

01; 04

© 1992

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ

А.В. Б о м к о, Д.Л. Г р е к о в,
О.С. П а в л и ч е н к о

1. Важнейшей задачей диагностики плазмы в термоядерных установках с магнитным удержанием является измерение профиля плотности электронов $n_e(r)$. Метод однохордовой многочастотной рефлектометрии обыкновенной (o^-) волной для определения профиля плотности в экспериментальном токамаке – реакторе ИТЭР, обсуждался и был признан перспективным [1, 2]. Этот метод был предложен еще в 60-е годы [3], к настоящему времени детально разработан и с успехом применяется на токамаках (см., например, [4]). Однако он позволяет восстановить профиль плотности только до первого максимума. Использование многохордовой микроволновой интерферометрии в перпендикулярных к экваториальной плоскости тора направлениях на установке ИТЭР невозможно из-за ограниченного доступа к плазме.

В работе предложен метод восстановления профилей плотности плазмы произвольного вида, основанный на применении двухполяризационной многочастотной рефлектометрии в экваториальной плоскости тора.

2. Предложенный метод основан на измерении набегов фаз o^- -волны и необыкновенной (x^-) волны, которая отражается в точке „верхней“ отсечки R_c , где

$$\omega = \omega_c(R_c)/2 + [\omega_c^2(R_c)/4 + \omega_p^2(R_c)]^{1/2}. \quad (1)$$

Здесь: ω – частота зондирующего сигнала, $\omega_p = [4\pi n_e(R_c) e^2 / m_e]^{1/2}$, $\omega_c(R) = eB / mc$, $B(R)$ – модуль удерживающего поля, B_t и B_p – тороидальное и полоидальное магнитное поле, R – координата вдоль большого радиуса тора в экваториальном сечении. Рассматриваются волны с составляющей волнового вектора вдоль магнитного поля $k_{||} = 0$.

Необходимым условием применимости предложенного метода диагностики является нарастание частоты (1) при уменьшении R . Для установки ИТЭР это условие хорошо выполняется в широком интервале изменения плотности плазмы.

Набег фазы x -волны, прошедшей от границы плазмы R_b до точки отсечки и обратно, равен

$$\Phi(\omega) = \frac{2}{c} \int_{R_s}^{R_b} \left[\frac{\omega^2 \omega_c^2(R) - (\omega_p^2(R) - \omega^2)^2}{\omega_c^2(R) + \omega_p^2(R) - \omega^2} \right]^{1/2} dR + \frac{\pi}{2}. \quad (2)$$

Плотность плазмы и магнитное поле при $R = R_b$ считаем известными.

3. Общая схема решения задачи восстановления профиля следующая:

1) По результатам измерений набегов фаз O -волны восстанавливаем $n_e(R)$ до точки первого максимума R_m .

2) Решая уравнение (2), находим на этом участке ($R_b - R_m$) по результатам измерений набегов фаз x -волны зависимость частоты отсечки (1) от радиуса $\omega(R)$ и $\omega_c(R)$.

3) Предполагаем, что магнитная ось смещена от геометрической оси тора R_0 на расстояние $\Delta(0) = \Delta_0$, а магнитные поверхности на расстояние

$$\Delta(0) = \Delta_0 \frac{\exp(\xi) - \exp(\xi a^2/b^2)}{\exp(\xi) - 1}, \quad (3)$$

где ξ - параметр, a - радиальная координата - метка магнитной поверхности, b - координата граничной поверхности. Предполагаем, что поле $B_a(a)$ на участке от $R_0 + \Delta_0$ до R_m изменяется от 0 до значения $B_p(R_m)$, найденного в (2), по линейному закону. Такое предположение можно принять, поскольку указанная область занимает центр плазменного шнура, где $B_p \ll B_z$.

4) Решая уравнение (2), находим $\omega(R)$ и $n_e(R)$ на участке от $R_0 + \Delta_0$ до R_m по результатам измерений набегов фаз x -волны.

5) Считая плотность плазмы постоянной на магнитной поверхности, продолжаем полученную зависимость $n_e(R)$ на участок от $R_0 + \Delta_0$ до внутренней границы тора. Используя данные измерений набегов фаз x -волны для диапазона частот, в котором точка отсечки лежит на внутренней стороне тора, минимизируем функционал

$$\Psi(\Delta_0, \xi) = \sum_k \left[\Phi(\omega_k) - \Phi_s(\omega_k, \Delta_0, \xi) \right]^{1/2} \quad (4)$$

по параметрам Δ_0 и ξ . Здесь Φ - измеренный, а Φ_s - восстановленный по заданным Δ_0 , ξ , $n_e(R)$ набег фаз.

4. Остановимся более подробно на ключевой позиции предложенного метода - возможности решения уравнения (2).

В данной постановке задачи исходное уравнение является интегральным нелинейным уравнением Вольтерры 1-го рода

$$\int_{R_b}^{R_c} N(\omega, \omega_p(R), \omega_c(R)) dR = \tau(\omega); \quad (5)$$

$$\left(N(\omega, \omega_p(R), \omega_c(R)) = \left[\frac{\omega_c^2(R) - (\omega_p^2(R) - \omega^2)^2 / \omega^2}{\omega_c^2(R) + \omega_p^2(R) - \omega^2} \right]^{1/2} \right. \quad \left. - \text{показатель} \right)$$

преломления, $\tau(\omega) = c/2\omega [\Phi(\omega) + \bar{x}/2]$ относительно неизвестных функций $\omega(R)$ и либо $\omega_p(R)$, либо $\omega_c(R)$. Эти функции связаны в точке R_c соотношением

$$\omega_c(R_c) = \frac{\omega^2(R_c) - \omega_p^2(R_c)}{\omega(R_c)}. \quad (6)$$

Начальные условия: $\omega_c(R_b)$, $\omega_p(R_b)$ и $\omega(R_b)$ известны, $\tau(\omega(R_b)) = 0$.

