

СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА Т-10 В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ*А.В. Горбунов, Л.А. Ключников, К.В. Коробов**НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

Один из вопросов при исследованиях в современных плазменных установках связан с поступлением примесей в основную плазму со стенок вакуумной камеры. Высокая концентрация примесей сильно влияет на характеристики плазменного разряда и в значительной степени определяет эффективность удержания плазмы. В статье представлена спектральная диагностика видимого диапазона излучения плазмы токамака Т-10 с невысоким спектральным разрешением, предназначенная для определения примесного состава плазмы. Наблюдение спектров в диапазоне 390—710 нм проводилось в омической стадии стационарного разряда в сечении «А» токамака, в котором установлены графитовые лимитеры. Для регистрации использовался монохроматор МДР-206 без выходной щели с камерой ПЗС Proscan HS 101H. На полученных спектрах, помимо линий рабочего газа дейтерия, хорошо видны линии примесей: углерода (основной примеси плазмы Т-10), лития, азота и кислорода. Особый интерес представляют линии азота и кислорода, которых в нормальных условиях работы установки не должно наблюдаться и которые свидетельствуют о плохой подготовке вакуумной камеры к рабочим режимам. Описанную в статье диагностику необходимо штатно использовать на токамаке для мониторинга примесного состава плазмы во время экспериментальной кампании и оперативного реагирования в случае значительного изменения интенсивностей линий примесей.

Ключевые слова: токамак Т-10, спектроскопия, обзорный спектр.

VISIBLE RANGE SPECTRUM OF THE T-10 TOKAMAK PLASMA*A.V. Gorbunov, L.A. Klyuchnikov, K.V. Korobov**NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

One of the issues in studies of the modern plasma devices is linked with the impurities behavior and its entrance to the central plasma from the walls of the vacuum chamber. High density of the impurities affects the plasma discharge characteristics and mainly determines the efficiency of the plasma confinement. This article presents the impurity components diagnostics of the T-10 tokamak plasma, which is based on spectroscopic measurements in visible range of wavelengths with low spectral resolution. The radiation in range 390—710 nm of steady-state ohmic discharges is collected in section «A» of the tokamak equipped with graphite limiters. Monochromator MDR-206 without the output gap is used for the light detection in combination with the Proscan HS 101H CCD camera. Measured spectra shows the working gas lines of deuterium and well visible lines of the impurities: carbon (the main T-10 plasma contaminant), lithium, nitrogen and oxygen. Of particular interest are the oxygen and nitrogen lines, which shall not be observed under normal conditions and which indicate poor preparation of the vacuum chamber for operation mode. The diagnostics described in this article is required for normal operation on the tokamak for monitoring the plasma impurity components behavior during the experimental period and for rapid response in case of significant change in the lines intensities.

Key words: tokamak T-10, spectroscopy, survey spectrum.

ВВЕДЕНИЕ

Один из основных вопросов при исследовании плазмы в современных установках связан с изучением поступления примесей при взаимодействии плазмы с элементами первой стенки камеры. Поведение примесей влияет на характеристики плазменного разряда и в значительной степени определяет эффективность удержания плазмы. Распространённый способ диагностики примесного состава — измерение излучения плазмы в различных участках спектра. Спектроскопия в видимом диапазоне длин волн используется на всех ведущих установках с магнитным удержанием плазмы для наблюдения линий излучения рабочего газа и примесей [1—4]. Использование спектроскопических диагностик позволяет отслеживать компонентный состав пристеночной плазмы, исследовать процесс её взаимодействия со стенкой, оценивать скорость эрозии элементов конструкции, непосредственно контактирующих с плазмой или обращённых к ней. Для определения компонентного состава примесей плазмы проводятся измерения спектра с разрешением, достаточным для верной идентификации спектральных линий атомов и ионов рабочего газа и примесей. Эта задача эффективнее всего решается с помощью обзорного спектрометра [5—10]. Обзорный спектрометр позволяет оперативно отслеживать какие-либо значительные изменения примесного состава, что особенно актуально в случае конструктивных изменений в вакуумной камере установки или при изменении условий откачки.

