УДК 621.039.665

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ПЛАЗМЫ В ИТЭР

А.А. Медведев

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Одной из основных задач диагностической системы H-alpha spectroscopy (+visible spectroscopy) является измерение изотопного состава плазмы на периферии плазменного шнура. Для получения информации о соотношении $n_H/n_D/n_T$ необходим анализ спектра одной из линий бальмеровской серии. Деконволюция спектра в принципе может быть проведена при наблюдении ограниченной области на периферии плазмы, где параметры, влияющие на форму спектра, такие, как магнитная индукция и ионная температура, можно считать однородными. Однако обеспечение таких условий в ИТЭР невозможно из-за высокого уровня фоновое излучения, обусловленного диффузным рассеянием света на металлической поверхности первой стенки. Коэффициент диффузного отражения видимого излучения может достигать 30—40%. Поэтому, куда бы ни был направлен конус наблюдения входной оптической системы, на её вход будет попадать излучение с обширной площади периферии плазменного шнура, а также из области дивертора и х-точки. Таким образом будет происходить наложение спектров, возникающих в зонах с существенно различными параметрами плазмы, что делает решение обратной задачи практически невозможным. Для того чтобы обеспечить возможность упомянутых измерений, предлагается следующая схема. В диагностическом порту организуется небольшой объём, сообщающийся при помощи короткого трубопровода с камерой установки. Принимаются меры для предотвращения попадания в этот объём видимого излучения плазмы. Во время рабочего импульса реактора в объёме зажигается тлеющий разряд. Излучение светящегося разряда при помощи сравнительно простой оптической системы выводится за двойное вакуумное окно, затем за биологическую защиту, где располагается спектрометр высокого разрешения.

Ключевые слова: диагностика плазмы, токамак, ИТЭР.

USE OF AN AUXILLIARY GLOW DISCHARGE FOR MEASUREMENTS OF THE PLASMA ISOTOPIC COMPOSITION IN ITER

A.A. Medvedev

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

One of the main objectives of the H-alpha spectroscopy (+visible spectroscopy) ITER diagnostic system is the measurement of the plasma isotopic composition at the main plasma periphery. To get information on the $n_H/n_D/n_T$ ratio it is necessary to analyze the spectrum shape of a Balmer line. A deconvolution in principle can be done for the observations performed at a limited plasma region where parameters, which influence the spectral shape, can be considered as homogeneous ones. However, such the conditions can not be met due to very strong diffusive scattering of light on the metallic wall surface. The reflection factor can achieve 30 to 40 percent. Thus and so, wherever the visible cone is directed, the stray light both from the divertor region and from the extended area of the main plasma periphery will be recorded. That is why overlapping of spectra from different locations is inevitable. It makes solving of the reversed problem practically impossible. To enable the measurements we propose the following strategy. A small measurement enclosure, connected to the main chamber with a wide short pipeline, is arranged inside a diagnostic port. Measures to suppress the hitting of the plasma stray light into the enclosure are taken. During the working shot of the reactor the glow discharge is ignited inside the enclosure. The light of the discharge is transmitted by means of mirror/lens optical elements beyond the biological shield and then, by fibers, to a high resolution spectrometer.

Key words: plasma diagnostics, tokamak, ITER.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач, стоящих перед диагностической системой спектроскопии водородных линий (СВЛ) ИТЭР, является измерение изотопного состава плазмы, т.е. отношение плотности водорода, дейтерия и трития ($n_H/n_D/n_T$) на периферии плазменного шнура ($r > 0,85$). Для центральной области плазмы эту функцию будет выполнять диагностика NPA.

Для получения данных об изотопическом составе средствами СВЛ необходимо провести измерения формы спектра одной из бальмеровских линий. Как показали проведённые модельные расчёты, форма спектра в условиях ИТЭР является довольно сложной [1]. Из-за эффекта Зеемана каждый изотопический компонент превращается в триплет. Кроме того, компоненты спектра расширяются вследствие эффектов Доплера и Штарка. Решение обратной задачи в принципе возможно, если конус наблюдения оптической

системы лежит в ограниченной области, в пределах которой параметры плазмы, влияющие на форму спектра, изменяются незначительно. Однако наибольшие сложности связаны с очень высоким уровнем диффузно рассеянного на металлической поверхности первой стенки излучения лимитерной плазмы. Для бериллия, из которого в настоящее время предполагается изготавливать элементы первой стенки реактора, коэффициент диффузного рассеяния в видимой области достигает 30—40%. Поэтому, независимо от ориентации конуса наблюдения, наряду с полезным сигналом будет регистрироваться рассеянное излучение как из диверторной области, так и из протяжённой периферийной зоны плазмы. В таких условиях отношение сигнал—помеха составляет около 10^{-3} , что делает измерения изотопного состава при помощи анализа излучения основной плазмы практически неосуществимыми.

