

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ СВЧ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ

Г.М. Батанов, Ю.В. Задирака, С.Н. Сатунин, В.А. Силин, Л.В. Синьковская

Измерения фазового набега диагностического излучения с частотой много большей, чем частота накачки, показывают, что в режиме быстрой нелинейной прозрачности плазменного слоя для волны накачки не регистрируется изменение средней концентрации плазмы по трассе диагностического луча.

Сильное СВЧ поле может вызывать в плазме значительные возмущения концентрации и приводить к нелинейному просветлению первоначально плотного (закритического) слоя бесстолкновительной плазмы /1-3/. Ряд экспериментальных данных указывают на то, что при таком просветлении возникает сильная ленгмюровская турбулентность, которая сопровождается значительными флуктуациями концентрации плазмы $\Delta N/N$, охватывающими в неоднородном плазменном слое область от критической концентрации N_c до $(2 \div 3)N_c$ /4/. Попытки измерить концентрацию плазмы с помощью ленгмюровских зондов не привели к успеху, т.к. наличие сильного СВЧ поля в области измерений мешает работе зондов.

В настоящей работе сообщается об измерении концентрации плазмы в области нелинейной прозрачности с помощью диагностических пробных волн. Для измерений была собрана схема однопроходного СВЧ интерферометра (фазометра), при этом диагностическая частота ω_d выбиралась существенно больше, чем максимальная ленгмюровская частота в слое плазмы $\omega_d \gg \omega_{Le \max}$.

Схема интерферометра показана на рис. 1. Излучение от мощного СВЧ генератора (накачка) частотой $f_0 \approx 3,2$ ГГц и мощностью 100-500 кВт создает в плазменном слое канал прозрачности шириной около 20 см /3,4/. Кроме мощной СВЧ волны плазменный слой облучается также диагностическим излучением с частотой $f_d = 6,78$ ГГц, ширина потока которого меньше, чем поперечный размер канала. Приемные устройства диагностического излучения и диагностический генератор Г4-10А (мощностью 30 мВт) защищены от воздействия мощной волны f_0 заградительными волноводами, которые пропускают частоту f_d и ослабляют f_0 не менее чем на 100 дБ. Кроме того, в диагностическом тракте использовался полосно-запирающий фильтр (ПЗФ), поглощающий вторую гармонику мощного генератора $2f_0$, и имеющий в диапазоне $2f_0$ полосу 40 МГц, в которой коэффициент пропускания составляет 50 дБ.

При измерениях с диагностическим излучением регистрировались одновременно сигнал излучения f_d , прошедшего через плазму (E_d), и смешанный сигнал прошедшей и опорной диагностических волн (E). Регистрация осуществлялась с помощью измерительных приемников П5-7Б, работавших в линейном режиме.

Измеряя фазовый набег диагностической волны, можно определить среднее значение концентрации плазмы на трассе диагностического луча. Набег фазы диагностического излучения составляет

$$\varphi = (\omega_d/c) \int_0^{l_0} \sqrt{\epsilon(l)} dl = (\omega_d/c) \int_0^{l_0} [1 - N(l)/N_{cd}]^{1/2} dl.$$

Отсюда следует, что при $N_{cd} \gg N_{\max}$ средняя концентрация по трассе луча (N) определяется простым выражением: $\langle N \rangle = 2N_{cd}(1 - \varphi \lambda_d / 2\pi l_0)$, где N_{cd} - критическая концентрация для f_d , λ_d - длина волны диагностического излучения, l_0 - длина пути диагностической волны в плазме.

В измерениях применялся режим линейного детектирования, таким образом. При сложении прошедшего плазму сигнала (E_d) с опорным (E_0) суммарный сигнал равен

$$E = (E_d^2 + E_0^2 + 2E_d E_0 \cos \varphi)^{1/2} = \sqrt{2} E_d (1 + \cos \varphi)^{1/2}$$

при $E_d = E_0$.

Это дает чувствительность по фазе диагностической волны

$$\partial E / \partial \varphi = E_d \sin(\varphi/2).$$

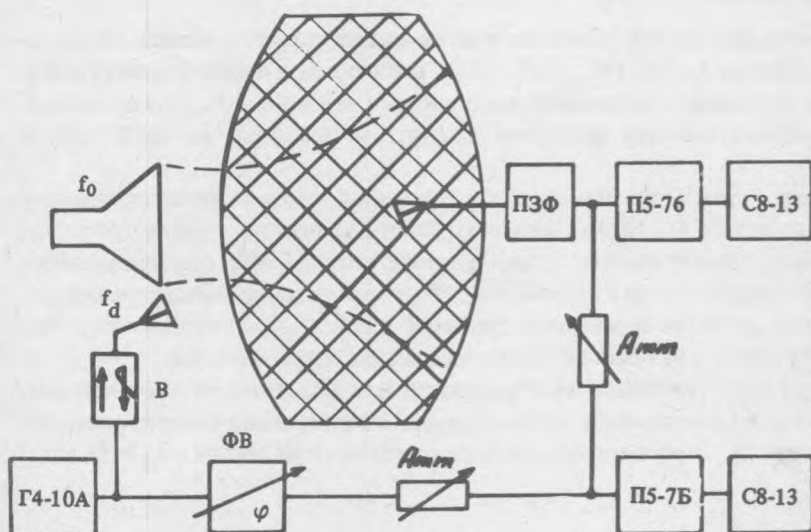


Рис. 1. Схема измерения фазового набега диагностического излучения: В — ферритовый вентиль, ФВ — фазовращатель, ПЗФ — полосно-запирающий фильтр, П5-7Б — измерительный приемник, С8-13 — осциллограф.

