УДК 533.9.08; 621.039.66

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ КТМ

Кашикбаев Е.А., Чектыбаев Б.Ж., Садыков А.Д., Жүнісбек С.А.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

E-mail: kashikbaev@nnc.kz

В работе рассматривается комплекс сверхвысокочастотных (СВЧ) диагностик токамака КТМ, предназначенный для измерения электронной плотности плазмы. Обсуждается состав СВЧ диагностик, их технические особенности исполнения и размещения, а также представлены первые экспериментальные результаты по измерению электронной плотности плазмы КТМ с их использованием.

Введение

Диагностика плазмы с помощью электромагнитного излучения сверхвысоких частот (СВЧ) применяется в большинстве современных плазменных установок. Измерять параметры плазмы можно либо по результату взаимодействия с ней электромагнитной волны от внешних излучателей, либо по характеристикам СВЧ-излучения самой плазмы. Наиболее широко применяется методика определения линейной плотности плазмы по измерению сдвига фазы и импульсной времяпролетной рефрактометрии плазмы.

На токамаке КТМ для измерения профиля плотности используется следующий комплекс СВЧ диагностик: бессбойный монитор среднехордовой плотности (двухчастотный радар рефрактометр), двухчастотный импульсный рефлектометр, перестраиваемый (восьмичастотный) импульсный рефлектометр и многоканальный интерферометр.

Все СВЧ диагностики КТМ работают на обыкновенной волне и располагаются в экваториальных диагностических патрубках токамака. Измерения производятся в горизонтальной плоскости вдоль большого радиуса КТМ. СВЧ диагностики токамака КТМ состоят из большого набора диагностик, дополняющих друг друга, и позволяющих детально измерять распределение электронной плотности плазмы с высокой точностью и пространственным разрешением.

Описание и принцип работы

СВЧ диагностик

Бессбойный монитор среднехордовой плотности (БМСП) или двухчастотный импульсный радар рефрактометр используется для измерения среднехордовой электронной плотности плазмы и работает на частотах зондирующего излучения 130 ГГц и 170 ГГц. Метод основан на измерении времени распространения микроволновых импульсов, прошедших через плазму. При достаточно большой несущей частоте измеряемое время распространения будет пропорционально среднехордовой электронной плотности независимо от профиля. Пределы и точность измерения плотности $1 \cdot 10^{12}$ –0,5 $\cdot 10^{14}$ см⁻³, 1 %. Длительность импульса рефрактометра по уровню 5 нс. В диагностике используется импульсное зондирование, т.е. зондирование плазмы с помощью микроволновых импульсов небольшой длительности. Такой метод позволяет относительно просто избавиться от паразитных переотражений в тракте и в камере токамака, повысить надежность измерений, поскольку здесь измеряется время задержки.

Двухчастотный импульсный радар рефлектометр (ДИРР) используется для измерения положения границы плазменного шнура с критической плотностью для данной частоты излучения, рефлектометр основан на явлении отражения зондирующей частоты от слоя плазмы с критической частотой. При определении времени распространения импульса в плазме до точки отражения, можно измерить расстояние этих слоев [1]. Частота излучения рефлектометра 19 ГГц и 21 ГГц, точность измерения границы плазменного шнура ± 1 см. Двухчастотность позволяет определить более точное расположение границы плазменного шнура. На рисунке 1 приведена функциональная схема для БМСП и ДИРР.



Рисунок 1. Функциональная схема для БМСП и ДИРР

Блок управления БУ осуществляет синхронизацию работы составных частей прибора. Основная часть излучения генератора рефрактометра и рефлектометра проходит через направленный ответвитель НО, передающую антенну ПА и плазму. Излучение рефрактометра отражается от внутренней стенки камеры токамака КТМ, а излучение рефлектометра отражается от слоя плазмы. Отраженное излучение принимается приемной антенной ПрА, далее детектируется сигнальным детектором Д2 и через усилитель У2 поступает на вход формирователя со следящим порогом (далее ФСП). Часть мощности (-20 дБ) отбирается направленным ответвителем на детектор опорного канала Д1 и через усилитель У1 поступает на вход ФСП. На выходе ФСП формируются два стандартных сигнала (ТТЛ-импульсы), которые далее поступают на входы блока время-амплитудного преобразователя (ВАП), где вырабатывается сигнал, амплитуда которого пропорциональна времени задержки между двумя импульсами (опорным и сигнальным). Этот сигнал поступает на вход аналоговоцифрового преобразователя (АЦП).

Перестраиваемый импульсный радар рефлектометр (ПИРР) работает на восьми частотах излучения в диапазоне 26–40 ГГц и предназначен для определения пространственного распределения электронной плотности плазмы.

Использование двух рефлектометров в перспективе позволит восстановить радиальный профиль электронной плотности плазмы КТМ по десяти пространственным точкам.