В видимую область спектра попадают в основном линии лёгких примесей, таких, как He, Li, C, N, O и др., при этом в нормальных условиях практически невозможно зафиксировать линии элементов с большим зарядовым числом, например, Fe, Cu, Cr, Ni. Для определения наличия этих элементов в плазме требуется проводить измерения спектров в ультрафиолетовом или мягком рентгеновском диапазоне спектра.

С помощью обзорного спектрометра можно сделать вывод об отсутствии какой-либо лёгкой примеси в плазме, если соответствующие линии отсутствуют в спектре. Тем не менее регистрация линий примеси в пристеночной области обзорным спектрометром не обязательно связана с наличием этой примеси в центральной области плазмы. В качестве примера можно привести поведение лития, поступающего в разряд после проведённой процедуры литиизации поверхности графитового лимитера [11]. В экспериментах на T-10 с помощью диагностики Charge Exchange Recombination Spectroscopy (CXRS) [12] не удалось зарегистрировать наличие ядер лития в основной части плазмы, несмотря на наличие в пристеночной области атома Li I и иона Li II с соответствующими яркими спектральными линиями (Li I: 670,8, 610,4 нм; Li II: 548,5 нм) [13].

В данной статье описана спектроскопическая диагностика, используемая для регистрации излучения плазмы токамака T-10 в видимом диапазоне: оптическая схема и состав диагностики, условия проведения и результаты измерений. Для измерений использовался монохроматор со снятой выходной щелью и камера ПЗС. Спектральное разрешение при этом составляло $\sim 0,5$ нм, которого было достаточно для идентификации большинства спектральных линий и определения компонентного состава пристеночной плазмы.

СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения спектров проводились в сечении «А» токамака, где установлены кольцевой и рельсовый графитовые лимитеры (рис. 1). Излучение собиралось через верхний патрубок с помощью короткофокусного ($F = 30$ мм) светосильного ($f/2$) объектива, направленного на рельсовый лимитер. Далее по кварцевому световоду ($d = 5$ мм, $l = 35$ м) излучение передавалось в диагностическую комнату. Для выделения интересующего спектрального диапазона использовался монохроматор МДР-206 производства «ЛОМО фотоника» ($F = 160$ мм, $f/4$) с установленной дифракционной решёткой 1200 штр./мм. Обратная линейная дисперсия составляла в среднем по спектру 4,3 нм/мм. Регистрация проводилась с помощью ПЗС-камеры Proscan HS 101H (рабочий диапазон 200—1100 нм, матрица 512×512 пикселей размером 24×24 мкм). Использование ПЗС-камеры с монохроматором без выходной щели позволило в каждом разряде регистрировать участки спектра ~ 50 нм. Таким образом, спектральный диапазон ~ 400 —700 нм снимался за 10 разрядов токамака с шагом 30 нм. Перекрытие спектров необходимо для корректной «сшивки» отдельных участков спектров.

В качестве примера приведены измерения спектров в видимой области в серии повторяющихся импульсов № 63977—63986. Параметры импульсов в омической стадии разрядов: ток 250 кА, концентрация электронов $1,8 \cdot 10^{19}$ м⁻³, магнитное поле 2,4 Тл. Хорошая повторяемость омического стационара позволила достаточно качественно сшить отдельные участки спектров. Измеренная яркость одинаковых линий в разных импульсах отличалась не более чем на 10%.

Спектральное разрешение МДР-206 с открытой на 50 мкм входной щелью и 24 мкм пикселем камеры составляет до 0,3 нм. Во время измерений камера работала в режиме с вертикальным биннингом (суммированием зарядов вертикальных пикселей матрицы), поэтому в связи с абберациями монохроматора спектральное разрешение составило $\sim 0,5$ нм. Корректировка по длинам волн проводилась после сшивки спектров по ярким точно известным линиям элементов (D, C II, C III). Спектры измерялись с

