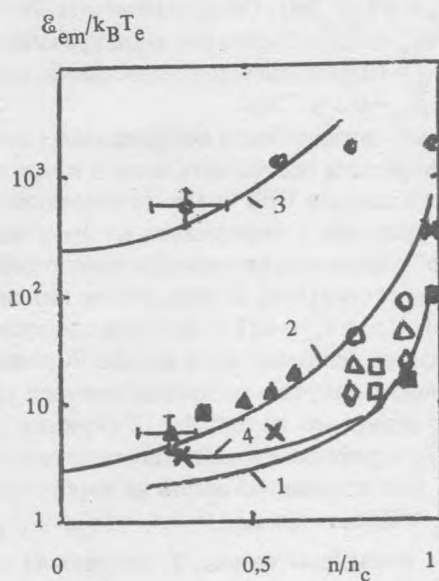


Рис. 1

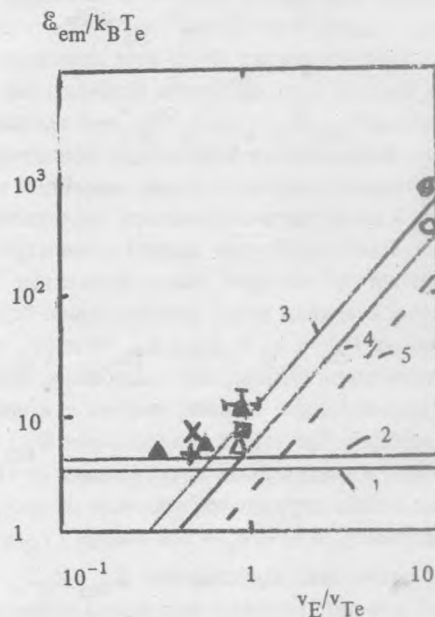


Рис. 2

Рис. 1. Зависимости отношения максимальной энергии ускоренных электронов \mathcal{E}_{em} к тепловой энергии $k_B T_e$ от нормализованной концентрации плазмы n/n_c . Экспериментальные зависимости: \blacksquare — $v_E/v_{Te} = 1$ /1/; \times — $v_E/v_{Te} = 0,5$ /1,4/; \blacktriangle — $v_E/v_{Te} = 0,5$ /1,8/; \circ — $v_E/v_{Te} = 0,5$ /1,7/; \triangle — $v_E/v_{Te} = 0,25$ /1,7/; \diamond — $v_E/v_{Te} = 0,15$ /1,7/; \bullet — $v_E/v_{Te} = 10$ /2/; \square — $v_E/v_{Te} = 0,2$ (верхняя точка) и $0,15$ (нижняя) /3/. Расчетные зависимости: 1 — для плазменной волны; 2 — по формуле (1) при $v_E/v_{Te} = 1$; 3 — то же при $v_E/v_{Te} = 10$; 4 — по данным /11/ при $T_e/T_i = 10$.

Рис. 2. Зависимости отношения максимальной энергии ускоренных электронов \mathcal{E}_{em} к тепловой энергии $k_B T_e$ от v_E/v_{Te} . Экспериментальные зависимости: при $n/n_c = 0,35$: \blacksquare — /1/, $+$ — /4/, \triangle — /8/, \circ — /2/; при $n/n_c = 0,5 - 0,6$: \times — /4/, \bullet — /2/, \blacktriangle — /8/. Расчетные зависимости: 1 — для плазменной волны; 2 — по данным /11/ при $T_e/T_i = 10$; 3-5 — по формуле (1) при $n/n_c = 0,5$ (3), $0,35$ (4), 0 (5).

При $v_E/v_{Te} > (v_E/v_{Te})_{th}$ имеет место увеличение поля плазменной волны и, следовательно, возрастание $\varepsilon_{em}/k_B T_e$ с увеличением v_E/v_{Te} (рис. 2).

Таким образом, имеющиеся экспериментальные данные об энергии ускоренных электронов плазмы (в сильных СВЧ полях при $n/n_c < 1$) удается описать с помощью формулы (1). Появление ускоренных электронов в СВЧ полях и плотной плазме ($n/n_c \geq 1$) объясняется явлениями в плазменном резонансе, когда создается локальное усиление поля ($\gamma_E/\Delta x \approx 1$) (см., напр., /6, 13, 14/). Ускорение электронов в слабых СВЧ полях ($v_E/v_{Te} \ll 1$) и разреженной плазме ($n/n_c < 1$) связано с синфазным движением электронов с волной. В сильных полях ($v_E/v_{Te} \geq 1$) в разреженной сильнонеоднородной плазме ($n/n_c < 1$) эффективное ускорение электронов происходит при достижении условий самопересечения электронных траекторий ($\gamma_E/L \approx 1$). Так же может происходить ускорение и в сильной плазменной волне (при $k\gamma_E \approx 1$).

Автор благодарен С.В. Буланову, С.Е. Гребенщикову, А.А. Рухадзе и К.Ф. Сергейчеву за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баринов В. И. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 3, 41 (1971).
2. Сергейчев К. Ф., Трофимов В. Е. Письма в ЖЭТФ, 13, 236 (1971).
3. Геккер И. Р., Кулаева Т. Г. Физика плазмы, 5, 1173 (1979).
4. Баринов В. И., Карфидов Д. М. Физика плазмы, 1, 638 (1975).
5. Баринов В. И. и др. Труды ФИАН, 73, 37 (1973).
6. Геккер И. Р. Физика плазмы, 9, 234 (1983).
7. Brownell et al. Phys. Rev. Lett., 31, 427 (1973); Proc. V CPPCNR, Tokyo, 2, 599 (1974).
8. Карфидов Д. М., Сергейчев К. Ф., Лукина Н. А. Физика плазмы, 7, 136, (1981).
9. Карфидов Д. М., Сергейчев К. Ф. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 3, 3 (1985).
10. Силин В. П. ЖЭТФ, 51, 842 (1966).
11. Андреев Н. Е. ЖТФ, 43, 850 (1973).
12. Геккер И. Р. Препринт ФИАН, № 51, М., 1979; Proc. XIV ICPIG, Grenoble, 1, 217 (1971).
13. Коврижных Л. М., Сахаров А. С. Физика плазмы, 5, 840 (1979).
14. Буланов С. В., Коврижных Л. М., Сахаров А. С. ЖЭТФ, 72, 1809 (1977).

Поступила в редакцию 28 августа 1985 г.
После переработки 18 марта 1986 г.