

ПЛАЗМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВБЛИЗИ ПОЛОГО ПРЯМОУГОЛЬНОГО КАТОДА

С. Н. Андреев, А. В. Бернацкий *, В. Н. Очкин

УДК 533.9

Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской АН,
119991, ГСП-1, Москва, Россия; e-mail: bernatskiyav@lebedev.ru

(Поступила 16 октября 2020)

Методом одиночных зондов получены концентрации электронов и функции распределения электронов по энергиям в коротком разрядном промежутке между прямоугольным полым катодом и сетчатым анодом. Установлено, что распределения электронов не максвелловские, с избытком высокоэнергичных электронов, доля которых уменьшается при удалении от катода.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, функция распределения электронов по энергиям, полый катод.

The values of electron concentrations and electron energy distribution functions in a short discharge gap between a rectangular hollow cathode and a mesh anode were obtained by the single probe method. It was established that the distributions of electrons are not Maxwell ones with an excess of high-energy electrons, the proportion of which decreases with a distance from the cathode.

Keywords: low-temperature plasma, electron energy distribution function, hollow cathode.

Введение. В последние годы разрабатываются новые методы количественной спектроскопии неравновесной плазмы пониженной плотности [1]. Они развивают эмиссионные абсолютные измерения [2], актинометрию [3—5], диодную лазерную спектроскопию [6, 7] и их комбинации [8] и могут применяться на различных электроразрядных установках [1, 5]. При их отработке и физическом обосновании на лабораторном уровне в ряде случаев возникает необходимость интерпретации оптических измерений с привлечением сведений о параметрах электронов плазмы [1]. Например, в методе оптической актинометрии [1, 3] пара излучающих состояний исследуемого вещества X (концентрацию которого надо определить) и вещества актинометра A (вещество в малых количествах, концентрация которого известна) подбираются определенным образом. Сечения возбуждения состояний должны иметь близкий порог, быть подобны. В таком случае при малых давлениях в системе отношение интенсивностей этих линий (регистрируемых в эксперименте) пропорционально отношению концентраций веществ $I_A/I_X \sim N_A/N_X$ [1]. Однако часто выбор пар $X-A$ и их излучающих состояний ограничен. Тогда различие порогов возбуждения спектральных линий и различающийся вид сечений обязывает вводить поправочные коэффициенты δ : $I_A/I_X \sim \delta N_A/N_X$ [1, 3, 9]. Величину δ легко определить, зная вид функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) [9].

В последние годы нами ведется разработка оптических методов поиска примесей в пристеночной плазме термоядерных реакторов [1, 5]. Для создания подобных условий в экспериментальной установке выбрана конфигурация разрядного устройства с полым прямоугольным катодом, моделирующая “чистящий” разряд в области соединений бланкетов первой стенки плазменного термоядерного реактора [10].

Цель данной работы — исследование ФРЭЭ в плазме вблизи полого прямоугольного катода. Установление вида ФРЭЭ позволит в дальнейшем апробировать предложенные спектроскопические методы [1] в коротких разрядных промежутках.

PLASMA PARAMETERS NEAR A HOLLOW RECTANGULAR CATHODE

S. N. Andreev, A. V. Bernatskiy *, V. N. Ochkin (P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia; e-mail: bernatskiyav@lebedev.ru)

Эксперимент. Эксперименты проведены в вакуумной камере установки “Течь” [1—5, 11, 12] объемом 22 л, оборудованной системой прогрева стенок [13] для ускоренной дегазации внутренних поверхностей и обеспечения остаточного вакуума на уровне $5 \cdot 10^{-7}$ мбар. Установка оборудована многоканальной системой напуска газов.

Разрядное устройство (рис. 1) представляет собой полый прямоугольный вольфрамовый катод $100 \times 50 \times 10$ мм с открытой стороной 100×10 мм, обращенной к аноду в виде вольфрамовой сетки (100×10 мм), расположенному на расстоянии 10 мм от края катода. В качестве источника напряжения используется блок УИП-1. Боковые стенки катода — керамические пластины (не показаны).

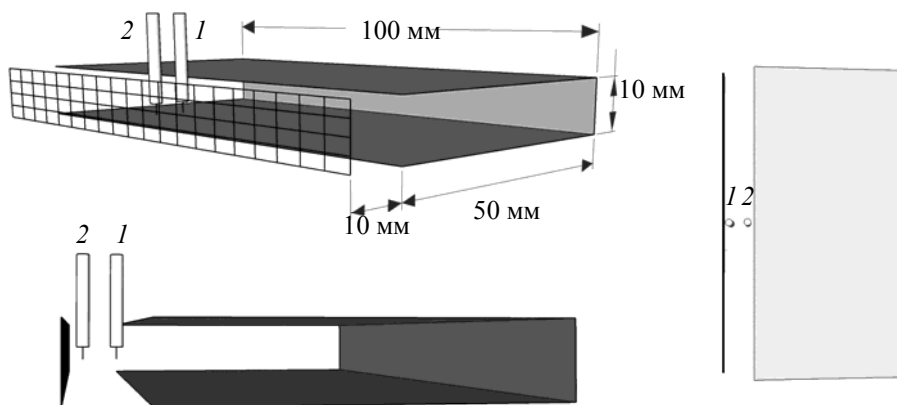


Рис. 1. Разрядное устройство и расположение зондов в разных проекциях: на расстояниях 1 (1) и 6 мм (2) от полого катода

