

ПРЯМОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ЛЕНГМЮРОВСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПЛАЗМЕ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО РАССЕЯНИЯ

*Л.Н. Вячеславов, И.В. Кандауров, Э.П. Кругляков,
М.В. Лосев, О.И. Мешков, А.Л. Санин*

Экспериментально показано, что при взаимодействии сильнооточного релятивистского электронного пучка с плазмой возбуждается ленгмюровская турбулентность. Узкополосный газовый фильтр, поглощающий излучение CO_2 лазера на переходе $R 14$, позволил использовать метод рассеяния при исследовании турбулентности.

В экспериментах по взаимодействию сильнооточных релятивистских электронных пучков (РЭП) с плазмой, ведущихся с целью изучения возможности ее нагрева за счет коллективных процессов, наиболее важным с физической точки зрения является вопрос о типе колебаний, возбуждаемых пучком в плазме. Теория ¹ предполагает, что возбуждаться должны ленгмюровские колебания. К настоящему времени получено немало косвенных экспериментальных данных, свидетельствующих о возбуждении в плазме ленгмюровских колебаний на частоте ω_{pe} .

Для прямого обнаружения и исследования ВЧ турбулентности, возбуждаемой пучком в плазме, нами использован метод лазерного рассеяния с регистрацией рассеянного излучения под малыми углами к направлению падающего. Эксперименты проводились на установке ГОЛ-М ² при следующих условиях: плотность плазмы, $n_e = (0,5 \div 2,5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, длина плазменного столба, $L = 750 \text{ см}$, напряженность продольного магнитного поля, $H_0 = 2,5 \text{ Тл}$. Параметры пучка: энергия электронов, $E = 0,5 \text{ МэВ}$, плотность релятивистских электронов в плазме, $n_b = (1 \div 5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, длительность пучка, $\tau_b \approx 100 \text{ нс}$.

Одномодовый CO_2 -лазер и трехпроходный усилитель были использованы в качестве источника излучения. Лазерная система обеспечивала энергию в импульсе порядка 10 Дж при длительности $0,07 \div 2 \text{ мкс}$.

Для изучения низкочастотных плазменных колебаний достаточно широко применяются гомодинные лазерные методы ³. Наблюдение электронных ленгмюровских колебаний указанными методами невозможно (характерные частоты достигают в нашем случае нескольких сотен ГГц). Поэтому система для анализа спектра лазерного излучения, рассеянного на ВЧ турбулентности, была построена на основе классической схемы спектрального прибора с дифракционной решеткой.

Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 1а. Разложенное в спектр дифракционной решеткой (150 штр/мм) рассеянное излучение фокусировалось в фокальной плоскости прибора, где была размещена линейка из пяти фотосопротивлений Si : В, охлаждаемая жидким гелием. Детекторы выделяли участок спектра порядка 250 ГГц. Положение этого участка по отношению к частоте генерации лазера могло меняться.

Рассеянное излучение регистрировалось под углом $2 \cdot 10^{-3} < \alpha < 2 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$ к направлению распространения лазерного излучения. Эти углы соответствуют рассеянию лазерного излучения ленгмюровскими колебаниями с фазовыми скоростями, близкими к скорости света, и с волновыми векторами \mathbf{K} , ориентированными под углами $\beta = 30 \div 80^\circ$ к направлению распространения РЭП (см. рис. 1б). Применялись и другие схемы эксперимента, позволившие наблюдать рассеяние лазерного излучения на колебаниях с волновыми векторами \mathbf{K} , ориентированными в области малых углов ($\beta < 50^\circ$) и углов $\beta \approx 100 \div 150^\circ$.

При регистрации рассеянного излучения под малыми углами по отношению к падающему весьма серьезной является проблема подавления лазерного излучения с несмещенной частотой

той, которое проникает сквозь спектральный прибор и создает большие трудности при выделении малых сигналов со сдвигом частоты. Эту проблему удалось решить путем использования в качестве источника излучения CO_2 -лазера, работающего на переходе $R14$ ($\lambda_0 = 10,29$ мкм), и поглощающих ячеек, наполненных аммиаком под давлением 0,25 атм (общая длина двух ячеек – 40 см). Поскольку аммиак имеет узкую линию поглощения, хорошо совпадающую с переходом $R14$ (см. ⁴), такой газовый фильтр – пробка подавлял излучение на частоте генерации на $12 \div 13$ порядков, практически не ослабляя рассеянное излучение в области $\lambda < \lambda_0$, где проводились измерения.