Основой решения является: сплайн-интерполяция функции $\tau(\omega)$ в известном диапазоне и разбиение его на M участков ($M=75-200$), определение R_i для каждого ω_i методом секущих с фиксированной начальной точкой. Для применения этого метода необходимы две начальные точки - R_{i-1} и R_{i-2} . При этом $R_0 = R_b$. В связи с этим для определения R_1 предлагается другой способ.

Примем на первом участке

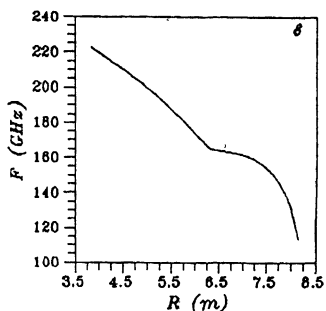
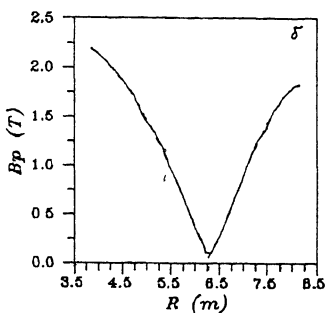
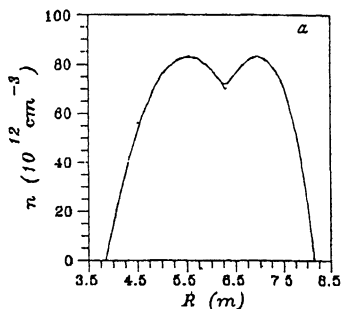
$$\omega_c(R) = \frac{1}{2} [\omega_c(R_1) + \omega_c(R_b)] = \text{const}, \quad \text{где } \omega_c(R_1) = \frac{\omega_1^2 - \omega_p^2(R_1)}{\omega_1}.$$

$\omega_p(R_1)$ определим через итерационный процесс, $\omega_p^{(0)}(R_1) = \omega_p(R_b)$, далее $\omega_p^{(j)} = \frac{1}{2} [\omega_p(R_b) + \omega_p^{(j-1)}(R_1)] = \text{const}$. Таким образом,

$$R_1^{(j)} = R_b \frac{\tau(\omega_1)}{N(\omega, \omega_p^{(j)}, \omega_c^{(j)})}.$$

Использовать этот метод в дальнейшем не эффективно из-за недостаточной точности.

Затем для нахождения каждой точки R_i применялся метод секущих. В точках R_{i-1} , R_{i-2} , необходимых для отыскания нулевого приближения $R_i^{(0)}$, интегрируем в (5) по уже известным величинам, далее в точке $R_i^{(0)}$ неизвестное значение $\omega_p(R_i^{(0)})$ или $\omega_c(R_i^{(0)})$ выбирается из условия отсечки (6). Незвестная функция ($\omega_p(R)$ или $\omega_c(R)$) интерполируется линейно на промежутке от R_{i-1} до $R_i^{(0)}$ и интегрируется численно. Если условие завершения итерационного процесса не выполняется,



Заданные (пунктир) и восстановленные (сплошная линия): плотность плазмы (а), полоидальное магнитное поле (б) и частота отсечки (в) в зависимости от большого радиуса тора.

проводится следующая итерация с использованием точек R_{i-2} и $R_i^{(0)}$. В результате определяется $R_i = R_i^{(j)}$.

Пример восстановленного профиля плотности $n_e(R)$ с использованием известных значений Δ_0 и ξ показан на рисунке.

5. Суммируя вышеизложенное, можно утверждать: предложен эффективный метод определения профилей плотности плазмы произвольного вида путем измерения набегов фаз отраженных от плазмы обыкновенной и необыкновенной волн. Этот метод применим для токамаков, в которых частота верхней отсечки необыкновенной волны имеет неубывающую зависимость от большого радиуса при перемещении в экваториальной плоскости с внешней стороны на внутреннюю сторону плазменного шнура. Для токамака с параметрами ИТЭРа нужно иметь данные по набегу фазы необыкновенной волны для числа частот $N \approx 20$. Метод особенно актуален для этой установки, где невозможно применение микроволновой интерферометрии из-за ограниченного доступа к плазме. Отметим также, что он позволяет восстановить профиль полоидального поля во внешней части плазменного шнура и в этом является продолжением идей работы [2].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] C o s t l e y A.E. Report ITER-IL-PH-7-9-E-8. 1989.
- [2] P a v l i c h e n k o O.S., S k i b e n - k o A.I., V a s i n I.V. Report ITER-IL-PH-07-0-15. 1990.
- [3] А н и с и м о в А.И., В и н о г р а д о в Н.И., Г о - л а н т В.Е., К о н с т а н т и н о в Б.П. // ЖТФ. 1960. Т. 30. С. 1009.
- [4] H u b a r d A.E., C o s t l e y A.E., F e s - s e y J.A., P r e n t i c e R., W a r d D. Preprint JET-P(86)45. 1986.

Харьковский
физико-технический
институт АН Украины

Поступило в Редакцию
3 июня 1992 г.