

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ И КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В РАЗРЯДЕ С ПОЛЫМ ПРЯМОУГОЛЬНЫМ КАТОДОМ В ГЕЛИИ

А. В. Бернацкий<sup>1</sup>, И. И. Драганов<sup>1,2</sup>, В. В. Лагунов<sup>1</sup>, В. Н. Очкин<sup>1</sup>

*Проведены оптико-электрические исследования разряда с полым катодом и сетчатым анодом в He при давлении 2 тбар. Установлен вид распределения концентрации электронов и интенсивности свечения отдельных линий He как между электродами, так и в стационарной плазме. При этом расстояние между анодом и катодом варьировалось (30–100 мм). Установлено, что плазму за анодом формируют электроны с небольшой энергией, которая меньше энергии возбуждения излучающих уровней гелия.*

**Ключевые слова:** функция распределения электронов по энергии, ФРЭЭ, зонд Ленгмюра, диагностика плазмы, концентрация электронов.

*Введение.* Разряд с полым катодом имеет множество применений [1–16]. Недавние исследования разряда с прямоугольным полым катодом (ПК) и сетчатым анодом [17, 18] демонстрируют эффект “облета” электронами анода. Вследствие этого эффекта за анодом наблюдается ненулевая концентрация электронов  $N_e$ . В [17, 18] измерения проводились одиночным зондом Ленгмюра. В недавней работе [19] было предложено использовать комбинированный зонд (LOR), состоящий из одиночного зонда Ленгмюра (LP) и оптического зонда (OP). Последний представляет собой оптическое волокно, один конец которого направлен на исследуемый объект, а противоположный – на входную щель монохроматора. В рамках настоящей работы проведены исследования разряда с ПК в гелии зондом LOR при расстояниях между электродами 30 мм и 100 мм.

*Постановка эксперимента.* Результаты получены на установке “Течь” [17, 18]. Измерения проводились комбинированным зондом LOR вдоль оси X разряда между полым вольфрамовым катодом ( $100 \times 50 \times 10 \text{ мм}^3$ ) и заземлённым сетчатым стальным анодом

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

<sup>2</sup> МФТИ, Физтех, 141701 Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

( $100 \times 10 \text{ mm}^2$ ) с использованием оригинальной сканирующей системы [20] (рис. 1). Ось  $X$  берет начало в геометрическом центре открытой стороны на срезе катода  $x = 0 \text{ mm}$ , анод располагается на  $x = 30 \text{ mm}$  или  $x = 100 \text{ mm}$ . Зондовые измерения проводились цилиндрическим зондом радиусом  $r = 30 \text{ }\mu\text{m}$ , длиной  $l = 2 \text{ mm}$ . Как было показано в [20], при таких размерах искажения вольт-амперной характеристики зонда вследствие “эффекта стока” [21] электронов на зонд и конечного сопротивления плазмы незначительны. В качестве держателя зонда использовался кварцевый капилляр с внешним радиусом  $R = 115 \text{ }\mu\text{m}$ . Расстояние между проволокой зонда и внутренней поверхностью держателя составляло  $22.5 \text{ }\mu\text{m}$ , что меньше радиуса Дебая для настоящих экспериментальных условий ( $r_D \approx 100 \text{ }\mu\text{m}$ ). Согласно [22] такой держатель вносит незначительные искажения в результат измерений. Измерения проводились при давлении  $2 \text{ mbar}$  в He, напряжение на катоде подбиралось так, чтобы ток разряда был  $60 \text{ mA}$ .

