ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ
PLASMA PHYSICS AND PLASMA METHODS

УДК 533.9 PACS: 52.50.Dg
EDN: XCUVEZ

Экспериментальное исследование электрофизических и спектроскопических параметров плазмы тлеющего разряда с микрополым катодом

© Е. А. Шершунова*, К. И. Романов, С. В. Небогаткин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, 191181 Россия
** E-mail: eshershunova@ieeras.ru*

Статья поступила в редакцию 03.06.2026; после доработки 16.06.2026; принята к публикации 22.10.2026
Шифр научной специальности: 1.3.13.

Представлены результаты экспериментального исследования электрофизических и спектроскопических параметров плазмы тлеющего разряда с микрополым катодом при прокачке аргоном. Получены экспериментальные зависимости величины выносимого на проводящую мишень заряда от расхода аргона и расстояния до мишени. Снят оптический эмиссионный спектр плазмы внутри реактора с полым микрокатодом, по которому произведена оценка электронной температуры плазмы.

Ключевые слова: газовый разряд, микрополый катод, аргон, диагностика плазмы, перенесенный заряд, мишень, оптический спектр излучения, электронная температура.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-5-76-83

1. Введение

Технологии с использованием холодной плазмы находят применение в различных областях, включая медицину [1–3], химию и биохимию [1, 4], сельское хозяйство [5, 6], обработку материалов [7–9] и др. Особый интерес представляет плазма субмиллиметрового и микронного размера с характерным размером разрядной области единицы-сотни мкм, которая сочетает высокую степень неравновесности. Такие разряды могут быть реализованы либо в реакторах с проводящими электродами, где в катоде имеется полость малого диаметра, через которую осуществляется принудительная прокачка газа для охлаждения электродов и выноса продуктов реакции, либо в реакторах с диэлектрическим барьером на хотя бы одном электроде. Отдельно выделяют разряд с микрополым катодом (РМК), для которого характерно наличие полости микронного размера в катоде, что способствует высокой степени ионизации и созданию плотной плазмы [10, 11]. Особый интерес представляет возможность работы РМК при атмосферном давлении, малые габариты плазменного реактора, низкое энергопотребление и низкое напряжение зажигания [12, 13].

В отличие от механического сверления современные лазерные технологии, оптимальный выбор характеристик пучка и точности фокусировки на поверхности в зависимости от типа материала и его толщины позволяют получать прецизионные отверстия микронного и субмикронного размера, обеспечивая высокую точность позиционирования и повторяемость [14–17]. Такие технологии открывают большие возможности для конструирования и исследования источников микроплазмы.

Стремительное расширение сфер применения плазмы субмиллиметрового и микронного размера [18] требует детального изучения процессов разряда. Параметры такой плазмы, переносимый ею заряд, температура, ее состав зависят от характеристик самого разряда, амплитуды и формы напряжения,

расхода газа, а также от свойств мишени, на которую распространяется струя, выносимая из реактора [19].

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию плазмы, генерируемой в плазменном реакторе с микрополым катодом, прокачиваемым аргоном при постоянном напряжении питания. Особое внимание уделено заряду, выносимому из реактора в зависимости от расхода аргона и расстояния до проводящей мишени. На основании оптического спектра излучения плазмы проведен анализ температуры возбуждения плазмы аргона.

2. Экспериментальная установка

На рис. 1 показана экспериментальная установка, которая детально описана в работе [20]. В качестве источника питания использовался источник постоянного напряжения «Плазон», способный выдавать на выходе напряжение до 30 кВ и ток до 10 мА [21]. Постоянное напряжение подавалось на электроды реактора через токоограничивающий резистор 6,2 МОм.

