

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ  
В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 539.9.082

ДВУХЧАСТОТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ РЕФРАКТОМЕТР  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ В ТОКАМАКАХ

© 2011 г. В. Г. Петров, А. Ю. Малышев, А. А. Петров, В. К. Марков

ГНЦ РФ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований” (ТРИНИТИ)

Россия, 142190, Троицк Московской обл., ул. Пушкиновых, 12

Поступила в редакцию 09.12.2010 г.

Описан прибор для “бессбойных” измерений электронной концентрации и оценки фактора пикирования распределения плотности в установках с магнитным удержанием плазмы с зондированием на частотах, близких к отсечке. Прибор позволяет проводить измерения в диапазоне плотностей  $5 \times 10^{18} - 10^{20} \text{ м}^{-3}$  (при зондировании необыкновенной волной) за времена  $\sim 10$  нс.

Двухчастотный импульсный рефрактометр предназначен для измерения средней электронной плотности на установках с магнитным удержанием плазмы.

Импульсный рефрактометр позволяет определять среднюю электронную плотность (свободную от “перескоков” фазы) в плазме токамака путем измерений времени распространения микроволнового импульса в плазме [1]. Принцип действия диагностики подобен принципу действия импульсного рефрактометра [2]. В отличие от последнего, зондирование плазмы осуществляется на частоте, на которой исследуемая плазма прозрачна, и регистрируется сигнал, прошедший через плазму и отраженный от внутренней стенки вакуумной камеры (схема с двойным проходом). Время задержки отраженного (от внутренней стенки вакуумной камеры) импульса в плазме  $\tau_{gr}$  дает однозначную информацию о линейной плотности зондируемой плазмы.

При зондировании на необыкновенной волне (электрическое поле волны перпендикулярно направлению суммарного магнитного поля в плазме), когда плазменная частота  $f_p \ll f_c, f$ , имеем

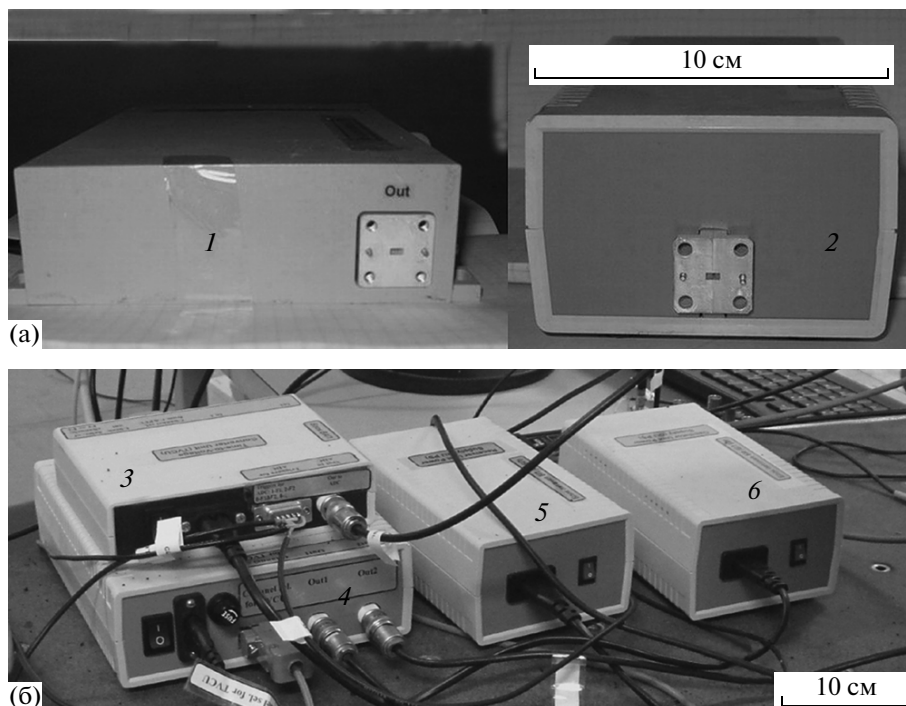
$$\tau_{gr,X} \approx k \frac{f^2 + f_c^2}{(f^2 - f_c^2)^2} \int_l N(z) dz,$$

где  $k$  – численный коэффициент;  $f$  – частота зондирующей волны;  $N(z)$  – электронная плотность плазмы;  $f_c$  – электронная циклотронная частота в центре плазменного шнура;  $f_p$  – электронная плазменная частота;  $z$  – текущая координата по направлению зондирования;  $l$  – длина пути луча в плазме [3].

