УДК 533.9.082

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ОПТИЧЕСКИМИ ДИАГНОСТИКАМИ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА НА ВТОРОМ ЭТАПЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА ТОКАМАКА КТМ

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

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

zhunisbek@nnc.kz

В статье описаны характеристики оптических диагностик токамака КТМ и полученные с их помощью результаты измерения параметров плазмы токамака КТМ. Измерения параметров плазменного разряда проводились в рамках работ по проведению второго этапа физического пуска токамака КТМ. На основе полученных экспериментальных данных проведена оценка элементного состава плазмы по измерению линейчатого излучения в видимом диапазоне (380–700 нм), определен момент пробоя плазмы, а также произведена оценка положения и формы плазменного шнура.

Введение

Проводятся завершающие работы по созданию в городе Курчатов Казахстанского материаловедческого токамака КТМ, основной задачей которого является изучение новых перспективных конструкционных материалов для будущих термоядерных реакторов. В ноябре 2019 года на токамаке КТМ был реализован заключительный этап физического пуска, который показал работоспособность установки и ее основных технологических систем. Во время экспериментальной кампании был получен плазменный разряд с током плазмы 60–100 кА в омическом режиме. Для достижения проектных параметров с током плазмы 750 кА с длительностью 5 с и средней электронной температурой T_e>1 кэВ, необходимо выполнить ряд технических мероприятий и исследований.

К числу базовых параметров, требующих детального и надёжного измерения в условиях современных токамаков и будущего токамака-реактора, относятся такие параметры, как примесный состав плазмы и излучение линий изотопов водорода. Базовыми диагностиками, позволяющими обеспечить локальные измерения этих параметров в условиях токамака, являются оптические диагностики. Измерение параметров плазмы оптическими диагностиками осуществляются бесконтактно, обеспечивая универсальность, дистанционность и отсутствие возмущений на исследуемой плазме. На текущем этапе работ токамака КТМ был измерен спектр излучения плазмы с помощью оптических диагностик в диапазоне длин волн 380-700 нм. Проведен анализ спектральных линий для определения элементного состава плазмы. Также были проведены измерения интенсивности линий Нα, чтобы показать временную эволюцию излучения рабочего газа – водорода.

Оптические диагностики токамака КТМ

Для наблюдения за плазмой в видимом диапазоне на токамаке КТМ имеется набор оптических диагностик: обзорный спектральный прибор (ОСП), монитор излучения линий водорода На–Da и спектрометр (USB 2000+). Данные диагностики позволяют измерить излучение плазмы в различные моменты времени и в разных областях объема плазменного шнура. Для обеспечения достоверности изучения параметров и поведения плазмы установлена система визуализации [1].

ОСП и USB2000+ позволяют проводить регистрацию излучения плазмы в видимом и ближнем ИК диапазонах (380–700 нм), что позволяет проводить исследования примесного состава плазмы и процессов переноса в плазме, а также определять источники и механизмы поступления примесей.

	Обзорный спектральный прибор	Спектрометр USB2000+	Монитор излучения линий На–Dа
Диапазон длин волн (нм)	380–710	360–1040	656,3
Спектральное разрешение (нм)	5	1.4	3
Хорды наблю- дения (шт)	8	1	2
Детектор	спектрометры Черни-Тернера и ПЗС-камера		фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)
Время интеграции	35 мс	5 мс	10 мкс

Таблица. Обзор диагностик

Для наблюдения временной эволюции интенсивности спектральных линий (Нα и Нβ), характеризующих поведение плазмы, обзорные спектрометры не очень эффективны. Чувствительность детектора спектрометра не позволяет проводить измерения с высоким временным разрешением. На современных установках типа токамак в качестве диагностики используют монитор На-Da. В данной диагностике в качестве детекторов используются фотоэлектронные умножители (ФЭУ). При использовании данного типа детектора выделение спектральных линий из общего спектра излучения плазмы осуществляется с использованием интерференционного фильтра, установленного перед ФЭУ. Чувствительность ФЭУ очень высокая, а время обработки сигнала составляет порядка 10 мкс, что позволяет детально изучить поведение плазмы. Основные технические параметры оптических диагностик токамака КТМ приведены в таблице.