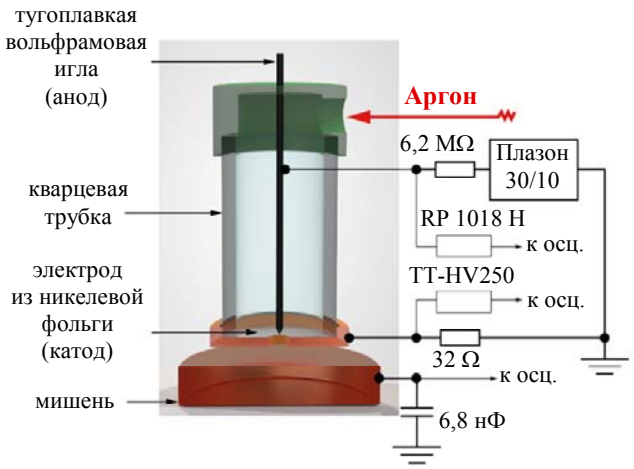


Рис. 1. Экспериментальная установка

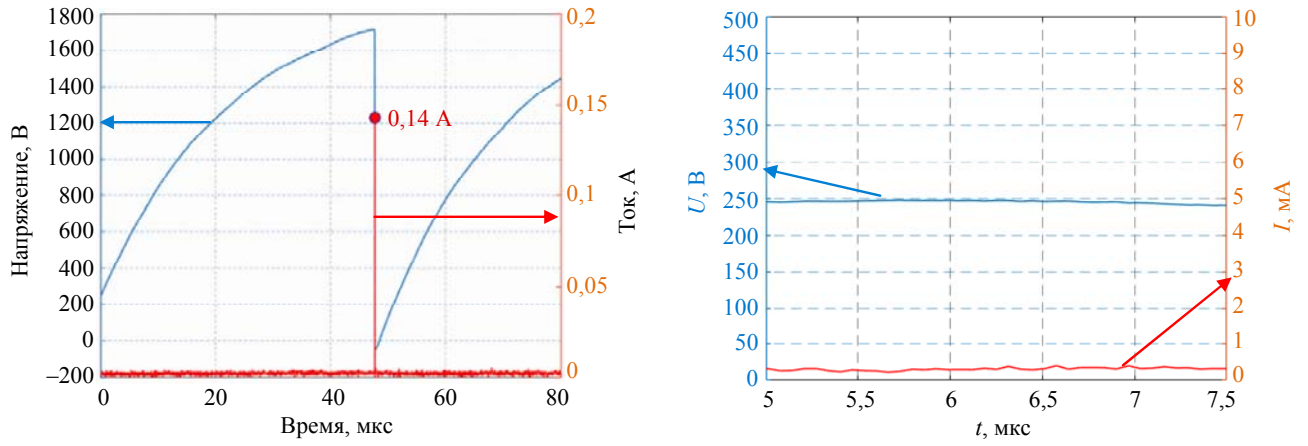
Плазменный реактор представлял собой кварцевую трубку диаметром 24 мм. В центре трубки была установлена тонкая тугоплавкая вольфрамовая игла диаметром 1 мм с радиусом скругления 0,2 мм, которая служила анодом. Катод, расположенный на расстоянии 1 мм от анода, представлял собой лист из никелевой фольги с отверстием по центру диаметром 0,95 мм. Для охлаждения электродов и выноса продуктов реакции использовался аргон атмосферного давления. При расходе газа в единицы литров в минуту скорость прокачки газа через отверстие составляла десятки-сотни м/с.

Для регистрации электрических параметров разряда использовался четырехканальный осциллограф Keysight Technologies, модель DSOX2024A, с полосой пропускания до 200 МГц и частотой дискретизации 1 Гвыб/с. Катод был подключен к земле через резистор сопротивлением 32 Ом. Напряжение на шунте измерялось с помощью пробника напряжения TT-HV250 с коэффициентом деления 100. Ток разряда в реакторе определялся по измеренному падению напряжения на резисторе. Падение напряжения на реакторе измерялось с помощью высоковольтного пробника RP 1018 H с коэффициентом деления 1000. Во время эксперимента изменялось расстояние L (от 2 до 10 мм) между выходом из реактора и проводящей круглой мишенью диаметром $S = 25$ мм. Накопленный на мишени заряд измеряли через падение напряжения на конденсаторе КВИ-3 емкостью 6800 пФ. Напряжение на конденсаторе регистрировалось с помощью пробника напряжения с коэффициентом деления 10.

