

УДК 537.523
EDN: RXVDSZ

PACS: 52.80.–s

Оценка заряда, формируемого на выходе из коаксиального плазменного реактора с микрополым катодом

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

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

Статья поступила в редакцию 30.04.2025; после доработки 29.05.2025; принята к публикации 20.10.2025
Шифр научной специальности: 1.3.13

Проведена экспериментальная оценка количества заряда, выносимого из коаксиального плазменного реактора с микрополым катодом в зависимости от напряжения питания и скорости прокачки газа через активную зону реактора. Показано, что количество заряда, выносимого из реактора, определяется не только прокачкой газоразрядного промежутка и расстояния до мишени, но и от режима горения разряда. Сравнительный анализ режимов питания реактора выявил значительную разницу в эффективности генерации и транспорта заряда: при использовании источника постоянного высокого напряжения выносимый заряд превышает аналогичный показатель в импульсном режиме в 5 раз. Данное различие обусловлено как повышенной частотой зажигания разряда, так и увеличенной длительностью ионизационных процессов в непрерывном режиме. В то же время установлено, что комбинация регулируемого импульсного высоковольтного питания и управляемой скорости газового потока позволяет гибко контролировать динамику выноса заряда, обеспечивая возможность дозированного и локализованного плазменного воздействия.

Ключевые слова: разряд с микрополым катодом; прокачка; заряд; режим горения разряда.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-5-78-84

Введение

Плазменные технологии, использующие холодную плазму, находят применение в различных областях, включая: медицину, сельское хозяйство, промышленность, технологии производства материалов, энергетику и пр. [1–6]. Существуют различные способы по созданию холодной плазмы. Наиболее распространены установки, использующие поверхностный и объемный барьерный разряд [7–9], коронный разряд [10, 11]. Благодаря перспективному применению в устройствах освещения [12], микродвижения и точной обработки поверхности [13, 14] большой интерес вызывает плазма микронного размера, которая может быть сгенерирована в разряде с микропо-

лым катодом, где в катоде есть полость диаметром десятки-сотни микрон [15]. Такой микрозаряд может быть сформирован при очень низкой потребляемой мощности, единицы ватт даже при атмосферном давлении. При этом разряд с микрополым катодом может обеспечивать плотность мощности до 100 кВт/см^3 , что делает его уникальным источником плазмы.

Как правило, в технологическую установку для создания холодной плазмы входит плазменный реактор с системой электродов, между которыми горит электрический разряд, высоковольтный источник, питающий этот реактор, и система прокачки рабочей среды, которая обеспечивает вынос плазмы из активной зоны реактора в зону обрабатываемой по-

верхности. В качестве рабочей среды часто используется воздух или инертные газы (такие как, аргон, неон и пр.). Тип высоковольтного источника определяется видом электрического разряда, используемого в данной технологии. Используются как высоковольтные источники постоянного и синусоидального напряжения промышленной частоты, так и источники импульсов различной формы [16, 17, 18].

В зависимости от конструкции плазменного реактора, системы электродов и наличия прокатки различают прямые и не прямые источники плазмы. В случае прямого источника плазма генерируется между электродами, один из которых является объектом. В случае непрямого источника плазма сначала генерируется в реакторе, а потом выносится на объект, который может быть как под плавающим, так и под земляным потенциалом [19]. Непрямые источники плазмы также называют иног-

да плазменными струями. Параметры плазменных струй, переносимый заряд и их состав зависят как от параметров самого разряда, напряжения на электродах реактора, скорости прокатки рабочей среды, так и от мишени, на которую замыкается струя, от ее материала, потенциала, от расстояния до мишени [18].

В данной работе проводится оценка заряда, выносимого из плазменного реактора коаксиальной конструкции при его прокатке, где формируется разряд с микрополым катодом, при подаче на электроды плазменного реактора напряжения разной формы, постоянного напряжения и прямоугольных наносекундных импульсов.