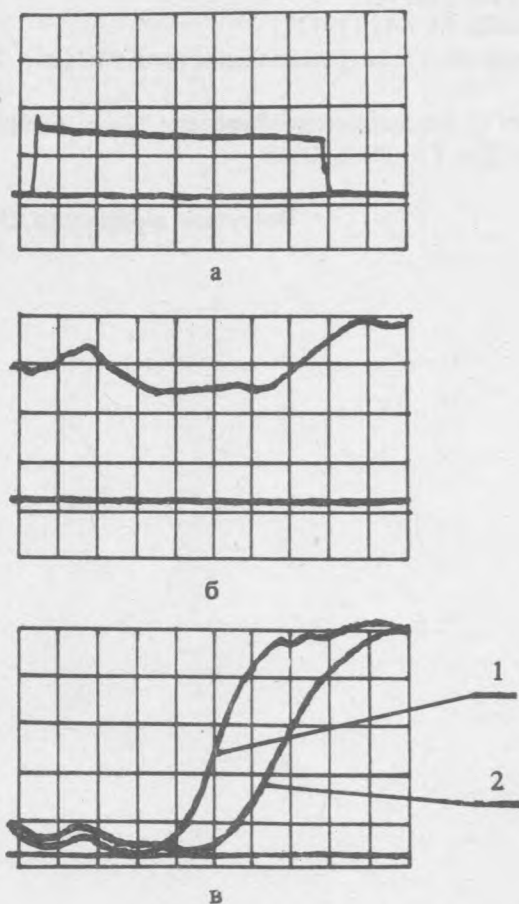


Рис. 2. Осциллограммы: а — огибающая импульса накачки, б — амплитуда прошедшего плазму диагностического излучения, в — смешанный сигнал прошедшей и опорной волны (1 — с накачкой, 2 — без накачки); масштаб времени 2 мкс/дел.

Последнее выражение определяет точки максимальной чувствительности при изменении фазы ($\varphi = \pi + 2\pi n$) и показывает, что минимальный регистрируемый фазовый угол $d\varphi = \partial E/E_d$ составляет $\approx 6^\circ$, поскольку изменения амплитуды измеряются с точностью 10%. Отсюда получим, что регистрируемое данной методикой минимальное изменение средней концентрации плазмы по трассе диагностического луча составляет $\Delta \langle N \rangle = 6 \cdot 10^{-3} N_{cd}$. (Здесь использовано значение $l_0 = 5\lambda_d$.)

Результаты измерений фазовых набегов диагностического излучения иллюстрируются осциллограммами рис. 2. Максимальная концентрация плазмы в слое ($N_{\max}/N_c = 2,1$) выбрана так, чтобы фазовый набег диагностического излучения составлял π к моменту включения мощной волны накачки f_0 , это соответствует максимуму чувствительности к дополнительному фазовому набегу, вызываемому мощной волной накачки.

В течение первых 3–5 мкс от момента включения накачки, т.е., во время, соответствующее режиму быстрой нелинейной прозрачности, значительных изменений фазового набега не регистрируется (рис. 2б). Результаты измерений показывают, что при мощностях накачки в диапазоне 150–260 кВт среднее значение концентрации плазмы в области прозрачности $\langle N \rangle = \text{const}$ с точностью 2% от критической концентрации для волны накачки. В последующие моменты времени изменения фазового набега f_d регистрируются, что, очевидно, связано с ускоренным разлетом плазмы из области, занятой сильным полем накачки.

Полученные результаты соответствуют представлениям об образовании в плазменном слое мелкомасштабного перераспределения концентрации и возникновения положительной эффективной диэлектрической проницаемости для диапазона частот вблизи f_0 . В то же время, для диагностической волны с $f_d \gg f_0$ плазма остается практически прозрачной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бродский Ю. Я. и др. Письма в ЖЭТФ, 13, 136 (1971).
2. Батанов Г. М., Силин В. А. Письма в ЖЭТФ, 14, 445 (1971).
3. Батанов Г. М., Силин В. А. В сб. "Диссипация электромагнитных волн в плазме", Труды ФИАН, т. 92, М., Наука, 1977, с. 3.
4. Батанов Г. М. и др. В кн. Тезисы докладов III Всесоюзной конференции "Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой", Алма-Ата, изд. Каз. ГУ, 1982, с. 120.

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 23 июня 1986 г.