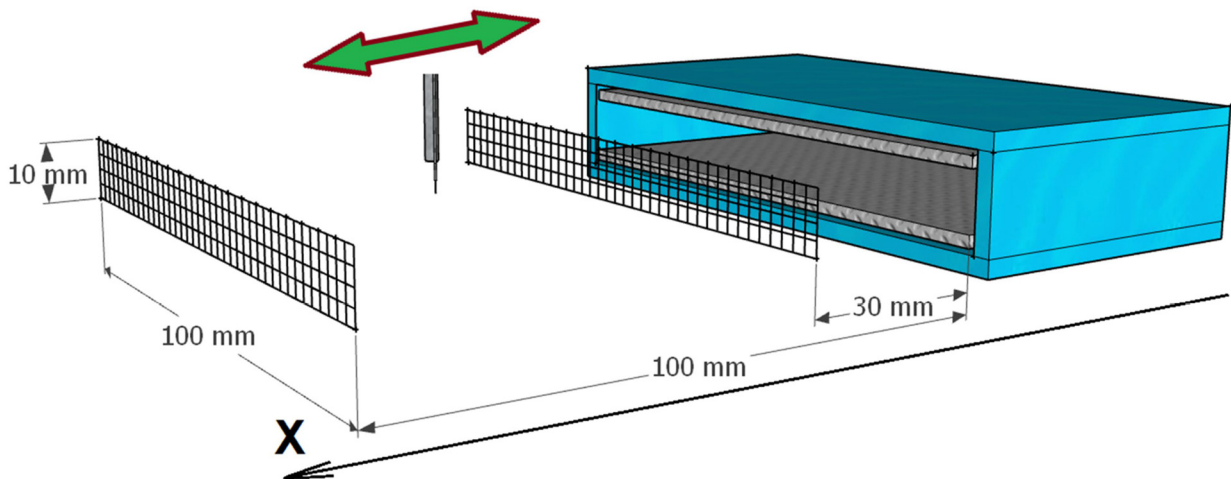


Рис. 1: Схема измерений при двух вариантах расположения анода ( $x = 30 \text{ mm}$  и  $x = 100 \text{ mm}$ ).

*Результаты и обсуждение.* Измеренные распределения концентрации электронов  $N_e$  и интенсивности линий He –  $501.57 \text{ nm}$  и  $587.56 \text{ nm}$  в случае расстояния анод–катод  $30 \text{ mm}$  показаны на рис. 2 в полулогарифмическом масштабе. Для сравнения приведенные зависимости нормированы на 1 при  $x = 1 \text{ mm}$ . Динамический диапазон измерения концентрации  $N_e$  и интенсивности излучения методами LP и OP, соответственно, превышает два порядка. На рис. 2 также показано распределение средней энергии электронов  $\langle u \rangle$ .

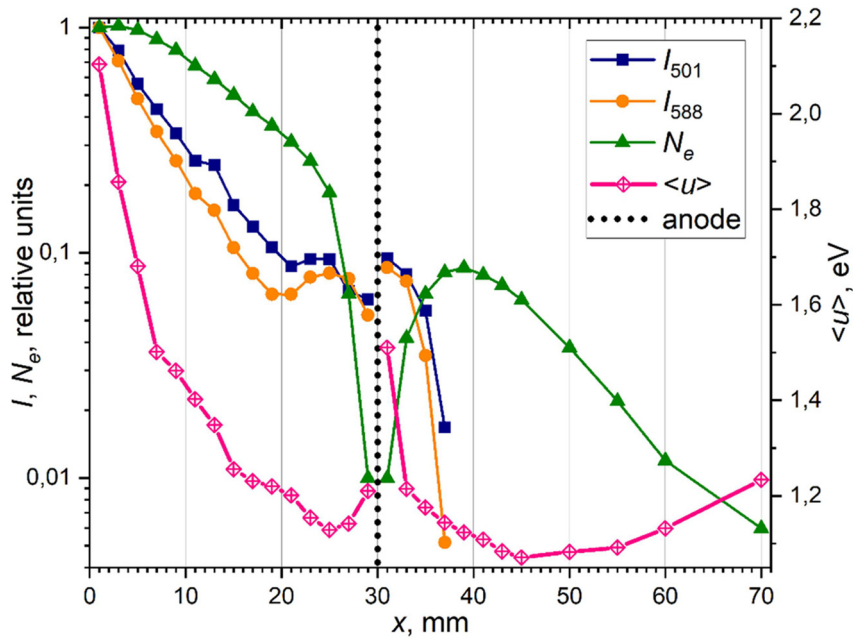


Рис. 2: Измеренные распределения  $N_e$ ,  $\langle u \rangle$  и интенсивности линий He – 501 нм и 588 нм. Анод на  $x = 30$  мм.

Как видно на рис. 2, по мере удаления от катода концентрация  $N_e$  уменьшается. С обеих сторон вблизи анода ( $x = 29$  мм,  $x = 31$  мм) распределение  $N_e$  имеет резкий провал, что связано с поглощением электронов анодом, т. е. их гибели в результате ускорения к металлу анода в сильном поле, формируемом анодным падением потенциала (для гелия  $\sim 20$  В). Значительное количество электронов наблюдается за анодом ( $33 < x < 45$  мм), что соответствует результатам, полученным в [17, 18]. Максимальное значение  $N_e$  в постанодной плазме наблюдается при  $x = 39$  мм.