Экспериментальные установки

Схема и фотография экспериментальной установки представлена на рис. 1.

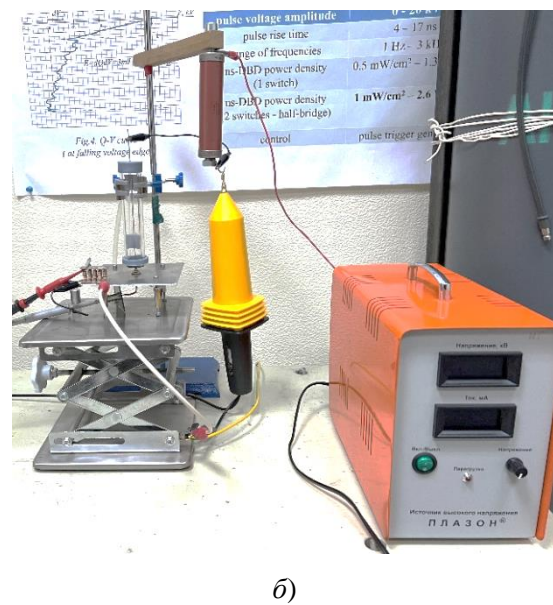
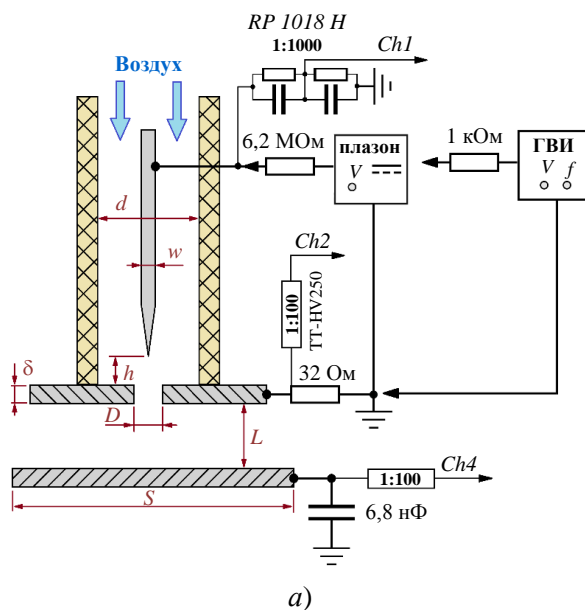


Рис. 1. Схема (а) и фотография (б) экспериментальной установки

В экспериментах использовались 2 разных высоковольтных источника. В первой серии экспериментов использовался генератор высоковольтных импульсов ГВИ, позволяющий получать импульсы положительной полярности амплитудой до 6 кВ, длительностью 600 нс, фронтом 25–30 нс и частотой следования импульсов от 100 Гц до 3 кГц [20]. Во второй серии экспериментов использовался источник постоянного высокого напряжения Плазон ИВНР-30/10 с максимальным напряжением на выходе до 30 кВ и током в

нагрузке до 10 мА. Сам разрядный реактор представлял из себя трубку из кварцевого стекла с внутренним диаметром $d = 24$ мм с расположенной по центру тупоглавой вольфрамовой иглой диаметром $w = 1$ мм, заостренной с одной стороны с радиусом $r \approx 0,2$ мм. Высокое напряжение подавалось с генератора на иглу через токоограничивающий резистор с сопротивлением 1 кОм при питании от ГВИ и 6,2 МОм при питании от Плазона, соответственно. Перпендикулярно игле на расстоянии $h = 1$ мм располагался

