

УДК 621.039

ПРОФИЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ДО И ПОСЛЕ АНОДА В РАЗРЯДЕ С ПОЛЫМ КАТОДОМ

© 2026 г. А. В. Бернацкий^а, И. И. Драганов^{а, б, *}, В. В. Лагунов^а, В. Н. Очкин^а

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

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

*E-mail: draganov.i@phystech.edu

Поступила в редакцию 18.02.2025 г.

После доработки 15.05.2025 г.

Принята к публикации 20.05.2025 г.

В тлеющем разряде, поддерживаемом полым катодом и сетчатым анодом, впервые получены трехмерные распределения параметров электронной компоненты плазмы методом зонда Ленгмюра как в объеме разряда, так и в пост анодной плазме. Экспериментально установлено, что анодное свечение, формирующееся в условиях разряда в настоящей работе, полностью окружает анод. Предложен механизм формирования плазмы за анодом, когда большая часть электронов облетает анод, тем самым существуют криволинейные траектории движения электронов в разряде, которые обеспечивают их попадание на анод с обратной по отношению к катоду стороны.

Ключевые слова: полый катод, анодное свечение, анодное пятно, зонды Ленгмюра, концентрация электронов

DOI: 10.56304/S2079562925060053

ВВЕДЕНИЕ

В физике низкотемпературной плазмы исследование разрядов разной формы и конфигурации разрядных узлов является одним из важнейших направлений для решения прикладных задач. Разряд с полым катодом — это эффективный источник плазмы и заряженных частиц: электронов и ионов, где плотная плазма формируется в пространстве между пластинами катода [1]. Разряд такой формы нашел широкое применение в стабилитронах и тиратронах [2], в качестве источника для накачки газовых лазеров, для осаждения тонких пленок [3–5], для исследования пристеночной плазмы [6]. В последнем случае диагностика разряда проводилась двумя методами: эмиссионная спектроскопия [6] и зондовая диагностика плазмы [7–9]. В [6, 10–13] были проведены спектральные измерения с пространственным разрешением, получены распределения электронных параметров по осям разряда: концентрации N_e и средней энергии $\langle E \rangle$ электронов и потенциала плазмы U_p . В условиях проведенных экспериментов на аноде наблюдалась локализованная светящаяся область — анодное пятно [1, 14–16], которое утягивает на себя электроны из прилегающей к нему плазмы и увеличивает эффективную площадь сбора последних на анод, искажая при этом функцию распределения элект-

тронов (ФРЭЭ) вблизи анода и, соответственно, влияя на параметры электронов.

Целью настоящей работы является диагностика плазмы в разряде в гелии при условиях, обеспечивающих образование анодного свечения вдоль всей поверхности анода. Так как разряд не ограничен стенками, электроны дрейфуют в свободном пространстве, имея, вероятно, возможность облетать анод или пролетать сквозь отверстия в его сетке. Для исследования этих особенностей разряда были проведены пространственные измерения концентрации электронов в объеме разряда в гелии с помощью системы трехмерного позиционирования зондов Ленгмюра, подробно описанной в работе [10].

Экспериментальная установка

Установка, подробное описание которой представлено в [6, 10–13, 17], представляет собой вакуумную камеру объемом 22 л. Камера оборудована несколькими каналами напуска газов, кварцевыми окнами, системой откачки и контроля за давлением. Остаточное давление в камере было на уровне 10^{-7} торр. Внутри камеры расположен разрядный узел, представленный полым катодом из вольфрама, размеры $50 \times 100 \times 10$ мм³ и сетчатым анодом, геометрические размеры которого 100×10 мм²