Диагностика ПИРР позволяет проводить измерения профиля электронной концентрации в диапазоне плотностей от $0,9\cdot10^{12} - 1,85\cdot10^{13}$ см⁻³. В качестве перестраиваемого задающего генератора в рефлектометре используется генератор VCO (voltage controlled oscillator), диапазон перестройки 13–20 ГГц. Диагностика излучает СВЧ импульсы с периодом не более 8 мкс в плазму токамака КТМ и принимает отраженные импульсы. Измеряется задержка отраженного импульса. На рисунке 2 приведена функциональная схема рефлектометра.



Рисунок 2. Функциональная схема ПИРР

Блок управления вырабатывает сигналы для управления и синхронизации всех составных частей. Микроволновый генератор, управляемый напряжением VCO, формирует радиоимпульсы длительностью около 10 нс с несущей частотой 13–20 ГГц, которые проходят через амплитудный модулятор АМ и микроволновый удвоитель частоты X2. Через направленный ответвитель НО некоторая часть сигнала ответвляется, основная часть проходит через передающую антенну. Импульсы с передающей антенны излучаются в плазму, где после отражения от слоя плазмы принимаются приемной антенной ПрА, после чего принимаются детектором сигнального канала СД2 и усиливаются в микроволновом усилителе ИУ2 с коэффициентом усиления k = -4. После прохождения усиления сигналы поступают на блок формирователя со следящим порогом ФСП. Также на входы блока ФСП поступают усиленные сигналы с микроволнового усилителя ИУ1 с коэффициентом усиления k = -10 и опорного детектора ОД1, ответвленные через направленный ответвитель, расположенный в передающем тракте. ФСП формирует TTL-импульсы с длительностью ~20 нс, привязанные по времени к соответствующим сигналам на его входе. Блок ВАП преобразует временную задержку между импульсами с опорного и сигнального детекторов в напряжение для АЦП, а также формирует сигналы тактирования для АШП.

Диагностика многоканального бессбойного интерферометра (МБИ) предназначена для измерения средней плотности плазмы по нескольким хордам зондирования в токамаке КТМ. Интерферометр состоит из трех подсистем: подсистемы в режиме малой плотности (ПМП) на частоте 94 ГГц и 94,9 ГГц; подсистемы с гетеродинным детектированием (ПГД) с частотой зондирующей волны 140 ГГц и 140,9 ГГц; подсистемы с прямым детектированием (ППД) на частоте 170,1 ГГц и 171 ГГц. Пределы и точность измерения плотности $0,5 \cdot 10^{12}$ – $0,6 \cdot 10^{14}$ см⁻³, 1 %. Каждая из подсистем ПГД и ППД измеряют плотность плазмы по двум хордам излучения. Таким образом, измерение плотности плазмы многоканальным интерферометром производится по пяти хордам.

Интерферометр позволяет проводить зондирование плазмы на двух близких частотах для измерения разности фаз $\Delta \phi_{12}$ между ними. При условии, что $\Delta \phi_{12} < 2\pi$ во всем диапазоне измеряемых плотностей, измерения плотности будут «бессбойными». Такой метод позволяет увеличить чувствительность измерений плотности по сравнению с импульсным времяпролетным рефрактометром, где проводятся прямые измерения времени распространения микроволнового импульса в плазме. Для измерения плотности плазмы по высоте сечения плазменного шнура применяется пятиканальная система вводов, расположенных на расстоянии 55 мм друг от друга. На рисунке 3 показана функциональная схема МБИ.

Функциональные схемы подсистем аналогичны друг другу. Основная часть излучения двухчастотного микроволнового генератора после объединителя проходит через направленный ответвитель НО, передающую антенну ПА и через плазму, затем отражается от внутренней стенки камеры токамака и принимается приемной антенной ПрА, далее детектируется сигнальным детектором СД, после усилителя ИУ2 поступает на вход электронного модуля обработки сигналов ЭМОС. Часть мощности зондирующего излучения (-20 дБ) до прохождения через плазму отбирается направленным ответвителем на детектор опорного канала ОД и через усилитель ИУ1 поступает на вход ЭМОС. В микроволновом генераторе в качестве излучателей используются твердотельные генераторы на лавинно-пролетных диодах. В детекторе используются высокочувствительные СВЧ-диоды на основе барьера Шоттки. В схеме подсистемы с гетеродинным детектированием ПГД использование дополнительного гетеродина на 800 и на 100 МГц позволяет существенно, в разы, повысить точность измерения плотности по сравнению с ПМП и ППД. В результате, такая система позволит измерять плотность более точно, с лучшим временным разрешением и в большем диапазоне.