В зависимости от потребляемого тока были реализованы два режима горения разряда: непрерывный (тлеющий) и самопульсирующий (рис. 2). Режим самопульсирующего разряда (рис. 2*а*) характеризовался высоким напряжением зажигания разряда, приблизительно 1700 В, с амплитудой импульсного тока 140 мА. Частота самопульсации составляла приблизительно 20 кГц. По мере увеличения тока потребления разряд становился тлеющим, переходил в непрерывный режим постоянного тока (рис. 2*б*). Напряжение зажигания в этом случае падало до 250 В. В отличие от самопульсирующего режима для тлеющего режима характерен постоянный ток в диапазоне мА.

Все экспериментальные зависимости в этой работе получены для тлеющего режима.

Оптический спектр излучения разряда регистрировался с помощью оптического спектрометра Brolight BIM-6002, работающего в диапазоне длин волн 200–900 нм с точностью измерения 1 нм. Излучение для анализа заводилось в спектрометр с помощью оптоволокна.



а) *б*)

Рис. 2. Два режима разряда при постоянном напряжении: а) – самопульсирующий, б) – тлеющий

3. Результаты эксперимента

Зависимость величины выносимого заряда от расхода газа и расстояния до мишени

На рис. 3 показана зависимость величины выносимого на мишень заряда от расхода газа в зависимости от расположения мишени, от 2 до 10 мм. Как видно из графика, величина выносимого из реактора заряда может составлять десятки-сотни нКл, что определяется величиной расхода газа и близостью мишени. Результаты показывают, что увеличение скорости прокачки газа и сокращение расстояния до мишени способствуют переносу большего количества заряда к мишени.

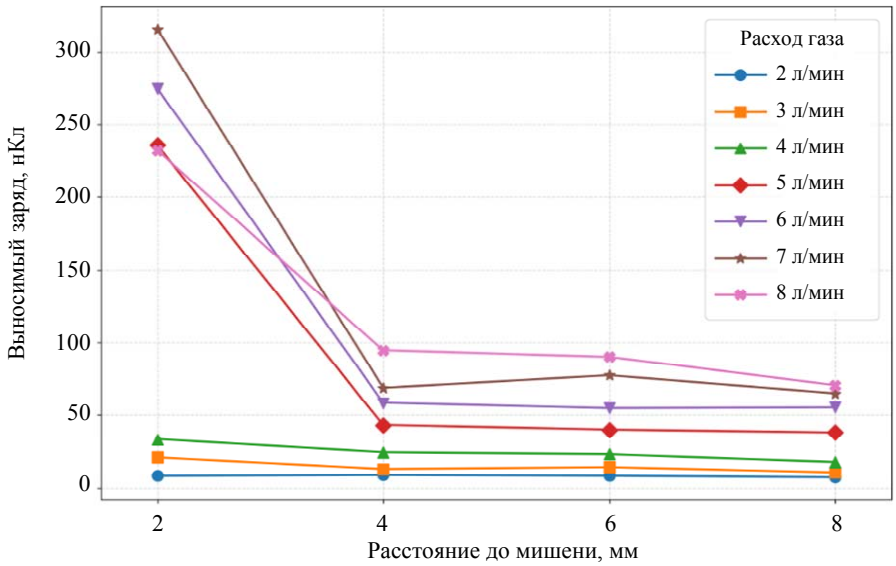


Рис. 3. Зависимость величины выносимого заряда от расстояния до мишени при разном расходе газа