Характер распределения интенсивностей свечения отдельных линий атома He (501.57 нм (переход  $1s3p J = 1 \rightarrow 1s2s J = 0$ ) и 587.56 нм ( $1s3d J = 3 \rightarrow 1s2p J = 2$ )) иной по сравнению с поведением  $N_e(x)$ . По мере удаления от катода интенсивность свечения уменьшается по закону, близкому к экспоненциальному. Вблизи анода ( $21 < x < 29$  мм) скорость спада интенсивности уменьшается. За анодом наблюдается сначала слабое изменение интенсивности, затем резкий спад в области ( $33 < x < 37$  мм). Чувствительности измерительной аппаратуры недостаточно, для измерений интенсивности при  $x > 37$  мм. Наблюдаемое “плато” интенсивности вблизи анода ( $21 < x < 33$  мм) можно связать с анодным свечением [17], формирующимся в условиях данного эксперимента.

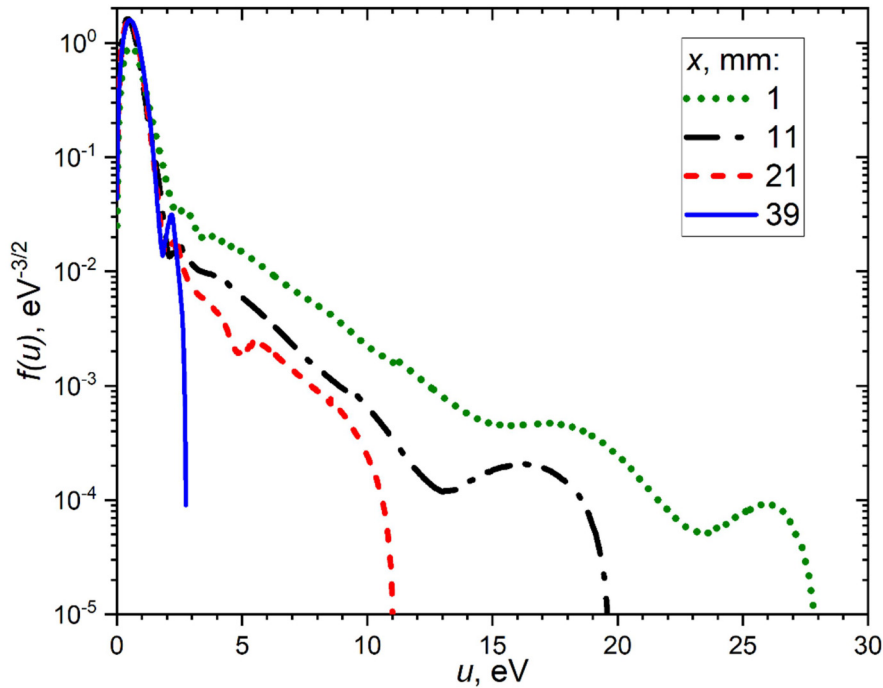


Рис. 3: ФРЭЭ на разном расстоянии от катода. Анод на  $x = 30$  мм.

Обращает на себя внимание тот факт, что в постанодной плазме значение  $N_e$  максимально на  $x = 39$  мм, при этом интенсивность свечения отдельных линий на этой координате не удаётся зарегистрировать. Для объяснения данного явления необходимо проанализировать вид функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) на разных расстояниях от катода. На рис. 3 показан вид ФРЭЭ на  $x = 1, 11, 21, 39$  мм. ФРЭЭ получены методом “splicing” [23]. Видно, что по мере удаления от катода область определения измеряемой ФРЭЭ уменьшается вследствие ее релаксации. Так при  $x = 1$  мм ФРЭЭ удастся измерить до  $\sim 27$  eV, при  $x = 11$  мм – до 19 eV, при  $x = 21$  мм – до 11 eV, при  $x = 39$  мм – до 3 eV. Очевидно, что у реальной ФРЭЭ в плазме на любой координате, где наблюдается свечение линий гелия 501.57 нм и 587.56 нм, должны быть электроны с энергиями  $u > 23.09$  eV. Это связано с порогами возбуждения 23.09 eV и 23.07 eV линий 501.57 нм и 587.56 нм, соответственно [19]. И, хотя, при измерениях ФРЭЭ может не хватать динамического диапазона, тенденция рис. 3, говорит о вероятном существенном уменьшении количества электронов с  $u > 23.09$  eV по мере удаления от катода. В области за анодом электроны ускоряются к нему в сильном поле, формируемом анодным падением потенциала. А значит электроны, которые дрейфуют, отдаляясь от анода, будут тормозиться этим полем, и доля быстрых электронов ФРЭЭ будет суще-