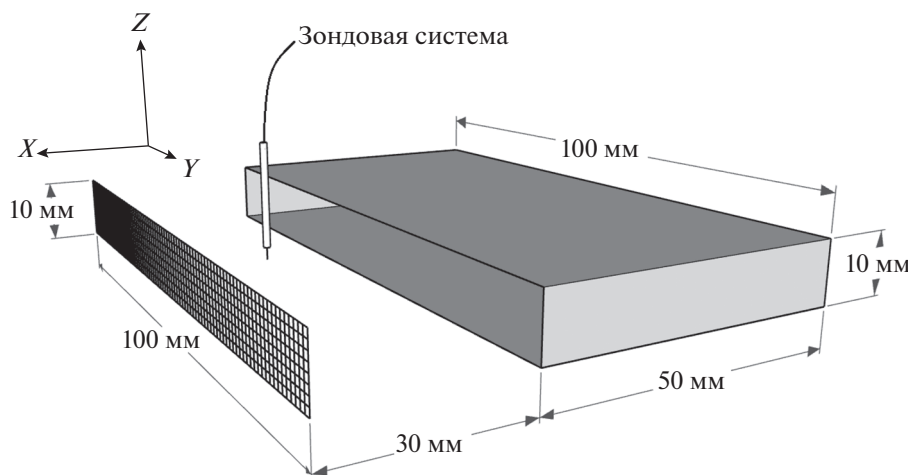


Рис. 1. Конфигурация разрядного узла.

(прозрачность сетки 50%). Схема взаимного расположения электродов показана на рис. 1. Расстояние от среза полого катода до анода — 30 мм. Разряд поддерживался источником питания SH0105 с диапазоном 0–2 кВ и 0–500 мА. Для зондовых измерений изготавливался зонд Ленгмюра с диаметром проводящей части 60 мкм и длиной 2 мм. Зонд был вставлен в изолятор с внешним диаметром 230 мкм, закрепленный на держателе. В ходе выбора размера проволоки зонда и размера его держателя мы руководствовались выводами из работ [10, 18]. Для перемещения зонда в объеме разряда была использована уникальная система трехмерного позиционирования, созданная нами ранее [10]. Она состоит из 3-х подвижек с шаговыми двигателями, направленных по осям разряда (X , Y , Z) (рис. 1). Шаг перемещения при измерениях по оси X — 1 мм, Y — 5 мм, Z — 2 мм.

Для формирования ВАХ на зонд подавался шумовой сигнал [18] в интервале от -55 В до -13 В, состоящий из 80000 точек. Время записи ВАХ в одной точке пространства — 2.1 с. Концентрация электронов определялась путем интегрирования второй производной ВАХ [10]. Зондовые измерения проводились в объеме разряда, вне его геометрической апертуры, а также за анодом.

Во всех экспериментах разряд зажигался в гелии при давлении 2.5 мбар, токе разряда 62 мА. В этом случае анод был окружен равномерным светящимся слоем, размером порядка 1 мм. В литературе это явление называется анодное свечение [16, 19, 20]. Исследования анодного свечения в разрядах с сетчатым анодом не проводились в известной нам литературе. В наших же условиях анодное свечение наблюдалось вокруг всего анода, поэтому проводилась диагностика и за ним.

Распределение параметров электронов вдоль оси разряда (распределения по X при $Y, Z = 0$)

Зависимость концентрации электронов от положения в разряде показана на рис. 2 в полулогарифмическом масштабе. Плотность электронов падает по мере приближения к аноду возможное объяснение чему дано в работе [11]. В области анодного свечения наблюдается сильное поглощение электронов анодом, резкое падение N_e примерно на порядок. Возможное объяснение такого поведения N_e заключается в следующем. В результате усиленной ионизации в этой области образуется избыточный положительный объемный заряд, выталкивающийся полем на периферию анодного слоя и нейтрализующий электроны в этой области, в то время как образовавшиеся электроны ускоряются полем к аноду. В результате электроны погибают либо на поверхности анода, либо в результате столкновений. Это приводит к уходу электронов из периферии анодного слоя ($X = 28, 29$ мм), что подтверждается на рис. 2. За анодом наблюдается рост количества электронов по мере удаления от анода. Чтобы объяснить ненулевые концентрации электронов за анодом были проведены трехмерные измерения концентрации электронов внутри и вне геометрической апертуры электронов.