Система сбора и регистрации излучения

Одной из особенностей токамака КТМ является расположение внутри вакуумной камеры подвижного диверторного устройства, что позволит в ближайшие годы проводить материаловедческие эксперименты (исследования) для поддержки международного термоядерного реактора ITER [2]. При взаимодействии плазмы с материалами, обращенными к плазме, происходят различные процессы, связанные с образованием частиц пыли и поступлением тяжелых примесей [3, 4], влияющие на удержание и на качество получаемой плазмы. Для наблюдения за этими процессами систему сбора света оптических диагностик разместили в вертикальном трековом патрубке вакуумной камеры токамака КТМ. На рисунке 1 показаны эскизы расположения системы регистрации оптических диагностик на вакуумной камере (ВК) КТМ, а также хорды их наблюдения.



1 – кварцевые окна, 2 – объектив, 3 – хорды наблюдения

Рисунок 1. Схема размещения оптических диагностик на токамаке КТМ

Расположенные обзорные спектрометры в верхних трековых патрубках позволяют проводить наблюдение за процессами, происходящими на диверторном столе. Для обеспечения вакуумной развязки, на трековых патрубках вакуумной камеры токамака КТМ были использованы кварцевые стекла КУ-1 (поз. 1 на рис. 1). Вертикальные хорды используются для измерения излучения плазмы в диверторной области, которая играет решающую роль в рециклинге рабочего газа и поступлении примесей в плазму при взаимодействии плазма-стенка. Излучение из плазмы собирается вдоль хорд (поз. 4 на рис. 1) для каждого спектрометра. Сбор света и построение изображения осуществляется с использованием объективов (поз. 2 на рис. 1). Передача света производится с помощью кварцевого световода с диаметром 0,8 мм (поз. 3 на рис. 1). Длина светового коллектора составляет 10–15 м, что позволяет расположить спектрометры в специальном оптическом шкафу, который защищает чувствительные элементы диагностики от внешних воздействий, таких как сильные магнитные поля и жесткое рентгеновское излучение.

Измерительная система монитора Hα–Dα состоит из 10 канальнов вертикальных хорд наблюдения с временным разрешением 0,01 мс. Хорды наблюдения монитора Hα–Dα обхватывают весь диверторный стол и часть витков пассивной стабилизации.

Излучение из плазмы вначале собирается объективом и фокусируется на входе 15-метрового кварцевого световода, выход которого находится в фокусе другого объектива, после чего свет преобразуется в параллельный пучок. Затем свет, проходя через интерференционный фильтр с пиковой пропускной способностью 65% на длине волны 656,3 нм и полной шириной на половине максимума (FWHM) 3 нм достигает ФЭУ. Токовый сигнал от фотоумножителей преобразуется в сигнал напряжения усилителем с коэффициентом усиления 10⁵ В/А, результат которого отправляется в систему сбора данных.

Перед началом измерений были проведены работы по юстировке приемо-передающей оптической системы и настройке системы синхронизации запуска оптических диагностик с остальными подсистемами токамака КТМ. Обзорные спектрометры были откалиброваны по длинам волн с использованием источника излучения CAL 2000 [5], который служит эталонным источником света с постоянной излучательной способностью на определенных длинах волн в видимой области спектра.

Результаты измерений

Наилучшие результаты по параметрам плазмы в ходе проведения второго этапа физического пуска были получены в плазменном разряде № 3669. Но в данной работе приведены результаты разряда № 3594, во многом схожего с разрядом № 3669, т.к. при технологических режимах чистки ВК тлеющим разрядом с использованием разных газов в межпусковых периодах наблюдалось напыление смотровых окон, которое привело к ухудшению пропускной способности кварцевых стекол в конце экспериментальной кампании. Данное явление не позволило произвести измерение излучения плазмы во всей серии плазменных экспериментов на токамаке КТМ. На рисунке 2 показано изменение во времени основных параметров плазменного разряда № 3594.

