

УДК 537.527.9; 537.53
 EDN: ККЕВОХ

PACS: 52.50.Dg

Генерация частиц с электродов, имеющих малые радиусы кривизны, при диффузном разряде атмосферного давления и энергокладе ≈ 1 мДж

В. Ф. Тарасенко, Д. В. Белоплов, Д. А. Сорокин, У. Хин

В воздухе, азоте, аргоне и гелии атмосферного давления исследовано излучение плазмы диффузного разряда, формируемой между двумя электродами с малым радиусом кривизны. При наносекундной длительности импульса напряжения и миджжоульных энергокладах в газ зарегистрированы треки частиц, вылетающих из ярких пятен на электродах, в том числе, под прямым углом к их поверхности. Показано, что в этих условиях длина треков зависит от полярности электрода и, что в воздухе треки заканчиваются более яркой областью свечения. Установлено, что наибольшую интенсивность излучения при разрядах в четырёх различных газах (воздух, азот, аргон и гелий) имеют треки, которые формируются в воздухе. Из этого, а также из зарегистрированной ранее длительности свечения треков в сотни микросекунд, следует, что их излучение в основном определяется нагревом материала электрода в результате взаимодействия с кислородом.

Ключевые слова: треки частиц; воздух; азот; аргон; гелий; диффузный разряд; неоднородное электрическое поле; малые энергоклады.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-6-40-46

Введение

Известно, что в результате пробоя при образовании ярких пятен на электродах за счёт взрывной эмиссии электронов происходит эрозия поверхности электродов [1]. Для вакуумных и газонаполненных промежутков образование кратеров на поверхности катода регистрировалось во многих работах, см.,

например, [1–3] и ссылки в этих публикациях. В промежутках, заполненных различными газами, перед образованием искрового канала при наносекундных разрядах также наблюдались повреждения катода, в том числе имеющие форму кратеров [4–6]. Повреждение поверхности электродов объясняется разогревом микронеоднородностей за счёт увеличения плотности тока в локальных областях до температуры плавления и быстрым (взрывным) испарением этих микронеоднородностей [1]. В результате до образования искрового канала на поверхности электродов с отрицательной полярностью формируется плотная плазма.

В работах [7, 8], посвящённых изучению механизма вакуумного пробоя при высоких напряжённостях электрического поля было установлено, что одной из причин, ограничивающих электрическую прочность вакуумной изоляции является влияние сильного электрического поля на механические свойства поверхности электродов. Расчёты, проведённые в работе [8], показали, что даже в непрогретой области, размер которой значительно превышает размер взрывоэмиссионного центра,

 Тарасенко Виктор Федотович¹, гл.н.с., д.ф.-м.н.

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

 Белоплов Дмитрий Викторович¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

 Сорокин Дмитрий Алексеевич¹, зав. лаб., к.ф.-м.н.

 Xin Yanbin², Senior Researcher.

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634050, г. Томск, просп. Академический, 2/3.

² College of Environmental Science and Engineering,

Dalian Maritime University.

China, 116026, Dalian, 1 Linghai Road.

Статья поступила в редакцию 19.07.2024

После доработки 27.08.2024

Принята к публикации 27.09.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9

 © Тарасенко В. Ф., Белоплов Д.В., Сорокин Д.А.,
 Xin Yanbin, 2024

материал катода также подвергается воздействию разрушающих механических напряжений. В результате первичное появление катодного пятна при разряде в вакууме и образование плазмы у поверхности электрода приводит к множественным локальным разрушениям его относительно ровной поверхности, в том числе на периферии катодного пятна.