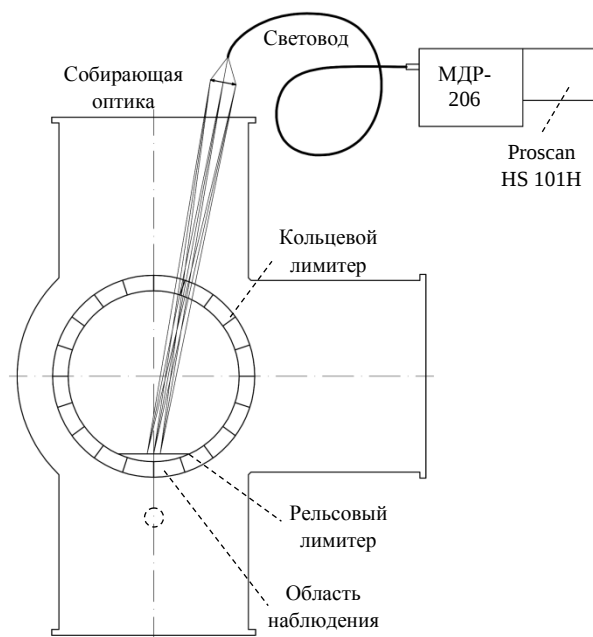


Рис. 1. Схема измерений. Сечение «А» установки T-10

частотой 10 Гц. Съёмка начиналась за 100 мс до начала импульса и заканчивалась после окончания разряда. Первый и последний кадры использовались для учёта темнового сигнала камеры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2 показано изменение во времени средней по центральной хорде электронной плотности $\bar{n}_e$, яркости линии D_α и мощности СВЧ-нагрева для импульса № 63981. Для других импульсов $\bar{n}_e$ и яркость D_α почти в точности повторяли профили до 600-й мс, когда включался СВЧ-нагрев плазмы (рис. 3). Го-

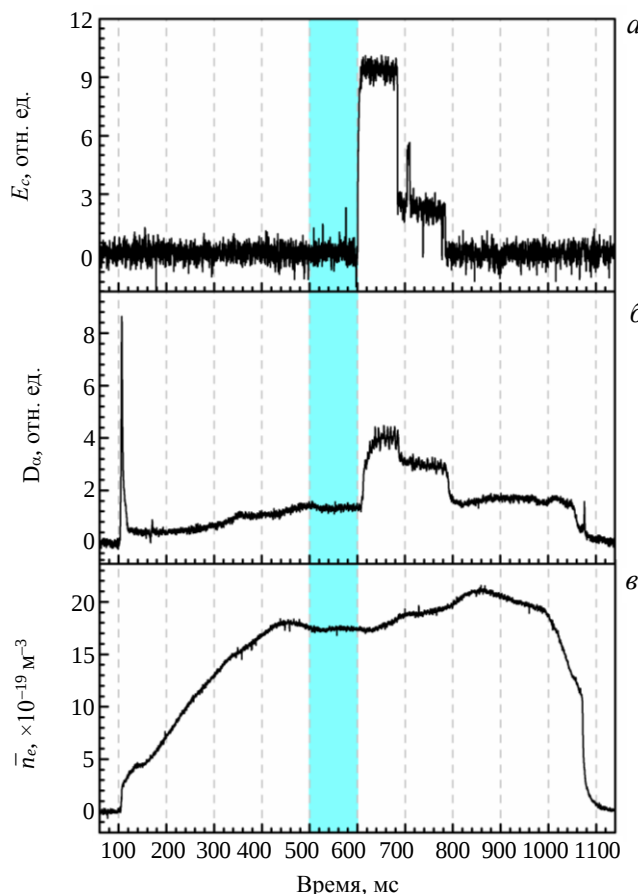


Рис. 2. Мощность СВЧ-нагрева (E_c) (а), линия 656,1 нм (D_α) (б) и средняя по центральной хорде плотность электронов $\bar{n}_e$ для импульса № 63981

лубым цветом на рис. 2, 3 дополнительно отмечен временной интервал, для которого приведены результаты измерения спектров. На омической стадии разрядов электронная плотность достигала значений