плоский электрод с отверстием диаметром $D = 1$ мм, выполненный из никелевой фольги толщиной $\delta = 0,15$ мм. Разряд зажигался между иглой и плоским никелевым электродом, а за счет прокачки воздуха через трубку реактора через отверстие в катоде осуществлялся направленный вынос продуктов разряда. Катод заземлялся через шунт сопротивлением 32 Ом. Напряжение с шунта снималось пробником ТТ-НВ250 с коэффициентом ослабления 100 и подавалось на 2-й канал цифрового запоминающего четырёхканального осциллографа Keysight с полосой пропускания 500 МГц. По падению напряжения на шунте определялся разрядный ток в реакторе. Падение напряжения на реакторе измерялось непосредственно на высоковольтном положительном электроде, игле, через высоковольтный пробник RP 1018 Н с коэффициентом ослабления 1000, сигнал с которого подавался на 1-й канал осциллографа. На расстоянии L от торца реактора располагалась проводящая круглая мишень диаметром $S = 25$ мм. Для определения величины заряда мишень заземлялась через высоковольтный конденсатор КВИ-3 ёмкостью 6800 пФ. Напряжение с измерительной емкости поступало через пробник с коэффициентом ослабления 10 на 4-й канал осциллографа. Расстояние L от катода до мишени варьировалось.

Результаты экспериментов

По результатам осциллографирования напряжения на измерительном конденсаторе были получены зависимости выносимого на мишень заряда от расхода воздуха $Q_{\text{вын}} = f(V)$ при питании реактора постоянным и импульсным напряжением. Изменение расхода воздуха через реактор осуществлялось при помощи компрессора.

Стоит отметить, что в случае питания реактора постоянным напряжением в зависимости от среднего потребляемого тока разряд генерировался в двух режимах, при токах до 1 мА – в режиме самопульсаций, при больших токах – в режиме постоянного горения, что также наблюдалось в работе [21, 22].

Зависимости переносимого заряда при фиксированном расстоянии до мишени для режима самопульсаций и при питании прямоугольными импульсами представлены на

рис. 2. Из полученных зависимостей видно, что при равных расходах воздуха при питании реактора от источника постоянного напряжения величина вынесенного заряда в 5 раз превышает заряд, полученный при питании от источника импульсного напряжения.

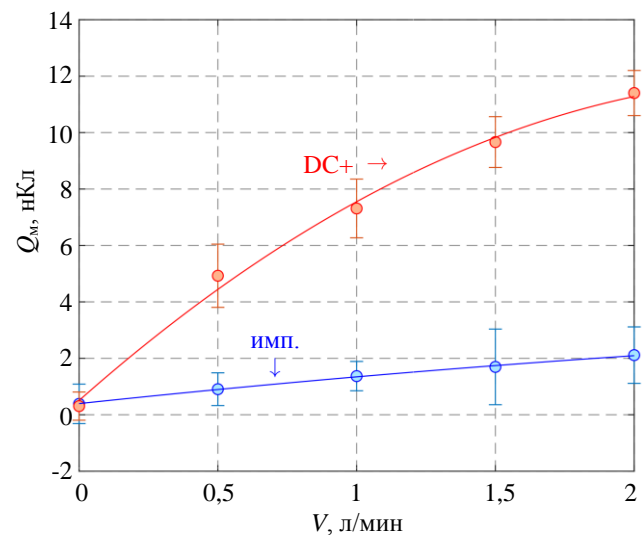


Рис. 2. Зависимости заряда, вынесенного на мишень от расхода воздуха через реактор при импульсном (синяя кривая) и постоянном напряжении положительной полярности (красная кривая) (расстояние до мишени $L = 3$ мм)

Отчасти это связано с различной частотой импульсов разряда. При питании от источника импульсного напряжения частота зажигания разряда в плазменном реакторе определялась частотой работы этого источника (3 кГц), которая более чем в 2 раза ниже частоты самопульсаций (при питании от DC) (рис. 3а). Длительность импульса тока разряда на полувывоте при питании от источника постоянного напряжения составляла порядка 30–40 нс, в то время как при питании от источника импульсного напряжения длительность составила порядка 250 нс. В режиме самопульсаций частота определяется емкостью промежутка [22], что характерно для разряда с микрополым катодом. Кроме того, в режиме самопульсаций форма напряжения на разрядном промежутке имеет пилообразный характер, обусловленный процессом зарядки собственной емкости системы. Во время постепенного нарастания напряжения ионизационные процессы начинаются чуть раньше достижения напряжения зажигания, соответственно, и время наработки заряда больше.

