

04

Пучок убегающих электронов, инициируемый плазмой емкостного разряда при давлении воздуха 0.4 и 1 Torr

© Е.Х. Бакшт, В.Ф. Тарасенко, Н.П. Виноградов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия
E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 15 октября 2024 г.

В окончательной редакции 14 ноября 2024 г.

Принято к публикации 15 ноября 2024 г.

При формировании плазменных диффузных струй, инициируемых плазмой емкостного разряда в воздухе низкого давления, с помощью коллектора зарегистрирован пучок убегающих электронов. Установлено, что пучок опережает фронт плазменной диффузной струи. Показано, что амплитуда тока пучка в импульсно-периодическом режиме возрастает с увеличением частоты следования импульсов.

Ключевые слова: пучок убегающих электронов, воздух низкого давления, емкостной разряд, плазменные диффузные струи.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.06.59928.20152

Последние тридцать лет большое внимание уделяется изучению атмосферных разрядов в стратосфере и мезосфере, которые отличаются большим разнообразием форм [1,2]. Одна из разновидностей таких разрядов — это столбчатые красные спрайты (СКС), фотографии которых приведены во многих работах (см., например, [3,4]). СКС инициируются на высоте около 75 km над уровнем моря и распространяются вначале к поверхности Земли. В работах [5,6] высказывалось предположение, что на формирование высотных атмосферных разрядов существенное влияние оказывают убегающие электроны (УЭ). Интенсивное рентгеновское и гамма-излучение при атмосферных разрядах на высоте 30 km и менее было обнаружено в работе [7] и подтверждено во многих публикациях (см., например, работы [8,9]). Однако результаты с прямыми измерениями тормозного рентгеновского и гамма-излучения или пучков УЭ, вызывающих это излучение из плазмы СКС, в настоящее время отсутствуют. Зарегистрировать пучки убегающих электронов и тормозное рентгеновское излучение при их взаимодействии с частицами воздуха при высотных разрядах весьма сложно. Это, в частности, обусловлено нестабильностью времени и места появления красных спрайтов, а также наличием рентгеновского и гамма-излучения из грозных разрядов на более низких высотах [7–10].

Следует отметить, что при подаче импульсов высокого напряжения рентгеновское излучение и пучок убегающих электронов (ПУЭ) во время наносекундных разрядов в длинных трубках, заполненных газами низкого давления, в том числе воздухом, были зарегистрированы в ряде работ (см., например, [11–13]). Однако в этих публикациях УЭ инициировались из плазмы, контактирующей с катодом из металла, и цвет разряда не сравнивался с цветом СКС.

В наших предыдущих работах [14–16] были описаны плазменные диффузные струи (ПДС) красного цвета, являющиеся лабораторными аналогами столбчатых красных спрайтов. ПДС состояли из стримеров [16] и имели спектры излучения и параметры плазмы, подобные регистрируемым в СКС. Кроме того, ПДС инициировались плазмой импульсно-периодического емкостного разряда, не имеющей контакта с металлическими электродами.

Цель настоящей работы — показать, что при емкостном импульсно-периодическом разряде в воздухе низкого давления пучки убегающих электронов могут генерироваться из плазмы, которая не имеет контакта с металлическими электродами.

Исследования проводились на модернизированной установке, которая использовалась для изучения свойств ПДС в работах [14–16]. Для регистрации тока пучка убегающих электронов в настоящей работе на правом торце кварцевой трубки был установлен коллектор, позволяющий осуществлять прямую регистрацию пучка убегающих электронов. Кроме того, использован генератор с более высоким напряжением. Схема установки и фотография ее основной части приведены на рис. 1, *a* и *b*.

ПДС формировались при подаче импульсов напряжения отрицательной полярности от генератора NPG-18/3500N с сопротивлением передающей линии 75 Ω, амплитуда которых в падающей волне составляла 12–18 kV при длительности на полувысоте ~ 6 ns и длительности фронта ~ 3 ns. Частота их следования f равна 8.6, 62 или 1980 Hz. Импульсы напряжения подавались на электроды 2 и 3, установленные на расстоянии 6 cm, по кабелю длиной 3.85 m. Высоковольтный вывод генератора соединялся либо с электродом 3 (рис. 1, *a* и *c*), либо с электродом 2 (рис. 1, *b*). В ряде экспериментов к электродам 2–3 подключалось согласующее сопротивление величиной 75 Ω. Это позволяло

уменьшить электромагнитные наводки и регистрировать ток разряда, но вдвое уменьшало напряжение, подаваемое на электроды 2–3. Кроме того, при наличии согласующего сопротивления отсутствовал второй импульс напряжения, который формировался за счет отражений от промежутка между электродами 2–3 и генератора. Кварцевая трубка заполнялась лабораторным воздухом с относительной влажностью $\sim 43\%$. Основные измерения были проведены при температуре $\sim 25^\circ\text{C}$ и давлениях 0.4 или 1 Торг.

