

УДК 533.951.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОТРАЖАЮЩЕГО СЛОЯ НЕОБЫКНОВЕННОЙ ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ СТЕЛЛАРАТОРА

А.В. Прокопенко, А.И. Скибенко, И.Б. Пинос

ИФП ННЦ НАН Украины "Харьковский Физико-Технический Институт" Академическая 1, 61108 Харьков, Украина

E-mail: prokopenko@kfti.kharkov.ua

Поступила в редакцию 7 февраля 2008 г.

В работе обсуждается применение зондирования необыкновенной волной наряду с обыкновенной волной как средства диагностики плазмы. В плазменных установках из-за пространственной неоднородности магнитного поля возникают сложности в определении положения слоя плазмы отражающего необыкновенную волну и величины плотности отражения. Учитывая, что в стеллараторах магнитное поле в плазме при малых β не отличается от его вакуумного значения, обсуждаются возможности определения профиля плотности по измеренной средней плотности и наличию отражения необыкновенной волны на нескольких частотах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стелларатор, неоднородное магнитное поле, обыкновенная волна, необыкновенная волна, профиль плотности, верхняя отсечка, нижняя отсечка, верхний гибридный резонанс.

Применение зондирования плазмы необыкновенной волной (НВ) ($E_{\perp}B_{\text{внеш}}$) как диагностического средства совместно с обыкновенной волной (ОВ) значительно расширяет возможности СВЧ диагностики магнитоактивной плазмы [1-5]. К достоинствам использования необыкновенной волны относятся следующие возможности. При локации плазмы необыкновенной волной расширяется диапазон измеряемых плотностей в более узкой полосе частот и коротковолновом диапазоне. При двухполяризационном зондировании более просто осуществляется разделение сигналов с близкими частотами при измерении градиентных длин плотности, корреляционных длин флуктуаций и их волновых чисел, при определении локализации изменения направления вращения плазмы. При малом градиенте профиля плотности плазмы зондирование необыкновенной волной в отличие от обыкновенной обеспечивает лучшее пространственное разрешение, а при определенных условиях появляется возможность получить информацию о слое плотности за ее максимумом. Важной особенностью двухполяризационного зондирования является возможность определить величины напряженности магнитного поля и ее флуктуации. Эти качества становятся возможными из-за зависимости диэлектрической проницаемости, как от плотности плазмы, так и от напряженности магнитного поля. Так как в термоядерных установках, как правило, магнитное поле изменяется в пространстве занятом плазмой, то важным является вопрос о положении отражения необыкновенной волны.

Целью настоящей работы является разработка метода построения профиля плотности плазмы путём определения локальных значений плотности по отражению необыкновенной волны и измерению средней плотности СВЧ интерферометром в плазменной ловушке стелларатора с учётом его магнитной конфигурации, которая не зависит от параметров плазмы при небольших β . Так как в исследованиях на торсатроне Ураган-3М широко используется двухполяризационная рефлектометрия и планируется ее использование на торсатроне Ураган-2М, то при проведении анализа взяты в расчет характеристики У-3М.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Области прозрачности ОВ и НВ определяются их коэффициентами преломления, которые при распространении поперек магнитного поля в пренебрежении столкновениями описываются выражениями:

$$\mu_{Ov}^2 = 1 - \frac{n}{n_{kp}}, \quad (1)$$

$$\mu_{Hv}^2 = 1 - \frac{\frac{n}{n_{kp}} \cdot \left(1 - \frac{n}{n_{kp}}\right)}{1 - \frac{n}{n_{kp}} - \left(\frac{f_{He}}{f}\right)^2}, \quad (2)$$

где $n_{kp} = \frac{\pi m f^2}{e^2}$ критическая плотность для частоты f , $f_{He} = \frac{eB}{2\pi m_e c} = 28 \cdot B(T)$ ГГц - электронная циклотронная частота. ОВ отражается при плотности $n = n_{kp}$ диапазон прозрачности $0 < n < n_{kp}$. НВ