Спектр оптического излучения плазмы

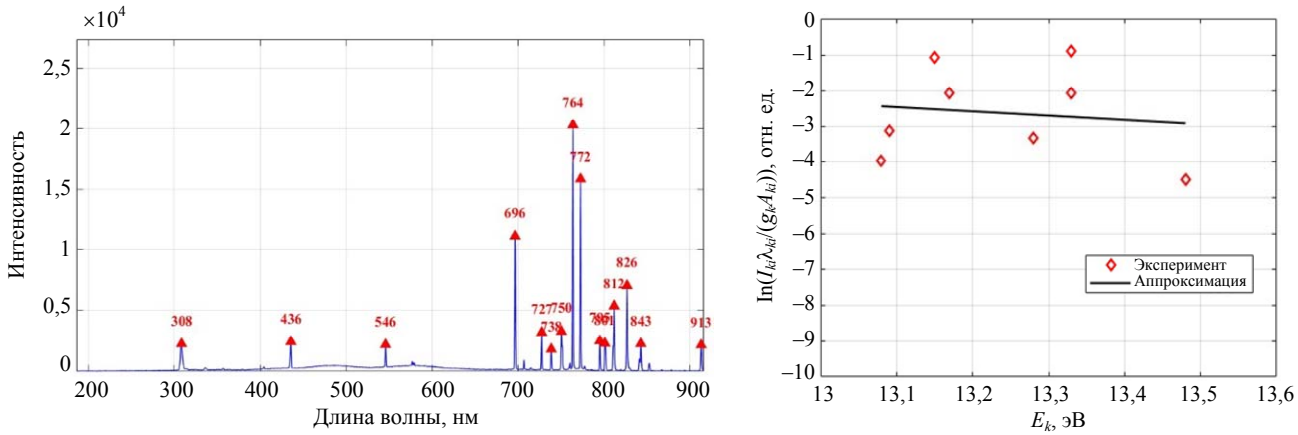
На рис. 4*а* показан спектр оптического излучения аргоновой плазмы в реакторе в тлеющем режиме при расходе аргона 3 л/мин. Как видно из рис. 4, в спектре присутствуют яркие линии высокоэнергичных переходов аргона Ar I (>13 эВ) в диапазоне длин волн 696–850 нм [22], слабая линия иона аргона Ar II (436 нм), присутствует линия OH (308 нм), указывающая на следы воды и слабые линии второй положительной линии азота (337, 356, 380 нм), говорящие о примеси воздуха. При этом, на спектре не наблюдается различимых

линий металлов, вольфрама и никеля, из которых сделаны электроды реактора. Такой спектр говорит о слабой ионизации исследуемой плазмы тлеющего разряда и отсутствии механизма распыления ионов металлов.

В предположении локального термического равновесия для линий аргона Ar I с энергиями верхнего уровня более 105000 1/см (больше 13 эВ) была установлена температура электронов T_e. Предполагалось, что температура возбуждения равна электронной температуре. Согласно [23] такое допущение справедливо для тлеющего разряда с микрополым катодом в аргоне при атмосферном давлении при квантовых числах больше 4.

Метод определения температуры возбуждения основан на построении графика Больцмана, где по оси абсцисс откладывается энергия верхнего уровня E_k, а по оси ординат – величина, определяющаяся как $\log(I_{ki}\,\lambda_{ki}/g_k A_{ki})$, где I_{ki}, λ_{ki}, A_{ki} – интенсивность, длина волны и вероятность перехода с верхнего k- на нижний i-уровень, а g_k – статистический вес верхнего уровня. Спектроскопические параметры линий излучения аргона Ar I перехода 4s-4p представлены в таблице 1.

На рис. 4*б* представлен график Больцмана линий перехода Ar I (4s-4p), экспериментальные значения и линия аппроксимации, полученная методом наименьших квадратов. По наклону графика на рис. 5 установлена электронная температура 9703 K, что сопоставимо со значением электронной температуры микроразрядов в аргоне (порядка 7000 K) при плотности электронов 10^{14} см$^{-3}$ [25].



