

УДК 533.9.082.5

## ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ НА ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ АТОМОВ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ АКТИНОМЕТРИИ

А. В. Бернацкий<sup>1</sup>, В. Н. Очкин<sup>1</sup>, Р. Н. Бафоев<sup>2</sup>

*Концентрации атомов кислорода и водорода в разряде в полом катодe с добавками паров воды определяются с помощью малых добавок аргона и ксенона в качестве оптических актинометров. Обсуждается возможность отказа от измерений параметров электронной компоненты плазмы.*

**Ключевые слова:** актинометрия, низкотемпературная плазма, концентрация атомов.

Для измерения концентраций атомов и молекул в плазме может быть использован метод оптической актинометрии [1]. Он основан на сопоставлении концентрации анализируемых частиц  $X$  с известной концентрацией добавляемых в контролируемых количествах частиц-актинометров  $A$  при сопоставлении интенсивностей  $I$  свечения частиц. Если в условиях плазмы низкого давления пренебречь тушением излучающих состояний столкновениями, эта связь выражается в виде

$$N_X = N_A \cdot \frac{I_X}{I_A} \cdot \frac{\lambda_X}{\lambda_A} \cdot \frac{C_A}{C_X} \cdot \frac{k_A}{k_X}. \quad (1)$$

Здесь  $N_{X,A}$  – концентрации частиц  $X$ ,  $A$  в основных электронных состояниях (предполагается, что они практически совпадают с полными концентрациями);  $k_{X,A}$  – константы скоростей возбуждения из основных состояний на верхние уровни переходов;  $C_{X,A}$  – коэффициенты, определяемые геометрией и пропусканием оптики, спектральной чувствительностью детектирования;  $\lambda_{X,A}$  – длины волн излучения соответствующих частиц. Полагая, что излучающие состояния возбуждаются электронами с распределением (ФРЭЭ)  $f(\varepsilon)$  по энергиям  $\varepsilon$ , константы  $k_{X,A}$  определяются как

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

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: berav@sci.lebedev.ru.

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (Государственный университет), 141700 Россия, Московская область, Долгопрудный, Институтский пер., 9.

$\sigma(\varepsilon)$  – сечение возбуждения. Метод привлекателен тем, что определение искомой концентрации не требует измерений абсолютных интенсивностей и концентраций электронов. При этом необходимость знания ФРЭЭ, вообще говоря, остается. В данной работе мы на конкретных примерах исследуем, насколько форма распределения критична. Важным при этом оказывается вопрос о подборе актинометрических пар.

А. Пороги возбуждения  $\varepsilon_t$  и формы сечений  $\sigma_X(\varepsilon)$  и  $\sigma_A(\varepsilon)$  различаются. Тогда, в соответствии с (1) и (2), следует измерить ФРЭЭ  $f(\varepsilon)$ , интенсивности  $I_X$ ,  $I_A$  в относительных единицах и искомую концентрацию  $N_X$  найти по соотношению (1).

Б. Пороги  $\varepsilon_t$  совпадают, а  $\sigma_X(\varepsilon)$  и  $\sigma_A(\varepsilon)$  имеют подобный вид, т.е.

$$\sigma_X(\varepsilon) = \Gamma \cdot \sigma_A(\varepsilon). \quad (3)$$

Подобие форм сечений при близких порогах  $\varepsilon_t$  не является чем-то случайным, поскольку в борновском приближении они связаны с силой осциллятора  $f_{gu}$  оптически разрешенного перехода между основным и возбуждаемым состояниями [1].

$$\sigma(\varepsilon) = 4 \cdot \pi \cdot a_0^2 \cdot \left( \frac{Ry}{\varepsilon_t} \right)^2 \cdot \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon} \cdot \ln \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_t} \right) \cdot f_{gu}, \quad (4)$$

$Ry$  – потенциал ионизации атома водорода,  $a_0$  – радиус Бора. Для возбуждения на оптически запрещенных переходах максимумы сечений группируются вблизи значений  $\varepsilon/\varepsilon_t \approx 1.2 - 1.6$ , и формы сечений также близки [1].

