

Однородное воздействие плазмы импульсного высоковольтного разряда наносекундной длительности на поверхность плоского анода*М. И. Ломаев, В. Ф. Тарасенко*

Приведены результаты экспериментального исследования воздействия на поверхность плоского заземленного электрода плазмы импульсного высоковольтного разряда наносекундной длительности в воздухе атмосферного давления, возбуждаемого в резко неоднородном электрическом поле. Показано, что при относительно больших межэлектродных расстояниях между острым катодом и плоским анодом реализуется диффузный разряд, обеспечивающий однородное воздействие плазмы разряда на поверхность анода.

Ключевые слова: диффузный разряд, искровой разряд, пространственная структура разряда, эрозия электрода.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-5-10

Введение

Низкотемпературная плазма и ее практические применения привлекают в настоящее время значительное внимание исследователей. Спектр применений включает модификацию поверхности материалов, очистку промышленных отходов, биотехнологии и плазменную медицину, катализ, плазменную резку, сварку, плазменное инициирование зажигания и горения, плазменную аэродинамику и другие области современной промышленности, медицины, сельского хозяйства. Данной теме посвящено большое число публикаций, включая монографии и обзоры [1–8]. Использование низкотемпературной плазмы рассматривается в настоящее время также как один из эффективных подходов для снижения заболеваний, вызываемых патогенными вирусами,

включая COVID-19 [9]. Генерация плазмы с помощью электрических разрядов различных типов является наиболее простым и технологичным способом в лабораторных и промышленных условиях [1–4]. Быстрые импульсные разряды со скоростью нарастания напряжения 100 В/нс и выше позволяют формировать плазму с большей плотностью химически активных частиц, что обеспечивает большую эффективность технологий на основе газоразрядной плазмы [10]. С этой точки зрения особый интерес представляют высоковольтные наносекундные разряды в неоднородном электрическом поле, в которых реализуется эффект убегания электронов [11–13]. Это обеспечивает возможность реализации диффузного разряда при повышенном, в том числе атмосферном, давлении газов, и, соответственно, генерации плотной химически активной низкотемпературной плазмы в разрядном промежутке. Механизм формирования, динамика пробоя и основные свойства плазмы разрядов данного типа описаны в работе [14].

Воздействие на анод плазмы высоковольтного разряда в воздухе при атмосферном давлении исследовалось ранее как в импульсном, так и в импульсно-периодическом режимах разряда. В работах [15–20], посвященных

Ломаев Михаил Иванович^{1,2}, в.н.с.

E-mail: Lomaev@loi.hcei.tsc.ru

Тарасенко Виктор Федотович¹, гл.н.с.¹ Институт сильноточной электроники СО РАН.
Россия, 634050, г. Томск, пр. Академический, 2/3.² Национальный исследовательский
Томский государственный университет.
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Статья поступила в редакцию 21 июля 2022 г.

© Ломаев М. И., Тарасенко В. Ф., 2022

исследованию динамики и структуры импульсного искрового разряда, а также воздействия плазмы разряда на заземленный электрод установлено, что вблизи острейшего электрода уже на начальной стадии развития разряда формируются токовые микроканалы диаметром единицы-десятки микрометров, достигающие по мере прохождения промежутка плоского заземленного электрода. На заземленном электроде в зоне воздействия регистрируется эрозионная микроструктура, которая коррелирует со структурой токовых микроканалов. В зоне воздействия обнаружены микрократеры диаметрами от 5 до 35 мкм [20].

Очевидно, что данный режим воздействия нежелателен в тех случаях, когда необходима однородная обработка/модификация поверхности материала. Перспективными с точки зрения достижения однородности обработки поверхности материалов являются импульсные и импульсно-периодические наносекундные разряды в неоднородном электрическом поле, формируемые убегаящими электронами. Как уже было отмечено, в этом случае удастся формировать диффузный разряд при атмосферном давлении, что важно на практике. В работах [19, 21, 22] проведены исследования пространственной структуры диффузного импульсного и импульсно-периодического разряда наносекундной длительности в неоднородном электрическом поле, формируемом в воздухе атмосферного давления, и воздействия плазмы данного разряда на поверхность заземленного электрода. Было обнаружено, что при оптимизации условий возбуждения реализуется диффузная форма разряда. При этом на поверхности заземленного электрода в зависимости от величины межэлектродного промежутка, полярности и амплитуды импульса напряжения яркие пятна могут наблюдаться или отсутствовать. В первом случае в зоне воздействия наблюдается эрозионная микроструктура поверхности заземленного электрода. Во втором случае воздействие плазмы разряда на поверхность заземленного электрода менее интенсивно и анализировалось по состоянию слоя сажи, нанесенной на поверхность заземленного электрода. Оказалось, что на слое сажи после воздействия 10 импульсами наблюдается из-

менение цвета поверхности при отсутствии сплошных повреждений слоя.

