

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННО-ЗВУКОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПЛАЗМЫ В ПОЛЕ МОЩНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ МЕТОДОМ РАССЕЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ CO_2 -ЛАЗЕРА

М.П. Брижинева, В.В. Буланин¹⁾, Б.Г. Еремин
А.В. Костров, А.В. Петров¹⁾, С.Г. Ревин

Методом рассеяния излучения CO_2 -лазера определены пространственно-временной спектр и интегральный уровень плотности энергии ионно-звуковых волн, возбуждаемых в плазме интенсивной электромагнитной волной.

При исследовании сильной ленгмюровской турбулентности, возникающей в бесстолкновительной плазме под действием интенсивного излучения, актуальным является вопрос о возбуждении и влиянии (возможно высокого уровня) ионно-звуковых колебаний на процесс диссипации ленгмюровской энергии¹.

В настоящей работе для решения этого вопроса проведено экспериментальное исследование ионно-звуковых колебаний возбуждаемых в плазме электромагнитной волной методом рассеяния излучения CO_2 -лазера. Этот бесконтактный метод позволяет получить наиболее полную информацию² об амплитуде и спектре ионного звука. В условиях эксперимента параметр рассеяния $\alpha = (k_s r_D)^{-1} > 30$ (где k_s – волновой вектор ионного звука, r_D – дебаевский радиус), что при $k_0 r_D \approx 3$ (k_0 – волновой вектор излучения лазера) соответствует малоугловому рассеянию на коллективных колебаниях плазмы.

Эксперименты проводились на установке, параметры которой подробно описаны в работах³⁻⁵. Плазма плотностью $N_e \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, температурой электронов $T_e \sim 10 \text{ эВ}$, ионов $T_i \sim 1 \text{ эВ}$ создавалась в гелии при давлении 10^{-2} торр в камере диаметром 20 см и длиной 150 см. Электромагнитное излучение 8-миллиметрового диапазона с помощью квазиоптической системы зеркал и линзы фокусировалось ($v_{\sim} / v_{Te} \approx 0,2$, где v_{\sim} – осцилляторная скорость электронов, v_{Te} – тепловая скорость) в центральную часть плазменного столба, находящегося в слабом магнитном поле ($H_0 \approx 100 \text{ Э}$). Вектор электрического поля волны накачки был параллелен оси камеры и внешнему магнитному полю.

Ранее проведенные на установке эксперименты показали, что воздействие интенсивной электромагнитной волны на плазму, с плотностью близкой к критической, приводит к развитию в плазме ленгмюровской турбулентности с высоким уровнем плотности энергии³ $W_e \approx 10^{-1} N_e T_e$, которая сопровождается генерацией ускоренных надтепловых электронов⁴, "просветлением" плазмы⁵ и т. п.

Для зондирования турбулентной области плазмы использовался гибридный CO_2 -лазер⁶, работающий на одной продольной и одной поперечной моде оптического резонатора. Мощность лазера составляла $10 \div 25 \text{ кВт}$ при длительности импульса $\tau_{\text{и}} \approx 5 \text{ мкс}$. Диаметр пучка лазера в плазме $\approx 1,2 \text{ см}$. Излучение лазера формировалось слабосходящимся к плоскости анализа пространственного спектра (см. рис. 1), находящейся на расстоянии 160 см от оси камеры, где помещался фотоприемник размером $1 \times 1 \text{ см}^2$. Такая оптическая схема позволяла иметь разрешение по волновым векторам ионного звука в плазме $\Delta k_x = \Delta k_y \approx 4,6 \text{ см}^{-1}$. Спектр флуктуаций по k_x и k_y анализировался путем перемещения фотоприемника в плоскости анализа по координатам x и y соответственно (см. рис. 1).

Регистрация рассеянного в плазме излучения производилось гомодинным детектированием на квадратичном полупроводниковом фотоприемнике, где происходило смещение рассеянного излучения и части зондирующего излучения в качестве опорного сигнала. В результате на выходе фотоприемника выделялся сигнал биений с частотой плазменных флук-

¹⁾ Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина.

туаций плотности, анализ которых осуществлялся в реальном времени спектроанализатором С4-47. Полоса обзора в одном цикле измерений составляла 10 МГц, центральная частота которой могла изменяться от 5 до 50 МГц. Чувствительность приемной аппаратуры при частотном разрешении $\Delta f \approx 0,3$ МГц составила величину $\approx 10^{-12}$ Вт. Минимальная плотность флуктуаций, которая могла быть зарегистрирована в аппаратной полосе частот и волновых векторов в приведенной на рис. 1 геометрии составила величину $\delta N_e \approx 2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$.

В эксперименте по рассеянию лазерного излучения наблюдалась временная корреляция между появлением сигнала биений с фотоприемника и сигнала ускоренных надтепловых электронов с коллектора, расположенного в торце камеры, которые свидетельствовали о резонансном взаимодействии волны накачки с плазмой.