На основании экспериментальных и теоретических исследований пробоя в вакууме, описанных авторами статей [7, 8]), в работах [9, 10] было высказано предположение, что подобный механизм разрушающих механических напряжений должен иметь место и при наносекундном пробое в газах между электродами с малым радиусом кривизны. Фотографирование разряда с высоким (до 1,7 мкм) пространственным разрешением показало, что в межэлектродном промежутке как при искровом, так и при диффузном разрядах, появляются тонкие светящиеся треки (ТСТ) частиц, которые движутся по разнообразным траекториям. Съёмка с помощью высокочувствительной ICCD камеры позволила установить, что частицы на минимальном удалении от электродов фиксируются с задержкой более 1 мкс, а их скорость зависит от их размеров и составляет ~ 40 м/с [9–11]. Данная скорость существенно меньше скорости разлета плазмы при взрывной эмиссии в вакууме (20 км/с), а

также скорости струи жидкого металла у катода (0,4 км/с) [12].

Результаты, полученные в работах [9–11] вызвали большой интерес и показали необходимость продолжения исследований условий появления ТСТ с электродов. Внимание к наблюдению треков связано с отсутствием данных о регистрации ТСТ при наносекундных диффузных разрядах в неоднородном электрическом поле, см., например, [13–17]. Отметим, что при искровом разряде в ряде работ сообщалось о наблюдении разлета частиц с электродов [18], а также о получении частиц малого размера [19]. Кроме того, в работе [20] было показано, что эрозия острия наблюдается при коронном разряде во время генерации серии импульсов Тричела.

Цель данной работы – в условиях диффузного разряда в воздухе, азоте, аргоне и гелии, формируемого при малых энерговкладах, исследовать возможность появления треков и их форму.

Установка и методики

Исследования проводились на установке, подобной описанной в работах [9–11]. Схематичное изображение установки показано на рисунке 1а.

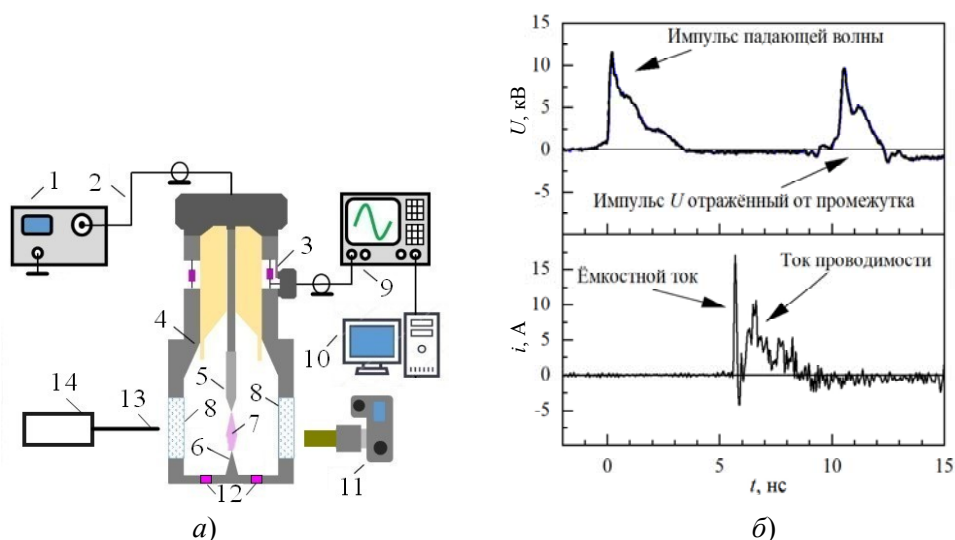


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и осциллограммы импульсов падающей и отражённой волны напряжения U , а также тока i через промежуток (б). 1 – импульсный генератор ГИН-10; 2 – высоковольтный кабель; 3 – шунт прямого и обратного тока; 4 – разрядная камера с передающей линией; 5 и 6 – электроды с малым радиусом кривизны; 7 – плазма разряда; 8 – кварцевые окна; 9 – осциллограф; 10 – компьютер; 11 – камера с микроскопом; 12 – шунт из SMD-резисторов; 13 – световод; 14 – спектрометр

Импульсы напряжения от генератора 1 [21] по коаксиальному кабелю 2 подавались на вход передающей линии разрядной камеры 4. Они имели положительную полярность, длительность на полувысоте $\tau_{0,5} \approx 1$ нс (рис. 1б) и фронт $\tau_{0,1-0,9} \approx 0,7$ нс. Амплитуда падающей волны напряжения U в передающей линии составляла 11,6 кВ. Энергия в импульсе не превышала 1,2 мДж. В режиме холостого хода напряжение на промежутке удваивалась.

