

УДК 533.9.082.5

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ПРИМЕСЕЙ ВОДЫ В ПЛАЗМЕ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ АКТИНОМЕТРИИ

А. В. Бернадский, В. Н. Очкин

Рассматривается применение метода оптической актинометрии для определения концентраций молекул воды в газоразрядной плазме. Для плазмообразующих газов $H_2O:He$ с примесью He такую возможность дает использование относительных интенсивностей линий He и кислорода O .

Ключевые слова: плазма, актинометрия.

При создании и эксплуатации мощных электровакуумных энергетических установок типична и актуальна проблема целостности охлаждаемых водой стенок. Нарушение их герметичности приводит к появлению в плазме рабочего вещества микропримесей воды с последующим выходом устройств из режима функционирования и возможными катастрофическими сценариями развития таких последствий. Так, в проекте реактора ИТЭР [1], с учетом опыта работы установок предыдущих поколений (напр., JET в Великобритании, Tore Supra во Франции, Л-2М в России...) [2, 3] заложено требование к натеканию паров воды в плазменную камеру в пределах $W \sim (10^{-2} - 10^{-7}) \text{ Па}\cdot\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}$ (величина $10^{-7} \text{ Па}\cdot\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}$ соответствует изменению концентрации молекул на $2.65 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$).

Наряду с многообразием методов измерений влажности газов, применительно к плазме такие возможности мало изучены и находятся в стадии исследований.

В работах [4, 5] мы в этих целях предложили спектроскопический метод, основанный на измерении интенсивности свечения т.н. “горячих” групп во вращательной структуре электронной полосы $A^2\Sigma - X^2\Pi$ гидроксила ОН. Эти группы появляются в результате диссоциативного возбуждения молекул H_2O электронным ударом с последующим их распадом на водород Н и возбужденный гидроксил $OH(A^2\Sigma)$ [6]. Такой подход продемонстрировал высокую чувствительность для индикации молекул воды. С помощью калибровок было показано, что такая чувствительность дает возможность определения очень низких скоростей натекания, вплоть до $3 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}$.

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ochkin@sci.lebedev.ru, berav@lebedev.ru.

С целью получения количественных результатов в работе [7] метод был дополнен абсолютными измерениями интенсивностей свечения ОН и зондовыми измерениями параметров электронной компоненты плазмы. В такой версии метода достигнута чувствительность $(1 \pm 0.2) \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, удовлетворяющая существующим требованиям. Вместе с тем, с точки зрения практического использования в реальных условиях сложных установок, такую комбинацию измерений реализовать достаточно трудно. К тому же, анализ условий применения показывает, что ультрафиолетовая область спектра (вблизи 300 нм для ОН) также вызывает вопросы, т.к. возможна деградация оптики в канале наблюдения при больших потоках быстрых частиц и жестких излучений.

С учетом этих обстоятельств в настоящей работе мы исследуем принципиальную возможность применения также и других спектральных линий без проведения зондовых измерений с использованием подхода, известного как оптическая актинометрия [6]. При этом для анализа такой новой возможности мы опираемся на сопоставления с результатами уже апробированного метода [7]. Суть актинометрического подхода состоит в сопоставлении концентрации $[n_X]$ анализируемых частиц с известной концентрацией добавляемых в контролируемых количествах частиц-актинометров $[n_{ACT}]$. Эта связь устанавливается при сопоставлении интенсивностей свечения частиц

$$\frac{I_X}{I_{ACT}} = \frac{k_X}{k_{ACT}} \cdot \frac{[n_X]}{[n_{ACT}]}, \quad (1)$$

где k – коэффициент скорости возбуждения спектральных линий определяемой частицы и актинометра электронным ударом

$$k = \int \sigma(\varepsilon) \cdot f(\varepsilon) \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot d\varepsilon, \quad (2)$$

$\sigma(\varepsilon)$ – сечение возбуждения, $f(\varepsilon)$ – функция распределения электронов по энергии электронов ε . Знания абсолютных значений интенсивностей при этом не требуется. Если, с точностью до масштабного коэффициента, вид $f(\varepsilon)$ для разных спектральных линий подобен, то и в первом приближении точного знания этого вида также не требуется.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

Исследовалась плазма разряда в открытом полом катоде. Такая геометрия, как представляется, наиболее соответствует модели для бланкетной структуры стенок реакторов. Вольфрамовый катод С ($100 \times 50 \times 10 \text{ мм}^3$) смонтирован в вакуумной камере ВС объемом 22 л с откачкой до остаточного давления $4 \cdot 10^{-5}$ мбар. Разряд осуществлялся между стенками и анодом А в виде вольфрамовой проволоки диаметром 1.5 мм,