ПРЕДЛАГАЕМАЯ СХЕМА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА

Рис. 1. Схема измерительного тракта: 1 — стенка вакуумной камеры реактора; 2 — трубопровод; 3 — разрядный объём; 4 — диагностический канал; 5 — металлические зеркала; 6 — двойное кварцевое окно

мы реактора в разрядный объём. Излучение тлеющего разряда по каналу 4 попадает на плоские металлические зеркала 5, затем через двойное вакуумное окно 6 — на входной объектив оптической системы 7. Остальная часть оптической системы концептуально аналогична тракту, разработанному для типового канала диагностической системы H-alpha Spectroscopy [2].

Может показаться, что данная концепция измерений не соответствует техническим требованиям к диагностике, поскольку, на первый взгляд, изотопный состав измеряется не на периферии плазменного шнура, а в патрубке. Однако, как показал численный анализ, основной поток частиц, поступающих во входной трубопровод, — это атомы перезарядки, рождающиеся в довольно обширном объёме плазмы.

Рис. 2. Схематическое изображение области разрядного объёма: 1 — стенка вакуумной камеры реактора; 2 — трубопровод; 3 — стенка разрядного объёма; 4 — катоды; 5 — анод; 6 — диагностический канал

Необходимо сказать, что предложения, схожие с рассматриваемым в данной работе, обсуждались во время интернет-конференций, посвящённых СВЛ, поэтому автор не претендует на оригинальность идеи, а предлагает конкретные варианты её реализации.

Концептуальная схема измерительного тракта показана на рис. 1. Разряд зажигается в полости 3, имеющей цилиндрическую форму (ось цилиндра направлена вдоль тороидального поля установки) и расположенной в непосредственной близости от поверхности первой стенки. Полость сообщается с объёмом камеры при помощи короткого трубопровода 2, на торцевой поверхности которого, обращённой к плазме, имеется световая ловушка, предотвращающая попадание излучения из плазмы реактора в разрядный объём.

Таким образом, область измерений находится на периферии плазменного шнура, как это и предусмотрено в технических требованиях к СВЛ ($r > 0,85$). Происходит быстрый обмен нейтралами между камерой реактора и измерительным объёмом, поэтому изотопический состав в них будет близок к значению этого параметра для перезаряжающихся ионов. Конечно, такие измерения нельзя назвать прямыми, как, впрочем, и спектрометрию излучения, возникающего непосредственно в самой камере установки.

Более подробно устройство разрядного объёма показано на рис. 2. Разряд зажигается по схеме Пеннинга при помощи полого цилиндрического анода 5 и двух плоских катодов 4. Ось анода

ориентирована вдоль тороидального поля реактора. В аноде сделана прямоугольная щель δ , которая обеспечивает попадание излучения разряда в канал оптической системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТА

Опыт организации тлеющего разряда в магнитном поле $B = 2\text{—}3$ Тл на установке Т-10 показывает, что разряд поддерживается самостоятельно при напряжённости электрического поля не более 120 В/см и концентрации дейтерия $10^{12}\text{—}10^{13}\text{ см}^{-3}$. Сделанные для основных сценариев разряда ИТЭР оценки давления в разрядном объёме дают величины такого же порядка. Необходимо заметить, что в вакуумной технике пеннинговский разряд широко используется в ионизационных преобразователях, диапазон стабильного разряда в которых достигает семи порядков по давлению [3].

Для пробоя в отсутствие предионизации может потребоваться несколько большее напряжение, но в условиях тритиевой фазы ИТЭР предионизация всегда будет обеспечена за счёт высокого уровня ионизирующих излучений.

Принципиальное ограничение на временное разрешение измерений при данной схеме накладывается характерным временем обмена газом между камерой установки и измерительным объёмом. Как показывают оценки, это время не будет превышать нескольких десятков миллисекунд, что близко к требованиям измерительных спецификаций (100 мс).

Необходимые размеры оптического канала определяются лучевой ёмкостью используемого спектрометра. В расчётах мы использовали измеренные параметры спектрометра, разработанного в НИЦ «Курчатовский институт» специально для измерения изотопного состава в ИТЭР [4]. Если на выходе канала устанавливается круглое зеркало диаметром 50 мм, то для использования всей оптической ёмкости спектрометра необходимый входной диаметр конического канала не превысит 1 см. Это также даёт представление о характерном размере области тлеющего разряда, из которой будет собираться излучение. Как показывают результаты регулярно проводимых нейтронных расчётов, введение в любой диагностический порт ИТЭР канала с такими размерами практически не изменяет уровень нейтронного излучения в объёме криостата.

Временное разрешение измерений при данной схеме определяется характерным временем обмена газом между камерой установки и измерительным объёмом. Сделаем некоторые численные оценки.