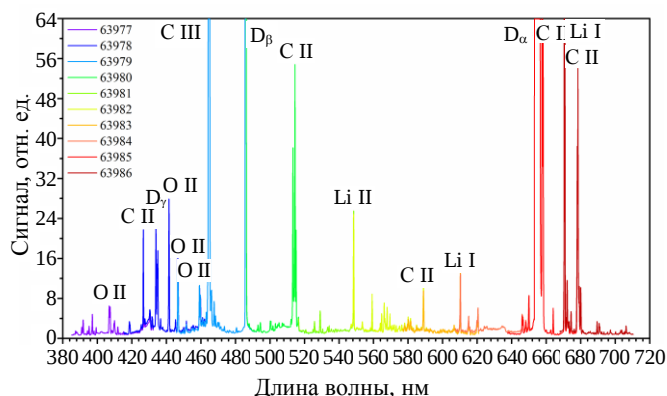


Рис. 4. Спектр излучения плазмы T-10 в сечении «А» для омической стадии разряда

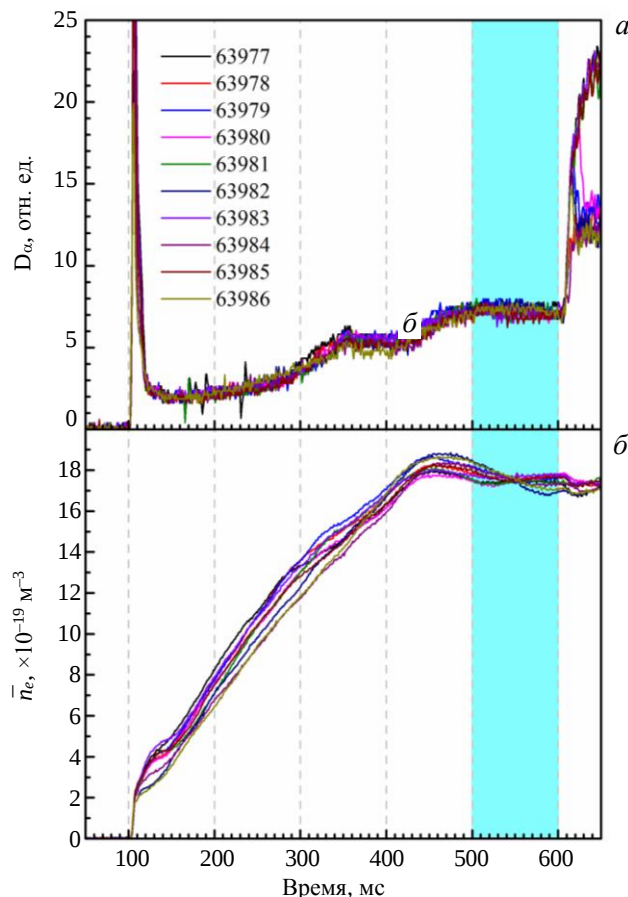


Рис. 3. Линия 656,1 нм (D_α) (а) и средняя по центральной хорде плотность электронов $\bar{n}_e$ (б) для импульсов № 63977—63986

($1,7\text{—}1,8$) 10^{19} м^{-3} и практически не менялась до включения СВЧ-нагрева на 600-й мс. После включения СВЧ наблюдался существенный рост свечения линий как рабочего газа, так и примесей из-за резко усилившегося взаимодействия плазмы со стенкой и лимитерами.

Мощность СВЧ-нагрева в различных импульсах сильно варьировалась, поэтому обзорный спектр в диапазоне 380—710 нм показан на рис. 4 для омической стационарной стадии разрядов 500—600 мс. Кроме линий рабочего газа (D_α 656,1 нм, D_β 486,0 нм и D_γ 433,9 нм) и углерода, из которого состоят лимитеры, на спектре хорошо

видны линии лития (Li I: 670,8 нм и 610,4 нм; Li II: 548,5 нм), ионов азота (N II и N III) и кислорода (O II). Литий в камере Т-10 присутствует после экспериментов по литиизации стенки и его инъекции в плазму. Существует несколько возможных объяснений присутствия азота и кислорода в плазме:

- при очередном вскрытии камеры на атмосферу происходит захват кислорода и азота в углеродных плёнках, покрывающих внутреннюю поверхность камеры установки. После откачки и начала очередной экспериментальной кампании происходит очистка поверхности от источников поступления примесей в специальных чистящих и рабочих режимах;

- наличие в камере лития может приводить к эффективному захвату кислорода и азота, возможно, с образованием устойчивых химических соединений, например, Li_2CO_3 . Во время рабочих разрядов кислород высвобождается из соединений и поступает в плазму;

- поступление в вакуумный объём атмосферного воздуха через микротечи в камере. Данный вариант нельзя исключать, поскольку в каждом разряде Т-10 вакуумная камера подвергается значительным механическим нагрузкам.