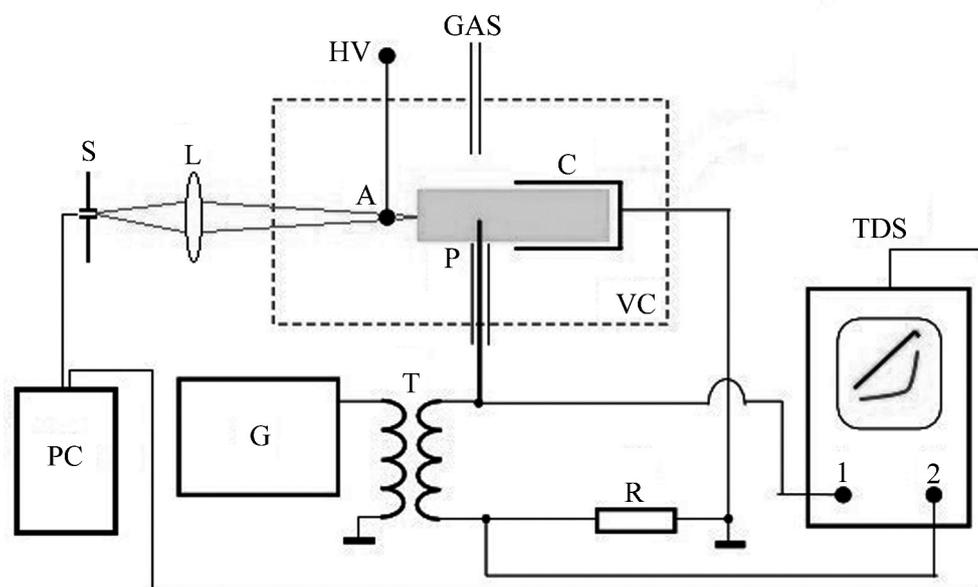


Рис. 1: Схема установки (пояснения в тексте).

длиной 100 мм, расположенного в 15 мм от среза катода. Напряжение 600 V создаётся блоком питания УИП-1 (HV), ток разряда 0.23 A. Смесь газов (He, Xe, пары H₂O) попадает в камеру через систему (GAS), которая позволяет создавать газовую смесь нужных пропорций. Излучение разряда проходит через оптику (L) и попадает на входную щель (S) монохроматора МДР-204. Сигнал с фотоумножителя Hamamatsu R928 передается на персональный компьютер (PC) для обработки. Электрический зонд (P) сделан из вольфрамовой проволоки диаметром 0.1 мм в кварцевом капилляре с выступающей частью 3 мм. пилообразное напряжение ± 110 V частотой 115 Hz подаётся на зонд с генератора SFG-8219A (G) через трансформатор (T). Сигнал с измерительного сопротивления $R = 490$ Ом поступает на цифровой осциллограф (TDS) и строится зондовая вольт-амперная характеристика.

Эксперименты проводились для условий разряда в смеси H₂O:He:Xe. Изучались спектры свечения разряда в диапазоне 300–900 нм. С точки зрения поставленной задачи наибольший интерес представляют линии Q(15) ($\lambda = 312.5$ нм) полосы OH ($A^2\Sigma - X^2\Pi$), Xe ($\lambda = 823.2$ нм) и атома кислорода O ($\lambda = 777.4$ нм). Вид сечений возбуждения этих линий по данным работ [8] (OH), [9] (Xe), [10] (O) приведен на рис. 2. Там же показан типичный вид функции распределения электронов по энергиям $f(\varepsilon)$ (EEDF), измеренной для разряда в смеси H₂O:He:Xe. Видно, что сечения имеют близкие значения пороговой энергии и схожий функциональный вид. Максимум функции $f(\varepsilon)$ соответствует энер-

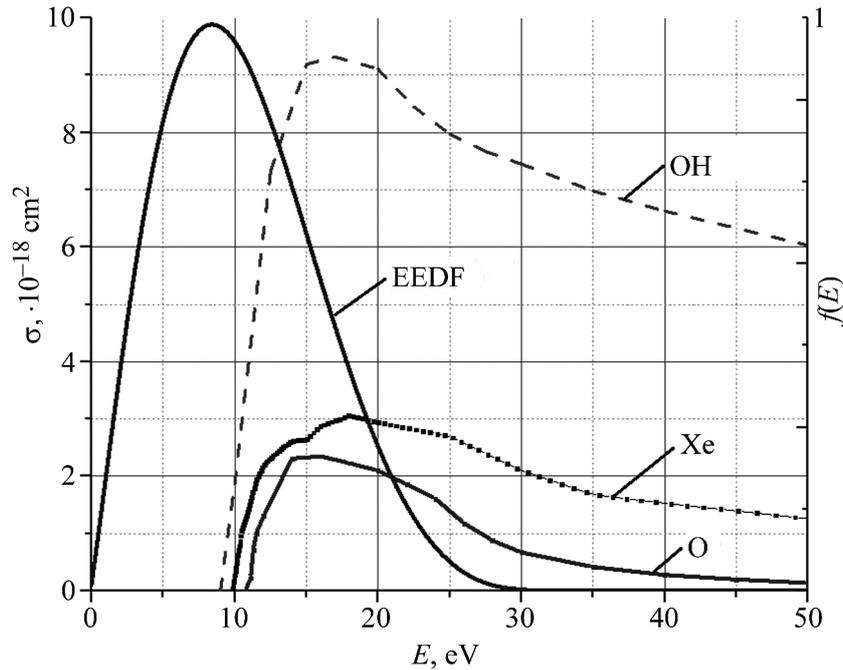


Рис. 2: Сечения возбуждения линий OH, O, Xe и вид $f(\varepsilon)$.