Зондовые измерения хорошо известны в диагностике плазмы [14, 15]. Получение плазменных параметров из вольт-амперной характеристики (ВАХ) на практике является непростой задачей. Ее оптимальное решение постоянно обсуждается (см., например, [16—20] и др.). Проблема в том, что измеряемые параметры ФРЭЭ — потенциал плазмы U_p , концентрация электронов N_e , их распределение по энергиям — получаются при дифференцировании ВАХ и крайне чувствительны к точности ее измерений и способу формирования. Можно отметить работы [19, 20], где в отдельных случаях удается достичь диапазона в 3—4 порядка для значений ФРЭЭ, однако подробности процедур и методов не описываются.

В [11] нами предложено формировать ВАХ при подаче на зонд напряжения в виде шумового сигнала. Обычно для этих целей используют периодический (например, пилообразный) сигнал. Такой подход позволяет значительно уменьшить ошибки в определении ФРЭЭ и плазменных параметров по сравнению с традиционным периодическим сигналом. Для изучения определенной области ФРЭЭ на зонд можно подать комбинацию периодического сигнала (с малым количеством точек) и шумового сигнала. Причем шумовой сигнал подается в область ВАХ, соответствующую области ФРЭЭ [11]. Можно формировать шумовой сигнал во всем диапазоне ФРЭЭ, но с неравномерным распределением количества точек [12]. Как показывают измерения [12], перераспределением количества точек в хвост ФРЭЭ удастся увеличить диапазон измерения как минимум на 5 эВ (при средней энергии электронов ~ 5.5 эВ). Предложенные подходы позволяют достичь 3—4 порядков динамического диапазона ФРЭЭ при сильно зашумленной ВАХ.

Источником напряжения в зондовой системе служил операционный усилитель APEX PA94 с нарастанием 500 В/мкс, током до 100 мА, питаемый источником постоянного напряжения 400 В. Форма сигнала с APEX задавалась каналом аналого-цифрового преобразователя платы PXIe-6366. Зондовый ток проходил через усилитель с гальванической развязкой Analog Devices AD215 и буферный усилитель AD620. Устройство подключалось к плате ввода/вывода NI PXIe-6366 (16 бит, 2 МГц/канал) с шасси PXIe-1073. Два канала аналого-цифрового преобразователя использовались для оцифровки значений зондового тока и напряжения, измеряемых непосредственно на зонде. Программа для управления и обработки результатов измерений написана в среде NI LabView и позволяет задавать произвольную форму напряжения на зонде и записывать в компьютере ВАХ в различных сериях измерений для последующей обработки (подробное описание зондовой системы см. в [11]).

Зонды 1, 2 (рис. 1) располагались по линии вдоль оси на расстоянии от катода 1 и 6 мм. Зонды, выполненные из вольфрамовой проволоки диаметром 0.1 мм, выступали из керамических изоляторов на 2 мм. Измерения проводились в разряде в He при давлении 1 мбар. Напряжение на разрядном устройстве 340 В, ток разряда 420 мА.

Результаты и их обсуждение. Результаты измерений ФРЭЭ показаны на рис. 2. Диапазон значений ФРЭЭ не менее четырех порядков и превышает опубликованные ранее результаты. На расстоянии 1 мм от катода средняя энергия электронов $\langle E \rangle = 8.1$ эВ, концентрация $N_e = 5.4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, на расстоянии 6 мм $\langle E \rangle = 6$ эВ, $N_e = 7.6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. На рис. 1 показаны максвелловские ФРЭЭ (кривые 1' и 2'), соответствующие экспериментальным 1 и 2 при сохранении $\langle E \rangle$. Видно существенное отклонение реальных распределений от максвелловских. В обоих случаях наблюдается избыток электронов в области 5—10 эВ. Следует предположить, что быстрые электроны, формируемые в полом катоде, дрейфуют в сторону анода, теряя энергию. Этот нелокальный механизм формирования ФРЭЭ требует более подробного экспериментального изучения и численного моделирования.

