

УДК 621.039

ТРАНСФОРМАЦИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ ВБЛИЗИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОЛОГО КАТОДА

© 2022 г. С. Н. Андреев^а, А. В. Бернацкий^{а, *}, В. Н. Очкин^а

^аФизический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН),
Ленинский проспект 53, Москва, ГСП-1 119991 Россия

*E-mail: bernatskiyav@lebedev.ru

Поступила в редакцию 29.06.2021 г.

После доработки 06.07.2021 г.

Принята к публикации 08.07.2021 г.

Усовершенствованным методом одиночных зондов Ленгмюра получены функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) в коротком (10 мм) разрядном промежутке между прямоугольным полым катодом и сетчатым анодом. Установлено, что распределения электронов не максвелловские с избытком высокоэнергичных электронов (10–20 эВ), доля которых уменьшается при удалении от катода. Особенности связываются с нелокальным механизмом формирования ФРЭЭ.

Ключевые слова: диагностика плазмы, метод одиночных зондов Ленгмюра, нелокальная плазма

DOI: 10.56304/S207956292201002X

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы разрабатываются новые методы количественной спектроскопии неравновесной плазмы пониженной плотности [1–5]. В перспективе они могут применяться на различных электроразрядных установках [1], в том числе для мониторинга примесей вблизи поверхностей внутренней стенки термоядерного реактора [2]. При их отработке и физическом обосновании на лабораторном уровне в ряде случаев возникает необходимость интерпретации оптических измерений с привлечением сведений о параметрах электронов плазмы [1–3]. В данной работе усовершенствованным методом одиночных зондов Ленгмюра [6] получены функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) в коротком разрядном промежутке между прямоугольным полым катодом и сетчатым анодом. Такая конфигурация разрядного устройства хорошо моделирует “чистящий” разряд в области бланкета первой стенки плазменного термоядерного реактора [7].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты проводились в вакуумной камере установки “Течь” [1–3, 6]. Камера имеет объем 22 л и оборудована системой прогрева стенок [1] для ускоренной дегазации внутренних поверхностей и обеспечения остаточного вакуума

на уровне $5 \cdot 10^{-7}$ мбар. Установка имеет многоканальную систему напуска газов.

Разрядное устройство (рис. 1) представляет собой полый прямоугольный вольфрамовый катод $100 \times 50 \times 10$ мм³ с открытой стороной 100×10 мм², обращенной к аноду в виде вольфрамовой сетки (100×10 мм²), расположенному на расстоянии 10 мм от края катода. В качестве источника напряжения используется блок УИП-1. На рисунке не показаны боковые стенки катода, изготовленные из керамических пластин.

Одиночные зонды Ленгмюра 1, 2 (см. рис. 1) располагались по линии вдоль оси катода, на расстоянии от него 1 и 6 мм соответственно. Зонды выполнены из вольфрамовой проволоки диаметром 0.1 мм и выступали из керамических изоляторов на 2 мм.

Зондовые измерения давно известны в диагностике плазмы [8, 9]. При идеологической простоте, однако, получение плазменных параметров из вольт-амперной характеристики (ВАХ) на практике является непростой задачей. Ее оптимальное решение постоянно обсуждается в монографиях [10–13], обзорах [14, 15], оригинальных работах [16–19] и др. Проблема в том, что для установления ФРЭЭ необходимо провести двойное дифференцирование ВАХ, которая, в реальном эксперименте, может быть получена с большой ошибкой. Среди опубликованных на сегодня наилучших данных

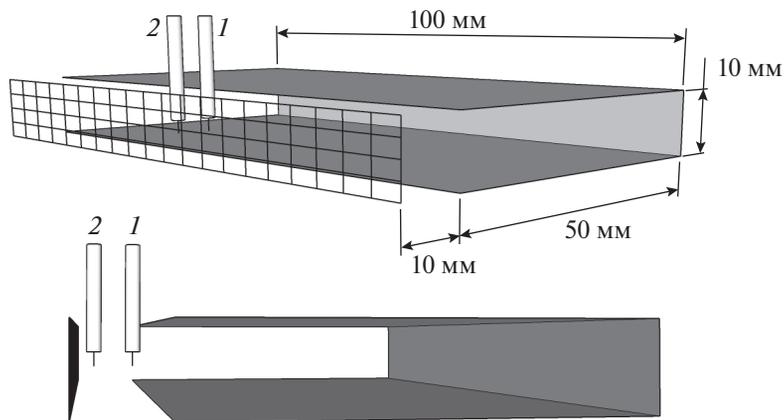


Рис. 1. Разрядное устройство и расположение зондов в разных проекциях. Зонды: 1 – на расстоянии 1 мм от полого катода; 2–6 мм от катода.