Как видно из графика, максимальная величина тока плазмы составляет около 68 кА с длительностью разряда 75 мс. Наибольший рост тока плазмы происходил в период времени с 2,03 с до 2,06 с. Линейная плотность плазмы – 5·10¹⁴ см⁻², измерена с помощью комплекса СВЧ диагностик [6]. Измерение яркости линий водорода производилось с помощью монитора $H\alpha$ – $D\alpha$. Из-за шума, характерного для ФЭУ, сигналы были отфильтрованы фильтром нижних частот для частоты 2000 Гц. По теоретическим представлениям и экспериментальным данным на других установках токамак предполагалось увидеть пик линии H α в начале разряда и в конце. Первые 8 мс пробоя наблюдается яркое свечение газа за счет его ионизации и роста тока плазмы. Максимальная интенсивность излучения регистрировалась под конец разряда за счет перезарядки (рекомбинации) рабочего газа. В стабильной фазе с плоской вершиной разряда не наблюдались линий H α , так как в это время плазма очень горячая, и большая часть излучения испускается на более коротких длинах волн.



Рисунок 2. Ток плазмы, линия На (656,3 нм) и линейная плотность электронов для разряда № 3594

На рисунке 3 показан спектр излучения плазменного разряда в диапазоне длин волн 380–700 нм на водороде, измеренный с помощью ОСП.

На рисунке 3-а в спектре наблюдается преобладание линий серии Бальмера Нβ (486,1 нм) и Нα (656,3 нм). Из-за большого спектрального разрешения прибора не удалось различить линии легких примесей (рисунок 3-б), т.к. в момент регистрации, спектральное разрешение прибора на половине максимума (FWHM) составляло более 5 нм.

Спектр излучения плазмы в диапазоне 380– 700 нм, измеренный с помощью спектрометра USB2000+, приведен на рисунке 4. Наблюдаемые спектральные линии соответствуют ионам легких примесей (азот, кислород, углерод) в различных ионизационных состояниях. Сравнение со спектрами излучения, измеряемыми на других токамаках (T-10 [7], HT-7 [8]), показывает совпадение основных наблюдаемых спектральных линий.

На спектре, кроме линий рабочего газа водорода (Нα 656,3 нм, Нβ 486,1 нм, Нγ 434,1 нм) и углерода (С III 464,7 нм) хорошо видны линии азота (N II и N III) и кислорода (O II), которые не должны наблюдаться при хорошей подготовке вакуумной камеры к экспериментальным пускам.



а) спектр излучения плазмы 1 – кадр





Рисунок 3. Спектр излучения плазмы токамака КТМ по ОСП, разряд № 3594



Рисунок 4. Спектр излучения плазмы токамака КТМ по USB2000+, разряд № 3594

В видимом диапазоне в нормальных условиях не наблюдаются спектральные линии тяжелых элементов, таких как Fe, Ni, Cr, но при взаимодействии края плазмы со стенкой в спектре появляются линии перечисленных элементов. Примеси с высоким зарядовым числом Z наиболее опасны, т.к. именно они дают значительный вклад в увеличение эффективного заряда ($Z_{3\varphi}$) плазмы, что приводит к ее неустойчивости. Для определения наличия высокоионизированных ионов (O IV, N IV, N V) и тяжелых элементов в плазме, в основном, проводят измерения спектров в ВУФ или мягком рентгеновском диапазоне.



Рисунок 7. Спектр излучения плазмы 3 кадр

Динамика изменения спектров для пуска № 3594 показана на рисунках 5–10. Относительно маленькая интенсивность объясняется тем, что из 5 мс времени интегрирования 2 мс уходит на обработку и сохранение данных, т.е. фактическая экспозиция составляет 3 мс. Наблюдаемые линии были идентифицированы с использованием справочных таблиц [9, 10], со знанием того, какие виды примесей вероятны, например, из анализа масс-спектрометра и состава внутрикамерной облицовки.