а) *б*)

Рис. 4. а) – спектр оптического излучения плазмы в аргоне при подаче постоянного напряжения; б) – график Больцмана для перехода линии Ar I (4s-4p)

Таблица 1

Спектроскопические параметры линий излучения аргона Ar I [24]

Длина волны перехода λ_{ki}, нм	Переход	Интенсивность линии перехода I_{ki}, отн. ед.	Вероятность перехода A_{ki}, 1/с	Энергия верхнего уровня E_k, 1/см	Энергия верхнего уровня E_k, эВ	Статистический вес верхнего уровня g_k
696,5	4s-4p	11107	$6{,}4\times10^6$	107496	13,32	3
727,2	4s-4p	3173	$1{,}83\times10^6$	107496	13,32	3
738,3	4s-4p	1784	$8{,}51\times10^6$	107289	13,30	5
750,4	4s-4p	3257	$44{,}5\times10^6$	108722	13,48	5
763,5	4s-4p	20264	$24{,}5\times10^6$	106237	13,17	5
772,4	4s-4p	15851	$11{,}7\times10^6$	107496	13,32	3
794,8	4s-4p	2477	$18{,}6\times10^6$	107131	13,28	3
811,5	4s-4p	5298	$33{,}1\times10^6$	105462	13,08	7
826,4	4s-4p	7018	$15{,}3\times10^6$	107496	13,32	3
842,4	4s-4p	2235	$21{,}5\times10^6$	105617	13,09	2

4. Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные данные позволяют установить взаимосвязь между газодинамическими параметрами, электрическими характеристиками разряда и процессами переноса заряда к внешней мишени. В зависимости от тока потребления получены два режима горения разряда: самопульсирующий и непрерывный тлеющий. Переход от самопульсирующего к тлеющему режиму происходит при увеличении тока потребления и сопровождается резким снижением напряжения горения. Такой переход типичен для разрядов с полым катодом и объясняется нагревом катода, изменением вторично-эмиссионных свойств его поверхности и перестройкой структуры катодного слоя [26]. Тлеющий режим обеспечивает стационарные условия генерации плазмы, что критически важно для воспроизводимого дозирования заряда и активных частиц, поэтому все зависимости получены именно в тлеющем режиме.

Измерения показали, что величина заряда, накапливаемого на проводящей мишени, составляет десятки – сотни нанокулон и монотонно растёт с увеличением расхода аргона и с уменьшением расстояния от выходного отверстия реактора до мишени. Эти зависимости имеют чёткое физическое обоснование. Увеличение расхода газа повышает скорость конвективного переноса заряженных частиц из области разряда через отверстие в катоде. Более того, интенсивная прокачка аргона способствует эффективному охлаждению электродов, предотвращая локальный перегрев и снижая термоэлектронную эмиссию, которые могли бы дестабилизировать тлеющий режим. Сокращение расстояния до мишени увеличивает долю ионов, достигающих поверхности без рекомбинации. При малых расстояниях плазменная струя ещё не успевает существенно расшириться, потери заряда минимальны. При увеличении расстояния до мишени до 1 см наблюдается заметное уменьшение величины фиксируемого заряда на мишени, что связано с рассеянием струи, рекомбинацией ионов на фоновых частицах, которые всегда присутствуют вне реактора в открытом воздухе.

Спектроскопические исследования показали наличие интенсивных линий аргона I в диапазоне длин волн 690–850 нм с высокой энергией верхнего уровня перехода, что позволило построить график Больцмана для этих линий. На основании графика определена температура возбуждения, которая дает нижнюю границу электронной температуры и в предположении локального термического равновесия принята равной электронной 0,84 эВ (9703 K). Полученная температура возбуждения сравнима с температурой электронов в микроразряде в аргоне атмосферного воздуха в другой работе [25].