Если условие (3) выполняется точно, то измерения концентрации  $N_X$  существенно упрощаются,  $k_A/k_X$  заменяется отношением сечений и результат расчета по формуле (1) не зависит от ФРЭЭ. Значения  $\Gamma$  могут быть определены, например, по максимумам сечений или по их средним (интегральным) значениям. Таким образом, при подборе актинометрических пар следует, по возможности, ориентироваться на линии в спектрах частиц с близким порогом возбуждения. Тогда соотношение (1) принимает вид

$$N_X = N_A \cdot \frac{I_X}{I_A} \cdot \frac{\lambda_X}{\lambda_A} \cdot \frac{C_A}{C_X} \cdot \Gamma^{-1} \cdot (1 + \delta_X), \quad (5)$$

где  $\delta_X$  – поправка, устраняющая различия (1) и (5), связанные с приближенностью (3).

В настоящей работе мы исследуем насколько существенны такие поправки на примере измерений концентраций атомов кислорода и водорода, возникающих при распаде молекул воды в разряде в газе, содержащем пары воды. Эта задача возникает в связи с созданием новых и эксплуатацией существующих мощных электровакуумных установок, для которых одной из центральных проблем является обеспечение чистоты

плазмообразующих газов. К числу таких проблем относится исключение проникновения паров воды в рабочую камеру из контуров охлаждения стенок [2, 3]. Контроль за этими событиями возлагается, в том числе, на оптические методы [4–6].

В недавней работе [7] предложено использовать метод актинометрии для контроля содержания атомов O, как возможного свидетельства проникновения паров воды в плазму. В качестве актинометра использовался атом Xe и проводились измерения ФРЭЭ.

В настоящей работе используются одновременно два актинометра (Xe, Ar), что увеличивает надежность измерений, расширяет перечень анализируемых частиц, комбинаций актинометрических пар и позволяет оценить возможность использования только спектральных измерений без привлечения зондовых, что существенно упрощает технику контроля на практике.

Экспериментальная установка включает вакуумную камеру из нержавеющей стали объемом 22 л с разрядным узлом в форме металлокерамического полого катода. Камера оснащена оптическими окнами для регистрации спектров излучения, вводами подачи высокого напряжения на разряд и электрического зонда для измерений параметров электронной компоненты. Более подробно установка описана в работах [5, 6]. Камера заполнялась смесью газов He:H<sub>2</sub>O:Xe:Ar (99:33:1:1) при общем давлении  $p_0 = 1$  мбар. Использовались актинометрические пары линий O (777.19 нм)–Xe

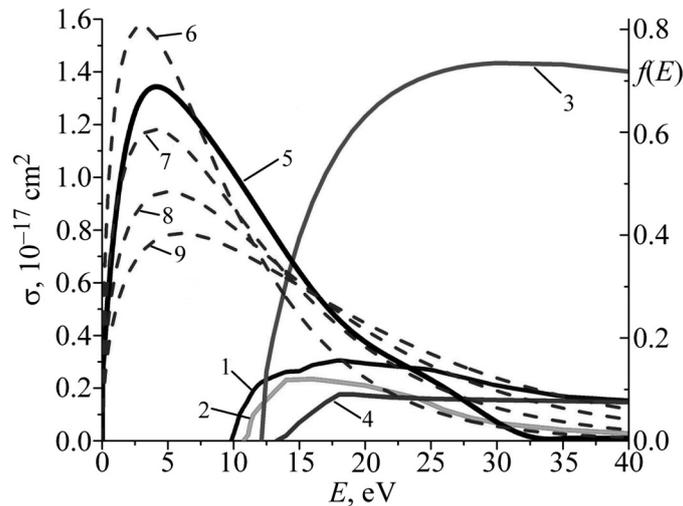


Рис. 1: Сечения возбуждения электронами атомов 1 – Xe [8]; 2 – O [9]; 3 – H [10]; 4 – Ar [11]. 5 – ФРЭЭ по зондовым измерениям; 6, 7, 8, 9 – максвелловские ФРЭЭ со средними энергиями  $\langle \varepsilon \rangle = 6, 8, 10$  и 12 эВ, соответственно.

(823.16 нм), О (777.19 нм)–Аг (751.46 нм), Н (656.28 нм)–Хе (823.16 нм), Н (656.28 нм)–Аг (751.46 нм).

На рис. 1 показаны энергетические зависимости сечений  $\sigma(\varepsilon)$  возбуждения электронами атомов О, Н, Хе, Аг и измеренный вид ФРЭЭ  $f(\varepsilon)$ . Там же показаны максвелловские ФРЭЭ  $f_M(\varepsilon)$  с различными средними энергиями  $\langle\varepsilon\rangle$ .