Спектры излучения на рисунках 5–10 различаются по количеству линий и их относительной интенсивности. Количество линий зависит от вида элементов, которые присутствовали в плазме, а интенсивность линий зависит как от вероятностей собственного перехода, так и от условий плазмы. На кадрах 5– 19 наблюдаются линии из серии Бальмера, поэтому не было необходимости показывать все зарегистрированные кадры. Измеренный спектр содержит в себе информацию о пространственно-локализованном поступлении частиц различных сортов в плазму. В других сечениях токамака, вне угла обзора оптических диагностик, соотношение поступающих примесей может существенно отличаться.



Рисунок 10. Спектр излучения плазмы 19 кадр

Как видно из рисунка 5, после пробоя в течение 6 мс в области измерения образуется облако примесей с графитовых ограничителей и в спектре появляются линии углерода. Линии углерода наблюдаются в зеленой (С II 515,1 нм и 513,3 нм) и в синей (С III 464,7 нм) областях спектра. Из-за небольшого спектрального разрешения не удалось разделить линии углерода в красной области спектра (С II: 658,3 и 657,8 нм), так как они сливаются с линией На.

Спектральные линии азота и ионов кислорода в основном располагаются в фиолетовой области спектра. Самая яркая линия кислорода О II 441,6 нм состоит из двух линии: 441,5 и 441,7 нм, а линии О III наблюдаются только на уровне шума. Линии азота на разных стадиях ионизации наблюдались, как в красной (N II 653,2 нм) и желтой (NII 566,7 и 500,5 нм) областях, так и в синей области спектра (N III: 460 нм).

На рисунке 11 приведены видеокадры формирования плазменного шнура с быстрой камеры (250 к/с), по которым видно, что формирование плазменного шнура начинается на 2004 мс разряда, а на 2008 мс происходит быстрая объемная ионизация газа (лавинный пробой) с ростом тока плазмы, затем около 60 мс плазменный шнур держится в кольцевой форме, после чего уходит в нижнюю часть вакуумной камеры.



Рисунок 11. Видеокадры свечения рабочего газа – водорода с быстрой камеры (пуск № 3594)

Видеокадры плазменного шнура коррелируют со снимками спектрометров. Удалось различить основные легкие примеси после лавинной ионизации и в конце разряда, а основная часть излучения испускается во время нагрева плазмы на стадий ионизации примесей.

Заключение

В рамках проведения работ по подготовке к проведению физического пуска токамака КТМ была проведена настройка, установка и калибровка оптических диагностик. В ходе экспериментальной кампании по проведению физического пуска токамака КТМ проведены измерения спектров излучения плазмы в видимой области (380-700 нм) с помощью спектрометра USB2000+, которые показали, что в плазме токамака КТМ кроме наличия линий рабочего газа (На 656,3 нм, Нβ 486,1 нм, Ну 434,1 нм), также присутствовали линии легких примесей (C, O, N) в разных ионизационных состояниях. Присутствие углерода в ходе разрядов объясняется тем, что ВК токамака КТМ была частично облицована графитовыми тайлами. Наличие азота и кислорода в плазменном разряде говорит о недостаточной очистке ВК КТМ перед разрядами. Наличие данных элементов в плазме возможно значительно повлияло на параметры полученного разряда. По данным с монитора излучения линий водорода хорошо определяются стадия пробоя и окончания разряда, зарегистрированное время которых хорошо коррелирует с данными с других диагностик. По измерениям с системы видеонаблюдения определена форма и положение плазменного шнура в динамике.

По результатам измерения у оптических диагностик был выявлен ряд технических недостатков, таких как низкое спектральное разрешение (около 5 нм) и высокое временное разрешение (35 мс), которые недостаточны для более точного измерения параметров плазмы. В соответствии с этим были подготовлены технические предложения по модернизации оптических диагностик.

Данная работа выполнена в рамках тем «Исследование процесса формирования плазменного инура токамака КТМ в режиме омического нагрева», «Определение параметров плазмы с использованием физических диагностик и расчетных методов» мероприятия «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке КТМ».