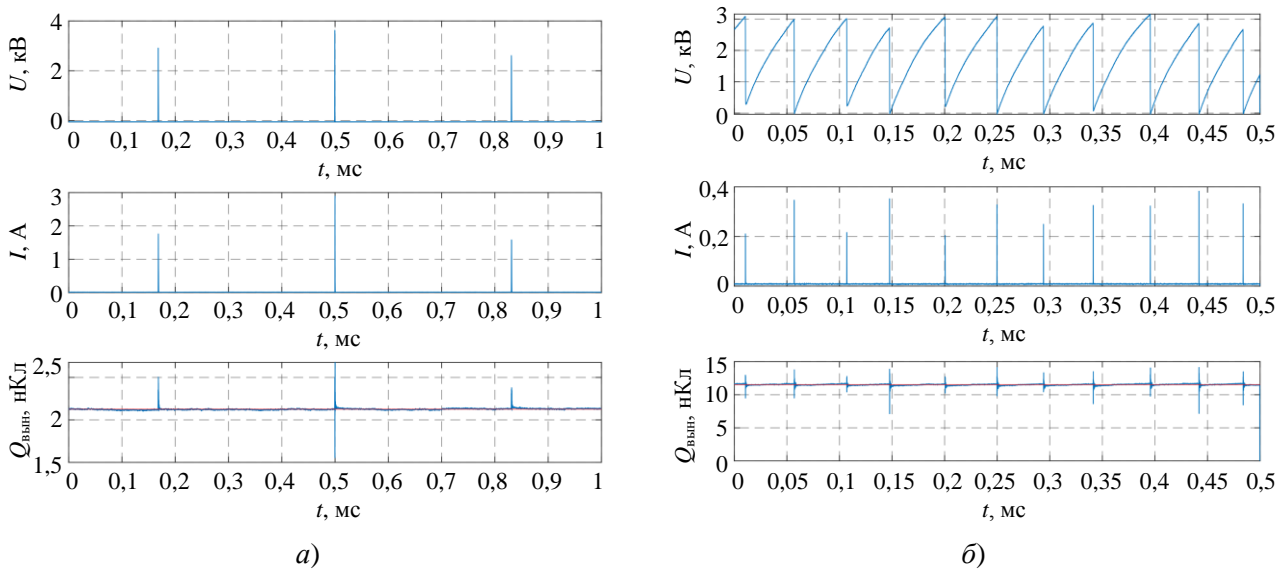


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на разрядном промежутке, тока разряда и заряда выносимого на мишень при расходе воздуха 2 л/мин при питании реактора от: (а) – ГВИ, (б) – Плазона

На основании электростатической полевой картины активной зоны реактора вблизи катода при атмосферном давлении и влажности 30 % была проведена оценка скорости дрейфа положительных ионов азота V^{u+} .

Полевая картина, а также график распределения напряженности поля вдоль кратчайшей силовой линии (линия № 5 снизу) представлены на рис. 4а и рис. 4б, соответственно. Расчет электрического поля выполнен в программе конечно-элементного моделирования BETAFields. В программе используются треугольные конечные элементы высоких порядков (второго и третьего), а вычисление градиентов выполняется с использованием метода SPR gradient recovery

[23]. Расчетная модель учитывала геометрию электродной системы и электрические свойства материалов конструкции реактора. Модель не учитывала объемный заряд.