Волновое сопротивление передающей линии с встроенным шунтом 3 равнялось 75 Ом. Этот шунт, сопротивление которого составляло 8,7 мОм, позволял регистрировать падающую на промежуток и отражённую от него волны напряжения, а также импульсы напряжения, отражённые от генератора. Ток через промежуток измерялся токовым шунтом 12, собранным из тонкоплёночных SMD-резисторов (Vishay Intertechnology), который устанавливался у заземлённого электрода. Сопротивление шунта составляло 30 мОм. Излучательные характеристики наносекундного разряда регистрировались из области между электродами 5 и 6, которые изготавливались из отрезков швейных игл с диаметром у основания 0,75 мм. Длина игл равнялась $\approx 5,5$ мм, а радиусы скругления ≈ 35 мкм. В связи с малой энергией в импульсе напряжения генератора ГИН-10 форма электродов существенно не изменялась от импульса к импульсу. Межэлектродный зазор равнялся 4 мм. Из-за отсутствия согласования импедансов газоразрядной нагрузки, генератора и передающей линии, импульсы напряжения испытывали отражения от промежутка и от генератора. В результате импульсы напряжения, отражённые от генератора, возвращались на промежуток каждые 22 нс с противоположной полярностью. Подробно подобные режимы описаны в работах [9–11]. Однако основная часть энергии вкладывалась в плазму разряда 7 во время прихода на промежуток первого импульса напряжения от генератора.

Сигналы с шунтов записывались осциллографом 9 Tektronix MSO64B (8 ГГц, частота дискретизации 20 выборок/нс). Для съёмки свечения плазмы разряда использовался зеркальный фотоаппарат 11 Canon EOS 2000D (число пикселей 24,7 Мп, размер матрицы

22,3×14,9 мм, размер пикселя 3,72 мкм), который оснащён длиннофокусным микроскопом K2 DistaMax (Infinity Photo-Optical Company) с объективом CF-3. Микроскоп в данной конфигурации обеспечивал увеличение 3,56 с предельным разрешением 1,7 мкм. Длительность экспозиции фотоаппарата обычно составляла 0,5 с, а чувствительность 40000 ISO. Для регистрации спектров излучения применялся спектрометр HR2000+ES 14 со световодом 13 (диапазон 200–1150 нм; оптическое разрешение $\approx 0,9$ нм) с известной спектральной чувствительностью. Разрядная камера 4 имела два боковых окна 8 из КУ-1. Фотографирование разряда и измерение спектров излучения проводились в отсутствие постороннего освещения.

Газоразрядная камера откачивалась форвакуумным насосом и заполнялась атмосферным воздухом с относительной влажностью 23 %, или азотом, или аргоном, или гелием. Исследования проводились при давлении ≈ 760 Торр.

Результаты измерений и их обсуждение

Исследования свечения разряда в воздухе и азоте, а также в аргоне и гелии, были проведены при малых энерговкладах, которые определялись короткой длительностью импульса напряжения (≈ 1 нс на полувысоте) и его амплитудой ($\approx 11,6$ кВ в падающей волне). Эти энерговклады были в 5 раз и более меньше чем используемые ранее в работах [9–11]. При давлении 760 Торр пробой промежутка обычно наблюдался при напряжении на промежутке близком к максимальному. В таком режиме на осциллограмме тока через промежуток во время нарастания импульса напряжения стабильно регистрировался пик ёмкостного тока, который превышал по амплитуде ток проводимости, рисунок 1б. Энергия, вкладываемая в газ в первом импульсе напряжения от генератора, в воздухе составляла около 0,5 мДж и незначительно (≈ 10 %) изменялась от импульса к импульсу.