Для измерения напряжения между высоковольтным и заземленными кольцевыми электродами применялся пробник ТТ-НВП 2739 с полосой пропускания 220 МГц. Разрядный ток в цепи генератора и плазмы емкостного разряда регистрировался шунтом с сопротивлением $0.1\ \Omega$, собранным из резисторов марки ТВО. Фотографирование разряда осуществлялось фотоаппаратом Canon 2000D. Спектры излучения в области 200–1000 нм записывались спектрометром HR2000+ES (диапазон 200–1150 нм; оптическое разрешение $\sim 0.9\ \text{nm}$) с известной спектральной чувствительностью. Временные характеристики излучения определялись кремниевым ФЭУ (SiPM) в составе модуля MicroFC-SMA-10035 с временем нарастания переходной характеристики 0.3 нс. Импульсы тока пучка регистрировались коллектором с временным разрешением $\sim 100\ \text{ps}$ [17]. Электрические сигналы с делителя, шунта, коллектора и SiPM подавались на осциллограф MDO 3104 корпорации Tektronix (1 ГГц, частота дискретизации 5 GS/s). Фотографирование разряда проводилось в отсутствие внешнего освещения.

Проведенные измерения подтвердили, что при подаче импульсов напряжения на внешние кольцевые электроды в трубке формируются плазменные диффузные струи, которые распространяются в обе стороны от области их инициирования (рис. 1, *c*). Длина ПДС увеличивалась при уменьшении давления, а также при увеличении амплитуды импульса напряжения. С генератором NPG-18/2000N цвет струй несколько изменялся относительно цвета ПДС с генератором G2, который формировал импульсы напряжения с амплитудой $\sim 7\ \text{kV}$ при длительности на полувысоте $\sim 2\ \mu\text{s}$ и фронте 350 нс [14]. При повышении давления цвет разряда приобретал голубой оттенок, что обусловлено увеличением вклада второй положительной ($2+$) и первой отрицательной ($1-$) систем полос молекулы и иона азота соответственно. Красный цвет излучения плазмы разряда определялся полосами первой положительной ($1+$) системы молекулы азота. Длина ПДС при давлениях воздуха 0.4 и 1 Торг была значительно больше расстояния (13 см) от правой кромки кольцевого электрода 3 до сетки коллектора 7, и фронт их свечения в экспериментах по измерению ПУЭ достигал обоих торцов кварцевой трубки.

С генератором NPG-18/3500N пучок УЭ регистрировался в широких диапазонах давлений воздуха и напряжений на электродах 2–3. Его амплитуда возрастала с

