

УДК 621.039

НОВАЯ МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ФРЭЭ ЗОНДОВЫМ МЕТОДОМ В РАЗРЯДЕ С ПОЛЫМ КАТОДОМ В ГЕЛИИ

© 2026 г. А. В. Бернацкий^{а, *}, И. И. Драганов^{а, b}, Н. А. Дятко^{а, с},
И. В. Кочетов^{а, с}, В. В. Лагунов^а, В. Н. Очкин^а

^а Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, 119991 Россия

^b Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Московская обл., 141700 Россия

^с Государственный научный центр РФ “Троицкий институт инновационных
и термоядерных исследований”, Троицк, 108840 Россия

*E-mail: bernatskiyav@lebedev.ru

Поступила в редакцию 18.02.2025 г.

После доработки 15.05.2025 г.

Принята к публикации 20.05.2025 г.

Для разряда с полым катодом в гелии предложен метод получения ФРЭЭ путем «сшивки» ее частей, низкоэнергетической и высокоэнергетической, каждая из которых определяется из измеренной вольт-амперной характеристики зонда Ленгмюра путем применения фильтра (Savitzky–Golay или Blackman) со специально подобранными значениями параметров. Диапазон изменения ФРЭЭ, измеренной предложенной методикой, составил 4–5 порядков. Функция распределения, рассчитанная методом Монте-Карло для условий эксперимента, достаточно хорошо согласуется с измеренной.

Ключевые слова: диагностика плазмы, метод одиночных зондов Ленгмюра, ФРЭЭ, Savitzky–Golay, Blackman

DOI: 10.56304/S2079562925060041

ВВЕДЕНИЕ

Для получения функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) в плазме традиционно используют метод зондов Ленгмюра [1–3]. В этом методе функция распределения определяется по второй производной вольт-амперной характеристики (ВАХ) зонда [2]. Если раньше для получения второй производной использовали аналоговые дифференцирующие схемы, то сейчас, зачастую, дифференцирование измеренной ВАХ производится численными методами, а сама ВАХ регистрируется в цифровом виде. Последний подход осложняется тем, что измеренная ВАХ может быть сильно зашумлена, в связи с чем необходимо предварительно или в процессе дифференцирования применять сглаживающие фильтры. Это, в свою очередь, может вносить дополнительную неопределенность в результат определения как ФРЭЭ, так и связанных с ней параметров. При имеющихся недостатках цифровой метод регистрации ВАХ избавлен от ошибок, связанных с аппаратной функцией аналоговой дифференцирующей схемы.

В литературе обсуждается использование различных сглаживающих фильтров [4–12], но наиболее часто в зондовой диагностике используются

фильтры Savitzky–Golay (SG) [13] и Blackman (BM) [14]. Преимущество какого-либо из указанных фильтров неочевидно. Например, в [9, 12] утверждается, что фильтр SG позволяет с большей достоверностью определить ФРЭЭ в области низких энергий, в то время как BM лучше подходит для определения высокоэнергетического “хвоста” ФРЭЭ. Помимо выбора самого фильтра важным моментом является выбор значений его параметров. Для фильтра SG это ширина окна ΔU^{SG} и степень полинома n^{SG} , для BM – ширина окна ΔU^{BM} . Универсальных критериев для выбора параметров ΔU^{SG} , n^{SG} и ΔU^{BM} не существует.