Настоящая работа является продолжением [19] и посвящена исследованию однократного воздействия плазмы импульсного высоковольтного разряда наносекундной длительности на состояние поверхности плоского заземленного электрода при различных режимах воздействия.

Техника и условия эксперимента

На рис. 1 приведена блок-схема установки, на которой были проведены эксперименты. В ее состав входили высоковольтный генератор NPG-18/3500N [23] (1), запускавшийся в режиме однократных импульсов, высоковольтный кабель с волновым сопротивлением 75 Ом (2), низкоиндуктивный шунт обратного тока, выполненный из чип-резисторов (3), разрядная камера (4) с электродным блоком из потенциального катода (5) и плоского заземленного анода (6), цифровой фотоаппарат Sony A100 (9), осциллограф TDS MDO3102 (полоса пропускания 1 ГГц, частота дискретизации 5 ГГц) (10), компьютер (11). Длительность фронта, длительность на полувысоте и амплитуда импульсов напряжения в падающей волне составляли ≈ 3 нс, ≈ 6 нс и ≈ 18 кВ, соответственно. Катод был выполнен в виде стального стержня диаметром 6 мм с заостренным концом с углом у вершины $\approx 50^\circ$ и радиусом кривизны вершины $\approx 0,2$ мм. Анодом служила заземленная медная пластинка диаметром 25 мм и толщиной 1 мм. Величина межэлектродного промежутка d варьировалась от 2 до 10 мм. Разряд формировался в межэлектродном промежутке в воздухе атмосферного давления при однократном включении генератора. Для увеличения чувствительности метода автографов (следов воздействия плазмы разряда на анод) на поверхность медной пластинки, обращенную в сторону катода, наносился слой сажи толщиной ≈ 10 мкм [22]. При расчете тока и напряжения на разрядном промежутке использовались сигнал с шунта обратного тока, а также предварительно известная информация о временной форме и амплитуде импульса формируемой генератором (падающей) волны напряжения. Внешний вид разряда регистрировался фотоаппара-

том Sony A100 через боковые окна в разрядной камере (8). Состояние поверхности анода после однократного воздействия на нее

плазмы разряда при различных величинах d определялось с помощью микроскопа ЛОМО МИКМЕД-1.

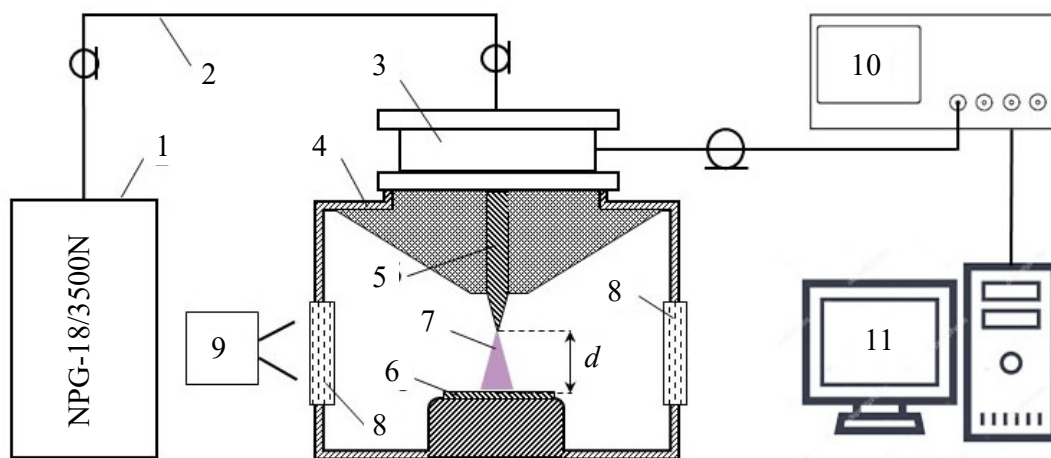


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – генератор NPG-18/3500N; 2 – высоковольтный кабель; 3 – шунт обратного тока; 4 – разрядная камера; 5 – катод; 6 – анод; 7 – зона разряда; 8 – окна камеры; 9 – фотоаппарат Sony A100; 10 – осциллограф TDS MDO3102; 11 – компьютер