Трехмерные распределения измеряемых параметров

На рис. 3 представлено распределение концентрации электронов вблизи открытой части полого катода на расстоянии $X = 1$ мм от нее, в параллельной ей плоскости YZ . Видно, что из полости катода вылетает симметричный относительно точки $Y, Z = 0$ пучок электронов с ярко выраженным максимумом плотности электронов в центре ($Y = 0$ мм, $Z = 0$ мм). Концентрация электронов от центра среза катода к периферии меняется при-

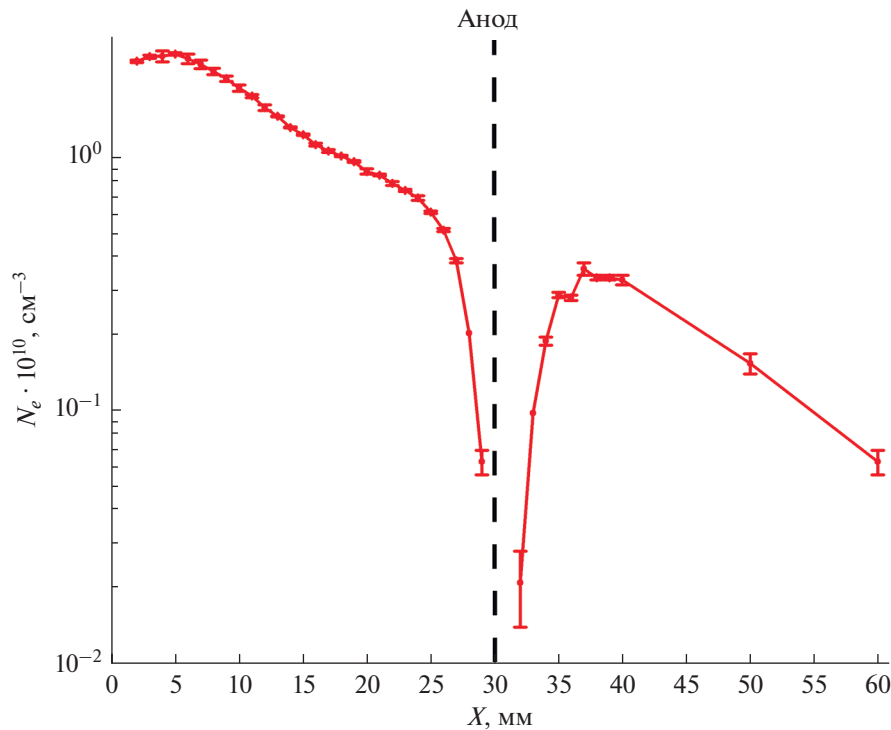


Рис. 2. Распределение концентрации электронов по оси разряда. $X = 30$ мм — положение анода.

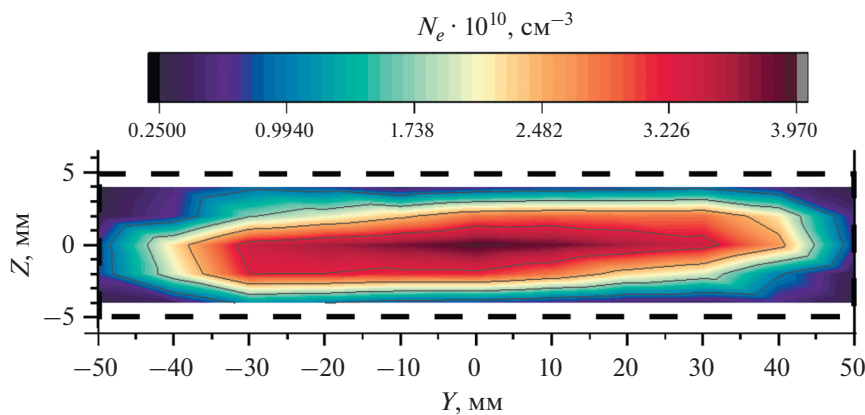


Рис. 3. Распределение концентрации электронов при $X = 1$ мм в плоскости YZ . Пунктиром показана геометрическая апертура среза катода.