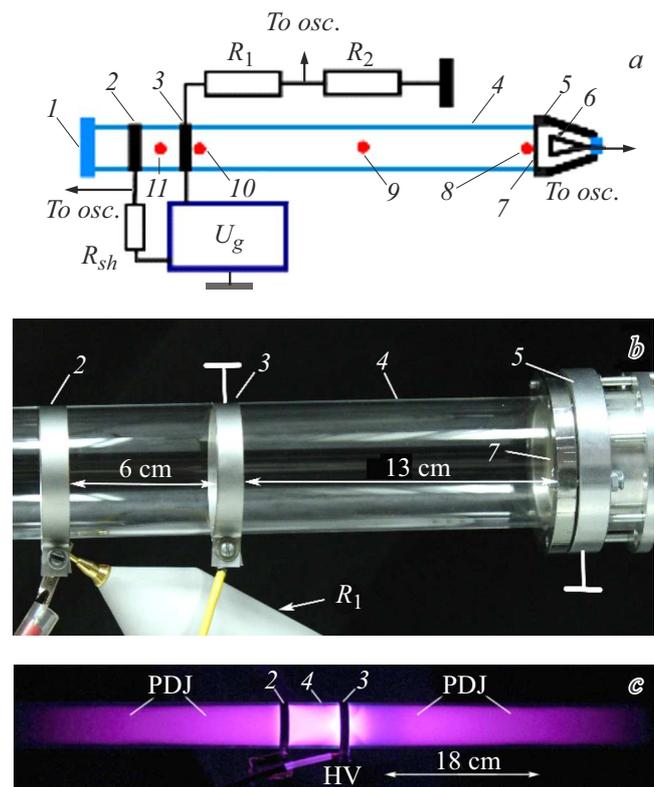


Рис. 1. *a* — схема установки; *b* — фотография основной части установки; *c* — фотография свечения разряда в кварцевой трубке длиной 100 см с электродами, расположенными в ее центральной части. 1 — левый торцевой фланец из капролона, 2 и 3 — внешние кольцевые электроды шириной 1 см из фольги толщиной $100\ \mu\text{m}$, 4 — кварцевая трубка с внутренним диаметром 5 см и толщиной стенки $2.5\ \text{mm}$, 5 — корпус коллектора, 6 — приемная часть коллектора диаметром 2 см, 7 — сетка из никеля толщиной $140\ \mu\text{m}$ с прозрачностью по свету $\sim 20\%$ и размером ячеек не более $70 \times 70\ \mu\text{m}$ (это обеспечивало экранировку динамического емкостного тока [18]), 8–11 — области разряда, из которых излучение по световоду подавалось на кремниевый ФЭУ (SiPM). R_1 и R_2 — сопротивления делителя напряжения ТТ-НВП 2739, R_{sh} — сопротивление шунта, равное $0.1\ \Omega$, U_g — импульсный генератор NPG-18/2000N отрицательной полярности. PDJ — плазменные диффузные струи.

увеличением частоты f . Импульсы ПУЭ, напряжения на промежутке и тока разряда с шунта показаны на рис. 2.

Пучок убегających электронов измерялся при суммарном временном разрешении системы регистрации не хуже $0.9\ \text{ns}$. Максимум амплитуды тока регистрировался с задержкой относительно максимума импульса напряжения $\Delta t \approx 5.6\ \text{ns}$. Это связано со временем пролета электронов от приэлектродной области, в которой они набирают основную энергию, до коллектора. Изменение положения высоковольтного электрода относительно коллектора не влияло на генерацию тока пучка. При расположении заземленного кольцевого электрода между высоковольтным электродом и заземленным кол-