В рамках данной работы мы предлагаем метод, в котором разные участки ВАХ обрабатываются с использованием разных значений параметров применяемого фильтра. Приводится сравнение экспериментальных ФРЭЭ (f_{SG} и f_{BM}), полученных данным методом с использованием фильтров SG и BM, и функции распределения (f_c), рассчитанной для экспериментальных условий методом Монте-Карло.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Результаты получены на установке “Течь” [15–17]. Зондовые измерения проводились вдоль цен-

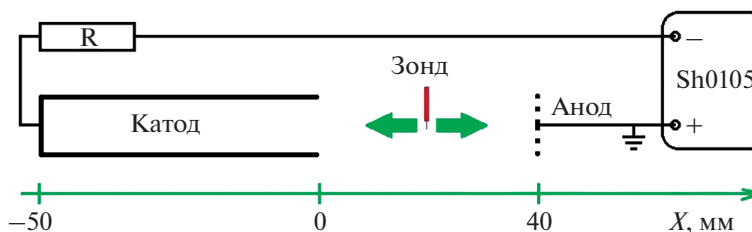


Рис. 1. Схема измерений.

тральной оси разряда между полым вольфрамовым катодом ($100 \times 50 \times 10 \text{ мм}^3$) и сетчатым стальным анодом ($100 \times 10 \text{ мм}^2$) при давлении 2.3 мбар в He с использованием оригинальной зондовой системы [18, 19]. Координата $x = 0 \text{ мм}$ – срез полого катода, $x = 40 \text{ мм}$ – положение анода (см. рис. 1). В измерениях использовался цилиндрический зонд радиусом $r = 30 \text{ мкм}$, длиной $l = 2 \text{ мм}$. Как было показано в [20], при таких размерах искажения ВАХ зонда вследствие “эффекта стока” электронов на зонд и конечного сопротивления плазмы незначительны и в данной работе не учитываются. В качестве держателя зонда использовался кварцевый капилляр с внешним радиусом $R = 115 \text{ мкм}$. Согласно [21], такой размер держателя вносит незначительные искажения в результат измерений. Расстояние между проволокой зонда и внутренней поверхностью держателя составляло 22.5 мкм, что меньше радиуса Дебая для настоящих экспериментальных условий ($r_D \approx 100 \text{ мкм}$), а значит плазма не затекает в пространство между внутренней поверхностью держателя и зондом.

Идея предлагаемой методики, результаты ее применения и обсуждение

Как было показано в [22], определение потенциала плазмы U_p возможно разными методами, в частности, по нулю второй производной ВАХ или по напряжению, при котором шум ВАХ зонда принимает максимальное значение. В последнем случае определение потенциала не зависит от параметров обработки сигнала с зонда. В [22] было также показано, что можно подобрать такие значения параметров фильтра SG, при которых значение U_p , определенное по нулю второй производной ВАХ, совпадает со значением потенциала, определенным по максимуму шума ВАХ.

В рассматриваемых условиях (разряд с полым катодом в He) можно ожидать, что “хвост” функции распределения будет резко спадать при $u \approx 20 \text{ эВ}$, так как энергия возбуждения нижнего электронного уровня этого атома He составляет 19.8 эВ.

Принимая во внимание отмеченные выше обстоятельства, мы предлагаем метод получения ФРЭЭ, путем обработки разных участков ВАХ

зонда фильтрами (SG или BM) с разными значениями их параметров:

(а) для получения низкоэнергетической части ФРЭЭ использовать такое значение параметров фильтра SG (или BM), при котором потенциал плазмы, определенный по нулю второй производной, совпадает с потенциалом плазмы, рассчитанным по максимуму шумов измеренной ВАХ зонда;

(б) для получения высокоэнергетической части ФРЭЭ использовать такое значение параметров фильтра SG (или BM), при котором “хвост” функции распределения резко спадает при $u \approx 20 \text{ эВ}$;

(в) для “сшивки” участков ФРЭЭ, полученных в вариантах (а) и (б), использовать участок одной (или нескольких) функции, полученный с использованием параметров фильтра SG (или BM) значения которых лежат между таковыми при (а) и (б).

Пример использования такой процедуры для фильтра BM представлен на рис. 2. Результирующая ФРЭЭ формируется из трех участков: Участок 1 – получен по критерию (а); Участок 2 – по критерию (в); Участок 3 – по критерию (б). Все функции на рис. 2 показаны до значения напряжения U , при котором $I''(U)$ впервые принимает отрицательное значение.