Рисунок 3. Функциональная схема многоканального бессбойного интерферометра

Электронная часть прибора состоит из электронного модуля обработки сигналов ЭМОС, предназначенного для формирования сигнала, пропорционального средней плотности («выход фазы»). Сигнал на этом выходе пропорционален разности фаз между двумя синусоидальными сигналами. На втором выходе ЭМОС формируется сигнал, пропорциональный отношению амплитуд сигналов. Этот сигнал далее поступает на вход АЦП. Диагностика МБИ работает в непрерывном режиме.

Размещение СВЧ диагностик

на токамаке КТМ

Диагностики МБИ и БМСП размещены в экваториальном патрубке вакуумной камеры токамака КТМ в секторе 2. Для размещения и зондирования плазмы имеется 7 вертикальных приемо-передающих волноводных трактов, расположенных в три ряда. Вакуумная развязка обеспечивается использованием кварцевых вакуумных окон. Центральный ряд волноводов используется для передачи СВЧ излучения в плазму, а боковые для приема отраженного излучения. На рисунке 4 показан эскиз размещения волноводов внутри вакуумной камеры (ВК) диагностик МБИ и БМСП, а также поканальное распределение данных диагностик по хордам измерения плазмы (волноводам).



а) полоидальное сечение ВК



б) тороидальное сечение ВК

Рисунок 4. Геометрия зондирования и расположение диагностик БМСП и МБИ на токамаке КТМ

Диагностики ДИРР и ПИРР размещаются в экваториальном патрубке 10 сектора ВК КТМ. Эскиз размещения волноводов для данных диагностик на ВК приведен на рисунке 5. Зондирование СВЧ излучением диагностики ДИР производится в вертикальной плоскости, а ПИР в горизонтальной плоскости.

НАСТРОЙКА И КАЛИБРОВКА СВЧ ДИАГНОСТИК

Метод измерения плотности в диагностиках основан на измерении времени распространения микроволновых импульсов и сдвига фаз, прошедших через плазму. При достаточно большой частоте, измеряемое время распространения и разность фаз будет пропорционально среднехордовой электронной плотности:

$$\tau = k \cdot \int_{l} n(l) dl, \qquad (*)$$

где n – электронная плотность плазмы, в 10^{14} см⁻³, τ – время задержки, в нс.

Из формулы (*) можно получить связь между измеряемым временем задержки и линейной плотностью <nl>. Максимальное время задержки сигнала, в рефрактометре и рефлектометрах, которое должен измерить прибор, составляет 0,5–1 нс в зависимости от частоты канала [2]. Связь между временем задержки и выходным напряжением определяется из калибровочной кривой.

В интерферометре время задержки определяется дифференциальным методом, т.е. через измерение разности фазы $\Delta \varphi_{12}$ между двумя волнами с близкими частотами f_1 и f_2 , прошедшими через плазму по одной и



Рисунок 5. Геометрия зондирования и расположение диагностик ДИРР и ПИРР на токамаке КТМ

той же хорде [3]. В данном способе применяется зондирование плазмы на двух близких частотах, и проводятся измерения разности фаз между ними. При условии, что $\Delta \varphi_{12} < 2\pi$ во всем диапазоне измеряемых плотностей, измерения плотности будут «бессбойными». Данный способ позволяет увеличить чувствительность измерений плотности по сравнению с импульсным времяпролетным рефрактометром. Калибровка диагностик проводилась в лабораторных условиях на стенде. В качестве отражающей поверхности используется металлический отражатель. Время задержки и разность фаз изменяется при перемещении мишени на оптическом рельсе относительно передающей и приемной антенн.

Передвигая мишень, измеряется выходной сигнал с диагностик. Изменение времени задержки и разности фаз определялось по формуле $\tau = 2L/c$, где L –расстояние до мишени (в см), c = 30 см/нс – скорость света в воздухе. На рисунке 6 показана калибровочная кривая СВЧ диагностик.





Рисунок 6. Калибровочная кривая диагностик БМСП (а); интерферометра МБИ (б)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ полученных данных

Экспериментальная проверка работы СВЧ диагностик была проведена на экспериментах по получению плазменного разряда на токамаке КТМ [4]. В ходе проведения экспериментов был получен плазменный пробой на рабочем газе аргон с током плазмы 6 кА и длительностью плазменного разряда около 50 мс (рисунок 7).



Рисунок 7. Кривые тока и мощности излучения плазменного разряда КТМ



Рисунок 8. Временная эволюция линейной электронной плотности токамака КТМ, измеренная диагностикой ПИРР с зондирующими частотами излучения: 26,6 ГГц, 30 ГГц, 32 ГГц, 36,4 ГГц



Рисунок 9. Временная эволюция средней линейной плотности в течение разряда, измеренная рефрактометром БМСП



Рисунок 10. Плотность плазмы, измеренная МБИ с подсистем ПМП и ПГД

На рисунках 8–10 приведены результаты измерения электронной плотности плазмы СВЧ диагностиками.