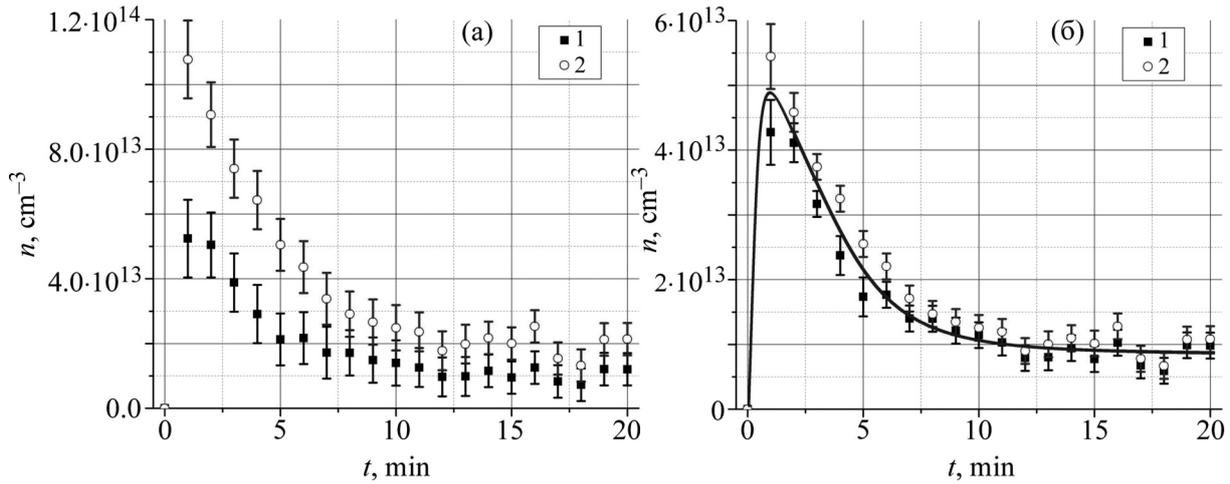


Рис. 2: Поведение концентрации атомов кислорода во времени после включения разряда. (а) обработка результатов без учета ФРЭЭ; (б) с учетом экспериментальной ФРЭЭ. 1, 2 – актинометры Хе, Аг, соответственно. Сплошная – аппроксимация средних по Хе и Аг значений  $n$  полиномом.

На рис. 2(а) приведены результаты измерений зависимости концентрации атомов кислорода от времени действия разряда при обработке величин интенсивностей линий актинометрических пар по упрощенному соотношению (5). Значения  $\Gamma$  соответствуют отношению площадей сечений возбуждения в диапазоне 0–70 эВ (характерный диапазон значимых величин ФРЭЭ). На рис. 2(б) – то же с учетом измеренной ФРЭЭ по формулам (1), (2). Видно, что в пределах погрешности измерений результаты рис. 2((а), (б)) близки, если в качестве актинометра используется Хе. Если в качестве актинометра служит Аг, значения концентраций О оказываются выше от полутора до двух раз. То, что отличия от результатов измерений с учетом ФРЭЭ больше в последнем случае, очевидно, связано с большими различиями в порогах возбуждения линий исследуемой частицы и актинометра Аг (рис. 1).

Аналогичные результаты, приведенные на рис. 3((а), (б)), получаются и при измерении концентраций атомов водорода.