Как известно, до пробоя газонаполненного промежутка реализуется режим холостого хода, а при развитии ионизационных процессов в газе сопротивление разрядной плазмы уменьшается. При формировании диффузного

разряда и оптимальном напряжении на промежутке, может на некоторое время реализоваться согласованный режим, при котором сопротивление плазмы в промежутке равняется сопротивлению передающей линии генератора. Однако при наносекундной длительности импульса напряжения, процесс согласованного ввода энергии обычно занимает только часть длительности импульса напряжения. По этим причинам достичь полного согласования сопротивления разрядной плазмы и генератора ГИН-10 невозможно. На рисунке 1б для давления атмосферного воздуха 760 Торр приведены осциллограммы импульсов напряжения и тока между электродами 5 и 6, который состоял из ёмкостного тока и тока проводимости.

Фотографии промежутка и свечения разрядной плазмы в воздухе и азоте в условиях появления треков приведены на рисунке 2.

На рисунке 2а показана фотография промежутка, на который импульс напряжения

был подан, но пробой отсутствовал вследствие короткой длительности импульса напряжения и малой его амплитуды. Даже при максимальной яркости изображения свечение на электродах отсутствовало. Такой режим легче всего было реализовать при заполнении камеры аргоном, но его вероятность составляла менее 10 %.

Режим разряда с формированием диффузного разряда и ТСТ в воздухе показан на рисунке 2б. У обоих электродов видны треки, причём, ТСТ с наибольшей длиной регистрировались у заземлённого электрода, который при приходе на промежуток первого импульса напряжения имел отрицательную полярность. Особенностью свечения треков в воздухе при малых энерговкладах в газ являлась максимальная интенсивность у их окончания. При высоких энерговкладах, см. работы [9–11] большинство треков имели примерно одинаковую яркость свечения по их длине.

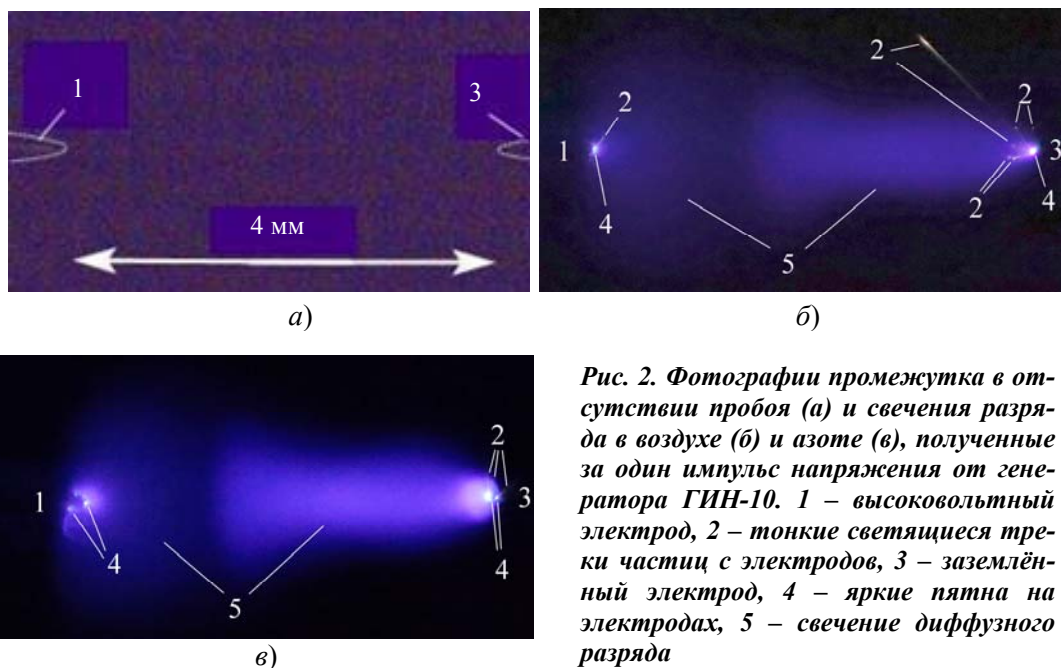


Рис. 2. Фотографии промежутка в отсутствие пробоя (а) и свечения разряда в воздухе (б) и азоте (в), полученные за один импульс напряжения от генератора ГИН-10. 1 – высоковольтный электрод, 2 – тонкие светящиеся треки частиц с электродов, 3 – заземлённый электрод, 4 – яркие пятна на электродах, 5 – свечение диффузного разряда

