

ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЫ И ИХ  
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ РАССЕЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. В. Буланин, Д. М. Карфицков, Е. Б. Куприянова,  
А. В. Петров, К. Ф. Сергейчев, А. М. Чекмарев

УДК 533.9.1506

Создана установка для диагностики плазмы методом рассеяния излучения  $\text{CO}_2$ -лазера. Методом рассеяния и зондовым методом определены параметры колебаний разреженной аргонной плазмы, что позволило определить возможности диагностической установки.

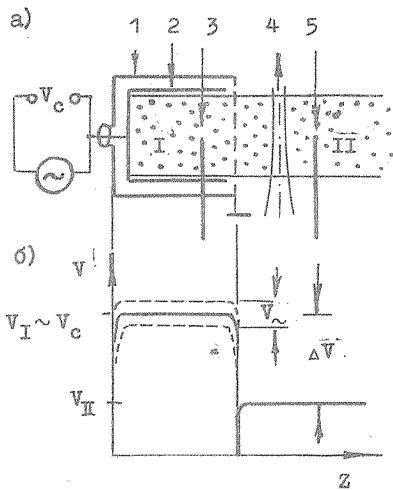
Спектр мелкомасштабных флуктуаций плотности  $\langle \delta n \rangle_{\omega, \vec{k}}$  является важной характеристикой взаимодействия плазмы с полями или пучками частиц. Сведения о спектре флуктуаций и области их локализации в пространстве можно получить методом комбинационного рассеяния лазерного излучения /1/.

С этой целью была создана установка, позволяющая регистрировать излучение  $\text{CO}_2$ -лазера, рассеянное плазмой под малыми углами. Разработанная методика отличается высокой чувствительностью к уровню флуктуаций плотности при большом разрешении спектров по волновым числам.

С помощью методики по рассеянию были исследованы колебания, возбуждаемые в плазме ионным пучком. Впервые в данной работе проведено сравнение результатов измерений параметров плазменных колебаний, выполненных новой методикой, с результатами измерений тех же параметров лентморовскими зондами. Продемонстрировано количественное совпадение данных, полученных обоими методами.

Плазма создавалась импульсным плазменно-пучковым разрядом вдоль магнитного поля напряженностью 100 Э в аргоне при дав-

лении  $\sim 3 \cdot 10^{-3}$  торр /2/. Исследование колебаний проводилось на стадии распада плазмы (постоянная времени  $\tau \sim 5 \cdot 10^{-5}$  с), когда ее основные параметры изменялись в следующих пределах: концентрация электронов  $n = 10^{11} - 10^{12}$  см $^{-3}$ , их температура  $T_e = 1-4$  эВ, температура ионов (по оценкам)  $T_i < 0,1$  эВ, характерный радиус столба  $r_0 \sim 3 - 5$  см.

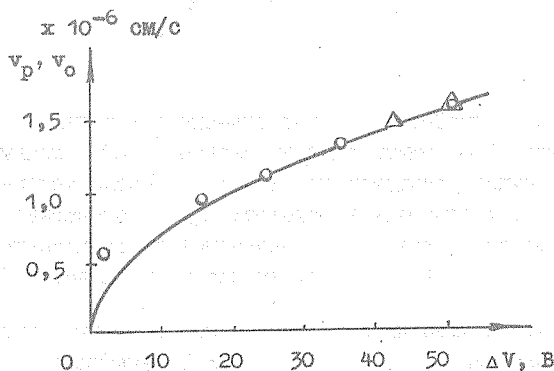


Р и с. 1. а) Устройство для возбуждения колебаний: I - заземленная сетка, 2 - цилиндрический электрод, 3,5 - лентмюровские зонды, 4 - пучок зондирующего лазера. б) Распределение потенциала вдоль оси плазменного столба:  $V_c$  - напряжение смещения и  $V_{\sim}$  - переменное напряжение, подаваемые на цилиндрический электрод (2),  $V_I$  и  $V_{II}$  - потенциалы плазмы в областях I и II

Колебания плазмы возбуждались с помощью устройства, аналогичного предложенному в /3/ (рис. 1). Заземленная сетка (I) этого устройства с размером ячейки 0,15 мм (порядка нескольких дебаевских длин), создающая потенциальный барьер для электронов, разделяет столб плазмы на две независимые по потенциалу области: I и II (см. диаграмму рис. 1). В области I плазма принимает по-

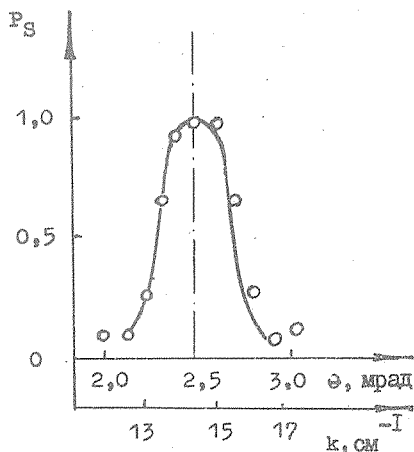
потенциал цилиндрического электрода (2)  $V_I = V_C + V_{\sim}$ , который задается постоянным смещением  $V_C = 2-50$  В и переменным напряжением с амплитудой  $V_{\sim} = 0,5 - 10$  В, а в области II устанавливается самоогласованный потенциал плазмы  $V_{II} \sim 2$  В. Ускоряющая ионы разность потенциалов  $\Delta V = V_I - V_{II}$  приводит к появлению ионного потока в области II. Колебания потенциала  $V_I$  вызывают в области II колебания плотности плазмы с той же частотой  $f$ . С помощью подвижного лентморовского зонда (5) были определены амплитуда колебаний, величина и направление волнового вектора, длина затухания. Было установлено, что колебания с максимальной амплитудой  $\delta n/n \sim 5 \cdot 10^{-2}$  распространяются перпендикулярно плоскости сетки на расстояние нескольких сантиметров от нее. Фазовая скорость этой волны  $v_p = \lambda f$  (где  $\lambda$  и  $f$  — длина волны и частота колебаний плотности) близка к скорости ионного потока  $v_0 = (2e\Delta V/M_1)^{1/2}$  (где  $M_1$  — масса иона) — см. рис. 2.