Результаты и обсуждение

При проведении экспериментов величина d варьировалась в пределах от 2 до 10 мм, регистрировались осциллограммы импульсов тока с шунта обратного тока, фотографировался внешний вид разряда и следы воздействия плазмы разряда на анод при однократном включении генератора. Энергозапас импульса напряжения в падающей волне, согласно оценке на основе данных о временной форме и амплитуде импульса напряжения, а также волновом сопротивлении высоковольтного кабеля, составлял ≈ 23 мДж. Следует отметить, что вследствие рассогласования газоразрядной нагрузки и цепи питания, на разрядный промежуток помимо первого импульса напряжения поступала серия отраженных импульсов. Согласно оценке, энергоз вклад в плазму разряда от первого импульса напряжения при $d = 6$ мм составляет ≈ 16 мДж. Это указывает на то, что воздействие плазмы разряда на анод происходит преимущественно в течении первого из поступающих на разрядный промежуток импульсов напряжения. При величинах $d \leq 4$ мм наблюдался искровой разряд, вызывавший появление следов воздействия на поверхности как медной пластинки, покрытой слоем сажи, так и на поверхно-

сти пластинки без слоя сажи. Внешний диаметр зоны со следами воздействия, наблюдаемыми с помощью микроскопа, составляет ≈ 5 мм. Диаметр зоны, в пределах которой осуществляется наиболее интенсивное воздействие, приводящее к удалению слоя сажи с поверхности пластинки и появлению на поверхности медной пластинки кратеров диаметром 50–60 мкм, составляет ≈ 1 мм. Частичное удаление слоя сажи с поверхности пластинки в местах токопрохождения в каналах диаметром 20–50 мкм наблюдается в кольцевой зоне с внутренним и внешним диаметрами, соответственно, ≈ 1 и ≈ 2 мм. При $d > 4$ мм реализуется диффузный разряд, характерный вид которого представлен на рис. 2. Интенсивность свечения и амплитуда тока разряда уменьшаются по мере увеличения межэлектродного промежутка. При $d = 10$ мм пробой затруднен и наблюдался примерно в 50 % случаев. Соответственно, при увеличении d интенсивность воздействия плазмы разряда на поверхность анода уменьшается. Как следует из рис. 2, при $d = 6$ мм наличие слоя сажи на поверхности анода вызывает появление анодных пятен, а на поверхности анода без слоя сажи они не возникают. При этом, как видно из рисунка, в обоих случаях реализуется диффузная форма разряда.

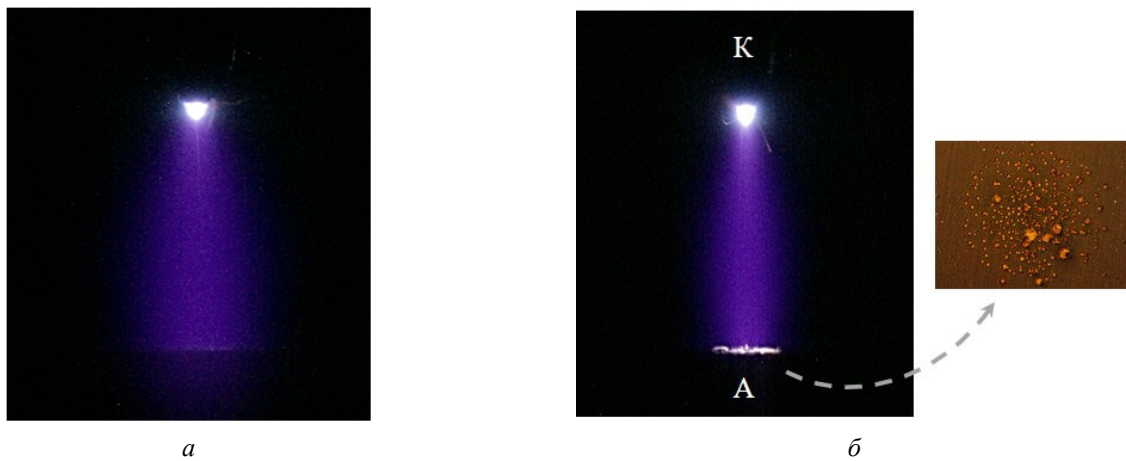


Рис. 2. Внешний вид разряда при $d = 6$ мм в случае анода из медной пластины (а), медной пластинки, покрытой слоем сажи (б); следы воздействия на анод ((б), вставка справа). К – катод, А – анод