Для количественной оценки механизма переноса заряда была произведена оценка скорости дрейфа ионов в слабом электрическом поле. На основании оптического спектра излучения плазмы можно утверждать, в плазме присутствуют ионы аргона, хоть ионизация плазмы слабая. Исходя из полученной электронной температуры плазмы 0,84 эВ, можно утверждать, что прямая ионизация электронным ударом невозможна, так как для ионизации таким способом требуется гораздо большая энергия (15,76 эВ). Ионы аргона Ar^+, похоже, рождаются путём ступенчатой ионизации при столкновении возбужденных атомов аргона с электронами или с молекулами примесей. Для оценки дрейфовой скорости ионов в плазме при атмосферном давлении использовано значение приведённой подвижности ионов аргона, полученное в работах [27, 28]: $\mu_0 = 1{,}54$ см^2/(В·с). С учетом атмосферного давления и напряженности поля вблизи катода (около 10 Тд) в реакторе получим подвижность ионов аргона 1,69 см^2/(В·с). Тогда скорость дрейфа ионов составляет 42 м/с. Следует, однако, учесть, что поле в реакторе неоднородно. У острия анода поле усиливается и составляет 30–100 Тд. В этой приэлектродной области локальная дрейфовая скорость ионов аргона может достигать сотен м/с, что существенно превышает скорость дрейфа вблизи катода. Полученная скорость дрейфа без учета потерь при расширении струи сравнима с со скоростью истечения аргона из реактора через отверстие: десятки м/с, т. е. практически совпадает со скоростью дрейфа ионов аргона. Таким образом, можно предположить, что за механизм движения плазменной струи к мишени отвечает как механизм конвекции, так и дрейф заряда в электрическом поле. Вблизи реактора, где поле у острия максимально, а поток газа направлен через отверстие, преоб-

ладает скорее всего конвективный механизм выноса заряда, а вблизи мишени, где поле слабое и поток не такой направленный – механизм дрейфа.

5. Заключение

Проведено экспериментальное исследование электрофизических и спектроскопических параметров тлеющего разряда в аргоне атмосферного давления с микрополым катодом с выносом плазмы на проводящую мишень. Показано, что величина заряда, переносимого плазменной струёй на проводящую мишень, составляет от десятков до сотен нанокулон и возрастает с увеличением расхода аргона, а также с уменьшением расстояния от выходного отверстия реактора до мишени, достигая максимума при расстоянии 2 мм и расходе 3 литра в минуту.

На основании рассчитанной скорости дрейфа ионов аргона и величины расхода аргона сделан вывод о том, что перенос заряда от реактора к мишени определяется совместным действием двух механизмов: конвективного выноса потоком газа и дрейфа в электрическом поле, причём вклады этих механизмов сопоставимы. Именно это объясняет наблюдаемую зависимость выносимого заряда, как от расхода газа, так и от расстояния до мишени.

Спектроскопические исследования показали наличие в спектре излучения интенсивных линий атомарного аргона Ar I с энергией верхнего уровня более 13 эВ. Методом построения графика Больцмана определена температура возбуждения, которая в предположении локального термического равновесия принята за электронную температуру. Полученное значение около 9700 K (примерно 0,84 эВ) характерно для неравновесной микроплазмы в аргоне при атмосферном давлении и подтверждает высокую степень неравновесности исследуемого разряда, что особенно ценно для применений, требующих генерации активных частиц при низкой термической нагрузке на обрабатываемый объект.

Разработанный реактор с микрополым катодом, работающий в тлеющем режиме при атмосферном давлении, обладает малыми габаритами, низким энергопотреблением и возможностью управления параметрами плазменной струи. Полученные результаты создают основу для проектирования источников холодной плазмы нового поколения с контролируемыми характеристиками и могут быть использованы в плазменной медицине, тонкой модификации поверхности, сельскохозяйственных технологиях и прецизионной обработке материалов.