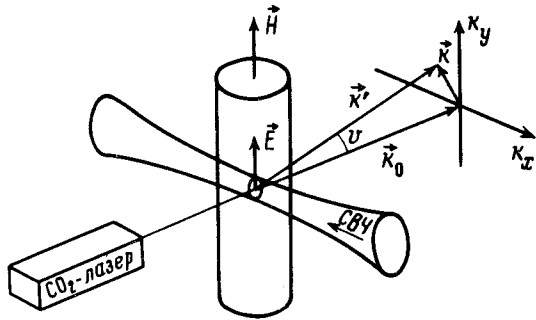


Рис. 1. Геометрия эксперимента

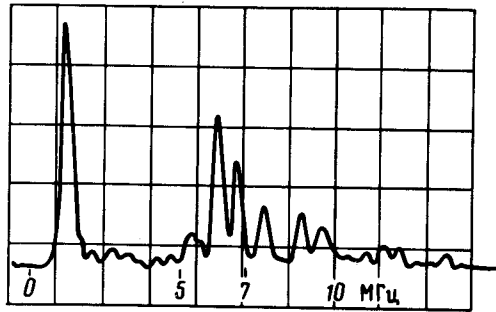


Рис. 2. Спектрограмма сигнала биений

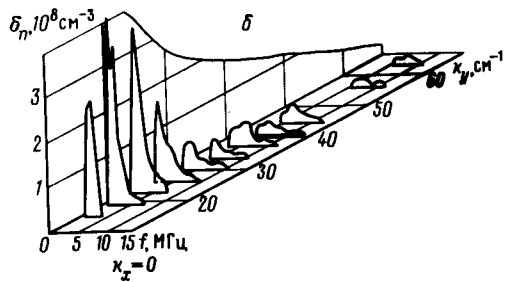
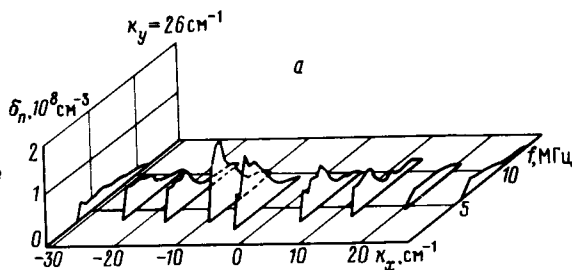


Рис. 3. Пространственно-временной спектр ионно-звуковых волн

Частотный спектр сигнала биений с фотоприемника, снятый за один цикл работы установки (см. рис. 2), представлял набор узких пиков с шириной близкой к аппаратной, заполняющих широкую полосу частот. Частотные спектры усредненные по большому числу циклов работы установки в зависимости от k_x при $k_y = 26 \text{ см}^{-1}$ и от k_y при $k_x = 0$ представлены на рис. 3, а и 3, б соответственно, интенсивность которых выражена через глубину модуляции плотности в полосе приемной аппаратуры $\Delta f, \Delta k_x, \Delta k_y$.

Анализ полученных данных показал, что при воздействии волны накачки на плазму с плотностью близкой к критической развивается ионно-звуковая турбулентность с широким спектром k_x и k_y и выделенным направлением максимальной интенсивности вдоль электрического поля накачки. С увеличением k_y от масштаба 20 см^{-1} происходит спад интенсивности и сдвиг спектра в сторону больших частот. Аналогичная зависимость наблюдается от $|k_x|$, что позволяет оценить усредненную скорость распространения возмущений (см. рис. 3, а, б). Эта скорость оказалась близкой к скорости ионного звука в гелиевой плазме $v_s \approx 1,3 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ для $T_e \approx 7 \text{ эВ}$.

Интегрированием квадратичного возмущения плотности по частотно-пространственному спектру колебаний можно получить величину плотности энергии в ионно-звуковых колебаниях. Плотность энергии в ионном звуке, отнесенная к тепловой энергии плазмы, составила величину $W_s/N_e T_e = (\delta N_e/N_e)^2 \sim 4 \cdot 10^{-8}$. Это значение плотности энергии явля-

ется нижней оценкой, что связано с нелокальностью метода измерений, который дает усреднение по объему плазмы $\sim 1 \text{ см}^3$. В случае, если ионно-звуковые колебания возбуждаются в узком слое плазмы (возможно уширение спектра по k_x связано с этим фактом) порядка толщины скин-слоя, то интегральная по спектру интенсивность ионного звука соответствует величине $(\delta N_e/N_e)^2 \sim 10^{-7}$.

Таким образом полученные результаты свидетельствуют, что при воздействии интенсивного электромагнитного излучения на плазму, вблизи точки плазменного резонанса возбуждаются длинноволновые ионно-звуковые волны ($\lambda_s \sim 10^3 r_D$) с плотностью энергии значительно меньшей плотности энергии запасенной в ленгмюровских колебаниях. Возбуждение ионно-звуковых волн, обнаруженных в эксперименте может происходить как непосредственно при развитии модуляционной неустойчивости, так и вследствие вторичных эффектов связанными с ускорением электронов ленгмюровскими волнами и возникновением токов в плазме.

Литература

1. Дегтярев Л.М., Сагдеев Р.З., Соловьев Е.И., Шапиро В.Д., Шевченко В.И. Физика плазмы, 1980, 73, 485.
2. Shusher R.E., Surko С.М. Phys. Fluids, 1980, 23, 427.
3. Брижинец М.П., Гавриленко В.П. и др. ЖЭТФ, 1983, 85, 893.
4. Еремин Б.Г., Костров А.В., Степанушкин А.Д., Фрайман Г.М. Физика плазмы, 1976, 2, 414.
5. Брижинец М.П., Еремин Б.Г., Костров А.В., Степанушкин А.Д. Физика плазмы, 1980, 6, 559.
6. Булакин В.В., Петров А.В. Оптика и спектроскопия, 1978, 45, 582.
7. Булакин В.В., Петров А.В., Ушаков С.Н. ЖТФ, 1983, 53, 1506.