Аналогичным способом была получена также функция распределения f_{SG} при использовании фильтра SG [23].

На рис. 3а–3в приведено сравнение экспериментальных ФРЭЭ f_{SG} и f_{BM} , полученных предлагаемым методом в разных областях разряда: $x = 1, 10, 30 \text{ мм}$. Все показанные на рис. 3а–3в функции нормированы условием:

$$\int_0^{\infty} \sqrt{u} f(u) = 1. \quad (1)$$

Видно, что функции f_{SG} и f_{BM} хорошо совпадают в области 0–19 эВ для всех значений x (рис. 3а–3в). При этом диапазон изменения ФРЭЭ в этой области энергий составляет ≈ 4 порядка. На данном этапе выделить преимущество одно из фильтров, SG или BM, не удалось.

На рис. 3 так же показаны функции распределения f_c , рассчитанные для экспериментальных

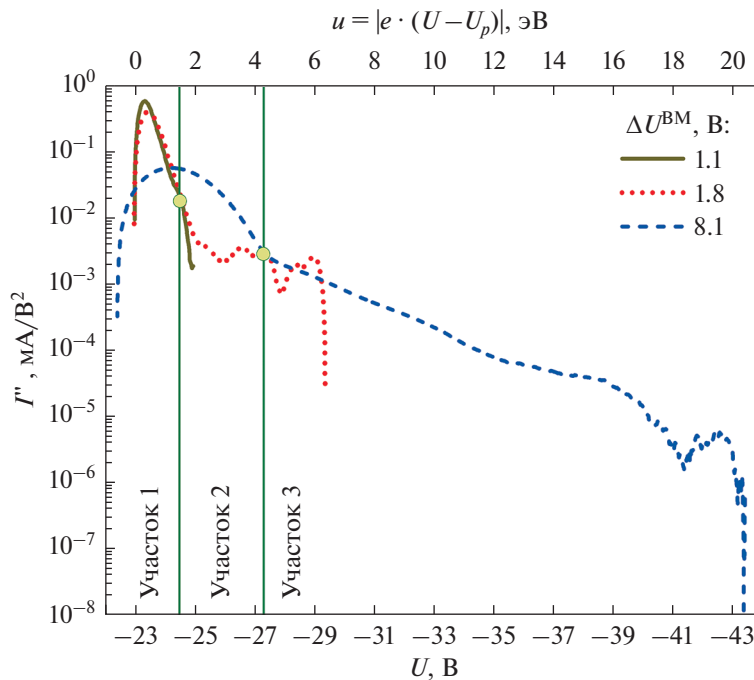


Рис. 2. Вторые производные ВАХ, полученные при разных значениях ΔU^{BM} и использованные для получения ФРЭЭ. Точки — места “сшивки” ($x = 10$ мм).

условий в соответствующих точках на оси разряда методом Монте-Карло. Подробно техника моделирования приводится в [21, 23–25]. Необходимые для расчета значения напряженности электрического поля вдоль оси разряда $E(x)$ определялись по зависимости $U_p(x)$, измеренной по максимуму шума ВАХ [22, 23]. Видно, что рассчитанные функции f_c хорошо согласуются с измеренными f_{SG} и f_{BM} на интервале энергий 0–18 эВ. Отметим, что по мере удаления от катода резкий спад ФРЭЭ происходит при меньших энергиях, что, по всей видимости, обусловлено релаксацией энергии электронов при движении к аноду.