можно отметить результаты работ [17, 19], где в отдельных случаях удается достичь динамического диапазона ФРЭЭ на уровне трех порядков, однако подробности процедур и методов не описываются.

В последние годы нами разработан новый подход [6, 20, 21] формирования ВАХ на одиночном зонде Ленгмюра. Созданная зондовая система формирует ВАХ зондовой цепи, при подаче на зонд напряжения в виде шумового сигнала. Подавая на зонд сигнал, представляющий собой белый шум, удается значительно уменьшить ошибки в определении ФРЭЭ по сравнению с традиционным периодическим сигналом (например, пилообразным или синусоидальным) [6, 21]. Если необходимо измерить определенную область ФРЭЭ с повышенной точностью, то возможно использовать комбинированные сигналы. Формировать ВАХ периодическим сигналом с малым количеством точек, а в область ВАХ, соответствующую интересующей области ФРЭЭ, подавать шумовой сигнал [6]. Можно, также, формировать ВАХ, используя шумовой сигнал с неравномерным распределением количества точек [20]. В [20] показано, что перераспределением количества точек, в хвост ФРЭЭ, удается увеличить диапазон измерения ФРЭЭ 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.

Параметры плазмы и ФРЭЭ определялись стандартным подходом [6, 10–14]. Как уже говорилось выше, ФРЭЭ получалась путем двойного дифференцирования ВАХ. Средняя энергия электронов $\langle E \rangle$ определялась путем интегрирования ФРЭЭ. Концентрация электронов N_e определялась по известному соотношению:

$$N_e = \frac{4i}{evS}, \tag{1}$$

где i – значение тока на ВАХ, соответствующее напряжению, при котором вторая производная ВАХ имеет нулевое значение; e – заряд электрона; v – средняя скорость электронов, S – площадь зонда.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зондовые измерения проводились методами [6, 20, 21] в разряде в He при давлении 1 мбар. Напряжение на разрядном устройстве 340 В, ток разряда составлял 420 мА.

Результаты измерений ФРЭЭ показаны на рис. 2, 3 в нормировках $EEDF f(E)$ и $E^2PF F(E) = E^{-1/2}f(E)$ соответственно. Заштрихованными областями показаны ошибки измерений. ФРЭЭ на рис. 3 представлена в логарифмическом масштабе, таким образом наличие ошибок на рис. 3. отражает реальный динамический диапазон измерений. На расстоянии 1 мм от катода средняя энергия электронов $\langle E \rangle = 7.3$ эВ, концентрация электронов $N_e = 5.4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. На расстоянии 6 мм $\langle E \rangle = 5.3$ эВ, $N_e = 7.6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Видно существенное отступление реальных распределений от максвелловских. В обоих примерах наблюдается избыток электронов в области 10–20 эВ, причем ближе к катоду количество электронов в этой области больше. Недостаток электронов в области 0–5 эВ связан с особенностью зондовых измерений. Как показано в [14, 22], ФРЭЭ электронов, достигающих поверхности зонда, отлична от ФРЭЭ в невозмущенной (зондом) плазме вследствие стока электронов к зонду и конечной скорости диффузии.

В ряде расчетно-теоретических работ (см. например, [23–25], а также недавние работы [26, 27]) было показано, что пространственная релак-

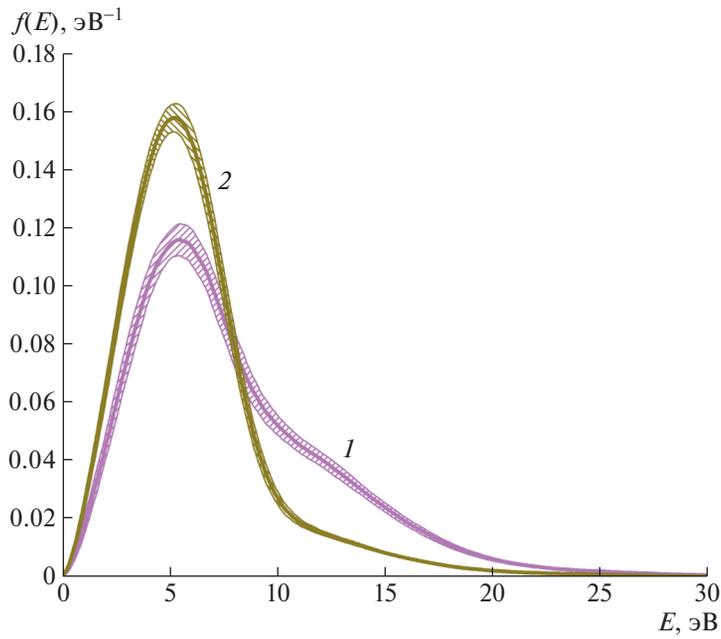


Рис. 2. Измеренные ФРЭЭ в нормировке EEDF: 1 – на расстоянии 1 мм от катода; 2 – 6 мм. Заштрихованные области – ошибки измерений.