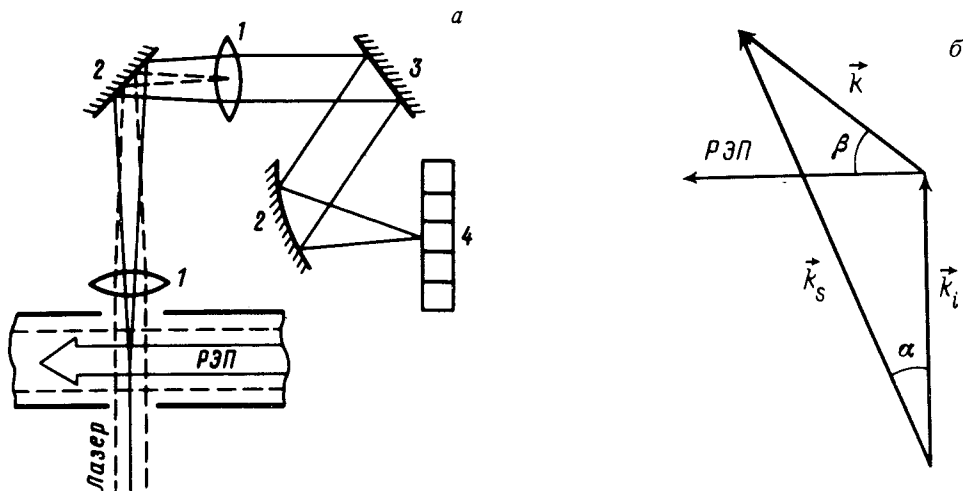


Рис. 1. Схема эксперимента (а) и геометрия волновых векторов (б). 1 – зеркала, 2 – линзы, 3 – дифракционная решетка, 4 – фотоспротивления, \vec{k}_i , \vec{k}_s – волновые вектора падающего и рассеянного излучения

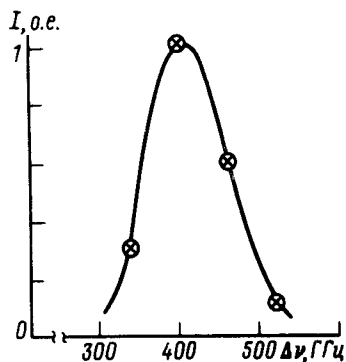


Рис. 2. Спектр рассеянного излучения

На рис. 2 представлен спектр рассеянного излучения, зарегистрированный одновременно несколькими детекторами при плотности плазмы $n_e \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. С уменьшением плотности плазмы спектральный интервал между сателлитом и несмещенной лазерной частотой сокращается. Для колебаний с фазовыми скоростями $v \approx c$ интенсивность рассеянного сигнала, соответствующего волновым векторам \vec{K} , ориентированным под углами $\beta = 30 \div 80^\circ$ к направлению распространения РЭП (см. рис. 1б), более чем на порядок превосходит интенсивность для области $\beta = 100 \div 150^\circ$. Таким образом, первые эксперименты позволили получить следующие результаты.

1. Экспериментально показано, что при взаимодействии сильноточных РЭП с плазмой возбуждается ленгмюровская турбулентность.

2. В процессе взаимодействия превышение мощности рассеянного излучения над равновесным уровнем достигало восьми порядков. Столь значительное превышение наблюдалось только во время прохождения пучка через плазму.

3. Обнаружена глубокая анизотропия ленгмюровских колебаний по отношению к направлению распространения электронного пучка.

Литература

1. Брейзман Б.Н., Рютов Д.Д. Ядерный синтез, 1974, 14, 873.
2. Бурмасов В.С. и др. ВАНТ (серия термоядерный синтез), 1987, вып. 2, с. 31.
3. Luhman N.E., Peebles W.A. In Laser Handbook, v. 5, Amsterdam, Elsevier, 1985.
4. Арефьев В.Н., Вешератин К.Н. Оптика и спектроскопия, 1984, 56, 676.

Институт ядерной физики
Сибирского отделения
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
2 октября 1989 г.