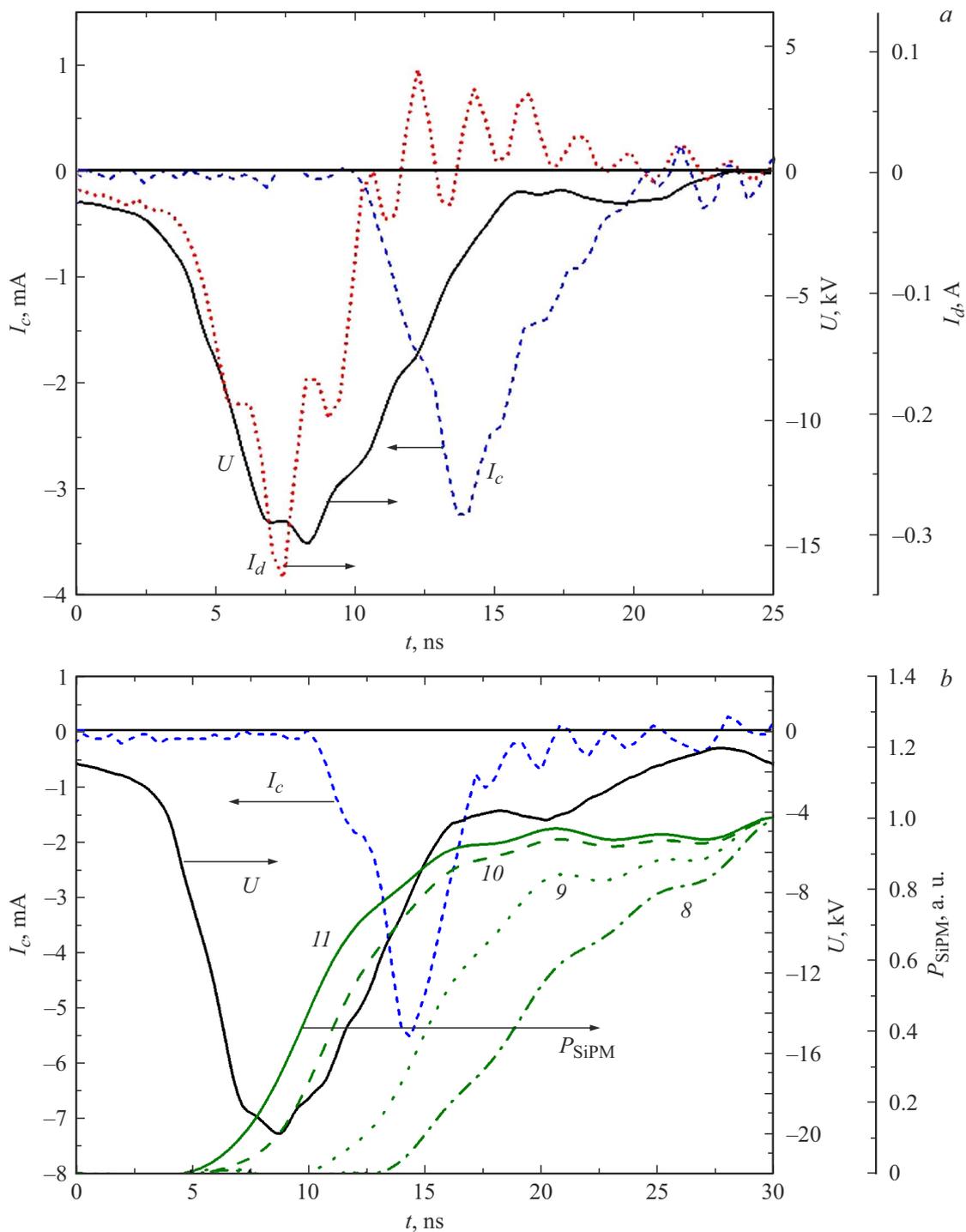


Рис. 2. *a* — осциллограммы импульсов напряжения U , тока разряда I_d и тока пучка I_c при $p = 0.4 \text{ Torr}$ и $f = 1980 \text{ Hz}$. *b* — осциллограммы U , I_c и оптического сигнала P_{SiPM} из областей 8–11 (см. рис. 1, *a*) при $p = 1 \text{ Torr}$ и $f = 62 \text{ Hz}$. Амплитуда ПУЭ на фрагменте *b* больше при меньшей частоте и большем давлении, чем на фрагменте *a*, за счет увеличения напряжения на электродах 2–3 при работе без согласующего сопротивления.

лектором, сетка которого была удалена от заземленного кольцевого электрода на расстояние 14 см, также регистрировался ПУЭ. На основании этого можно заключить, что быстрые электроны получают основное ускорение вблизи высоковольтного кольцевого электрода.

При установке за сеткой бумажного фильтра толщиной $100 \mu\text{m}$ ПУЭ не регистрировался из-за сравнительно малой энергии УЭ.

Средняя энергия электронов T оценивалась по известной формуле $T = mv^2/2$, где m — масса электрона,

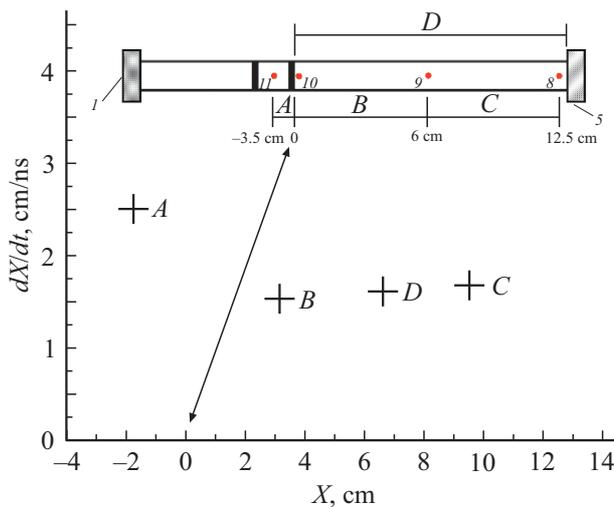


Рис. 3. Средние скорости распространения свечения фронта ПДС на уровне 0.5 по направлению к коллектору на участках между областями 11–10 (A), 10–9 (B), 9–8 (C) и 10–8 (D) на рис. 1, а при $p = 1$ Торг и $f = 62$ Hz. Координаты точек на графике по оси X соответствуют координатам середин, обозначенных на вставке.

v — скорость электрона. Средняя скорость электронов $v_{av} = l/\Delta t$ (где зазор между правой кромкой высоковольтного электрода 2 и приемной частью коллектора $l = 21$ см, а $\Delta t \approx 5.6$ ns) составила 3.75 cm/ns. Длина экстраполированного пробега электрона в воздухе при его энергии ~ 4 keV, согласно данным рис. 1 работы [19], при давлении воздуха 1 Торг составляет 60 см, что существенно больше расстояния от кромки высоковольтного электрода до коллектора.