гии, близкой к пороговым значениям сечений. Эти обстоятельства благоприятны для актинометрических измерений.

Результаты представлены в табл. 1 для случая плазмообразующей смеси He:H₂O:Xe (25:3:1) при общем давлении в камере 0.85 мбар. Приведены отношения интенсивностей I спектральных линий и концентрации частиц. При этом концентрация атомов Xe полагалась равной таковой в плазмообразующем газе. Концентрации частиц в исходной смеси отмечены индексом ⁰. Индексом * отмечены концентрации молекул воды, измеренные методом абсолютных интенсивностей в комбинации с зондовыми измерениями [7]. Концентрации без индексов получены методом актинотрии. Зондовые измерения показали, что в этих условиях ФРЭЭ значимы в пределах от 0 до 40 eV, средняя энергия варьируется от 6 до 10 eV, поэтому отношение сечений рассматривалось также в этой области: $\sigma_{OH}/\sigma_{Xe} = 3.4$, $\sigma_{OH}/\sigma_O = 6.5$. В табл. 1 также приведены значения концентрации электронов n_e и их средних энергий $\bar{\varepsilon}$. При измерениях относительных интенсивностей линий $I_{Q(15)}/I_{Xe}$, $I_{Q(15)}/I_O$ учитывался коэффициент чувствительности ФЭУ K для соответствующих длин волн: $K_{312.5} = 0.24$, $K_{777.4} = 0.04$, $K_{823.2} = 0.03$.

Т а б л и ц а 1

Результаты измерений

Относительные интенсивности		Концентрации частиц, см ⁻³					Параметры электронов	
I_{Xe}/I_{Q15}	I_O/I_{Q15}	Xe ⁰	H ₂ O ⁰	O	H ₂ O	H ₂ O*	n_e , см ⁻³	$\bar{\epsilon}$, эВ
480±	4±	21×	8×	(1.1±	(3±	(3.1±	(3.1 ± 0.6)×	9±
50	0.5	10 ¹⁴	10 ¹⁴	0.2) · 10 ¹³	0.8) · 10 ¹⁴	0.5) · 10 ¹⁴	10 ⁸	0.3

Результаты первых экспериментов показывают, что использование предлагаемого актинометрического метода по интенсивностям атомных спектральных линий позволяет определять концентрации молекул воды в плазме. Чувствительность таких измерений сопоставима с чувствительностью измерений при помощи комбинации методов абсолютных интенсивностей в спектре гидроксила и зондовых измерений [7]. Выяснение предельных чувствительностей и минимизации содержания актинометрических добавок требует дополнительных исследований.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 14-12-00784).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] ITER Final Design Report No. G 31 DDD 14 01.07.19 W 0.1, Section 3.1: Vacuum Pumping and Fuelling Systems (IAEA, Vienna, 2001).
- [2] Au. Durocher, A. Bruno, M. Chantant, et al., *Fusion Engineering and Design* **88**, 1390 (2013). <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.02.078>
- [3] V. Kurnaev, O. Afonin, A. Antipenkov, et al., L-2M team, *Fusion Engineering and Design* **88**, 1414 (2013). <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2012.12.022>
- [4] А. Б. Антипенков, О. Н. Афонин, В. Н. Очкин, С. Ю. Савинов, С. Н. Цхай, *Физика плазмы* **38**(3), 221 (2012).
- [5] А. Б. Антипенков, О. Н. Афонин, А. В. Бернацкий, В. Н. Очкин, *Ядерная физика и инжиниринг* **5**(7-8), 644 (2014).
- [6] V. N. Ochkin, *Spectroscopy of Low Temperature Plasma* (WILEY-VCH, Weinheim, 2009).
- [7] А. Б. Антипенков, О. Н. Афонин, А. В. Бернацкий, В. Н. Очкин, *Физика плазмы* **41**(9), 767 (2015). <http://doi:10.7868/S0367292115090036>.

- [8] Y. Itikawa, N. Mason, J. Phys. Chem. Ref. Data **34**(1), 1 (2005).
- [9] Biagi-v8.9 (Magboltz version 8.9) database, www.lxcat.net, retrieved on June 10, 2015.
- [10] R. R. Laher, F. R. Gilmore, J. Phys. Chem. Ref. Data **19**(1), 277 (1990).

Поступила в редакцию 3 июля 2015 г.