При анализе поверхности анода установлено, что на пластинке без слоя сажи следы однократного воздействия визуально не обнаруживаются. В то же время, на поверхности пластинки, покрытой слоем сажи, в зоне наиболее интенсивного воздействия в форме круга диаметром ≈ 2 мм наблюдается удаление слоя сажи с поверхности пластинки в местах токопрохождения в каналах диаметром 20–150 мкм (вставка справа на рис. 2б). В связи с этим, можно предположить, что микроканальная структура разряда в данных условиях может формироваться при приближении волны ионизации непосредственно к поверхности анода, покрытой слоем сажи, или вследствие неустойчивости фронта волны ионизации при ее распространении в промежутке [16–18]. Можно также предположить, что микроканальная структура разряда реализуется также в том случае, когда анодные пятна отсутствуют и при наблюдении сбоку свечение разряда диффузно (рис. 2а). Увеличение d до 8 и 10 мм приводит к ослаблению воздействия плазмы разряда на поверхность анода. При этом анодные пятна не появляются, в том числе на пластинке, покрытой слоем сажи. В зоне воздействия диаметром ≈ 2 мм на слое сажи, покрывающем пластинку, наблюдаются незначительные изменения структуры поверхности слоя без его разрушения. Из этого следует, что режим разряда, реализуемый в однократном импульсе при $d \geq 8$ мм, обеспечивает однородное воздействие плазмы разряда на поверхность анода.

Заключение

Проведено исследование состояния поверхности плоского заземленного электрода при однократном воздействии на него плазмой импульсного высоковольтного разряда наносекундной длительности в воздухе атмосферного давления при различных режимах воздействия. Установлено, что за счет увеличения межэлектродного расстояния до 8–10 мм удается уменьшить интенсивность воздействия и реализовать режим однородной обработки поверхности материала в отдельном импульсе. При межэлектродном расстоянии 4 мм и менее наблюдался искровой разряд, приводивший к формированию на поверхности заземленного электрода эрозионной структуры, состоявшей из совокупности кратеров диаметром единицы-десятки мкм.

Данное исследование выполнено
при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации,
Соглашение № 075-15-2021-1026 от 15.11.2021.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hippler R., Kersten H., Schmidt M., Schoenbach K. H. (Eds.). Low Temperature Plasma. Fundamentals, Technologies, and Techniques. – Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
2. Samukawa S., Hori M., Rauf S., Rauf S., Tachibana K., Bruggeman P. J., Kroesen G., Whitehead J. C.,

