

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ МЕТОДОМ ДОППЛЕРОВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Одна из основных проблем физики плазмы в токамаках связана с наблюдаемым в этих установках аномальным переносом частиц и энергии. В ряде экспериментов на токамаках был обнаружен переход к улучшенному удержанию плазмы, когда в некоторых областях разряда аномальный перенос резко снижался, и возникали так называемые транспортные барьеры. Полагается, что одной из основных причин перехода к улучшенному удержанию является неоднородное вращение плазмы (шир вращения), которое приводит к подавлению турбулентных флуктуаций, ответственных за аномальный перенос частиц и энергии. В связи с этим важным является экспериментальное определение скорости вращения в токамаках. Эффективным способом оценки скорости вращения плазмы является метод обратного рассеяния излучения в области отсечки наклонного падающего микроволнового пучка, который получил название доплеровская рефлектометрия [1,2].

Одночастотные рефлектометры с последовательной перестройкой частоты зондирования от разряда к разряду, которые обычно применяются в экспериментах, не позволяют получить надежные данные о шире скорости из-за плохой повторяемости разрядов токамака. Использование рефлектометров с последовательной перестройкой частоты во время разряда не позволяет исследовать быстрые изменения ширины скорости из-за конечного времени перестройки частоты. Для надежного определения радиального профиля скорости необходимо проводить одновременное многочастотное зондирование плазмы. Целью работы являлась разработка для экспериментов на токамаке ТУМАН-3М двухчастотного доплеровского рефлектометра, позволяющего определять скорость вращения плазмы одновременно в двух точках, разнесенных по радиусу, и, тем самым, оценивать шир вращения

Для зондирования плазмы и приема обратно рассеянного излучения использовались две рупорно-параболические антенны. Они имели следующие характеристики: прямоугольный антенный раскрыв 10×93 мм²; расстояние между раскрывами антенн в тороидальном направлении составляло 5 мм. Система ввода антенны в камеру токамака позволяла изменять угол зондирования от 0 до 30 градусов [1]. Зондирование плазмы осуществлялось излучением О-моды одновременно на двух частотах, разнесенных на 1.8 ГГц. Эта разность соответствовала расстоянию между отсечками около 1 см. Частоты зондирования плазмы лежали в пределах 17-25 ГГц, когда отсечки находились вблизи периферийного транспортного барьера на токамаке ТУМАН-3М [1]. Частота 1.8 ГГц являлась также промежуточной частотой для гетеродинного приема обратно рассеянного излучения. СВЧ сигналы из генераторов поступали по волноводному тракту в антенну, откуда излучались в плазму токамака под углом к поверхности равного коэффициента преломления. Регистрировались излучение, обратно рассеянное на плазменных флуктуациях, вращающихся в полоидальном направлении. Обратно рассеянное излучение, сдвинутое по частоте согласно эффекту Доплера на величину $\Delta\omega = \mathbf{k} \cdot \mathbf{V}$, принималось соседней антенной и по волноводному тракту поступало на балансный смеситель. На балансный смеситель поступал также сигнал со второго генератора, который являлся опорным сигналом при гетеродинном приеме. На выходе смесителя получался сигнал вблизи промежуточной частоты 1.8 ГГц. Сигнал усиливался и поступал на квадратурный IQ детектор, где смешивался с сигналом на промежуточной частоте. На выходе IQ-детекторов получались 2 пары сигналов $U_{\cos}(t)$ и $U_{\sin}(t)$, сдвинутых друг относительно друга на 90 градусов. Сигналы

записывались с помощью АЦП, который имел следующие характеристики: 4 канала, 12 разрядов, частота 2 МГц, объём памяти составлял 256 килобайт на канал. Важно, что комплексный сигнал $\dot{U}(t) = U_{\cos}(t) + iU_{\sin}(t)$ после Фурье-преобразования даёт спектр в красной и синей областях, т.е. имеется возможность определить абсолютное значение смещения спектра и знак этого смещения. Собранный и протестированный схема рефлектометра была установлена на токамаке Туман-3М.

Были получены первые экспериментальные результаты исследования скорости вращения плазмы на токамаке Туман-3М с использованием СВЧ-схемы двухчастотного доплеровского рефлектометра. Измерения проводились при различных режимах работы токамака. Наиболее интересными для данного рода исследований являются режимы с переходом в Н-моду, в котором следовало ожидать появление шира вращения. На рис. 1 приведены данные различных диагностик для одного из выстрелов токамака,

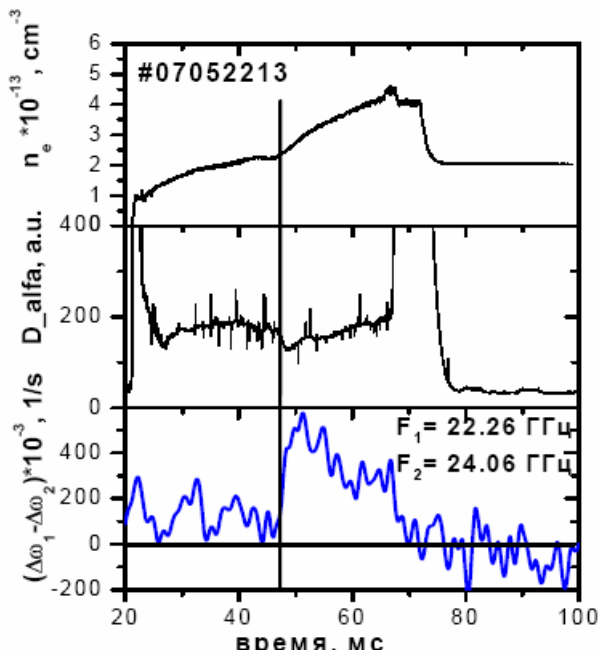


Рис. 1. Временные зависимости величин: плотности электронов; уровня D-alfa; разность доплеровских смещений частоты

сопровождающегося переходом в режим улучшенного удержания. Вертикальной линией обозначен момент времени перехода в Н-моду. Характерными признаками перехода в режим улучшенного удержания являются увеличение плотности электронов в центральной области плазмы и падение уровня излучения на линии D_α (см. рис. 1). На рисунке отображена также разность доплеровских смещений частоты $\Delta\omega_1 - \Delta\omega_2$ двух каналов рефлектометра. Резкое увеличение этой разницы в момент наступления режима улучшенного удержания отвечает увеличению в этот момент разности скоростей вращения плазмы на различных радиусах, т.е. появлению шира вращения. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования разработанного двух частотного доплеровского рефлектометра исследования процессов перехода в Н-моду.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Буланин В.В., Лебедев С.В., Левин Л.С., Ротерштейн В.С. Физика плазмы, 2000, т. 26, № 10.
2. Conway G D et.al. Plasma Phys. Control. Fusion, 2004, Vol. 46, 951.