отражается при плотностях:

$$n_{01} = n_{кр} \cdot \left(1 - \frac{f_{He}}{f}\right), \quad (3)$$

$$n_{02} = n_{кр} \cdot \left(1 + \frac{f_{He}}{f}\right), \quad (4)$$

$$n_{03} = n_{кр} \cdot \left(1 - \left(\frac{f_{He}}{f}\right)^2\right), \quad (5)$$

которые соответственно называются верхней отсечкой, нижней отсечкой и областью верхнего гибридного резонанса (ВГР). Между n_{01} и n_{03} и n_{02} и n_{03} существуют области непрозрачности и прозрачности соответственно: $n_{03} - n_{01} = n_{кр} \cdot \left(\frac{f_{He}}{f} - \frac{f_{He}^2}{f^2}\right)$, $n_{02} - n_{03} = n_{кр} \cdot \left(\frac{f_{He}}{f} + \frac{f_{He}^2}{f^2}\right)$. Зависимость относительных

плотностей $\frac{\Delta n_{23}}{n_{кр}}$ и $\frac{\Delta n_{31}}{n_{кр}}$ от $\frac{f_{He}}{f} \leq 1$ представлена на рис. 1.

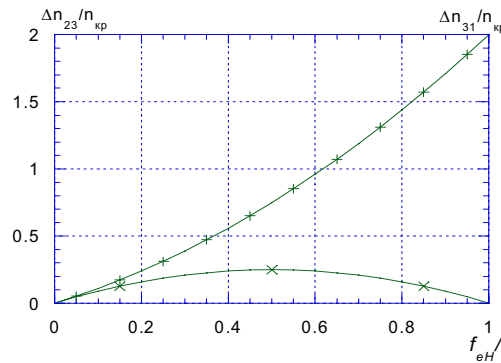


Рис. 1. Зависимость относительных плотностей $\frac{\Delta n_{23}}{n_{кр}}$ и $\frac{\Delta n_{31}}{n_{кр}}$ от $\frac{f_{He}}{f}$

При $\frac{f_{He}}{f} > 1$ отсечки n_{01} и n_{03} вырождаются и остается $n_{02} > n_{кр}$. Частоты верхней, нижней отсечки и верхнего гибридного резонанса определяются формулами:

$$f_{1,3} = \pm \frac{f_{He}}{2} + \sqrt{\left(\frac{f_{He}}{2}\right)^2 + f_p^2}, \quad (6)$$

$$f_2 = \sqrt{f_{He}^2 + f_p^2}. \quad (7)$$

Экспериментальное наблюдение верхней, нижней отсечек и верхнего гибридного резонанса выполнено в [1]. Особенности отражения в области ВГР представлены в работе [5].

При вычислении радиального распределения этих частот учитывался профиль плотности и радиальное распределение магнитного поля, которое в области удержания плазмы в стеллараторе описывается выражением [6]:

$$B = B_0 \cdot [1 - \xi_t - \xi_n \cdot \cos l(\theta + \eta\varphi)], \quad (8)$$

где $\xi_t = \frac{\rho}{R}$ - тороидальная неоднородность, $\xi_n = \left[\frac{l}{l-1} \cdot (\alpha \cdot \xi_t)^4 \cdot l\right]^{1/2}$ - полоидальная неоднородность, θ и φ - углы в полоидальном и тороидальном направлениях, ρ - расстояние от геометрической (круговой) оси тора (см), $\eta = 3$ - число шагов винтовой обмотки, l - угол вращательного преобразования, $\alpha = \frac{N}{l}$, $N=9$ - число периодов, $l=3$ - заходность.

Учитывая, что для У-3М $R=100$ см, $l = 0,25$ имеем:

$$B(r) = B_0 \left[1 - 0,9986 \cdot \left(\frac{r+5,5}{100}\right) - 0,566 \cdot \left(\frac{r+5,5}{100}\right)^2\right], \quad (9)$$

где r – расстояние от магнитной оси (см), B_0 – магнитное поле на геометрической оси тора. Приведенные расчеты относятся к случаю зондирования вдоль большого радиуса тора в медианной плоскости. При других направлениях зондирования численные коэффициенты вычисляются с учетом углов φ и θ .