- Murphy A. B., Gutsol A. F., Starikovskaia S. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. Vol. 45. P. 253001. doi:10.1088/0022-3727/45/25/253001
3. Chu P. K., Lu XinPei. (Eds.). Low temperature plasma technology. Methods and applications. – London, New York: CRC Press, 2013.
4. Adamovich I., Baalrud S. D., Bogaerts A., Bruggeman P. J., Cappelli M., Colombo V., Czarnetzki U., Ebert U., Eden J. G., Favia P. et al. // J. of Phys. D: Appl. Phys. 2017. Vol. 50. Is. 32. P. 323001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa76f5>
5. Laroussi M., Lu X., Keidar M. // Journal of Applied Physics. 2017. Vol. 122. Is. 2. P. 020901.
6. Weltmann K.-D., Kolb J. F., Holub M., Uhrlandt D., Šimek M., Ostrikov K., Hamaguchi S., Cvelbar U., Černák M., Locke B., Fridman A., Favia P., Becker K. // Plasma processes and polymers. 2019. Vol. 16. Is. 1. P. 1800118. <https://doi.org/10.1002/ppap.201800118>.
7. Lu X. P., Reuter S., Laroussi M., Liu D. W. Nonequilibrium Atmospheric Pressure Plasma Jets: Fundamentals, Diagnostics, and Medical Applications. – CRC Press, 2019.
8. Keidar M., Weltmann K.-D., and Macheret S. // J. Appl. Phys. 2021. Vol. 130. P. 080401. <https://doi.org/10.1063/5.0065750>
9. Mohamed H., Nayak G., Rendine N., Wigdahl B., Krebs F. C., Bruggeman P. J., Miller V. // Frontiers in Physics. 2021. Vol. 9. P. 683118. doi: 10.3389/fphy.2021.683118
10. Brandenburg R., Bruggeman P. J., Starikovskaia S. M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2017. Vol. 26. P. 020201. doi:10.1088/1361-6595/aa5205
11. Babich L. P. High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases: Theory, Experiment and Natural Phenomena. – Arlington, Virginia: Futurepast (ISTS Science and Technology Series, Vol. 2). 2003.
12. Tarasenko V. F. (Ed.) Runaway Electrons Pre-ionized Diffuse Discharges. – New York: Nova Science Publishers, Inc. 2014.
13. Naidis G. V., Tarasenko V. F., Babaeva N. Y., Lomaev M. I. // Plasma Sources Sci. Technol. 2018. Vol. 27. P. 013001. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aaa072>
14. Сорокин Д. А., Белоplotов Д. В., Гришков А. А., Шкляев В. А., Тарасенко В. Ф., Беломытцев С. Я., Ломаев М. И. Высоковольтный наносекундный разряд в неоднородном электрическом поле и его свойства. – Томск: STT, 2020.
15. Буранов С. Н., Горохов В. В., Карелин В. И., Павловский А. И., Ретин П. Б. // Квантовая электроника. 1991. Т. 18. Вып. 7. С. 891.
16. Перминов А. В., Тренькин А. А. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 9. С. 52.
17. Карелин В. И., Тренькин А. А. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 3. С. 29.
18. Алмазова К. И., Белоногов А. Н., Боровков В. В., Горелов Е. В., Морозов И. В., Тренькин А. А., Харитонов С. Ю. // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 6. С. 827.
19. Almazova K. I., Belonogov A. N., Beloplotov D. V., Borovkov V. V., Trenkin A. A., Erofeev M. V., Ripenko V. S., Shulepov M. A., Tarasenko V. F. // Journal of Nanoscience, Nanomedicine & Nanobiology. 2021. Vol. 4. Is. 1. P. 100009.
20. Тренькин А. А. // ЖТФ. 2019. Т. 89. Вып. 2. С. 189.
21. Ерофеев М. В., Бакут Е. Х., Бураченко А. Г., Тарасенко В. Ф. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 9. С. 56.
22. Бакут Е. Х., Блинова О. М., Ерофеев М. В., Карелин В. И., Рипенко В. С., Тарасенко В. Ф., Тренькин А. А., Шибитов Ю. М., Шулепов М. А. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. Вып. 9. С. 859.
23. Коротков С. В., Аристов Ю. В., Козлов А. К., Коротков Д. А., Люблинский А. Г., Спичкин Г. Л. // ПТЭ. 2012. Т. 55. № 5. С. 99.

PACS: 52.80.–s

Homogeneous action of plasma of a nanosecond pulsed high-voltage discharge on the surface of a flat anode

M. I. Lomaev^{1,2} and V. F. Tarasenko¹

¹ Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk, 634055, Russia

² National Research Tomsk State University
36 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: Lomaev@loi.hcei.tsc.ru

Received July 21, 2022

The results of an experimental study of the effect on the surface of a flat-grounded electrode of a plasma of a pulsed high-voltage nanosecond discharge in air at atmospheric pressure, excited in a sharply inhomogeneous electric field, are presented. It is shown that at relatively large

interelectrode distances between the pointed cathode and the flat anode, a diffuse discharge is realized, which ensures a homogeneous action of the discharge plasma on the anode surface.

Keywords: diffuse discharge, spark discharge, spatial structure of the discharge, electrode erosion.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-5-10