При разряде в азоте, рисунка 2в, а также в гелии, в отличие от разряда в воздухе, интенсивность излучения треков была максимальна у ярких пятен на электродах и медленно уменьшалась при удалении от них. Причём, ТСТ в азоте имели большую яркость свечения, чем в гелии, но меньшую, чем в воздухе. В аргоне с генератором ГИН-10 и при межэлектродным зазоре 4 мм зарегистрировать треки частиц не удалось, хотя они наблюда-

лись при более высоких энерговкладах, а также при уменьшении давления в работе [9].

В спектрах излучения, полученных при диффузном разряде в воздухе и азоте, как и следовало ожидать (см. работы [6, 9]), доминировали полосы второй (2+) положительной систем молекулярного азота, что обусловлено высокой напряжённостью электрического поля при пробое за счёт субнаносекундной длительности фронта импульса напряжения.

Спектральная плотность энергии излучения основных полос 2+ системы азота была на порядок больше, чем у полос первой положительной (1+) системы. Спектры излучения ярких пятен на электродах и треков зарегистрировать в этих условиях не удалось. Трудности регистрации спектров излучения треков можно объяснить их тепловой природой, соответственно, большой шириной спектров излучения ТСТ. Излучение треков, которое происходит при разлёте частиц с электродов, также может определять высокая температура ярких пятен на электродах. Эти пятна, как известно, образуются за счёт взрывной эмиссии электронов [1]. Из полученных данных следует, что оба процесса имеют место. В азоте (рис. 2а) и гелии яркость треков при удалении уменьшалась, а в воздухе она была максимальной у окончания треков (рис. 2б). Кроме того, частицы электродов могут нагреваться при столкновениях с молекулами и атомами газа, но этот процесс менее эффективен.

Проведённые исследования поддерживают гипотезу, выдвинутую в работах [9, 10]. Наблюдаемые треки – это следы горячих частиц металла, которые вылетают из поверхности электродов в области её контакта с плотной плазмой. Первоначально плазма создаётся при разогреве и тепловом взрыве микроненородностей за счет увеличения плотности тока в этих местах. Созданная плазма усиливает электрическое поле на поверхности электродов. С использованием малых энергокладов было установлено, что треки имеют большую длину при их иницировании с электрода имеющего отрицательную полярность. Хотя в данных экспериментах наибольшая напряжённость электрического поля достигалась на высоковольтном электроде при приходе первого импульса от генератора. Заземлённый электрод был окружён стенками разрядной камеры, которые ослабляли электрическое поле у острия б, см. рисунок 1а. Однако треки в основном генерировались с этого электрода и распространялись на большие расстояния.

Заключение

В данной работе исследовано формирование тонких светящихся треков в промежутке с электродами, имеющими малый радиус