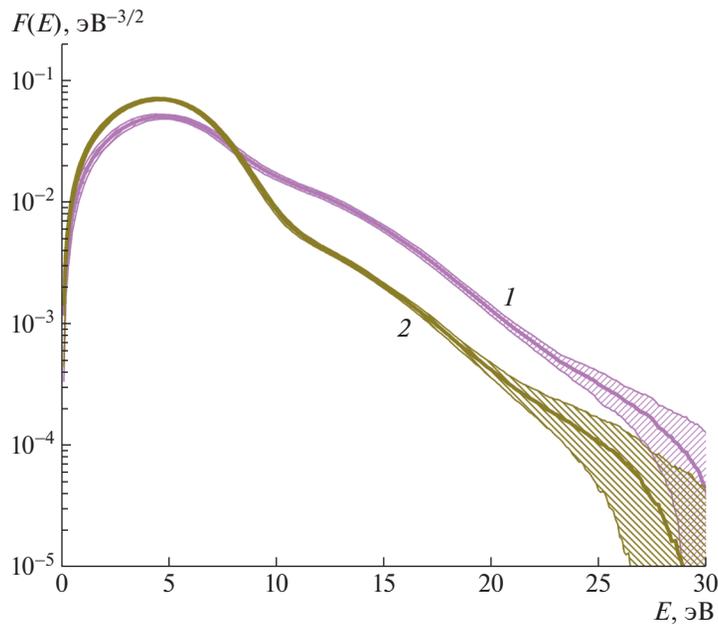


Рис. 3. Измеренные ФРЭЭ в нормировке EEPF: 1 – на расстоянии 1 мм от катода; 2 – 6 мм. Заштрихованные области – ошибки измерений.

сация ФРЭЭ в инертных газах (в частности, в гелии) в электрическом поле может иметь существенно нелокальный характер. При этом может формироваться ФРЭЭ с двумя горбами. Результаты, полученные в данной работе (рис. 2), наглядно демонстрируют этот эффект. Электрон, двига-

ясь от катода к аноду, ускоряется полем. Достигая энергии >19.8 эВ (в случае разряда в He) он может принять участие в возбуждении электронных состояний, т.е., отдать энергию, равную энергии возбуждения первого возбужденного электронного уровня. Затем, под действием поля, его энергия снова