Следует отметить, что измерения спектров в данном случае проводились вблизи графитового лимитера, который является сильным источником поступления углерода. Измеренный спектр содержит в себе информацию о пространственно-локализованном поступлении частиц различных сортов в плазму. В других сечениях токамака соотношение поступающих примесей может существенно отличаться, что затрудняет оценки потоков интегрально по плазменному шнуру с помощью измерения спектров. Для определения детальных закономерностей поведения примесей и установления основных источников поступления необходимо применять весь возможный набор диагностик, таких, как CXRS [12], измерения величины $Z_{\text{эф}}$, масс-спектрометрию и др.

Десять отдельных спектров с обозначенными линиями показаны на рис. 5—14. Линии D_α и D_β , а также наиболее яркие линии C II, C III и Li I оказались в насыщении (> 64 отн. ед.). В фиолетовой области спектра в основном располагаются линии ионов кислорода и азота. Углерод наблюдается как в крас-

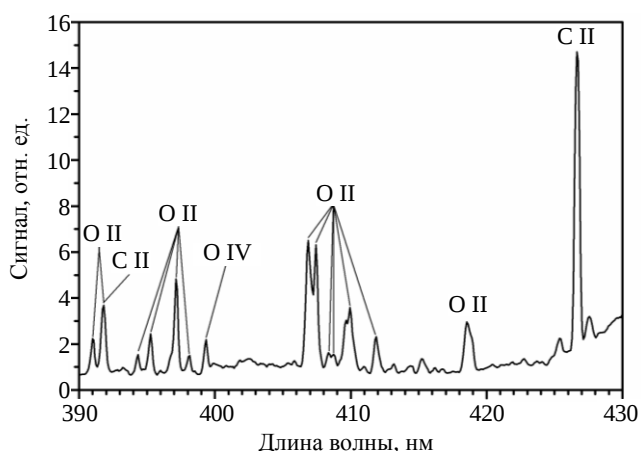


Рис. 5. Спектр излучения в районе 410 нм, разряд № 63977

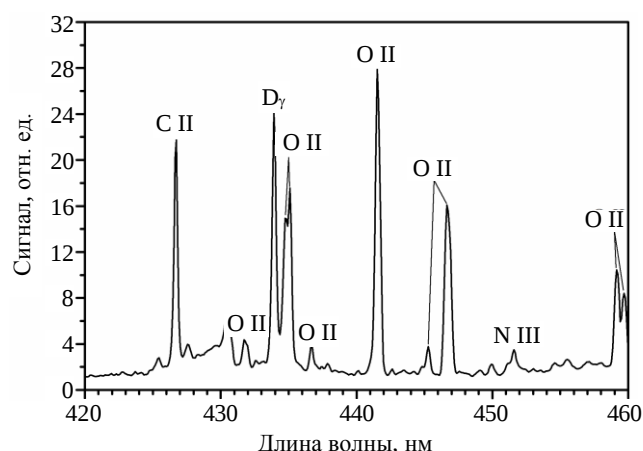


Рис. 6. Спектр излучения в районе 440 нм, разряд № 63978

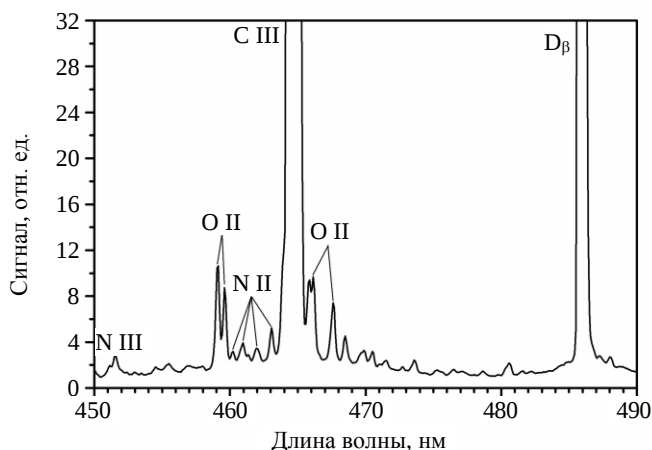


Рис. 7. Спектр излучения в районе 470 нм, разряд № 63979

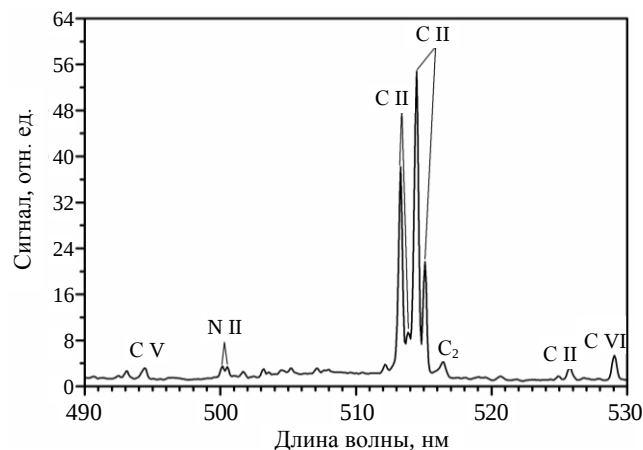


Рис. 8. Спектр излучения в районе 510 нм, разряд № 63980

ной (С II: 658,3 и 657,8 нм) и зелёной (С II: 513,3, 514,3, 514,5 и 515,1 нм) областях, так и в синей (С III: 464,7, 465,0 и 465,1 нм). Близкие линии углерода не удалось разделить из-за недостаточного спектрального разрешения. Самая яркая линия кислорода О II 441,6 нм состоит из двух: 441,5 и 441,7 нм; О III — отдельно стоящая линия 559,2 нм. Азот N II лучше регистрировать в жёлтой области (четыре линии): 566,7, 567,6, 568,0 и 568,6 нм, в окружении слабых линий кислорода.