Так как вблизи поверхности катода напряженность электрического поля достаточно слабая, меньше 1 кВ/мм, подвижность можно считать константой, а скорость дрейфа ионов принять линейно зависящей от напряженности поля. Согласно данным из работы [24] в условиях, соответствующих экспериментальным, значение подвижности положительных ионов азота в воздухе равно $k_{п} = 1,42 \times 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

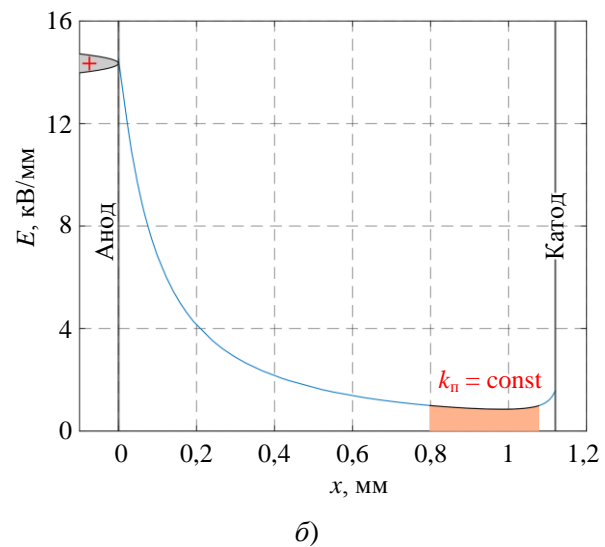
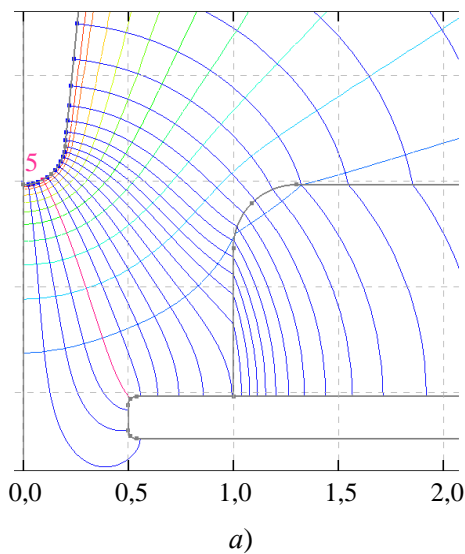


Рис. 4. К оценке скорости дрейфа положительных ионов: (а) – картина распределения электрического поля активной зоны реактора, (б) – график изменения напряженности электрического поля вдоль кратчайшей силовой линии (линия № 5)

При подстановке значений напряженности поля и подвижности ионов характерная скорость дрейфа положительных ионов вблизи поверхности катода составляет порядка 120 м/с, что всего на порядок превышает характерные скорости прокачиваемого газа (42 м/с при расходе 2 л/мин).

Заключение

Была проведена экспериментальная оценка заряда, выносимого из коаксиального плазменного реактора с микрополым катодом. Установлено, что количество заряда напрямую зависит от скорости прокачки газоразрядного промежутка. Установлена разница в количестве заряда при различной форме напряжения на электродах реактора. При питании реактора от источника постоянного напряжения величина вынесенного заряда в 5 раз превышает заряд, полученный при питании от источника импульсного напряжения, что объясняется большим числом актов зажигания разряда за фиксированный интервал времени, а также большей длительностью протекания ионизационных процессов. Но несмотря на эффективность получения заряда при использовании высоковольтного источника постоянного напряжения, использование регулируемого импульсного источника высокого напряжения совместно с регулированием скорости прокачки воздуха через реактор может дать возможность управления динамикой процесса выноса нарабатываемого заряда. Это, в свою очередь, может быть полезно, например, для обеспечения точечного воздействия на обрабатываемые поверхности наиболее чувствительных материалов.