Зададим следующие размеры: диаметр и длина разрядной камеры 7 и 10 см соответственно; диаметр катодов и анода 2 см; входной трубопровод в виде параллелепипеда $7\times 3\times 20$ см (высота $\times$ ширина $\times$ глубина); диафрагма между разрядным объёмом и диагностическим каналом 20×8 мм. Рассмотрим трубопровод и камеру тлеющего разряда как два соединённых последовательно вакуумных объёма. Для разрядной камеры входная диафрагма представляет собой кольцевую щель между стенками камеры и катодом. Диафрагму между разрядной камерой и диагностическим каналом можно в первом приближении не учитывать, поскольку площадь отверстия в ней значительно меньше площади отверстия на входе в объём. Для плотности нейтралов водорода на периферии плазменного шнура, не превышающей 10^{19} м^{-3} , режим газообмена будет молекулярным.

Используем формулу проводимости для отверстия [3]

$$U = 36,4 \sqrt{\frac{T}{M}},$$

где T — температура газа; M — молекулярная масса газа.

Длительность заполнения объёма V будет равно V/U . Для входного трубопровода получаем ~ 320 мкс, для объёма тлеющего разряда ~ 170 мкс. Характерное время газообмена (и соответственно выравнивания изотопного состава между периферией плазмы и объёмом тлеющего разряда) не превысит суммы этих величин.

Необходимо отметить, что расчёт проведён для энергии частиц, соответствующей комнатной температуре. Однако средняя энергия нейтралов водорода, поступающих в трубопровод, будет существенно выше, что увеличит скорость газообмена.

Измеренная в Т-10 удельная объёмная мощность излучения линии D_α в тлеющем разряде с близкими параметрами составляет не менее 10^{-5} Вт/см³. Величина фонового сигнала в описываемых условиях пренебрежимо мала. Исходя из этих данных, необходимое для обеспечения случайной погрешности, равной 10%, время накопления информации не превышает 2 мс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая схема измерений обладает следующими достоинствами:

- фоновое излучение пренебрежимо мало;
- низкие плотность и ионная температура внутри измерительного объёма обуславливают малые уширения вследствие эффектов Штарка и Зеемана, что облегчает анализ спектра;
- магнитное поле внутри измерительного объёма не только однородно, но и известно по величине, что позволяет точно идентифицировать положение зеемановских компонентов спектра;
- практически отсутствует деградация входного оптического элемента из-за осаждения частиц плазмы, что является одной из наиболее серьёзных проблем для всех диагностик ИТЭР, работающих в видимой области спектра.

Серьёзным препятствием для использования описанной схемы в ИТЭР в том виде, как она описана, может стать острый дефицит пространства в диагностических патрубках, не позволяющий выделить для этой диагностики отдельный канал. В качестве альтернативного варианта возможна организация тлеющего разряда внутри узла первого зеркала любого из каналов системы H-alpha Spectroscopy. В этом случае для передачи светового потока к спектрометру будет использоваться штатная оптика этой системы. Необходимо отметить, что в настоящее время проводятся и дают оптимистические результаты эксперименты по очистке входных зеркал диагностики тлеющим разрядом. Если будет применяться этот метод очистки, то внедрения каких-либо дополнительных узлов или изменения конструкции узла первого зеркала для реализации предлагаемой методики измерений не потребуется.

Работа выполнена в рамках контракта № Н.4х.45.90.12.1023 от 06 апреля 2012 г. между Госкорпорацией «Росатом» и НИЦ «Курчатовский институт».

REFERENCES

1. **Lisitsa V.S., Vukolov K.Yu., Kadomtsev M.B., Levashova M.G., Medvedev A.A., Calisti A., Ferri S.** Spectroscopy of the Balmer lines in ITER: test of modelling methods and new opportunities. — In: XXXVIII Zvenigorod Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion. Russia, Zvenigorod, February 14—18, 2011.
2. **System** Design Description Document «DDD H-alpha (+ visible spectroscopy)», <http://user.iter.org/>, the IDM number ITER_D_6HNZ39.
3. **Pipko A.I., Pliskovskiy V.Ya., Penchko E.A.** Design and calculation of vacuum systems. — M.: Energiya (Energy), 1979 (in Russian).
4. **Alexandrov E.V., Gorshkov A.V., Medvedev A.A., Vukolov D.K., Sannikov O.V.** High resolution fast spectrometer for isotopic composition measurements in ITER. — In: Intern. Conf. and School on Plasma Physics and Controlled Fusion. Alushta, Ukraine, September 22—26, 2008.

AUTHORS

Medvedev A.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Medvedev_AA@nrcki.ru

Received 19 February 2013
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Termoyadernyi sintez, 2013, vol. 36, issue 2, pp.51—54