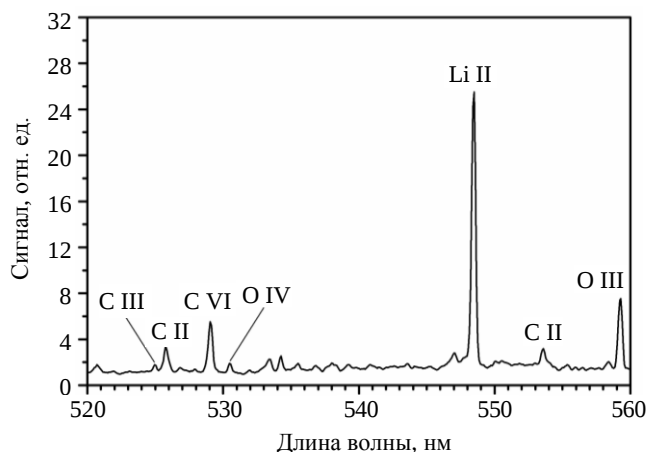


Рис. 9. Спектр излучения в районе 540 нм, разряд № 63981

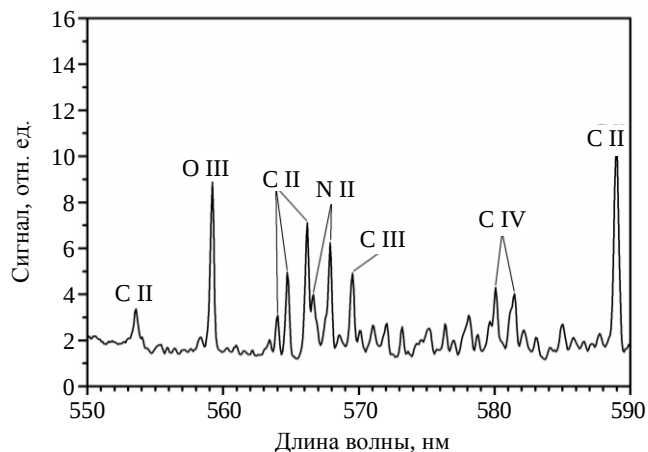


Рис. 10. Спектр излучения в районе 570 нм, разряд № 63982

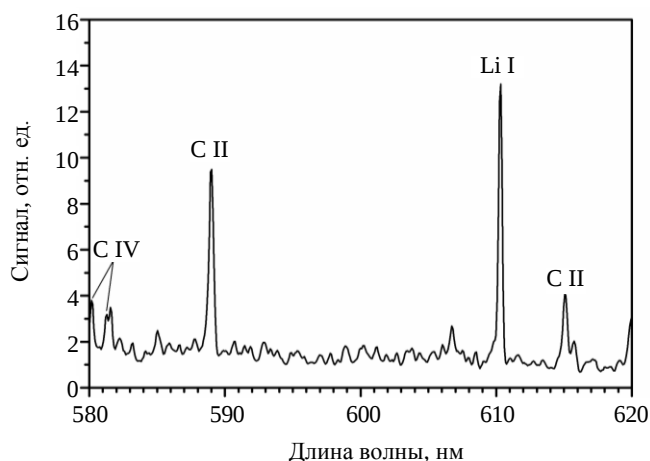


Рис. 11. Спектр излучения в районе 600 нм, разряд № 63983

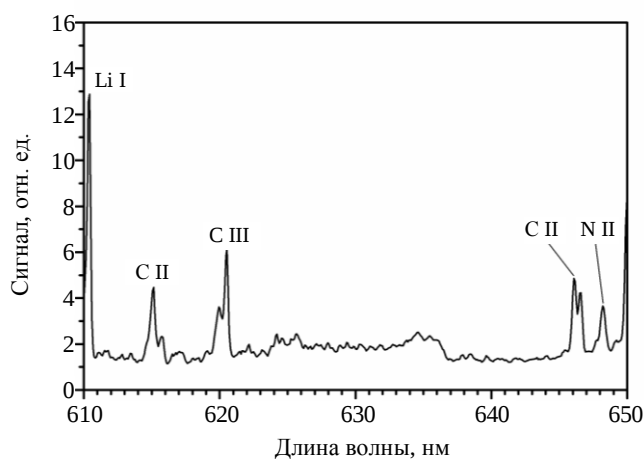


Рис. 12. Спектр излучения в районе 630 нм, разряд № 63984

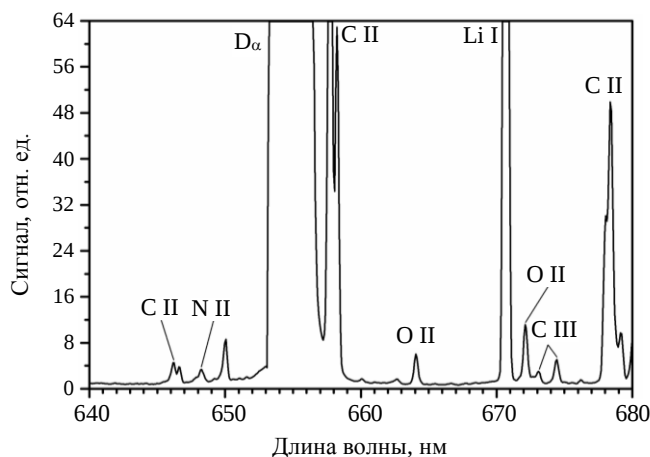


Рис. 13. Спектр излучения в районе 640 нм, разряд № 63985