мерно на порядок. Далее, как видно из рис. 4 и 5, в ходе дрейфа электронов к аноду в электрическом поле, формируемом в разряде, этот пучок расширяется и может выходить за геометрическую апертуру электродов разрядного устройства в том числе и за счет диффузии электронов, ввиду отсутствия ограничивающих стенок, как, например, в газоразрядной трубке.

На рис. 4 показано распределение концентрации электронов в плоскости XU при $Z = 0$. Распределение симметрично относительно оси $Y = 0$ с

максимумом N_e вблизи катода. Большая часть электронов удерживается в апертуре разряда (между катодом и анодом), попадая на анод со стороны, обращенной к катоду. Из рис. 4 видно, что резкий спад электронов вблизи анода (область анодного свечения) наблюдается вдоль всего анода, как до него, так и в области геометрической «тени» за ним. Это значит, что анодное свечение наблюдается с двух сторон анода вдоль всей длинной стороны, что подтверждается визуальными наблюдениями за разрядом.

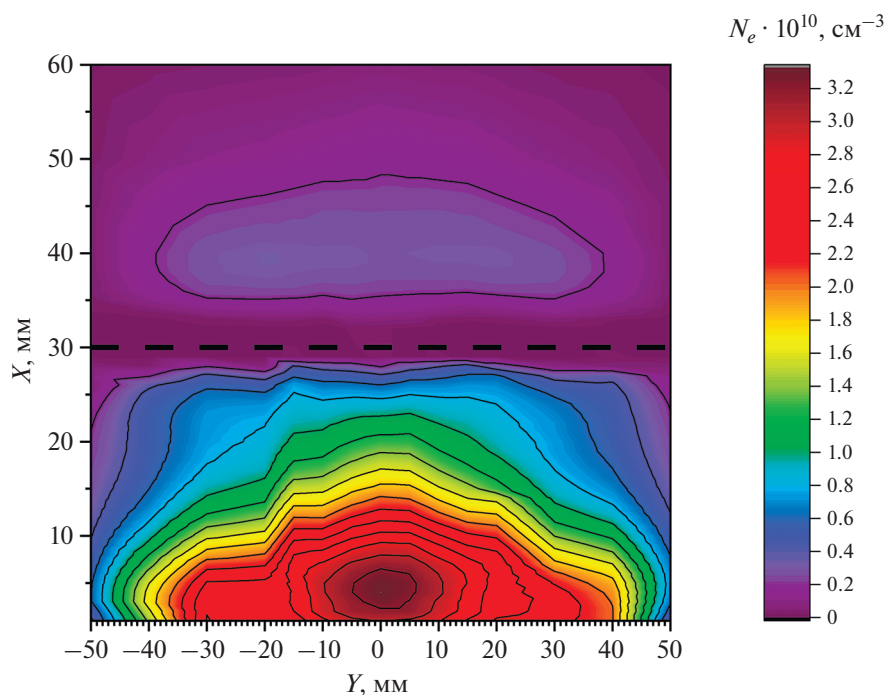


Рис. 4. Распределение концентрации электронов в плоскости XY при $Z = 0$ мм. Штриховая линия — анод.