Предлагаемая методика “сшивки” демонстрирует существенное увеличение диапазона измеренной ФРЭЭ по шкале энергий. Например, представленная на рис. 2 f_{BM} , полученная при $\Delta U^{\text{BM}} = 1.1$ В, когда U_p определен по нулю второй производной ВАХ совпадает с потенциалом, определенным по шуму ВАХ, определяется до ~2 эВ. После процедуры “сшивки” (см. рис. 3б) f_{BM} определяется до энергий ~18 эВ. Таким образом, предлагаемый метод, который позволяет определить ФРЭЭ в широком диапазоне энергий, может найти применение в различных методах спектроскопии плазмы (см., например [26]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована возможность измерения ФРЭЭ методом зонда Ленгмюра в плазме разряда

с полым катодом в гелии. Функция распределения определялась двойным дифференцированием IVC с использованием фильтра Savitzky–Golay или фильтра Blackman. Для рассмотренных экспериментальных условий предложен комбинированный метод получения ФРЭЭ путем “сшивки” ее частей, низкоэнергетической и высокоэнергетической, каждая из которых определяется путем применения фильтра (Savitzky–Golay или Blackman) со специально подобранными значениями параметров. Для получения низкоэнергетической части ФРЭЭ предлагается использовать такие значения параметров, при которых потенциал плазмы, рассчитанный по нулю второй производной ВАХ, совпадает с потенциалом, рассчитанным по максимуму шумов измеренной ВАХ. Для получения высокоэнергетической части ФРЭЭ следует использовать такие значения параметров фильтра, при которых “хвост” функции распределения резко спадает при энергии выше потенциала возбуждения нижнего электронного уровня атома гелия. ФРЭЭ, полученные таким способом с использованием фильтров Savitzky–Golay и Blackman, оказались практически одинаковыми в диапазоне энергий 0–18 эВ. Диапазон изменения ФРЭЭ в этом интервале энергий составляет 4 порядка. Функция распределения, рассчитанная для экспериментальных условий методом Монте-Карло, достаточно хорошо согласуется с ФРЭЭ, полученными методом сшивки.