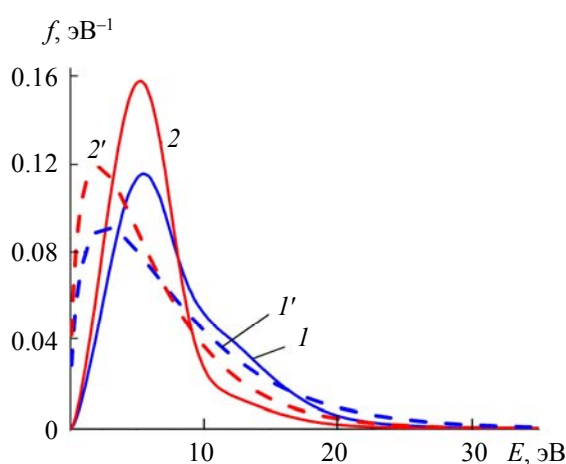


Рис. 2. ФРЭЭ, измеренные на расстояниях 1 (1) и 6 мм (2) от катода; 1' и 2' — максвелловские ФРЭЭ с $\langle E \rangle$, соответствующей экспериментальным 1 и 2

Заключение. На ограниченном промежутке плазмы разряда, поддерживаемого полым катодом, экспериментально изучена пространственная трансформация вида энергетического распределения электронов, их концентраций, средних энергий и потенциала пространства. Метод одиночных зондов с формированием вольт-амперных характеристик одновременно напряжениями различной формы позволяет реализовать динамический диапазон функции распределения электронов по энергиям не менее четырех порядков величины, что превышает известные результаты. Распределения существенно не максвелловские, с избытком быстрых электронов, уменьшающимся ближе к аноду, что может свидетельствовать о нелокальности формирования электронного спектра.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 19-12-00310).

- [1] A. V. Bernatskiy, I. V. Kochetov, V. N. Ochkin. Plasma Phys. Rep., **46**, N 9 (2020) 783—829, <https://doi.org/10.31857/S0367292120090024>
- [2] A. V. Bernatskiy, V. N. Ochkin, O. N. Afonin, A. B. Antipenkov. Plasma Phys. Rep., **41**, N 9 (2015) 705—714, <https://doi.org/10.1134/S1063780X15090032>
- [3] A. V. Bernatskiy, V. N. Ochkin, I. V. Kochetov. J. Phys. D: Appl. Phys., **49**, N 39 (2016) 395204, <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/39/395204>
- [4] A. V. Bernatskiy, I. V. Kochetov, V. N. Ochkin. Phys. Plasm., **25**, N 8 (2018) 083517, <https://doi.org/10.1063/1.5042839>
- [5] A. V. Bernatskiy, I. V. Kochetov, V. N. Ochkin. Plasma Sour. Sci. Technol., **28**, N 10 (2019) 105002, <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab4301>

-
- [6] **A. V. Bernatskiy, V. V. Lagunov, V. N. Ochkin.** *Quantum Electron.*, **49**, N 2 (2019) 157—161, <https://doi.org/10.1070/QEL16819>
- [7] **A. V. Bernatskiy, I. V. Kochetov, V. V. Lagunov, V. N. Ochkin.** *Phys. Plasm.*, **26**, N 8 (2019) 083511, <https://doi.org/10.1063/1.5118830>
- [8] **A. V. Bernatskiy, V. V. Lagunov, V. N. Ochkin, S. N. Tskhai.** *Laser Phys. Lett.*, **13**, N 7 (2016) 075702, <https://doi.org/10.1088/1612-2011/13/7/075702>
- [9] **A. V. Bernatskiy, V. N. Ochkin, R. N. Bafoev.** *Bull. Lebedev Physics Institute*, **43**, N 6 (2016) 195—198, <https://doi.org/10.3103/S1068335616060038>
- [10] ITER, Final Design Report (2001) G31 DDD 14 01_07-19 W0.1. Section 3.1 Vacuum pumping and fuelling systems
- [11] **S. N. Andreev, A. V. Bernatskiy, V. N. Ochkin.** *Vacuum*, **180** (2020) 109616, <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109616>
- [12] **S. N. Andreev, A. V. Bernatskiy, V. N. Ochkin.** *Bull. Lebedev Physics Institute*, **47**, N 10 (2020) 317—319, <https://doi.org/10.3103/S1068335620100024>
- [13] **A. V. Bernatskiy, V. N. Ochkin, R. N. Bafoev, A. B. Antipenkov.** *Plasma Phys. Rep.*, **42**, N 10 (2016) 990—995, <https://doi.org/10.1134/S1063780X16100019>
- [14] **H. M. Mott-Smith, I. Langmuir.** *Phys. Rev.*, **28** (1926) 727, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.28.727>
- [15] **M. J. Druyvesteyn.** *Zeitschrift für Physik*, **64** (1930) 781, <https://doi.org/10.1007/BF01773007>
- [16] **Ю. А. Иванов, Ю. А. Лебедев, Л. С. Полак.** *Методы контактной диагностики в неравновесной плазмохимии*, Москва, Наука (1981)
- [17] **О. В. Козлов.** *Электрический зонд в плазме*, Москва, Атомиздат (1969)
- [18] **В. И. Демидов, Н. Б. Колоколов, А. А. Кудрявцев.** *Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы*, Москва, Энергоатомиздат (1996)
- [19] **V. A. Godyak, B. M. Alexandrovich, V. I. Kolobov.** *Phys. Plasm.*, **26** (2019) 033504, <https://doi.org/10.1063/1.5088706>
- [20] **V. A. Godyak, V. I. Demidov.** *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44** (2011) 233001, <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/23/233001>