кривизны, при диффузном разряде в воздухе, азоте, аргоне, гелии и малых энергокладах в газ. Установлено, что ТСТ формируются преимущественно с электрода отрицательной полярности и их длина при уменьшении энергокладов в плазму разряда становится короче. Показано, что наибольшую яркость в воздухе имеют окончания треков, что можно объяснить их дополнительным разогревом при окислении частиц, которые стартуют с электродов. В азоте и гелии интенсивность излучения треков максимальна у ярких пятен на электродах и уменьшается с удалением от них, что свидетельствует об уменьшении температуры частиц, образующих треки.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН по теме № FWRM-2021-0014.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mesyats G. A. Explosive Electron Emission. – Ekaterinburg, URO-Press, 1998.
2. Beilis I. Plasma and Spot Phenomena in Electrical Arcs. – Switzerland, Springer Nature, 2020.
3. Korsbäck A., Djurabekova F., Wuensch W. / AIP Advances. 2022. Vol. 12. Art. № 115317.
4. Королев Ю. Д., Кузьмин В. А., Месяц Г. А. / ЖТФ. 1980. Т. 50. № 4. С. 699–704.
5. Almazova K. I., Belonogov A. N., Borovkov V. V., Khalikova Z. R., Ragimkhanov G. B., Tereshonok D. V., Trenkin A. A. / Plasma Sources Sci. Technol. 2021. Vol. 30. Art. № 095020.
6. Lomaev M., Tarasenko V., Shulepov M., Beloplotov D., Sorokin D. / Surfaces. 2023. Vol. 6. № 1. P. 40–52.
7. Нефёдов Е. В., Онищенко С. А., Батраков А. В. / Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 7. С. 31–38.
8. Нефёдов Е., Онищенко С. / Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48. № 22. С. 33–35.
9. Tarasenko V. F., Beloplotov D. V., Panchenko A. N., Sorokin D. A. / Surfaces. 2023. Vol. 6. № 2. P. 214–226.
10. Тарасенко В. Ф., Белоплотов Д. В., Ломаев М. И., Панченко А. Н., Сорокин Д. А. / Успехи прикладной физики. 2023. Т. 11. № 4. С. 312–319.
11. Tarasenko V. F., Beloplotov D. V., Panchenko A. N., Sorokin D. A. / Plasma Sci. Technol. 2024. Vol. 26. Art. № 094003.
12. Месяц Г. А. Эктонны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. – М.: Наука, 2000.
13. Tardiveau P., Moreau N., Bentaleb S., Postel C., Pasquiers S. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. Art. № 175202.
14. Pai D. Z., Lacoste D. A., Laux C. O. / Plasma Sources Sci. Technol. 2010. Vol. 19. Art. № 065015.
15. Starikovskiy A. / IEEE Trans. on Plasma Sci. 2011. Vol. 39. P. 2602–2603.

16. Xin Y., Wang Q., Sun J., Sun B. *Applied Energy*. 2022. Vol. 325. Art. № 119892.
17. Zhang B., Zhu Y., Zhang X., Popov N., Orrière T., Pai D. Z., Starikovskaia S. M. / *Plasma Sources Sci. and Technol.* 2023. Vol. 32. Art. № 115014.
18. Roth C., Ferron G. A., Karg E., Lentner B., Schumann G., Takenaka S., Heyder J. / *Aerosol Science and Technol.* 2004. Vol. 38. № 3. P. 228–235.
19. Tabrizi N. S., Ullmann M., Vons V. A., Lafont U., Schmidt-Ott A. / *J. of Nanoparticle Research*. 2009. Vol. 11. P. 315–332.
20. Асиновский Э. И., Петров А. А., Самойлов И. С. / *Письма в ЖЭТФ*. 2007. Т. 86. № 5–6. С. 354–356.
21. Efanov V. M., Efanov M. V., Komashko A. V., Kriklenko A. V., Yarin P. M., Zazoulin S. V. *Ultra-wideband, short pulse electromagnetics 9*. – New York: Springer-Verlag, 2010.

PACS: 52.80.Hc

Generation of particles from electrodes with a small radius of curvature in a diffuse discharge of atmospheric pressure at the energy input of ≈ 1 mJ

V. F. Tarasenko¹, D. V. Beloplotov¹, D. A. Sorokin¹ and Y. Xin²

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

²College of Environmental Science and Engineering, Dalian Maritime University
1 Linghai Road, Dalian, 116026, China

Received 19.07.2024; revised 27.08.2024; accepted 27.09.2024

In air, nitrogen, argon and helium at atmospheric pressure, the radiation of a diffuse discharge plasma formed between two electrodes with a small radius of curvature was studied. With a nanosecond voltage pulse duration and energy input into the gas ≈ 1 mJ, tracks of particles escaping from bright spots on the electrodes, including transverse to their surface, were recorded. It has been established that under these conditions the length of the tracks depends on the polarity of the electrode and that in the air the particle tracks end in a bright glow region. It has been shown that the highest brightness of radiation during discharges in four gases is found in tracks that were formed in air. From this, as well as from the observed glow duration of the tracks of hundreds of microseconds, it follows that their emission is mainly determined by the heating of the electrode material as a result of interaction with oxygen.