будет увеличиваться. Таким образом, на разном расстоянии от катода ФРЭЭ будут иметь разный вид, в т.ч., разное количество максимумов. Очевидно, что на большом расстоянии от катода ФРЭЭ примет окончательный вид и перестанет трансформироваться при дальнейшем отдалении от катода [26, 27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На ограниченном промежутке плазмы разряда, поддерживаемого полым катодом, экспериментально изучена пространственная трансформация вида энергетического распределения электронов. Использовался оригинальный метод одиночных зондов с формированием ВАХ одновременно напряжениями различной формы. Распределения существенно не максвелловские, с избытком быстрых электронов, уменьшающимся ближе к аноду. Вероятно, такая картина связана с пространственной релаксацией нелокальной ФРЭЭ. Причина нелокальности формирования ФРЭЭ обусловлена близким расположением исследованного участка плазмы к полюсу катоду, который является источником быстрых электронов. По мере удаления от катода электроны теряют энергию.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Bernatskiy A.V., Kochetov I.V., Ochkin V.N.* // Plasma Phys. Rep. 2020. V. 46 (9). P. 874. <https://doi.org/10.1134/S1063780X20090020>
2. *Bernatskiy A.V., Kochetov I.V., Ochkin V.N.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2019. V. 28 (10). P. 105002. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab4301>
3. *Bernatskiy A.V., Kochetov I.V., Ochkin V.N.* // Phys. Plasmas. 2018. V. 25 (8). P. 083517. <https://doi.org/10.1063/1.5042839>
4. *Bernatskiy A.V., Lagunov V.V., Ochkin V.N., Tskhai S.N.* // Laser Phys. Lett. 2016. V. 13 (7). P. 075702. <https://doi.org/10.1088/1612-2011/13/7/075702>
5. *Bernatskiy A.V., Lagunov V.V., Ochkin V.N.* // Quantum Electron. 2019. V. 49 (2). P. 157. <https://doi.org/10.1070/QEL16819>
6. *Andreev S.N., Bernatskiy A.V., Ochkin V.N.* // Vacuum. 2020. V. 180. P. 109616. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109616>
7. ITER. Final Design Report. 2001. G31 DDD 14 01_07-19 W0.1. Sect. 3.1.
8. *Mott-Smith H.M., Langmuir I.* // Phys. Review. 1926. V. 28. P. 727. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.28.727>
9. *Druyvesteyn M.J.* // Z. Phys. 1930. V. 64. P. 781. <https://doi.org/10.1007/BF01773007>
10. *Иванов Ю.А., Лебедев Ю.А., Полак Л.С.* Методы контактной диагностики в неравновесной плазмохимии. 1981. Москва: Наука.
11. *Козлов О.В.* Электрический зонд в плазме. 1969. Москва: Атомиздат.
12. *Демидов В.И., Колоколов Н.Б., Кудрявцев А.А.* Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы. 1996. Москва: Энергоатомиздат.
13. *Schott L.* Plasma Diagnostics. 1968. Amsterdam: North Holland.
14. *Demidov V.I., Koepe M.E., Kurlyandskaya I.P., Malkov M.A.* // Phys. Plasmas. 2020. V. 27. P. 020501. <https://doi.org/10.1063/1.5127749>
15. *Cherrington B.E.* // Plasma Chem. Plasma Process. 1982. V. 2. P. 113. <https://doi.org/10.1007/BF00633129>
16. *Godyak V.A., Piejak R.B., Alexandrovich B.M.* // Plasma Sources Sci. Technol. 1992. V. 1. P. 36. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/1/1/006>
17. *Godyak V.A., Demidov V.I.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. P. 233001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/23/233001>
18. *Godyak V.A., Alexandrovich B.M.* // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. P. 233302. <https://doi.org/10.1063/1.4937446>
19. *Godyak V.A., Alexandrovich B.M., Kolobov V.I.* // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. P. 033504. <https://doi.org/10.1063/1.5088706>
20. *Andreev S.N., Bernatskiy A.V., Ochkin V.N.* // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2020. V. 47 (10). P. 317. <https://doi.org/10.3103/10.3103/S1068335620100024>
21. *Andreev S.N., Bernatskiy A.V., Ochkin V.N.* // Plasma Chem. Plasma Process. 2021. V. 41 (2). P. 659–672. <https://doi.org/10.1007/s11090-020-10137-4>
22. *Andreev S.N., Bernatskiy A.V., Dyatko N.A., Kochetov I.V., Ochkin V.N.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2021. V. 30. P. 095004. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac1ee2>
23. *Sigeneger F., Dyatko N.A., Winkler R.* // Plasma Chem. Plasma Process. 2003. V. 23. P. 103. <https://doi.org/10.1023/A:1022420920041>
24. *Winkler R., Petrov G., Sigeneger F., Uhrlandt D.* // Plasma Sources Sci. Technol. 1997. V. 6. P. 118. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/6/2/005>
25. *Sigeneger F., Winkler R.* // Plasma Chem. Plasma Process. 1997. V. 17. P. 1. <https://doi.org/10.1007/BF02766819>
26. *Andreev S.N., Bernatskiy A.V., Dyatko N.A., Ochkin V.N.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1683. P. 032001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/3/032001>
27. *Dyatko N.A., Kochetov I.V., Ochkin V.N.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2020. V. 29. P. 125007. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/abc412>

Transformation of the Electron Energy Distribution Function Near a Rectangular Hollow Cathode

S. N. Andreev¹, A. V. Bernatskiy¹, *, and V. N. Ochkin¹

¹*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, 53 Leninskiy prosp., Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: bernatskiyav@lebedev.ru*

Received June 29, 2021; revised July 6, 2021; accepted July 8, 2021

Abstract—Using the improved method of single Langmuir probes, the electron energy distribution functions (EEDF) were obtained in a short (10 mm) discharge gap between a rectangular hollow cathode and a mesh anode. It was found that the electron distributions are not Maxwellian with an excess of high-energy electrons (10–20 eV), the proportion of which decreases with distance from the cathode. The features are associated with the nonlocal mechanism of the EEDF formation.

Keywords: plasma diagnostics, single Langmuir probe method, non-local plasma