*Работа выполнена при поддержке
Минобрнауки РФ (FFGR-2022-0007)*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Metelmann H. R., von Woedtke T., Weltmann K. D. *Comprehensive Clinical Plasma Medicine*. – Springer, 2018.
2. Lee T., Puligundla P., Mok C. / *Journal of Food Engineering*. 2018. Vol. 223. P. 168–174.
3. Балданов Б. Б., Ранжуров Ц. В. / *Химия высоких энергий*. 2023. Т. 57. № 6. С. 490–494.
4. Анисович А. Г., Филатова И. И. и др. / *Литье и металлургия*. 2019. № 2. С. 85–91.
5. Kostov K. G. et al. / *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 314. P. 367–375.
6. Cheng C., Liye Z., Zhan R. J. / *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. № 24. P. 6659–6665.
7. Lu X., Laroussi M., Puech V. / *Plasma Sources Science and Technology*. 2012. Vol. 21. № 3. P. 034005.
8. Winter J., Brandenburg R., Weltmann K. D. / *Plasma sources science and technology*. 2015. Vol. 24. № 6. P. 064001.
9. Panousis E. et al. / *Plasma Sources Science and Technology*. 2006. Vol. 15. № 4. P. 828.
10. Kuwahara T. et al. / *Thin Solid Films*. 2012. Vol. 523. P. 2–5.
11. Schutze A. et al. / *IEEE transactions on plasma science*. 1998. Vol. 26. № 6. P. 1685–1694.
12. Kogelschatz U. / *Plasma chemistry and plasma processing*. 2003. Vol. 23. № 1. P. 1–46.
13. Takao Y. et al. / *Japanese journal of applied physics*. 2006. Vol. 45. № 10S. P. 8235.
14. Shin J., Tuyen P. D. / *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2011. Vol. 39. № 11. P. 2944–2945.
15. Schoenbach K. H., Becker K. / *The European Physical Journal D*. 2016. Vol. 70. P. 1–22.
16. Bárdos L., Baránková H. / *Thin solid films*. 2010. Vol. 518. № 23. P. 6705–6713.
17. Laroussi M., Akan T. / *Plasma Processes and Polymers*. 2007. Vol. 4. № 9. P. 777–788.
18. Shershunova E. A., Moshkunov S. I., Khomich V. Y. / *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2019. Vol. 47. № 11. P. 4909–4914.
19. Weltmann K. D. et al. / *Pure and Applied Chemistry*. 2010. Vol. 82. № 6. P. 1223–1237.
20. Мошкунов С. И., Хомич В. Ю., Шерцунова Е. А. / *Письма в Журнал технической физики*. 2019. Т. 45. № 3. С. 34–36.
21. Moshkunov S. I., Nebogatkin S. V., Romanov K. I., Shershunova E. A. / *15th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" GDP 2021*. – Ekaterinburg, 2021. P. 76.
22. Мошкунов С. И. и др. / *Прикладная физика*. 2021. № 5. С. 11–15.
23. Лоханин А. К., Ларин В. С., Матвеев Д. А. / *Электричество*. 2005. № 7. С. 82–85.
24. Zhang B., He J., Ji Y. / *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017. Vol. 24. № 2. P. 923–929.

Charge estimation at the output of the micro-hollow cathode discharge

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

Institute for Electrophysics and Electric Power RAS, St.-Petersburg, 191181 Russia

* *E-mail: esherhunova@ieeras.ru*

Received 30.04.2025; revised 29.05.2025; accepted 20.10.2025

In this work, an experimental assessment of the amount of charge carried out from a coaxial plasma reactor with a micro-hollow cathode is carried out depending on the supply voltage and the rate of gas pumping through the active zone of the reactor. It is shown that the amount of charge carried out of the reactor is determined not only by the pumping of the gas discharge gap and the distance to the target, but also by the discharge mode. A comparative analysis of different power supply modes revealed a significant difference in the efficiency of charge generation and transport: under DC high voltage, the extracted charge is five times higher than that obtained in pulsed mode. This difference is attributed to both a higher discharge ignition frequency and longer duration of ionization processes in the continuous regime. At the same time, it has been demonstrated that combining a controllable pulsed high-voltage power supply with adjustable gas flow enables flexible control over the charge extraction dynamics, thereby providing the capability for precise, localized, and dose-controlled plasma treatment.