Положение (радиус) отражающего слоя для каждого из трех случаев отсечки необыкновенной волны определяется из уравнений:

$$n_0 \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^p \right] = n_{кр} \left[1 \pm \frac{28 \cdot B(r)}{f} \right], \quad (10)$$

$$n_0 \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^p \right] = n_{кр} \left[1 - \left(\frac{28 \cdot B(r)}{f} \right)^2 \right], \quad (11)$$

где f – частота зондирования в ГГц, B_0 – магнитное поле в Т. Если описывать радиальное распределение плотности функцией вида $n(r) = n_0 \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^p \right]$, то максимальная плотность $n_0 = n_{кр} \cdot \frac{p+1}{p}$, $n_{кр} = \frac{(nL)_{изм}}{L_{DD}}$ – средняя плотность, $(nL)_{изм}$ – измеряется СВЧ интерферометром, L_{DD} – длина отрезка хорды, вдоль которой проводится зондирование необыкновенной волной в пределах крайней неразрушенной магнитной поверхности в стеллараторе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Решение уравнений (10), (11) позволяет определить положение (радиус) отражающего слоя с учётом измеряемой средней плотности для различных значений p . Значение p можно оценить путем решения уравнений вида (10) или (11) для момента отсечки зондирующей волны с частотой $f > f_{He}$ (f_{He} соответствует максимальному магнитному полю в плазме), учитывая что она наступает в максимуме плотности, то есть на магнитной оси ($r=0$) [2,4]. На рис. 2а, б, в представлены зависимости радиуса отражения в слое верхней отсечки от средней плотности для $p=1, 2, 3$ и различных частот зондирования в диапазоне $f=18\div 30$ ГГц, отличающихся на 1 ГГц. Эти зависимости получены при численном решении уравнений (10).