Среднехордовая плотность плазмы в рассматриваемом разряде, измеренная СВЧ диагностиками, не превышала 4·10¹² см⁻².

Как видно из рисунка 8 рефлектометр ПИР работал в режиме рефрактометра из-за малой плотности плазмы в данном разряде. Отличия значения плотности разных частотных каналов ПИР, по всей видимости, связаны с разной чувствительностью каналов и работой в нештатном режиме рефрактометра.

Разницу в значении плотности двух подсистем диагностики МБИ можно объяснить разными хордами зондирования по высоте ($Z_1 = 0,22$ м, $Z_2 = 0,33$ м) и отличием плотности плазмы в данных направлениях, а также разной чувствительностью измерительных систем и малой плотностью плазмы. Неустойчивый характер сигнала возможно связан с малой плотностью плазмы, лежащей в нижней части чувствительного диапазона диагностики в купе с наличием электромагнитных помех во время плазменного разряда.

В целом, полученные данные по СВЧ диагностикам коррелируют между собой по времени. Имеющиеся небольшие расхождения в значениях плотности можно объяснить разной чувствительностью и геометрией зондирования, при небольшой плотности плазмы, и малыми ее размерами, а также неустойчивостью плазменного шнура.

Заключение

В результате работы была проведена настройка и калибровка СВЧ диагностик. Во время проведения экспериментов по получению плазменного разряда на токамаке КТМ был использован комплекс СВЧ диагностик. По результатам экспериментов проведена обработка и анализ полученных экспериментальных данных. Данные с СВЧ диагностик согласуются между собой. Предельная измеренная плотность плазмы не превышала 4.10¹² см⁻². Имеющиеся небольшие расхождения в значениях измеренной плотности СВЧ диагностик можно объяснить разной чувствительностью и геометрией зондирования, при небольшой плотности плазмы и небольших размеров, а также неустойчивостью плазменного шнура и малым временем разряда.

В целом по результатам работы была продемонстрирована работоспособность комплекса СВЧ диагностик. Работа выполнена в рамках темы «Определение параметров плазмы с использованием физических диагностик и расчетных методов» НТП «Научнотехническое обеспечение экспериментальных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке КТМ».

Литература

- 1. В.Г. Петров, А.А. Петров, А.Ю. Малышев, В.К. Марков, А.В. Бабарыкин. Сканирующий импульсный радар рефлектометр для измерений профиля электронной концентрации плазмы. Электронный журнал «Приборы и техника эксперимента» № 4, 2003. 1–2 с.
- 2. А.А. Петров, В.Г. Петров, А.Ю. Малышев, В.К. Макаров, А. В. Бабарыкин. // Приборы и техника эксперимента, 2003, № 4, с. 1–9.
- Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны / Под редакцией Д.И. Воскресенского. Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2006. – с. 35–38.
- Чектыбаев Б.Ж., Садыков А.Д., Батырбеков Э.Г., Скаков М.К., Кашикбаев Е.А., Жаксыбаева А.А. Результаты экспериментов по получению плазменного разряда на токамаке КТМ в 2018 году // Вестник НЯЦ РК – 2019 – № 1 – С. 60–65.

ҚТМ ТОКАМАКТАҒЫ ПЛАЗМАНЫҢ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ТЫҒЫЗДЫҒЫН ӨЛШЕУДІҢ ЭКСПЕРИМЕНТТІК НӘТИЖЕЛЕРІ

Е.А. Кашикбаев, Б.Ж. Чектыбаев, А.Д. Садыков, С.А. Жүнісбек

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Мақалада ҚТМ токамактағы плазманың электрондық тығыздығын өлшеуге арналған ӨЖЖ диагностикасының кешені қарастырылады. ҚТМ плазмасының электрондық тығыздығын өлшеу бойынша алғашқы тәжірибелік нәтижелері және де ӨЖЖ диагностиканың құрамы ұсынылған, оларды орындау және орналастырудың техникалық ерекшеліктері талқыланады. ӨЖЖ құрылғылардың жұмыс істеу принципіне және диагностиканың токамакта орналасқан жеріне ерекше көңіл бөлінеді.

EXPERIMENTAL RESULTS OF MEASURING ELECTRON PLASMA DENSITY IN KTM TOKAMAK

E.A. Kashikbayev, B.Zh. Chektybayev, A.D. Sadykov, S.A. Zhunisbek

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper deals with a complex of OHF diagnostics of tokamak KTM, designed to measure the electron density of the plasma. The composition of the OHF diagnostics, their technical features of execution and placement are discussed, and the first experimental results on the measurement of the electron density of the KTM plasma using them are presented. Special attention is paid to the principle of operation of OHF devices and the location of diagnostics on the tokamak.