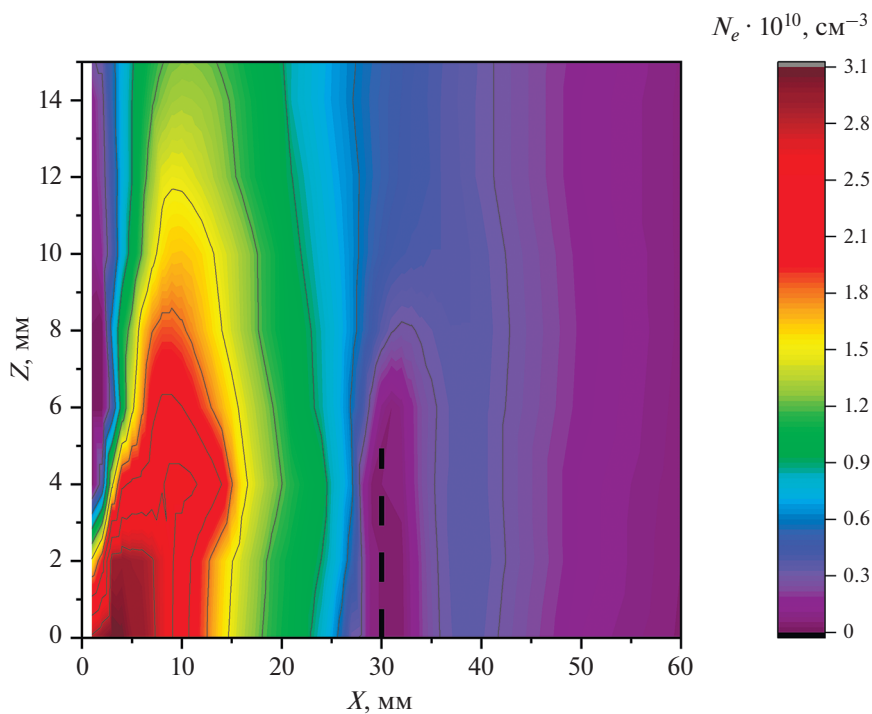


Рис. 5. Распределение концентрации электронов в плоскости XZ при $Z > 0$ мм, $Y = 0$ мм. Штриховая линия — анод.

На рис. 5 показано поведение концентрации электронов в плоскости XZ , при $Z > 0$, $Y = 0$. Черной штриховой линией нарисована Z апертура

анода. Область измерений в этом случае выходит за границы апертуры электродов. Узкий вдоль оси Z пучок электронов (рис. 3), вылетая из като-

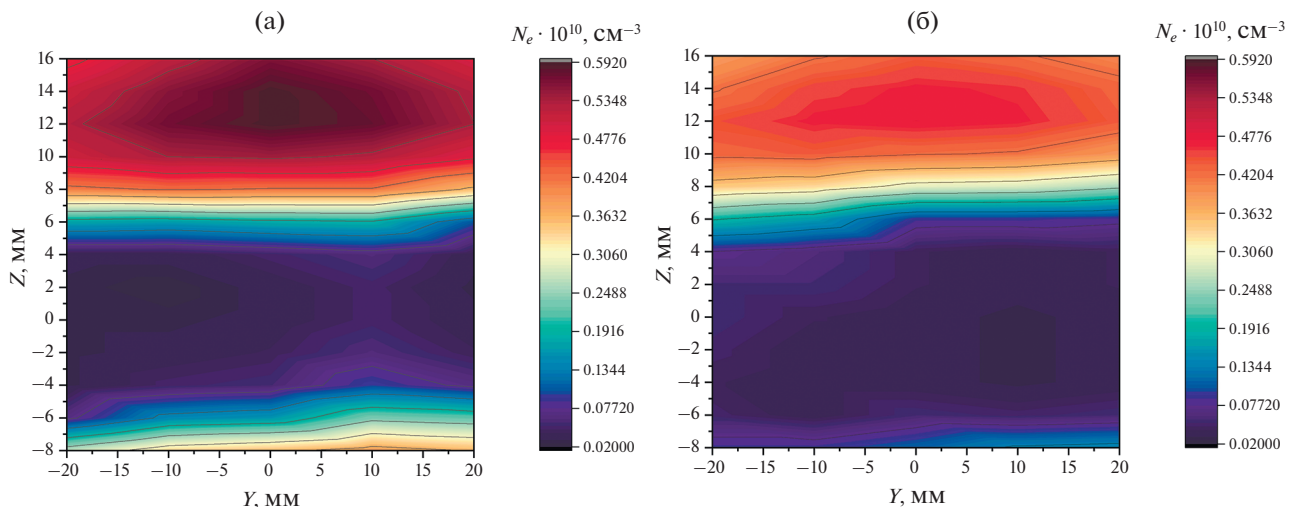


Рис. 6. Пространственное распределение концентрации электронов в области YZ анодного свечения в одном масштабе по цвету: (а) до анода, $X = 29$ мм; (б) после анода, $X = 32$ мм. Апертура анода: $Y = [-50:50]$ мм, $Z = [-5:5]$ мм.