REFERENCES

1. R. Hippler, H. Kersten, M. Schmidt, Schoenbach K.H. (Eds.), *Low Temperature Plasma. Fundamentals, Technologies, and Techniques*. (WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, Weinheim, 2008).
2. S. Samukawa, M. Hori, S. Rauf, S. Rauf, K. Tachibana, P. J. Bruggeman, G. Kroesen, J. C. Whitehead, A. B. Murphy, A. F. Gutsol, S. Starikovskaia et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45**, 253001 (2012). doi:10.1088/0022-3727/45/25/253001
3. P. K. Chu and XinPei Lu. (Eds.), *Low temperature plasma technology. Methods and applications*. (CRC Press, London, New York, 2013).
4. I. Adamovich, S. D. Baalrud, A. Bogaerts, P. J. Bruggeman, M. Cappelli, V. Colombo, U. Czarnetzki, U. Ebert, J. G. Eden, P. Favia et al., *J. of Phys. D: Appl. Phys.* **50** (32), 323001 (2017). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa76f5>
5. M. Laroussi, X. Lu, and M. Keidar, *Journal of Applied Physics* **122** (2), 020901 (2017).
6. K.-D. Weltmann, J. F. Kolb, M. Holub, D. Uhrlandt, M. Šimek, K. Ostrikov, S. Hamaguchi, U. Cvelbar, M. Černák, B. Locke, A. Fridman, P. Favia, and K. Becker, *Plasma processes and polymers* **16** (1), 1800118 (2019). <https://doi.org/10.1002/ppap.201800118>
7. X. P. Lu, S. Reuter, M. Laroussi, and D. W. Liu, *Nonequilibrium Atmospheric Pressure Plasma Jets: Fundamentals, Diagnostics, and Medical Applications*. (CRC Press, 2019).
8. M. Keidar, K.-D. Weltmann, and S. Macheret, *J. Appl. Phys.* **130**, 080401 (2021). <https://doi.org/10.1063/5.0065750>
9. H. Mohamed, G. Nayak, N. Rendine, B. Wigdahl, F. C. Krebs, P. J. Bruggeman, and V. Miller, *Frontiers in Physics* **9**, 683118 (2021). doi: 10.3389/fphy.2021.683118
10. R. Brandenburg, P. J. Bruggeman, and S. M. Starikovskaia, *Plasma Sources Sci. Technol.* **26**, 020201 (2017). doi:10.1088/1361-6595/aa5205
11. L. P. Babich, *High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases: Theory, Experiment and Natural Phenomena*. (Arlington, Virginia: Futurepast (ISTS Science and Technology Series, Vol. 2). 2003.
12. V. F. Tarasenko (Ed.), *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges*. (Nova Science Publishers, Inc., New York, 2014).
13. G. V. Naidis, V. F. Tarasenko, N. Y. Babaeva, and M. I. Lomaev, *Plasma Sources Sci. Technol.* **27**, 013001 (2018). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aaa072>
14. D. A. Sorokin, L. V. Beloplotov, A. A. Grishkov, V. A. Shklyayev, V. F. Tarasenko, S. Y. Belomyttsev, and M. I. Lomaev, *High-voltage nanosecond discharge and its properties*. (STT, Tomsk, 2020).
15. S. N. Buranov, V. V. Gorokhov, V. I. Karelin, A. I. Pavlovskii, and P. B. Repin, *Quantum Electron* **21** (7), 806 (1991).
16. A. V. Perminov and A. A. Tren'kin, *Tech. Phys.* **53** (3), 314 (2008).
17. V. I. Karelin and A. A. Tren'kin, *Tech. Phys.* **50** (9), 1158 (2005).
18. K. I. Almazova, A. N. Belonogov, V. V. Borovkov, E. V. Gorelov, I. V. Morozov, A. A. Tren'kin, and S. Yu. Kharitonov, *Tech. Phys.* **63** (6), 801 (2018).
19. K. I. Almazova, A. N. Belonogov, D. V. Beloplotov, V. V. Borovkov, A. A. Trenkin, M. V. Erofeev, V. S. Ripenko, M. A. Shulepov, and V. F. Tarasenko, *Journal of Nanoscience, Nanomedicine & Nanobiology* **4** (1), 100009 (2021).
20. A. A. Trenkin, *Tech. Phys.* **64** (2), 159 (2019).
21. M. V. Erofeev, E. Kh. Bakst, A. G. Burachenko, and V. F. Tarasenko, *Tech. Phys.* **60** (9), 1316 (2015).
22. E. Kh. Bakst, O. M. Blinova, M. V. Erofeev, V. I. Karelin, V. S. Ripenko, V. F. Tarasenko, A. A. Trenkin, Yu. M. Shubitov, and M. A. Shulepov, *Plasma Physics Reports* **42** (9), 876 (2016).
23. S. V. Korotkov, Yu. V. Aristov, A. K. Kozlov, D. A. Korotkov, A. G. Lyublinsky, and G. L. Spichkin, *Instruments and Experimental Techniques* **55** (5), 605 (2012).