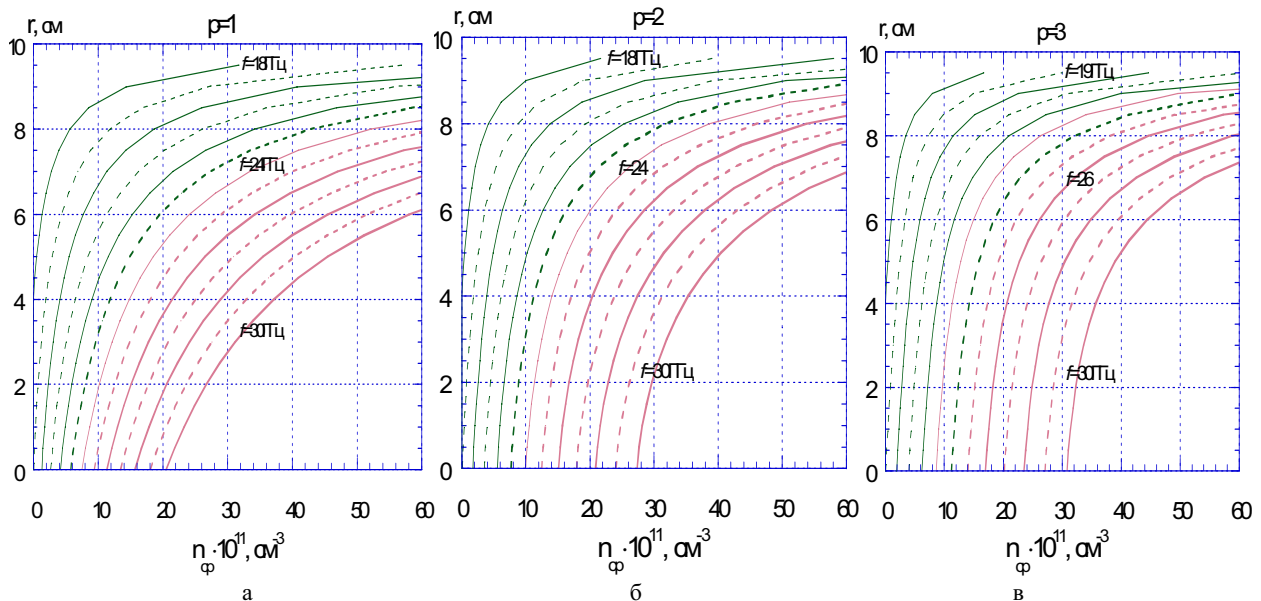


Рис.2. Зависимости радиуса отражения в слое верхней отсечки от средней плотности для различных p и различных частот зондирования в диапазоне $f=18\div 30$ ГГц.
а - $p = 1$; б - $p = 2$; в - $p = 3$

Аналогичные зависимости при отсечке в слое ВГР, полученные путём численного решения уравнений (11), представлены на рис. 3.

По измеренным значениям средней плотности при наличии отражения НВ на заданной частоте из графиков рис.2а, б, в или рис.3 а, б, в находим значение радиуса отражающего слоя. Из уравнения (9) определяем $B(r)$ для найденных значений радиуса отражающего слоя. Затем, подставив значение $B(r)$ в формулы (3) или (5), находим зависимости плотности верхней отсечки НВ рис.4а, б, в или плотности отсечки в области ВГР от средней плотности рис.5.

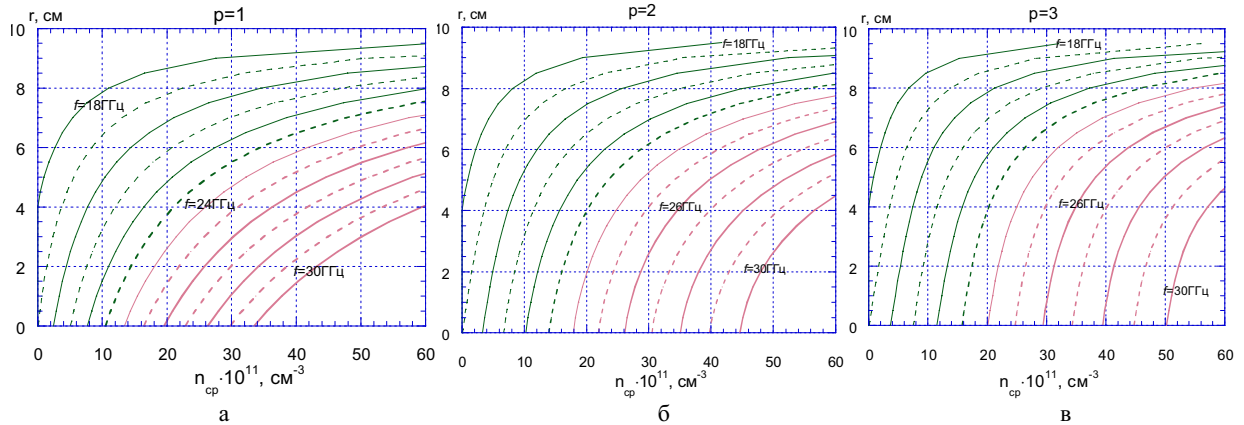


Рис.3. Зависимости радиуса отражения в слое ВГР от средней плотности для различных p и различных частот зондирования в диапазоне $f=18\div 30$ ГГц.
а - $p = 1$; б - $p = 2$; в - $p = 3$

