

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕНГМЮРОВСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ЗОНДИРУЮЩИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

М.П.Брижинев, С.В.Егоров, Б.Г.Еремин, А.В.Костров

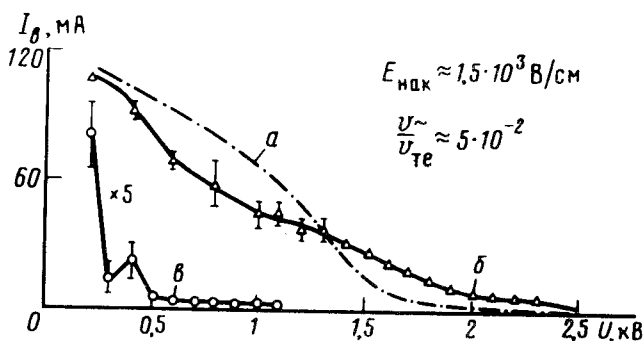
С помощью зондирующего пучка электронов проведено исследование сильной ленгмюровской турбулентности в плазме, возникающей в поле электромагнитной волны. Обнаружено, что при амплитуде электрического поля в волне накачки порядка пороговой для развития модуляционной неустойчивости, в плазме возбуждается нелинейная стоячая ленгмюровская волна. При увеличении амплитуды поля волны накачки происходит генерация широкого спектра плазменных волн.

При исследовании нелинейного взаимодействия интенсивных электромагнитных волн с плазмой в области плазменного резонанса наиболее важной является информация об амплитуде и пространственном спектре возбуждаемых ленгмюровских волн. В настоящей работе для определения структуры сильной ленгмювской турбулентности применен зондирующий электронный пучок. Диагностика основана на измерении деформации энергетического спектра электронов пучка, прошедшего через турбулентную область плазмы, в зависимости от начальной энергии электронов. По величине деформации энергетического спектра и начальной энергии пучка можно определить амплитуду электрического поля и масштаб возбуждаемых ленгмювских волн.

Эксперименты по исследованию взаимодействия интенсивных электромагнитных волн с плазмой проводились в вакуумной камере длиной 1500 мм и диаметром 200 мм. Плазма с температурой электронов $T_e = 10$ эВ и ионов $T_i = 1$ эВ создавалась в гелии при давлении 10^{-2} торр. Столб плазмы ($d = 100$ мм) находился в слабом магнитном поле ($\omega_{H_e} \ll \omega_{P_e}$, где ω_{H_e} и ω_{P_e} гирочастота и плазменная частота электронов). Сфокусированное ($L_E = 10$ мм) электромагнитное излучение волны накачки ($\lambda = 8$ мм) вводилось перпендикулярно столбу плазмы с поляризацией электрического поля $\mathbf{E} \parallel \mathbf{H}$.

В ранее проведенных экспериментах на этой установке¹⁻³ был зарегистрирован ряд нелинейных эффектов, возникающих в области плазменного резонанса при превышении порогового поля в волне накачки $v/v_{T_e} \approx 1,5 \cdot 10^{-2}$, (v_{\sim} и v_{T_e} — осцилляторная и тепловая скорость электрона): генерация надтепловых электронов, наличие выделенных групп на функции распределения ускоренных частиц по энергиям, усиление и насыщение высокочастотного электрического поля (v/v_{T_e} достигала $2,5 \cdot 10^{-1}$), возбуждение ионнозвуковых волн ($\delta N_s/N_e \sim 10^{-4}$). Совокупность экспериментальных результатов, позволила сделать вывод, что вблизи точки плазменного резонанса в поле накачки происходит развитие модуляционной неустойчивости, при этом может возникнуть нелинейная стоячая плазменная волна⁴.

Зондирующий пучок электронов ($N_b/N_e = 10^{-5}$, где N_b и N_e плотность электронов пучка и плазмы), применяемый для диагностики основных характеристик возбуждаемых ленгмювских волн, направлялся вдоль магнитного поля по оси вакуумной камеры. Начальная энергия пучка могла изменяться от 500 до 6000 эВ. Анализ интегрального энергетического спектра электронов по продольным (вдоль магнитного поля) энергиям, производился многосеточным анализатором, установленным в торце камеры. Отметим, что эффектов, связанных с квазилинейной релаксацией пучка не наблюдалось, а обнаруженное уширение энергетического спектра (см. рисунок *a*), определялось столкновениями электронов пучка с нейтральными атомами гелия.