Keywords: micro-hollow cathode discharge; pumping; charge; discharge mode.

REFERENCES

1. Metelmann H. R., von Woedtker T. and Weltmann K. D., *Comprehensive Clinical Plasma Medicine*. Springer, 2018.
2. Lee T., Puligundla P. and Mok C., *Journal of Food Engineering* **223**, 168–174 (2018).
3. Baldanov B. B. and Ranzhurov Ts. V., *High Energy Chemistry* **57** (6), 527–531 (2023).
4. Anisovich A. G., Filatova I. I. et al., *Lit'ye i metallurgiya*, № 2, 85–91 (2019) [in Russian].
5. Kostov K. G. et al., *Applied Surface Science* **314**, 367–375 (2014).
6. Cheng C., Liye Z. and Zhan R. J., *Surface and Coatings Technology* **200** (24), 6659–6665 (2006).
7. Lu X., Laroussi M. and Puech V., *Plasma Sources Science and Technology* **21** (3), 034005 (2012).
8. Winter J., Brandenburg R. and Weltmann K. D., *Plasma sources science and technology* **24** (6) P. 064001 (2015).
9. Panousis E. et al., *Plasma Sources Science and Technology* **15** (4), 828 (2006).
10. Kuwahara T. et al., *Thin Solid Films* **523**, 2–5 (2012).
11. Schutze A. et al., *IEEE transactions on plasma science* **26** (6), 1685–1694 (1998).
12. Kogelschatz U., *Plasma chemistry and plasma processing* **23** (1), 1–46 (2003).
13. Takao Y. et al., *Japanese journal of applied physics* **45** (10S), 8235 (2006).
14. Shin J. and Tuyen P. D., *IEEE Transactions on Plasma Science* **39** (11), 2944–2945 (2011).
15. Schoenbach K. H. and Becker K., *The European Physical Journal D* **70**, 1–22 (2016).
16. Bárdos L. and Baránková H., *Thin solid films* **518** (23), 6705–6713 (2010).
17. Laroussi M. and Akan T., *Plasma Processes and Polymers* **4** (9), 777–788 (2007).
18. Shershunova E. A., Moshkunov S. I. and Khomich V. Y., *IEEE Transactions on Plasma Science* **47** (11), 4909–4914 (2019).
19. Weltmann K. D. et al., *Pure and Applied Chemistry* **82** (6), 1223–1237 (2010).
20. Moshkunov S. I., Khomich V. Yu. and Shershunova E. A., *Letters to the Journal of Technical Physics* **45** (3), 34–36 (2019) [in Russian].
21. Moshkunov S. I., Nebogatkin S. V., Romanov K. I. and Shershunova E. A. 15th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" GDP 2021, Ekaterinburg, 2021, p. 76.
22. Moshkunov S. I. et al., *Applied Physics*, № 5, 11–15 (2021) [in Russian].
23. Lokhanin A. K., Larin V. S. and Matveev D. A., *Elektrichestvo*, № 7, 82–85 (2005) [in Russian].
24. Zhang B., He J. and Ji Y., *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* **24** (2), 923–929 (2017).

Об авторах

Шершунова Екатерина Александровна, к.т.н., заведующая лабораторией мощной импульсной техники, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, литера А). E-mail: eshershunova@ieeras.ru SPIN-код: 1314-5887, AuthorID: 630856

Небогаткин Сергей Вячеславович, к.т.н., заведующий лабораторией прикладной электрофизики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, литера А). E-mail: snebogatkin@mail.ru SPIN-код: 8374-9520, AuthorID: 172235

Клубков Александр Владимирович, младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, литера А). E-mail: a-klubkov@mail.ru SPIN-код: 4567-5421, AuthorID: 1181434

Романов Кирилл Ильич, инженер, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, литера А). E-mail: kiromanov@ieeras.ru SPIN-код: 2258-4044, AuthorID: 1123274