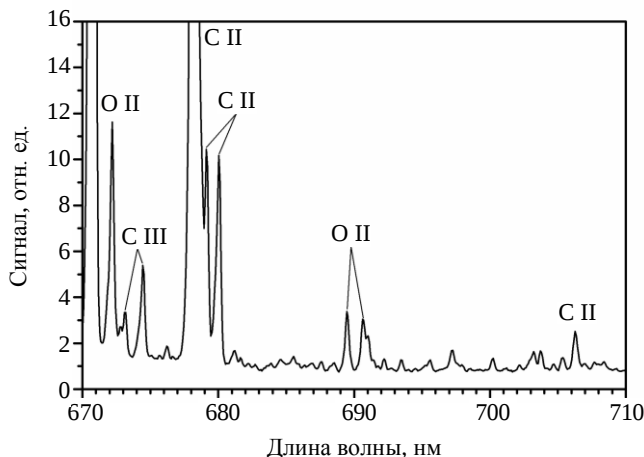


Рис. 14. Спектр излучения в районе 690 нм, разряд № 63986

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На токамаке T-10 развита и испытана диагностика для определения примесного состава плазмы с помощью регистрации обзорного спектра в видимой области (390—710 нм). Данная диагностика обеспечивает за один разряд токамака измерение участка спектра шириной до 50 нм при использовании дифракционной решётки 1200 штр./мм со спектральным разрешением примерно 0,5 нм.