Интегральные энергетические спектры электронов: *a* — зондирующего пучка в отсутствие накачки, *б* — зондирующего пучка при амплитуде электрического поля накачки $E = 15$ кВ/см, *в* — надтепловых электронов плазмы

Зондирование турбулентной области плазмы электронным пучком с разными начальными энергиями проводилось для разных амплитуд волны накачки. Наиболее информативными оказались результаты, которые были получены при полях накачки в три раза превышающих определенное ранее пороговое значение ($v/v_{T_e} = 5 \cdot 10^{-2}$)¹⁻². Было обнаружено, что существует выделенная область энергий пучка ($W_b \sim 1200$ В), при которой наблюдалась деформация энергетического спектра электронов (рисунок *б*). Это обстоятельство позволяет пред-

положить, что в плазме под действием волны накачки возбуждается узкий пакет ($\Delta k \ll k_{\text{пл}}$) ленгмюровских волн с характерным масштабом¹⁾ $\lambda_{\text{пл}} \sim 100 r_{de}$ (r_{de} — дебаевский радиус) обладающим, по-видимому, максимумом инкремента модуляционной неустойчивости. Амплитуда поля бегущей плазменной волны, которая определялась по величине области захвата, оказалась равной $E_{\text{пл}} \cong 3$ кВ/см. Естественно, что в плазме возбуждается стоячая ленгмюровская волна, суммарное поле в которой в два раза больше. Полученный результат достаточно хорошо соответствует оптическим измерениям, где наблюдалось усиление и насыщение поля в плазме до 7 кВ/см ($v_{\sim}/v_{Te} \cong 2,5 \cdot 10^{-1}$)².

Для выяснения механизма диссипации, возбуждаемой плазменной волны, было проведено исследование функции распределения надтепловых электронов плазмы. Установлено, что при $v_{\sim}/v_{Te} = 5 \cdot 10^{-2}$ появляются ускоренные электроны, максимальная энергия которых достигала значения $W_{\text{max}} = 400$ эВ (рисунок, в). Этот результат свидетельствует, что возбуждаемая плазменная волна с фазовой скоростью значительно превышающей тепловую, вследствие развития модуляционной неустойчивости, является нелинейной и наличие в ее пространственном спектре высоких гармоник приводит из-за затухания Ландау к ускорению электронов плазмы. Действительно, если области захвата высоких пространственных гармоник ($k_N = Nk_0$, где N — номер гармоники, k_0 — основной масштаб стоячей нелинейной плазменной волны) перекрыты, то тепловые электроны плазмы могут ускоряться по области перекрытия. Оценки показывают, что области захвата второй ($W_2 \cong 300$ эВ), третьей ($W_3 \cong 130$ эВ) и т.д. гармоник перекрыты, а первой ($W_1 \cong 1200$ эВ) и второй не перекрыты. В этом случае электроны плазмы могут ускоряться до величины порядка фазовой скорости второй гармоники, что соответствует энергии $W_{\text{max}} \sim W_2 + \frac{W_2 - W_3}{2} \cong 400$ эВ.

Таким образом, из результатов эксперимента можно сделать вывод, что при амплитуде электрического поля волны накачки $v_{\sim}/v_{Te} \leq 5 \cdot 10^{-2}$ в области плазменного резонанса возбуждается нелинейная стоячая плазменная волна, энергия которой диссипирует вследствие затухания Ландау на тепловых электронах плазмы.

При увеличении амплитуды электрического поля волны накачки ($v_{\sim}/v_{Te} > 5 \cdot 10^{-2}$) с помощью зондирующего пучка электронов было установлено, что деформация энергетического спектра пучка происходила в широком диапазоне ($500 \text{ В} < W_b < 4000 \text{ В}$) начальных энергий, т.е. возбуждался сплошной спектр ленгмюровских волн. С увеличением амплитуды накачки, возрастала доля ускоренных надтепловых электронов плазмы, максимальная энергия которых достигала 4000 эВ. Интерпретация этого результата может быть связана с тем, что при высокой амплитуде поля волны накачки в плазме образуется хаотическая структура локализованных несфазированных сгустков высокочастотного поля — солитонов (см., например, ⁵).

Авторы благодарны В.А.Миронову за полезные обсуждения результатов работы.

Литература

1. Еремин Б.Г., Костров А.В., Степанушкин А.Д., Фрайман Г.М. Физика плазмы, 1976, т. 2, 414.
2. Брижинец М.П., Гавриленко В.П., Егоров С.В., Еремин Б.Г., Костров А.В., Окс Е.А., Шагиев Ю.М. ЖЭТФ, 1983, 85, 883.
3. Брижинец М.П., Буланин В.В., Еремин Б.Г., Костров А.В. Письма в ЖЭТФ, 1984, 40, 382.
4. Литвак А.Г., Трахтенгерц В.Ю., Федосеева Т.И., Фрайман Г.М. Письма в ЖЭТФ, 1974, 20, 544.
5. Кн.: "Взаимодействие сильных электромагнитных волн с бесстолкновительной плазмой" ИПФ АН СССР, г. Горький, 1980 г.

Институт прикладной физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
30 декабря 1985 г.

¹⁾ Масштаб определяется из условия синхронизма электронного пучка с плазменной волной.