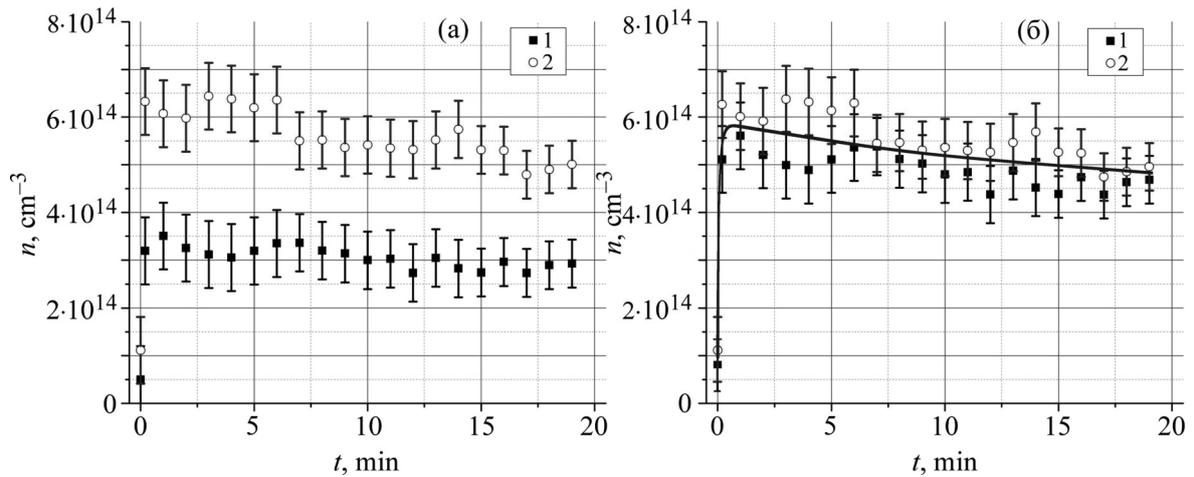


Рис. 3: Поведение концентрации атомов водорода во времени после включения разряда. (а) обработка результатов без учета ФРЭЭ; (б) с учетом экспериментальной ФРЭЭ. 1, 2 – актинометры Хе, Аг, соответственно.

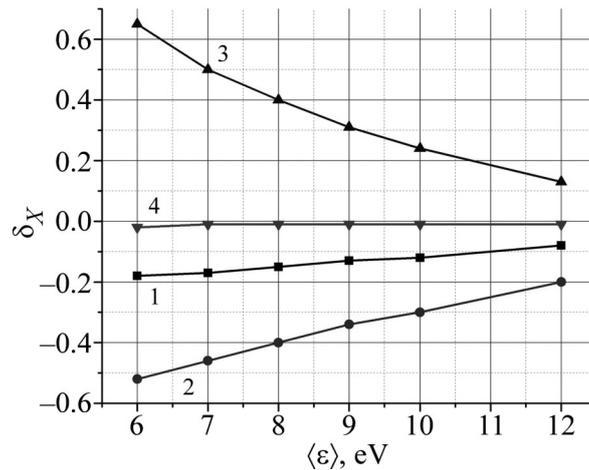


Рис. 4: Поправки  $\delta_{\chi}$  для учета влияния максвелловских ФРЭЭ с различными средними энергиями. Актинометрические пары: 1 – O-Xe, 2 – O-Ar, 3 – H-Xe, 4 – H-Ar.

Таким образом, использование нескольких актинометрических пар приводит к хорошо согласующимся результатам. На практике, конечно, гораздо проще проводить только оптические измерения, не обращаясь к зондовым измерениям ФРЭЭ. Поправка  $\delta_{\chi}$  в формуле (5) может быть принята за меру связанных с этим погрешностей. Для их оценки мы провели расчеты  $\delta_{\chi}$  для ряда максвелловских ФРЭЭ с различными средними энергиями  $\langle \epsilon \rangle$  применительно к рассматриваемым случаям измерений атомов кислорода и водорода.

Результаты представлены на рис. 4. Поправки убывают по мере увеличения  $\langle \varepsilon \rangle$  и уменьшения различий порогов возбуждений пар актинометрических спектральных линий. В диапазоне от 12 эВ до 6 эВ они не превышают 60%. Они приближенно могут быть введены, если средняя энергия электронов оценивается из величин приведенных напряженностей электрического поля  $E/N$  [12].

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

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. Н. Очкин, *Спектроскопия низкотемпературной плазмы* (М., Физматлит, 2010).
- [2] 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).
- [3] Au. Durocher, A. Bruno, M. Chantant, et al., *Fusion Engineering and Design* **88**, 1390 (2013). doi: 10.1016/j.fusengdes.2013.02.078.
- [4] А. Б. Антипенков, О. Н. Афонин, В. Н. Очкин и др., *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). doi: 10.1134/S2079562914070021.
- [6] А. В. Бернацкий, В. Н. Очкин, О. Н. Афонин, А. Б. Антипенков, *Физика плазмы* **41**(9), 767 (2015). doi: 10.7868/S0367292115090036
- [7] А. В. Бернацкий, В. Н. Очкин, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **42**(9), 30 (2015).
- [8] Biagi-v8.9 (Magboltz version 8.9) database, www.lxcat.net, retrieved on June 10, 2015.
- [9] R. R. Laher, F. R. Gilmore, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **19**(1), 277 (1990).
- [10] H. W. Drawin, *Collision and transport cross-sections* (EUR-CEA-FC report 383, 1966).
- [11] A. Yanguas-Gil, J. Cotrino, L. L. Alves, *Journal of Physics D: Applied Physics* **38**, 1588 (2005).
- [12] Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда* (М., Наука, 1987).

Поступила в редакцию 29 марта 2016 г.