Полученные колебания плотности плазмы были исследованы методом рассеяния лазерного излучения. Для зондирования плазмы использовался одночастотный гибридный  $CO_2$ -лазер с выходной мощностью  $\sim 50$  кВт и длительностью импульса генерации  $\sim 10^{-5}$  с при подавлении побочных мод до относительного уровня  $< 10^{-10}$  /4/.



Р и с. 2. Зависимость фазовой скорости  $v_p$  от разности потенциалов  $\Delta V$ : о — зондовые измерения,  $\Delta$  — лазерное рассеяние, сплошная кривая — расчетная зависимость скорости ионного потока  $v_0$  от  $\Delta V$

Рассеянное излучение детектировалось с помощью фотосопротивления на основе германия, легированного цинком [5], по методу го-  
 модинного приема. Чувствительность приемника - 0,1 В/Вт, мощ-  
 ность опорного излучения  $\sim 50$  Вт, быстродействие  $\sim 10^{-9}$  с, по-  
 лоса пропускания усилителя от 2 до 10 МГц, коэффициент усиле-  
 ния по напряжению  $\sim 1000$ , уровень шума  $\sim 3\text{дБ}$ , что обеспечи-  
 вает получение обнаружительной способности  $\sim 10^{-17}$  Вт/Гц.  
 Разработанная оптическая схема позволяла анализировать излу-  
 чение, рассеянное под углами  $\theta = 1-100$  мрад, что соответствует  
 диапазону измеряемых длин волн в плазме  $\lambda = 10^{-2}-1$  см. Анализ  
 по углу осуществлялся путем перемещения фотоприемника. Было  
 достигнуто высокое разрешение по волновым числам  $\Delta k = 1 \text{ см}^{-1}$   
 при относительно короткой длине оптического пути от плазмы до  
 фотоприемника  $\sim 2,4$  м. Указанная величина  $\Delta k$  близка к предельно  
 возможной, определяемой дифракционной расходямостью лазерного  
 луча в области рассеяния  $\Delta k \sim 1/\omega_p$  ( $\omega_p$  - радиус каустики зонди-  
 рующего луча в плазме). На рис. 3 представлено угловое распре-



Р и с. 3. Угловое распределение мощности рассеянного излучения:  
 $\theta$  - угол рассеяния,  $k$  - модуль волнового вектора рассеянного  
 излучения,  $\circ$  - экспериментальные точки, сплошная кривая - рас-  
 чет

деление излучения, рассеянного колебаниями плазмы, возбуждаемыми на частоте  $f = 4$  МГц ( $V_c = 50$  В,  $V_{\perp} = 10$  В). Максимальная интенсивность рассеянного излучения наблюдалась под углом  $\theta = 2,5$  мрад, соответствующим  $\lambda \sim 4$  мм, что совпадает с данными зондовых измерений длины волны в этих условиях (рис. 2). Полуширина контура рассеянного излучения свидетельствует о высоком разрешении данной методики по углу и, соответственно, по волновым числам  $\Delta k \sim 1$  см $^{-1}$ . По интенсивности рассеянного излучения была определена амплитуда колебаний концентрации, которая в указанном примере составила  $\delta n = 6,5 \cdot 10^9$  см $^{-3}$  ( $\delta n/n = 1,3 \cdot 10^{-2}$ ), что хорошо согласуется с данными зондовых измерений:  $\delta n = 9 \cdot 10^9$  см $^{-3}$  ( $\delta n/n = 1,6 \cdot 10^{-2}$ ). Предельное значение амплитуды колебаний плотности плазмы, которые могут быть зарегистрированы фотоприемником над уровнем шумов, составляет  $\delta n L \sim 5 \cdot 10^9$  см $^{-2}$ , где  $L \sim 6$  см — длина области рассеяния.

Авторы выражают благодарность Г. М. Батанову, В. Н. Колесникову и Н. Н. Соболеву за плодотворное обсуждение работы.

Поступила в редакцию

21 января 1983 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. D. E. Evans, *Physica*, 82C, 27 (1976).
2. Д. М. Карфилов и др., *Физика плазмы*, 7, 136 (1981).
3. A. L. Peratt et al., *Phys. Fluids*, 20, 1900 (1977).
4. Г. М. Батанов и др., *Препринт ФИАН № 263*, М., 1981 г.
5. В. А. Курбатов, Н. А. Пенин, *Физика и техника полупроводников*, 6, 903 (1972).