да сразу расширяется. Учитывая малость Z апертуры катода и анода, ненулевая концентрация электронов наблюдается далеко за пределами $Z = [0:5]$, т.е. большое количество электронов дрейфуют вне геометрической апертуры электродов. Расширение разряда происходит уже на масштабах нескольких миллиметров от катода. Внутри электродной апертуры происходит спад N_e подобно рис. 2, тогда как вне ее электроны дрейфуют в свободном пространстве, не имея перед собой поглотителя (анода), что объясняет большое количество электронов в области над анодом, $X = 30$ мм, $Z > 6$ мм. Из рис. 5 видно, что резкий спад плотности электронов наблюдается и в области над ним, а значит анодное свечение полностью окружает сетку анода. Этот результат подтверждается визуальным наблюдением за разрядом. Рисунок 5 демонстрирует, что электроны попадают за анод, облетая его сверху, и, возможно, снизу, тем самым обеспечивая ненулевую концентрацию в области за ним.

Рисунок 6 показывает распределение концентрации электронов в плоскости YZ при X равном 29 (до анода) и 32 (после анода), соответственно. Ввиду особенностей конструкции измерения при $Z < -8$ вблизи анода пока не проводились. На рис. 8 в диапазоне $Y = [-20:20]$ до анода видим симметричное распределение концентрации электронов по $Z = [-8:8]$ относительно $Z = 0$, при этом в области анодного свечения электронов на порядок меньше, чем над анодом. Большое количество электронов наблюдается в области над анодом ($Z > 8$). Аналогичная картина при $X = 32$ демонстрирует, что электроны, которые находились под анодом погибли, когда сверху их осталось почти столько же. Естественно, часть этих электронов ускорилась к аноду и поглотилась, особенно вблизи поверхности анода, однако большая часть пролетела. Мож-

но сделать вывод, что облет анода электронами происходит именно сверху, и это связано с особенностями крепления анода к его держателю из тefлона (диэлектрика). Последний находится под анодом, при этом расстояние от поверхности анода до него меньше сантиметра, а сверху разряд ничем не ограничен. Стоит отметить, что при отсутствии препятствия под анодом электроны, скорее всего, будут в равной степени облетать анод с двух сторон, так как на рис. 6б видно, что в области $Z < -6$ электронов все же больше чем в центре, а значит малое количество электронов в итоге пролетает под анодом.