Исследование было выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 24-19-00727, https://rscf.ru/project/24-19-00727/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wende K. et al.* / Biological Chemistry. 2018. Vol. 400. № 1. P. 19–38.
2. *Laroussi M.* / Frontiers in Physics. 2020. Vol. 8. P. 74.
3. *Bernhardt T. et al.* / Oxidative medicine and cellular longevity. 2019. Vol. 2019. № 1. P. 3873928.
4. *Зиннурова А. Б. и др.* / Сибирский онкологический журнал. 2024. Т. 23. № 6. С. 89–96.
5. *Domonkos M. et al.* / Applied Sciences. 2021. Vol. 11. № 11. P. 4809.
6. *Thirumdas R. et al.* / Trends in food science & technology. 2018. Vol. 77. P. 21–31.
7. *Hnatiuc E. et al.* / 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering. IEEE, 2012. P. 497–502.
8. *Анисович А. Г. и др.* / Литьё и металлургия. 2019. № 2. С. 85–91.
9. *Тихонов Е. А., Гостев К. В.* / Наука и бизнес: пути развития. 2012. С. 75–78.
10. *Schoenbach K. H. et al.* / Physics of plasmas. 2000. Vol. 7. № 5. P. 2186–2191.
11. *Мошкунов С. И. и др.* / Прикладная физика. 2021. № 5. С. 11. EDN XDVIFB.
12. *Moshkunov S. I. et al.* / Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2021. Vol. 2064. № 1. P. 012032. EDN QMXBMY.
13. *Moshkunov S. I. et al.* / Plasma Physics Reports. 2022. Vol. 48. № 4. P. 449–452. EDN ZRYFGS.
14. *Jeong B. et al.* / Quantum Electronics. 2020. Vol. 50. № 2. P. 201–204.
15. *Tokarev V. N. et al.* / Laser Physics. 2015. Vol. 25. № 5. P. 056003. EDN UFTKWX.
16. *Khomich Y. V., Mikolutskiy S. I.* / Acta Astronautica. 2022. Vol. 194. P. 442–449. EDN JNZNUO.
17. *Zheleznov V. Yu. et al.* / Journal of Communications Technology and Electronics. 2023. Vol. 68. № 9. P. 1061–1066. EDN KAFUBE.
18. *Becker K. H., Schoenbach K. H., Eden J. G.* / Journal of Physics D: Applied Physics. 2006. Vol. 39. № 3. P. R55–R70.
19. *Shershunova E. A., Moshkunov S. I., Khomich V. Y.* / IEEE Transactions on Plasma Science. 2019. Vol. 47. № 11. P. 4909–4914. EDN GODHWB.

20. *Шершунова Е. А. и др.* / Прикладная физика. 2025. № 5. С. 78–84. EDN RXVDSZ.
21. *Romanov K. I. et al.* / Plasma physics and plasma technology (PPPT-11): «Kovcheg». 2025. P. 81–84. EDN TDXWHJ.
22. *Горбунков В. И. и др.* / Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 3. С. 123–130.
23. *Jovović J., Konjević N.* / The European Physical Journal D. 2014. Vol. 68. № 3. P. 60.
24. *Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J.* NIST Atomic Spectra Database. Version 5.12 [Электронный ресурс]. NIST ASD Team. – National Institute of Standards and Technology, 2024. URL: https://physics.nist.gov/asd, (дата обращения: 08.04.2026).
25. *Sismanoglu B. N. et al.* / The European Physical Journal D. 2010. Vol. 60. № 3. P. 505–516.
26. *Du B. et al.* / Journal of Physics D: Applied Physics. 2011. Vol. 44. № 12. P. 125204.
27. *McAfee Jr K. B., Sipler D., Edelson D.* / Physical Review. 1967. Vol. 160. № 1. P. 130.
28. *Madson J. M., Oskam H. J.* / Physics Letters A. 1967. Vol. 25. № 5. P. 407–408.

PACS: 52.50.Dg

Experimental study of electrophysical and spectroscopic parameters of a microhollow cathode glow discharge plasma

E. A. Shershunova*, K. I. Romanov, and S. V. Nebogatkin

Institute for Electrophysics and Electric Power RAS, St.-Petersburg, 191181 Russia
** E-mail: eshershunova@ieeras.ru*

Received 03.06.2026; revised 16.06.2026; accepted 22.10.2026

This work presents the results of an experimental study on the electrophysical and spectroscopic parameters of a microhollow cathode glow discharge plasma under argon flow. The experimental dependences of the charge transferred to a conductive target on the argon flow rate and the target distance were obtained. The optical emission spectrum of the plasma inside the microhollow cathode reactor was recorded, and the plasma electron temperature was estimated from it.

Keywords: gas discharge, microhollow cathode, argon, plasma diagnostics, transferred charge, target, optical emission spectrum, electron temperature.