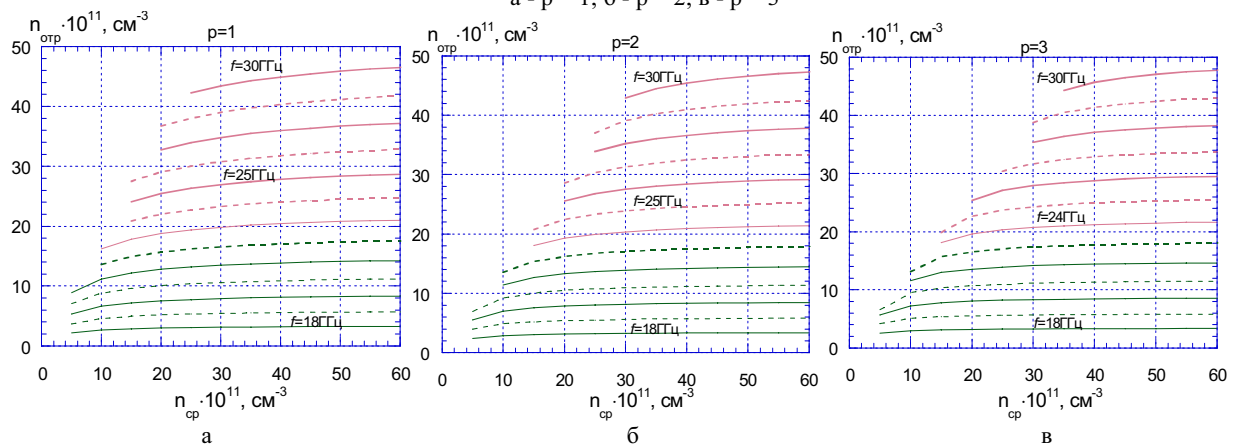


Рис.4. Зависимости плотности верхней отсечки НВ от средней плотности для различных p и различных частот зондирования в диапазоне $f=18\div 30$ ГГц.
а - $p = 1$; б - $p = 2$; в - $p = 3$

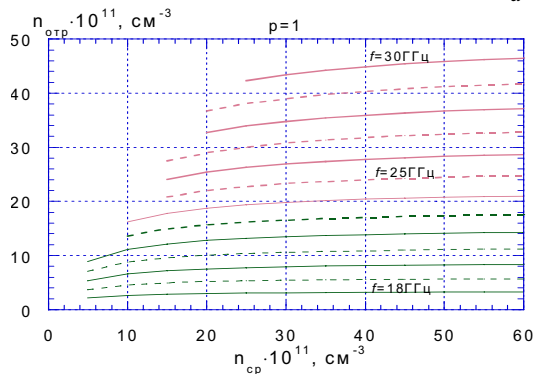


Рис.5. Зависимости плотности отсечки НВ в области ВГР от средней плотности для $p = 1$ и различных частот зондирования в диапазоне $f=18\div 30$ ГГц.

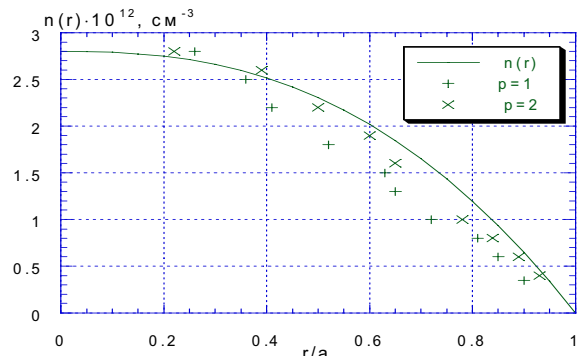


Рис.6. Сравнение заданного профиля ($p = 2,5$) и восстановленного с использованием рис.2 и рис.4 с учётом отражения НВ на частотах 18 - 26 ГГц.

Пользуясь расчетными данными, представленными на рис.2а, б, в и рис.4а, б, в в случае верхней отсечки и измеренным значением средней плотности при наличии отражения необыкновенной волны в некотором диапазоне частот можно построить радиальное распределение плотности при выбранных значениях показателя p .

Сравнение профиля вида $n(r) = 2,8 \cdot 10^{12} \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^{5/2} \right]$ и восстановленного с использованием рис.2 и рис.4 с учётом отражения НВ на частотах 18-26 ГГц представлено на рис.6. При заданном профиле $n_{cp} = \frac{p}{p+1} \cdot n_0 = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. На рисунке сплошной линией представлен заданный профиль, кружочками обозначены точки, полученные в предположении $p=1$, а крестиками при $p=2$. При $p=2$ наибольшая погрешность

в определении локальной плотности наблюдается при $\frac{r}{a} \approx 0,5$ и составляет $\frac{\Delta n}{n} \approx 5\%$, а при $r=1$ соответственно $\frac{\Delta n}{n} \approx 20\%$.