Результаты измерений потенциала плазмы, электрического поля и результаты моделирования электронной компоненты для данной конфигурации разрядного устройства, представлены в работах [21, 22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было проведено детальное экспериментальное исследование разряда с полым катодом и сетчатым анодом. Впервые получены трехмерные распределения параметров электронной компоненты плазмы в пространстве между электродами и за анодом. Впервые показано, что анодное свечение наблюдается со всех сторон анода, когда разряд горит в свободном пространстве. Впервые показано, что в разряде, не ограниченном поглощающими стенками, плазма за анодом в основном формируется благодаря облету электронов анода. Ненулевая концентрация электронов за анодом зарегистрирована даже на расстояниях порядка межэлектродного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Rane R., Chauhan S., Bharathi P., Nigam K., Bandyopadhyay P., Mukherjee S. // *Phys. Plasmas*. 2018. V. 25. P. 093509.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1808.09646>
2. Москалев Б.И. Разряд с полым катодом. 1969. Москва: Энергия.
3. Baggio-Scheid V.H., Neri J.W., de Vasconcelos G. // *Surf. Coat. Technol.* 2001. V. 146. P. 469–473.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01458-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01458-X)
4. Barankova H., Bardos L. // *Surf. Coat. Technol.* 2001. V. 146. P. 486–490.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01376-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01376-7)
5. Kozec D., Engemann J., Mildner M., Theirich N.B. // *Surf. Coat. Technol.* 1997. V. 93. P. 128–133.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00022-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00022-4)
6. Andreev S.N., Bernatskiy A.V., Draganov I.I., Kochetov I.V., Ochkin V.N. // *Plasma Phys. Rep.* 2022. V. 27. P. 1273–1287.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X22601043>
7. Mott-Smith H.M., Langmuir I. // *Phys. Rev.* 1926. V. 28. P. 727.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.28.727>
8. Druyvesteyn M.J. // *Z. Phys.* 1930. V. 64. P. 781–798.
<https://doi.org/10.1007/BF01773007>
9. Mott-Smith Jr. H. *Electrical Discharge*. 1961. P. 23–98.
<https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9909-2.50012-6>
10. 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>
11. Andreev S.N., Bernatskiy A.V., Dyatko N.A., Kochetov I.V., Ochkin V.N. // *Plasma Phys. Rep.* 2023. V. 49. P. 1031–1037.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X23600846>
12. Andreev S.N., Bernatskiy A.V., Ochkin V.N. // *Plasma Chem. Plasma Process.* 2021. V. 41. P. 659–672.
<https://doi.org/10.1007/s11090-020-10137-4>
13. Andreev S.N., Bernatskiy A.V., Dyatko N.A., Kochetov I.V., Ochkin V.N. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2022. V. 31. P. 105016.
<https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac9750>
14. Rubens S.M., Henderson J.E. // *Phys. Rev.* 1940. V. 58. P. 446.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.58.446>
15. Baalrud S.D., Longmier B., Hershkowitz N. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2009. V. 18. P. 035002.
<https://doi.org/10.1088/0963-0252/18/3/035002>
16. Baalrud S.D., Scheiner B., Yee B.T., Hopkins M.M., Barnat E. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2020. V. 29. P. 053001.
<https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab8177>
17. Andreev S.N., Bernatskiy A.V., Ochkin V.N. // *Vacuum*. 2022. V. 206. P. 111514.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111514>
18. 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>
19. Chauhan S., Ranjan M., Bandyopadhyay M., Mukherjee S. // *Phys. Plasmas*. 2016. V. 23. P. 013502.
<https://doi.org/10.1063/1.4939029>
20. Грановский В.Л. Электрический ток в газах. Т. 1: Общие вопросы электродинамики газов. 1952. Москва, Ленинград: Гос. изд-во технико-теорет. лит.
21. Bernatskiy A.V., Draganov I.I., Dyatko N.A., Kochetov I.V., Lagunov V.V., Ochkin V.N. // *Plasma Chem. Plasma Process.* 2025. V. 45. P. 993–1009.
<https://doi.org/10.1007/s11090-025-10552-5>
22. 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>

Electron Concentration Distribution Profiles Before and After the Anode in a Hollow Cathode Discharge

A. V. Bernatskiy¹, I. I. Draganov^{1, 2, *}, 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*

*e-mail: draganov.i@phystech.edu

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

Abstract—In a glow discharge supported by a hollow cathode and a mesh anode, three-dimensional distributions of the parameters of the electronic component of the plasma were obtained for the first time by the Langmuir probe method both in the discharge volume and in the post-anode plasma. It has been experimentally established that the anode glow formed under discharge conditions in this work completely surrounds the anode. A mechanism for plasma formation behind the anode is proposed, when most of the electrons fly around the anode, thus there are curved trajectories of electron movement in the discharge, which ensure their entry into the anode from the opposite side to the cathode.

Keywords: hollow cathode, anode glow, anode spot, Langmuir probes, electron concentration