Однако когда частота зондирующей волны находится вблизи частоты отсечки в плазме (как это имеет место, например, в токамаках ИТЭР и FTU), измеряемая величина существенно зависит от профиля плотности (отличается от просто-

го интеграла плотности), поэтому необходимо вводить некоторые поправки. Система с двумя различными зондирующими частотами обеспечивает два значения времени задержки, которые можно использовать (в предположении о гладком профиле плотности вида  $N(\rho) = N(0)(1 - \rho^2)^\alpha$ , где  $N(0)$  – плотность в центре плазмы,  $\rho = r/a$  – нормализованный радиус плазмы) для оценки фактора пикирования распределения плотности  $\alpha$  и определения правильного значения линейной плотности [4].

Основной частью прибора являются импульсные микроволновые генераторы (длительность импульсов  $\sim 5$  нс) с частотами 51.5 и 60.5 ГГц, излучение которых объединяется с помощью объединителя излучения и далее поступает на направленный ответвитель. После этого основное излучение направляется в плазму и дважды проходит через нее, отразившись от внутренней стенки разрядной камеры токамака. Далее его принимает приемная антенна, оно детектируется сигнальным детектором и через усилитель поступает на вход формирователя со следящим порогом ФСП. Часть мощности ( $-20$  дБ) ответвляется направленным ответвителем на детектор опорного канала и через усилитель поступает на второй вход ФСП. На выходах блока управления и ФСП (БУ/ФСП) формируются два TTL-импульса, привязанных по времени к соответствующему фронту импульсов на входах ФСП. Эти TTL-импульсы далее поступают на входы 1 (Старт) и 2 (Смон) блока времяамплитудного преобразователя ВАП, с выхода которого напряжение, пропорциональное времени задержки  $\Delta t$  между импульсами, поступает на входы АЦП. На выходе блока ВАП вырабатываются также сигналы синхронизации для тактирования работы каждого из двух каналов АЦП, необходимых для преобразования в код АЦП аналогового сигнала времени задержки для обеих частот, вырабатываемых в блоке излучателя:  $f_1 = 51.5$  ГГц и  $f_2 = 60.5$  ГГц.



Общий вид прибора в сборе на стенде: **а** – блок излучателя (1), блок приемника (2); **б** – БУ/ФСП (3), блок ВАП (4), блок питания приемника (5), блок питания излучателя (6).

Таким образом, один канал АЦП производит запись времени задержки, измеренного на частоте излучения 50.5 ГГц, а второй – на частоте излучения 60.5 ГГц. Зондирующие микроволновые импульсы формируются последовательно во времени с частотой повторения 250 кГц (или 125 кГц – выбирается с помощью переключателя на передней панели БУ/ФСП), полный цикл занимает соответственно 8 (16) мкс. Импульсный способ позволяет относительно просто избавиться от “паразитных” переотражений в тракте и в камере токамака, а также повысить надежность измерений, поскольку непосредственно измеряется время задержки импульса в плазме, а не фаза, как в обычных фазовых рефлектометрах или интерферометрах.

**Основные технические характеристики прибора.** Предельная точность измерения временных задержек 10 пс, что соответствует диапазону измеряемых плотностей  $5 \cdot 10^{18} - 10^{20} \text{ м}^{-3}$  за времена  $\sim 8 - 16 \text{ мкс}$  при зондировании необыкновенной волной в условиях:  $a/R$  (малый/большой радиусы токамака) = 0.3/0.93 м,  $I_p$  (ток плазмы) = 500 кА;  $B_t$  (тороидальное магнитное поле) = 5–7 Тл. Сбор данных осуществляется с помощью АЦП (в состав прибора не входит) с внешним тактированием, осу-

ществляемым TTL-сигналами, вырабатываемыми на выходе блока ВАП прибора. Питание прибора от сети 220 В, 50 Гц; потребление  $\sim 100 \text{ Вт}$ ; масса  $< 6 \text{ кг}$  (вместе с блоками питания).

На рисунке показан общий вид прибора в сборе на стенде.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров А.А., Петров В.Г., Малышев А.Ю. и др. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 10. С. 877.
2. Шевченко В.Ф., Петров А.А., Петров В.Г., Чаплыгин Ю.А. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 1. С. 33.
3. Петров В.Г., Петров А.А., Малышев А.Ю. и др. // Физика плазмы. 1994. Т. 34. № 1. С. 27.
4. Petrov A. A., Petrov V.G. // Rev. Sci. Instrum. 2003. V. 74. P. 1465.

Адрес для справок: Россия, 142190, Троицк Московской обл., ул. Пушкиновых, 12, ГНЦ РФ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований” (ТРИНИТИ). Тел. (496) 751 0439.  
E-mail: vpetrov@triniti.ru