ВЫВОДЫ

С целью определения радиального профиля плотности неоднородной плазмы, находящейся в изменяющемся по радиусу магнитном поле проведен расчет положения отражения необыкновенной волны и плотности плазмы. При анализе использована радиальная зависимость магнитного поля и представление профиля плотности в виде степенной функции, для которой максимальное значение плотности представлено через значение средней плотности, измеренное СВЧ интерферометром, и показатель степени. Записаны уравнения, позволяющие определить радиусы отражающего слоя, для трех случаев отсечки необыкновенной волны (ф.10, 11). Для практического применения анализа при определении профиля плотности в торсатроне Ураган-3М построены зависимости расстояния отражающего слоя от магнитной оси торсатрона и значения плотности в отражающем слое от средней плотности в ловушке торсатрона при различных значениях показателя степени.

Пользуясь расчетными данными для верхней отсечки необыкновенной волны, проведено сравнение заданного профиля плотности и восстановленного по представленной методике. Найдены отклонения значений локальной плотности в заданной точке профиля, которые указывают на удовлетворительную точность воспроизводства профиля.

Таким образом, на основе проведенного анализа возможно восстановление профиля плотности простым способом с удовлетворительной точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.А. Душин, В.И. Привезенцев, А.И. Скибенко Диагностика плазмы с применением необыкновенной поперечной волны. // Сборник физика плазмы и проблемы УТС. – Киев: Наукова думка, 1965.
2. О.С. Павличенко, Р.С. Павличенко, А.И. Скибенко, И.П. Фомин Измерение профиля плотности и её флуктуаций на торсатроне «Ураган-3М» с помощью двухполяризационной рефлектометрии // Физика плазмы. – 1994. - Т.20, №1. - С. 13-15.
3. G.J. Kramer, R. Nazikian, E. Valeo Effects of two-dimensional and finite density fluctuations on O-X correlation reflectometry // Plasma Physics and Contr. Fusion. – 2002. – Vol. 44. – P. L11-L19.
4. A.I. Skibenko, V.L. Berezhnij at all. Optimization of UHF reflectometer device for study of plasma density profile and fluctuation in magnetically confined plasmas // MSMW'98 Symposium Proceedings. – 1998. - Vol.2. - P. 697 – 699.
5. A.B. Altukhov, A.D. Gurchenko, E.Z. Gusakov et al. Observation of enhanced Doppler effect in the Upper hybrid resonance backscattering experiment at FT-2 tokamak // 30th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics – 2003. - Vol. 27A. – P.-4.170pd.
6. Е.Д. Волков, В.А. Супруненко, А.А. Шишкин Стелларатор. - Киев: Наукова думка, 1983. – 312с.

DETERMINATION OF THE EXTRAORDINARY WAVE REFLECTION LAYER POSITION IN INHOMOGENEOUS PLASMA PLACED IN RADIALLY CHANGING MAGNETIC FIELD

A.V. Prokopenko, A.I. Skibenko, I.B. Pinos

Institute of Plasma Physics of National Science Center

“Kharkov Institute of Physics and Technology”,

Akademicheskaya st. 1, 61108 Kharkov, Ukraine

E-mail: prokopenko@kipt.kharkov.ua

In that work a simultaneous using of plasma probing by X – wave and O – wave is discuss as a diagnostic tool. However in the plasma devices the difficulties arise in determination the reflecting layer position and cut - off density in it due to spatial inhomogeneity of magnetic field. Taking into account, that magnetic field of the stellarator at a small β does not differ from the vacuum magnetic field we discuss the possibility of the plasma density profile determination by the measured average density if there are reflection of X – waves for several frequencies.

KEY WORDS: stellarator, inhomogeneous magnetic field, ordinary wave, extraordinary wave, density profile, upper cut-off, lower cut-off, upper hybrid resonance.