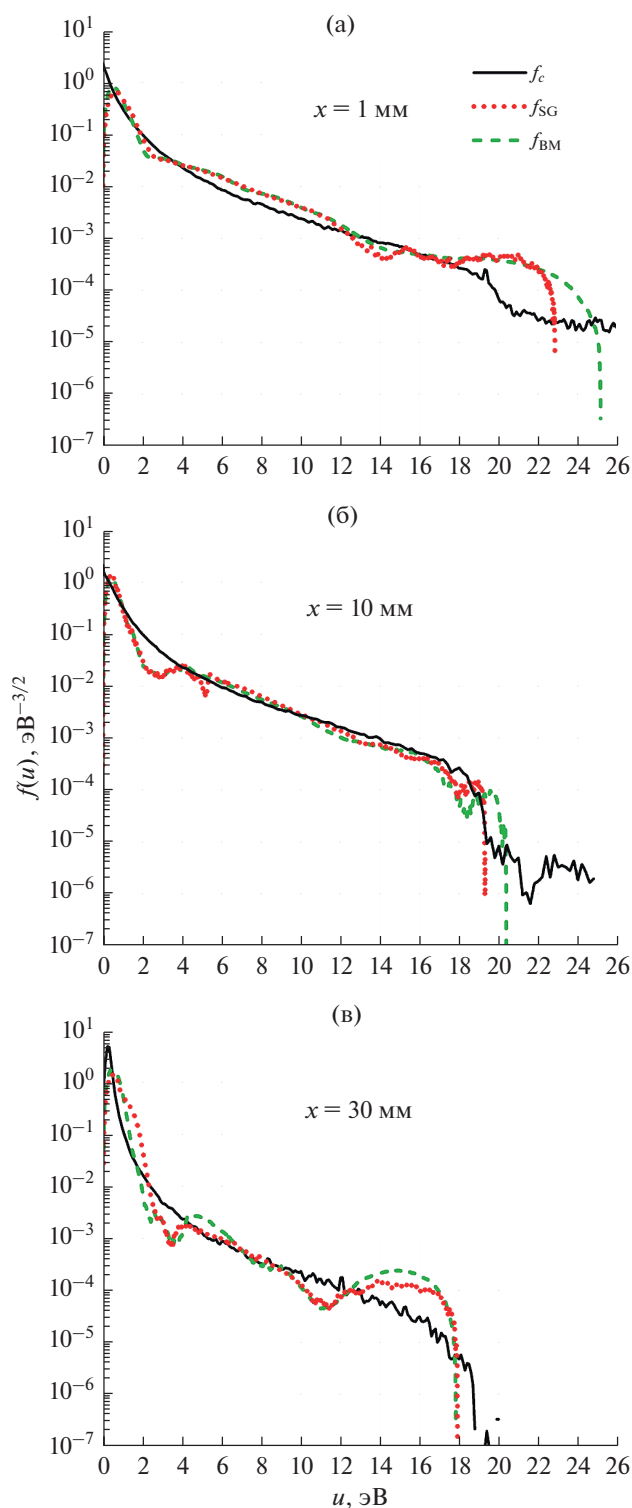


Рис. 3. Функции распределения $f_{SG}(u)$ и $f_{BM}(u)$, полученные из измеренной ВАХ с использованием фильтров SG и BM на разных расстояниях от катода: (а) — $x = 1$ мм; (б) — $x = 10$ мм; (в) — $x = 30$ мм. $f_c(u)$ — теоретические ФРЭЭ, рассчитанные в указанных точках.

Отметим, что использованный нами способ “сшивки” не является универсальным. В нем использовалось предположение о том, что ФРЭЭ резко падает в области энергии возбуждения нижнего электронного уровня атома гелия. Для рассмотренных условий (разряд с полым катодом в гелии) такое предположение представляется обоснованным. При определении ФРЭЭ в плазме разрядов другого типа и/или других плазмообразующих газов для выбора параметров фильтров следует искать другие характерные особенности вида функции распределения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Mott-Smith H.M., Langmuir I. // Phys. Rev. 1926. V. 28. P. 727. <https://doi.org/10.1103/physrev.28.727>
2. Druvesteyn M. // Z. Phys. 1930. V. 64. P. 781–798. <https://doi.org/10.1007/BF01773007>
3. Mott-Smith Jr. H. Electrical Discharge. 1961. P. 23–98. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9909-2.50012-6>
4. Fernández Palop J.I., Ballesteros J., Colomer V., Hernández M.A. // Rev. Sci. Instrum. 1995. V. 66. P. 4625–4636. <https://doi.org/10.1063/1.1145300>
5. Dias F.M., Tatarova E. // J. Phys. IV France. 1998. V. 8. P. Pr7-257-Pr5-264. <https://doi.org/10.1051/jp4:1998721>
6. Magnus F., Gudmundsson J.T. // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. P. 073503. <https://doi.org/10.1063/1.2956970>
7. Ляхов А.А., Шкуркин В.В. // Вестн. Омск. унив. 2012. № 4 (66). С. 72–76. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21004117>
8. Hannemann M. // Contrib. Plasma Phys. 2013. V. 53. P. 45–50. <https://doi.org/10.1002/ctpp.201310008>
9. Roh H.J., Kim N.K., Ryu S., Park S., Lee S.H., Huh S.R., Kim G.H. // Curr. Appl Phys. 2015. V. 15. P. 1173–1183. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2015.07.003>
10. Caldarelli A., Filleul F., Boswell R.W., Charles C., Ratzenbury N.J., Cater J.E. // Phys. Plasma. 2023. V. 30. P. 040501. <https://doi.org/10.1063/5.0133840>
11. Jauberteau J.L., Jauberteau I. // AIP Adv. 2024. V. 14. P. 055326. <https://doi.org/10.1063/5.0204161>
12. Xu L., Zhao J., Jian Y., Kang H. // Meas. Sci. Technol. 2025. V. 36. P. 015902. <https://www.doi.org/10.1088/1361-6501/ad8a7e>
13. Savitzky A., Golay M.J.E. // Anal. Chem. 1964. V. 36. P. 1627–1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>
14. Blackman R.B. Linear Data-Smoothing and Prediction in Theory and Practice. 1965. London: Addison-Wesley.
15. Bernatskiy A.V., Ochkin V.N. // Plasma Sources Sci. Technol. 2017. V. 26. P. 015002. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/26/1/015002>