Литература

- Visible wide angle view imaging system of KTM tokamak based on multielement image fiber bundle / B. Chektybayev, G. Shapovalov, A. Kolodeshnikov // Review of Scientific Instruments. – May 2015.– Vol. 86, Issue 5.– doi: 10.1063/1.4921475.
- Ватырбеков Э.Г., Азизов Э.А., Тажибаева И.Л., Шаповалов Г.В., Казахстанский токамак материаловедческий. Основные параметры и системы, направления исследований и международное сотрудничество. – учебное пособие, М: НИЯУ МИФИ, 2016. – 112 с.

- Binfu Gao, Rui Ding, Hai Xie, Long Zeng, Ling Zhang, Baoguo Wang, Changjun Li, Dahuan Zhu, Rong Yan, Junling Chen. Plasma-facing components damage and its effects on plasma performance in EAST tokamak // Fusion Engineering and Design. – Volume 156. July 2020. 111616.
- C. Arnas, J. Irby, S. Celli, G. De Temmerman, Y. Addab, L. Couëdel, C. Grisolia, Y. Lin, C. Martin, C. Pardanaud, S. Pierson. Characterization and origin of large size dust particles produced in the Alcator C-Mod tokamak // Nuclear Materials and Energy. – Volume 11. Pages 12–19.
- 5. Источник излучения CAL 2000 // руководство по эксплуатации. https://oceanoptics.com/wp-content/uploads/cal2000.pdf
- 6. Кашикбаев Е.А., Чектыбаев Б.Ж., Садыков А.Д., Жунисбек С.А. / Экспериментальные результаты измерения электронной плотности плазмы на токамаке КТМ // Вестник НЯЦ РК. 2019 г. 3. С. 4.
- 7. Горбунов А.В., Ключников Л.А., Коробов К.В. Спектр излучения плазмы токамака Т-10 в видимом диапазоне». ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т.38, вып. 2. С. 63–67.
- 8. Zhou Qian, Wu Zhenwei, Huang Juan. The Spectroscopic Systems for the Study of Light Impurity Particle Transport in the HT-7 Tokamak. Plasma Science and Technology, Volume 9, Number 1, February 2007.
- 9. А.Н. Зейдель, В.К. Прокофьев, С.М. Райский, В.А. Славный, Е.Я. Шрейдер «Таблица спектральных линий». Москва, 1977 г.
- 10. А.Р. Стриганов, Н.С. Свинтицкий «Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов». Москва, 1966.

ҚТМ ТОКАМАГІНІҢ ФИЗИКАЛЫҚ ІСКЕ ҚОСУДЫҢ ЕКІНШІ САТЫНДА СПЕКТРДІҢ КӨРІНЕТІН АРАЛЫҒЫНДА ОПТИКАЛЫҚ ДИАГНОСТИКАМЕН ПЛАЗМА ПАРАМЕТРЛЕРІН ӨЛШЕУ

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

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

Мақалада ҚТМ токамагінің оптикалық диагностикасының сипаттамалары және олардың көмегімен алынған КТМ токамагінің плазма параметрлерін өлшеу нәтижелері сипатталған. Плазмалық разряд параметрлерін өлшеу ҚТМ токамакты физикалық іске қосудың екінші кезеңіндегі жұмыс шеңберінде жүргізілді. Алынған эксперименттік мәліметтер негізінде плазманың элементтік құрамы көрінетін аралықта (380–700 нм) сызықтық сәулеленуді өлшеу арқылы бағаланды, плазманың бұзылу сәті анықталды және плазма бағанының жағдайы мен формасына баға беру іске асырылды.

MEASUREMENT OF PLASMA PARAMETERS BY OPTICAL DIAGNOSTICS IN THE VISIBLE SPECTRUM RANGE AT THE SECOND STAGE OF PHYSICAL START-UP OF THE TOKAMAK KTM

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

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

The article describes the characteristics of optical diagnostics of the tokamak KTM and the results of measuring the plasma parameters of the tokamak KTM obtained with their help. The measurements of the parameters of the plasma discharge were carried out as part of the work at the second stage of the physical start-up of the tokamak KTM. Based on the obtained experimental data the elemental composition of the plasma was estimated by measuring line radiation in the visible range (380–700 nm), the moment of plasma breakdown was determined and the position and shape of the plasma column was estimated.