REFERENCES

1. Wende K. et al., Biological Chemistry **400** (1), 19–38 (2018).
2. Laroussi M., Frontiers in Physics **8**, 74 (2020).
3. Bernhardt T. et al., Oxidative medicine and cellular longevity **2019** (1), 3873928 (2019).
4. Zinnurova A. B., Siberian Journal of Oncology **23** (6), 89–96 (2024) [in Russian].
5. Domonkos M. et al.,Applied Sciences **11** (11), 4809 (2021).
6. Thirumdas R. et al., Trends in food science & technology **77**, 21–31 (2018).
7. Hnatiuc E. et al. 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering. 2012, pp. 497–502.
8. Anisovich A. G. et al., Foundry and Metallurgy, № 2, 85–91 (2019) [in Russian].
9. Tikhonov E. A. and Gostev K. V., Science and business: development paths 75–78 (2012) [in Russian].
10. Schoenbach K. H. et al., Physics of plasmas **7** (5), 2186–2191 (2000).
11. Moshkunov S. I. et al., Applied Physics, № 5, 11 (2021) [in Russian]. EDN XDVIFB.
12. Moshkunov S. I. et al., Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing **2064** (1), 012032 (2021). EDN QMXBMY.
13. Moshkunov S. I. et al., Plasma Physics Reports **48** (4), 449–452 (2022). EDN ZRYFGS.
14. Jeong B. et al., Quantum Electronics **50** (2), 201–204 (2020).
15. Tokarev V. N., Cheshev E. A., Bezotosnyi V. V. et al., Laser Physics **25**, 056003 (2015). EDN UFTKWX.
16. Khomich Yu. V. and Mikolutskiy S. I., Acta Astranautica **194**, 442–449 (2022). https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.12.022. EDN JNZNUO.

17. Zheleznov V. Yu. et al., Journal of Communications Technology and Electronics **68** (9), 1061–1066 (2023). EDN KAFUBE.
18. Becker K. H., Schoenbach K. H., and Eden J. G., Journal of Physics D: Applied Physics **39** (3), R55–R70 (2006).
19. Shershunova E. A., Moshkunov S. I., and Khomich V. Y., IEEE Transactions on Plasma Science **47** (11), 4909–4914 (2019). EDN GODHWB.
20. Shershunova E. A. et al., Applied Physics, № 5, 65–70 (2025) [in Russian]. EDN UUNYOR.
21. Romanov K. I. et al., Plasma physics and plasma technology (PPPT-11): «Kovcheg» 81–84 (2025). EDN TDXWHJ.
22. Gorbunkov V. I. et al., Dinamika sistem, mexanizmov i mashin **7** (3), 123–130 (2019) [in Russian].
23. Jovović J. and Konjević N., The European Physical Journal D **68** (3), 60 (2014).
24. Kramida A., Ralchenko Yu., and Reader J. NIST Atomic Spectra Database. Version 5.12. NIST ASD Team. National Institute of Standards and Technology, 2024. URL: https://physics.nist.gov/asd
25. Sismanoglu B. N. et al., The European Physical Journal D **60** (3), 505–516 (2010).
26. Du B. et al., Journal of Physics D: Applied Physics **44** (12), 125204 (2011).
27. McAfee Jr K. B., Sipler D., and Edelson D., Physical Review **160** (1), 130 (1967).
28. Madson J. M. and Oskam H. J., Physics Letters A **25** (5), 407–408 (1967).

Об авторах

Шершунова Екатерина Александровна, к.т.н., заведующая лабораторией мощной импульсной техники, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Санкт-Петербург, Россия). E-mail: eshershunova@ieeras.ru SPIN-код: 1314-5887, AuthorID: 630856

Романов Кирилл Ильич, инженер, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Санкт-Петербург, Россия). E-mail: kiromanov@ieeras.ru SPIN-код: 2258-4044, AuthorID: 1123274

Небогаткин Сергей Вячеславович, к.т.н., заведующий лабораторией прикладной электрофизических исследований, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Санкт-Петербург, Россия). E-mail: snebogatkin@mail.ru SPIN-код: 8374-9520, AuthorID: 172235