ственно уменьшаться. По виду измеренной ФРЭЭ можно определить среднюю энергию электронов  $\langle u \rangle$ , что было проделано и демонстрируется на рис. 2. Как видно величина  $\langle u \rangle$  во всей области за анодом при  $33 < x < 45$  mm не превышает 1.25 eV. В области между катодом и анодом ( $1 < x < 29$  mm)  $\langle u \rangle \approx 2.1$  eV при  $x = 1$  mm и уменьшается до  $\langle u \rangle \approx 1.2$  eV при  $x = 29$  mm.

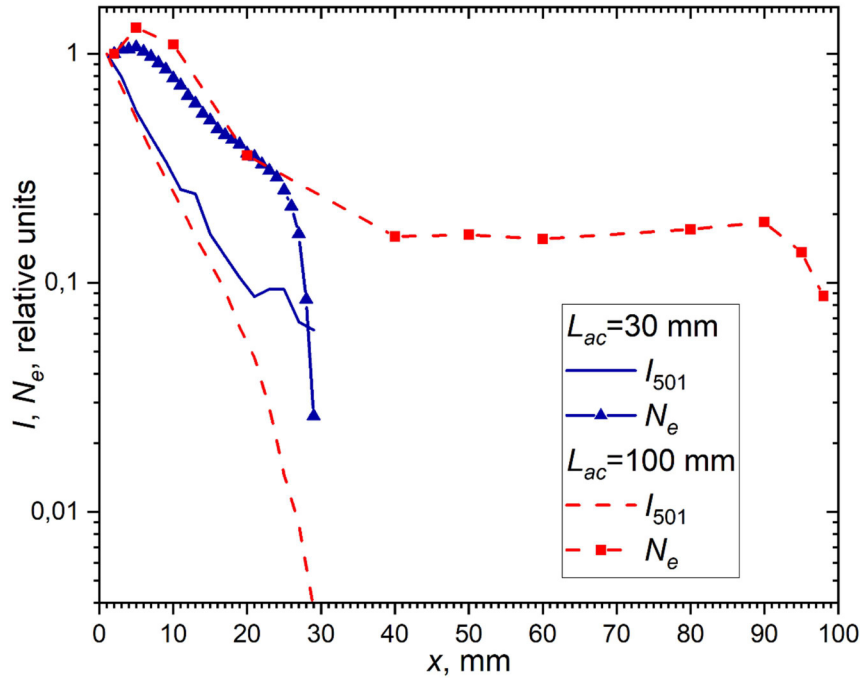


Рис. 4: Измеренные распределения  $N_e$  и интенсивности линии He 501 nm при расположении анода на  $x = 30$  mm и  $x = 100$  mm.

На рис. 4 показаны измеренные распределения  $N_e$  и интенсивности линии He 501.57 nm при расположении анода на  $x = 30$  mm и  $x = 100$  mm. Видно, что при расстоянии анод–катод 100 mm, в диапазоне  $40 < x < 90$  mm величина  $N_e$  практически не изменяется, что говорит о возможном формировании положительного столба в разряде с полым катодом. К сожалению, чувствительности аппаратуры недостаточно для измерений интенсивности свечения на  $x > 27$  mm, когда анод находится на расстоянии 100 mm. Такое поведение интенсивности говорит о том, что упомянутое выше “плато” в распределении интенсивности формируется именно вблизи анода, скорее всего благодаря наличию анодного свечения.