Keywords: particle tracks; air; nitrogen; argon; helium; diffuse discharge; inhomogeneous electric field; low energy inputs.

REFERENCES

- Mesyats G. A., *Explosive Electron Emission*, Ekaterinburg, URO-Press, 1998.
- Beilis I., *Plasma and Spot Phenomena in Electrical Arcs*, Switzerland, Springer Nature, 2020.
- Korsbäck A., Djurabekova F. and Wuensch W., *AIP Advances* **12**, 115317 (2022).
- Korolev I. D., Kuzmin V. A. and Mesiats G. A., *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki* **50**, 699–704 (1980) [in Russian].
- Almazova K. I., Belonogov A. N., Borovkov V. V., Khalikova Z. R., Ragimkhanov G. B., Tereshonok D. V. and Trenkin A. A., *Plasma Sources Sci. Technol.* **30**, 095020 (2021).
- Lomaev M., Tarasenko V., Shulepov M., Beloplotov D. and Sorokin D., *Surfaces* **6** (1), 40–52 (2023).
- Nefedtsev E. V., Onischenko S. A. and Batrakov A. V., *Russian Physics Journal* **62**, 1130–1138 (2019).
- Nefedtsev E. V. and Onischenko S. A., *Tech. Phys. Lett.* **48**, 69–71 (2022).
- Tarasenko V. F., Beloplotov D. V., Panchenko A. N. and Sorokin D. A., *Surfaces* **6** (2), 214–226 (2023).

10. Tarasenko V. F., Beloplotov D. V., Lomaev M. I., Panchenko A. N. and Sorokin D. A., *Advances in Applied Physics* **11** (4), 312–319 (2023) [in Russian].
11. Tarasenko V. F., Beloplotov D. V., Panchenko A. N. and Sorokin D. A., *Plasma Sci. Technol.* **26**, 094003 (2024).
12. Mesyats G. A., *Ectons in a vacuum discharge: breakdown, spark, arc*, Moscow, Nauka, 2000 [in Russian].
13. Tardiveau P., Moreau N., Bentaleb S., Postel C. and Pasquiers S., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42**, 175202 (2009).
14. Pai D. Z., Lacoste D. A. and Laux C. O., *Plasma Sources Sci. Technol.* **19**, 065015 (2010).
15. Starikovskiy A., *IEEE Trans. on Plasma Sci.* **39**, 2602–2603 (2011).
16. Xin Y., Wang Q., Sun J. and Sun B., *Applied Energy* **325**, 119892 (2022).
17. Zhang B., Zhu Y., Zhang X., Popov N., Orrière T., Pai D. Z. and Starikovskaia S. M., *Plasma Sources Sci. and Technol.* **32**, 115014 (2023).
18. Roth C., Ferron G. A., Karg E., Lentner B., Schumann G., Takenaka S. and Heyder J., *Aerosol Science and Technol.* **38** (3), 228–235 (2004).
19. Tabrizi N. S., Ullmann M., Vons V. A., Lafont U. and Schmidt-Ott A., *J. of Nanoparticle Research* **11**, 315–332 (2009).
20. Asinovskii É. I., Petrov A. A. and Samoylov I. S., *JETP Letters* **86**, 302–303 (2007).
21. Efanov V. M., Efanov M. V., Komashko A. V., Kriklenko A. V., Yarin P. M. and Zazoulin S. V., *Ultra-wideband, short pulse electromagnetics 9*, New York, Springer-Verlag, 2010.