16. *Bernatskiy A.V., Kochetov I.V., Ochkin V.N.* // *Phys. Plasma*. 2018. V. 25. P. 083517.
<https://doi.org/10.1063/1.5042839>
17. *Bernatskiy A.V., Draganov I.I., Lagunov V.V., Ochkin V.N.* // *High Energy Chem*. 2024. V. 58. P. S108–S110.
<https://doi.org/10.1134/S0018143924700693>
18. *Andreev S.N., Bernatskiy A.V., Ochkin V.N.* // *Vacuum*. 2020. V. 180. P. 109616.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109616>
19. *Andreev S.N., Bernatskiy A.V., Ochkin V.N.* // *Vacuum*. 2022. V. 206. P. 111514.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111514>
20. *Bernatskiy A.V., Draganov I.I., Dyatko N.A., Kochetov I.V., Ochkin V.N.* // *Plasma Chem. Plasma Process*. 2024. V. 44. P. 651–666.
<https://doi.org/10.1007/s11090-023-10378-z>
21. *Bernatskiy A.V., Draganov I.I., Dyatko N.A., Kochetov I.V., Ochkin V.N.* // *Vacuum*. 2024. V. 226. P. 113338.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113338>
22. *Bernatskiy A.V., Draganov I.I., Kochetov I.V., Lagunov V.V., Ochkin V.N.* // *Vacuum*. 2024. V. 225. P. 113279.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113279>
23. *Bernatskiy A.V., Draganov I.I., Dyatko N.A., Kochetov I.V., Lagunov V.V., Ochkin V.N.* // *Vacuum*. 2025. V. 235. P. 114162.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114162>
24. *Andreev S.N., Bernatskiy A.V., Dyatko N.A., Kochetov I.V., Ochkin V.N.* // *Plasma Sources Sci. Technol*. 2022. V. 31. 105016.
<https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac9750>
25. *Bernatskiy A.V., Draganov I.I., Dyatko N.A., Kochetov I.V., Lagunov V.V., Ochkin V.N.* // *Phys. Rev. E*. 2025. V. 112. P. 025204.
<https://doi.org/10.1103/hfnf-92bq>
26. *Bernatskiy A.V., Ochkin V.N., Bafoev R.N.* // *Bull. Lebedev Phys. Inst*. 2016. V. 43. P. 195–198.
<https://doi.org/10.3103/S1068335616060038>

New Technique for Obtaining EEDF Using Probe Method in Hollow Cathode Discharge in Helium

**A. V. Bernatskiy^{1, *}, I. I. Draganov^{1, 2}, N. A. Dyatko^{1, 3},
I. V. Kochetov^{1, 3}, V. V. Lagunov¹, and V. N. Ochkin¹**

¹*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

²*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow Region, 141700 Russia*

³*SRC RF Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Troitsk, Moscow, 108840 Russia*

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

Received February 18, 2025; revised May 15, 2025; accepted May 20, 2025

Abstract—For a hollow cathode discharge in helium, a combined method for obtaining the EEDF by “stitching” its low-energy and high-energy parts is proposed. Each part is determined by applying a filter (Savitzky-Golay or Blackman) with specific parameter values. The dynamic range of the measured EEDF that can be obtained using the method was 4 orders of magnitude. The theoretical EEDF, calculated for experimental conditions, agrees well with the measured one.

Keywords: plasma diagnostics, single Langmuir probe method, EEDF, Savitzky–Golay, Blackman