*Заключение.* Проведены исследования разряда с полым катодом и сетчатым анодом в He при давлении 2 mbar. Установлен вид распределения концентрации электронов и

интенсивности свечения отдельных линий He как между электродами, так и в постановочной плазме. При этом расстояние между анодом и катодом варьировалось (30–100 mm). Установлено, что плазму за анодом формируют электроны с небольшой энергией, недостаточной для обеспечения возбуждения излучающих состояний атома гелия.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-22-00566, <https://rscf.ru/project/25-22-00566/>.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. E. Pillow, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* **36**, 821 (1981). [https://doi.org/10.1016/0584-8547\(81\)80064-X](https://doi.org/10.1016/0584-8547(81)80064-X).
- [2] R. Mavrodineanu, *Journal of Research of the National Bureau of Standards* **89**, 143 (1984). <https://doi.org/10.6028/jres.089.009>.
- [3] K. H. Schoenbach, A. El-Habachi, W. Shi, M. Ciocca, *Plasma Sources Science and Technology* **6**, 468 (1997). <https://doi.org/10.1088/0963-0252/6/4/003>.
- [4] M. Kühne, *Experimental Methods in the Physical Sciences* **31**, 65 (1998). [https://doi.org/10.1016/S0076-695X\(08\)60038-1](https://doi.org/10.1016/S0076-695X(08)60038-1).
- [5] S. D. Kovaleski, M. J. Patterson, G. C. Soulas, T. R. Sarver-Verhey, *Proc. 27th International Electric Propulsion Conference No. E-13096* (2001). <https://ntrs.nasa.gov/citations/20020010171>.
- [6] E. M. Oks, A. Anders, I. G. Brown, *Review of Scientific Instruments* **75**, 1030 (2004). <https://doi.org/10.1063/1.1651633>.
- [7] S. Tashiro, M. Tanaka, M. Nakatani, et al., *Surface and Coatings Technology* **201**, 5431 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.158>.
- [8] S. A. Janjua, M. Ahmad, R. Khalid, et al., *Journal of Physics D: Applied Physics* **40**, 401416 (2007). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/5/015>.
- [9] I. L. Alberts, D. S. Barratt, A. K. Ray, *Journal of Display Technology* **6**, 52 (2010). <https://doi.org/10.1109/JDT.2009.2031924>.
- [10] L. Shen, L. Wang, J. J. Xu, *Surface and Coatings Technology* **228**, S456 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.05.026>.
- [11] А. В. Бернадский, В. Н. Очкин, Р. Н. Бафоев, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **43**(6), 18 (2016). <https://doi.org/10.3103/S1068335616060038>.
- [12] A. V. Bernatskiy, V. N. Ochkin, *Plasma Sources Science and Technology* **26**, 015002 (2017). <https://doi.org/10.1088/0963-0252/26/1/015002>.
- [13] A. V. Bernatskiy, I. V. Kochetov, V. N. Ochkin, *Physics of Plasmas* **25**, 083517 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5042839>.

- [14] A. V. Bernatskiy, I. V. Kochetov, V. N. Ochkin, *Plasma Sources Science and Technology* **28**, 105002 (2019). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab4301>.
- [15] S. Muhl, A. Pérez, *Thin Solid Films* **579**, 174 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.02.066>.
- [16] D. M. Goebel, G. Becatti, I. G. Mikellides, A. Lopez Ortega, *Journal of Applied Physics* **130**, 050902 (2021). <https://doi.org/10.1063/5.0051228>.
- [17] A. V. Bernatskiy, I. I. Draganov, N. A. Dyatko, et al., *Physical Review E* **112**, 025204 (2025). <https://doi.org/10.1103/hfnf-92bq>.
- [18] A. V. Bernatskiy, I. I. Draganov, N. A. Dyatko, et al., *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **45**, 993 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11090-025-10552-5>.
- [19] А. В. Бернацкий, И. И. Драганов, И. В. Кочетов, В. Н. Очкин, *Физика плазмы* **51**(3), 332 (2025). <https://doi.org/10.31857/S0367292125030089>.
- [20] A. V. Bernatskiy, I. I. Draganov, N. A. Dyatko, et al., *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **44**, 651 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11090-023-10378-z>.
- [21] S. N. Andreev, A. V. Bernatskiy, N. A. Dyatko, et al., *Plasma Sources Science and Technology* **30**, 095004 (2021). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac1ee2>.
- [22] A. V. Bernatskiy, I. I. Draganov, N. A. Dyatko, et al., *Vacuum* **226**, 113338 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113338>.
- [23] A. V. Bernatskiy, I. I. Draganov, N. A. Dyatko, et al., *Vacuum* **235**, 114162 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114162>.

Поступила в редакцию 2 апреля 2026 г.

После доработки 8 апреля 2026 г.

Принята к публикации 9 апреля 2026 г.