Измерения обзорного спектра в видимой области (390—710 нм), проведённые за 10 повторяющихся разрядов токамака, показали, кроме наличия линий рабочего газа — дейтерия и основной примеси плазмы установки — углерода, также линии других элементов: лития, азота, кислорода. Литий, присутствующий в установке после литиизации, не представляет особого интереса в отличие от кислорода и азота, которые свидетельствуют о плохой подготовке вакуумной камеры к рабочим режимам. В случае высокой концентрации N и O могут оказывать существенное влияние на удержание плазмы и приводить к значительному увеличению $Z_{эф}$. Описанная в статье диагностика не позволяет делать количественные оценки, поэтому для измерения концентрации кислорода и азота и определения их влияния на поведение плазмы необходимо задействовать другие методы измерений, в частности, CXRS-диагностику.

В 2015 г. на T-10 планируется замена кольцевого и рельсового графитовых лимитеров на вольфрамовые, а также введение дополнительного литиевого лимитера. Эти изменения должны сократить поступление лёгких примесей в плазму и привести к значительному изменению соотношения их концентрации. Вместе с тем в плазму будет вводиться мощность СВЧ-нагрева до 3 МВт, что может приводить к повышенному распылению материалов лимитеров и стенок камеры, покрытых углеродом. Подобные изменения режима работы токамака требуют отслеживания изменения спектра излучения и оперативно-го анализа примесного состава плазмы, проведённых с помощью обзорного спектрометра.

Авторы выражают благодарность В.А. Крупину за оказанную помощь и консультации при подготовке и проведении измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Isler R.C. — Fusion Eng. Des., 1997, vol. 34—35, p. 115—123.
2. Hofman J. — Visible Spectroscopy on ASDEX, 1991, IPP III/174.
3. Weinzel V., Panek R., Hron M., Stockel J. et al. — Fusion Eng. Des., 2011, vol. 86(6—8), p. 1227—1231.
4. Boxa F., Howard J., van de Kolk W.A., Meijer F. — Ibid., 1997, vol. 34—35, p. 231—134.
5. Schacht J., Pingel S., Herbst U., Hennig C. et al. — Ibid., 2013, vol. 88(5), p. 259—264.
6. Bell R. — Rev. Sci. Instrum., 2004, vol. 75, p. 4158—4161.
7. Hillis D., Fehling D., Bell R., Johnson D et al. — Ibid., p. 3449—3451.
8. Gray T., Biewer T., Boyle D., Granstedt E. et al. — Ibid., 2012, vol. 83, 10D537.
9. Brix M., Dodt D., Korotkov A., Morgan P. et al. — Ibid., 2010, vol. 81, 10D733.
10. Brezinsek S., Pospieszczyk A., Sergienko G., Mertens P., Samm U. — Plasma Fusion Res., 2008, vol. 3, S1041 (5 p.).
11. Итоги работы по научному направлению «Термоядерный синтез и плазменные технологии» в РНЦ «Курчатовский институт» за 2009 г. Отчёт. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2010, вып. 2, с. 3—18.
12. Крупин В., Ключников Л., Коробов К., Немец А. и др. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 4, с. 60—70.
13. Vershkov V., Andreev V., Borschegovskiy A., Chistyakov V. et al. — Nucl. Fusion, 2011, vol. 51, 094019 (14 p.).



Алексей Викторович Горбунов, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
alexeygor@mail.ru



Леонид Александрович Ключников, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Кирилл Вячеславович Коробов, м.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Korobov_KV@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 18 марта 2015 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 2, с. 62—67.