При использовании генератора G2 с длительностью фронта импульса ~ 350 ns и напряжением на кольцевых электродах ~ 7 kV пучок убегающих электронов не регистрировался.

Скорость распространения ПДС определялась с помощью SiPM, на который по световоду подавалось излучение из кварцевой трубки. На рис. 1, а показаны области 8–11, из которых регистрировалось излучение ПДС, а на рис. 2, б — осциллограммы импульсов излучения из этих областей, интенсивности которых нормированы на единицу. Диаметр области излучения, попадавшего на торец световода, который располагался на различном удалении от кольцевых электродов при одинаковом расстоянии до поверхности трубки, составлял ~ 1 см. Средние скорости распространения фронта свечения ПДС по трубке в сторону коллектора на различных участках приведены на рис. 3.

Наибольшая скорость регистрировалась у электродов на участке А. При уменьшении давления скорость движения фронта волны ионизации возрастала. Было обнаружено, что при $p = 0.4$ Торг свечение плазмы у торца коллектора в области 8 появлялось раньше, чем в середине трубки, что можно объяснить иницированием встречного стримера в области 9 убегающими

электронами и тормозным рентгеновским излучением из коллектора под воздействием ПУЭ. При $p = 1$ Торг пучок убегающих электронов также приходил на коллектор раньше фронта ПДС (рис. 2, б), но не успевал иницировать у коллектора заметный обратный стример.

Из представленных результатов следует, что при давлениях воздуха 1 Торг и менее одновременно с формированием ПДС от плазмы, создаваемой импульсно-периодическим емкостным разрядом, генерируется пучок убегающих электронов. Амплитуда ПУЭ увеличивалась с ростом напряжения генератора и при учете прозрачности сетки при диаметре приемной части коллектора 2 см превышала 25 mA. Длительность импульса тока пучка на полувысоте при давлении воздуха 1 Торг составила ~ 3 ns, а его плотность была ~ 8 A/cm². Из экспериментов следует, что УЭ набирают основную энергию в области электродов, где реализуется наибольшая напряженность электрического поля. Можно предположить, что при формировании отрицательных стримеров в красных спрайтах существенную роль играют убегающие электроны, причем УЭ ускоряются в областях максимального приведенного электрического поля при иницировании стримеров и влияют на форму красных спрайтов.

Проведенные исследования показали, что при формировании плазменных диффузных струй импульсно-периодическим емкостным разрядом пучок убегающих электронов генерируется в отсутствие контакта иницирующей плазмы с металлическим катодом. Установлено, что в данных условиях ПУЭ опережает фронт ПДС и регистрируется коллектором до ее прихода. Данные результаты могут быть использованы при изучении высотных разрядов.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 24-29-00166.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V.P. Pasko, J. Geophys. Res., **115**, A00E35 (2010). DOI: 10.1029/2009JA014860
- [2] V.V. Surkov, M. Hayakawa, Surv. Geophys., **41** (5), 1101 (2020). DOI: 10.1007/s10712-020-09597-3
- [3] J. Qin, S. Celestin, V.P. Pasko, S.A. Cummer, M.G. McHarg, H.C. Stenbaek-Nielsen, Geophys. Res. Lett., **40** (17), 4777 (2013). DOI: 10.1002/grl.50910
- [4] R. Marskar, Plasma Sources Sci. Technol., **33**, 025024 (2024). DOI: 10.1088/1361-6595/ad29c0
- [5] V. Yukhimuk, R.A. Roussel-Dupré, E.M.D. Symbalisty, Y. Taranenko, J. Geophys. Res. Atmos., **103** (D10), 11473 (1998). DOI: 10.1029/98JD00348

- [6] A.V. Gurevich, K.P. Zybin, Y.V. Medvedev, *Phys. Lett., A*, **361** (1-2), 119 (2007).
DOI: 10.1016/j.physleta.2006.05.063
- [7] G.J. Fishman, P.N. Bhat, R. Mallozzi, J.M. Horack, T. Koshut, C. Kouveliotou, G.N. Pendleton, C.A. Meegan, R.B. Wilson, W.S. Paciesas, S.J. Goodman, H.J. Christian, *Science*, **264** (5163), 1313 (1994). DOI: 10.1126/science.264.5163.1313
- [8] J.R. Dwyer, N. Liu, J.E. Grove, H. Rassoul, D.M. Smith, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **122** (8), 8915 (2017).
DOI: 10.1002/2017JA024141
- [9] T. Neubert, N. Østgaard, V. Reglero, O. Chanrion, M. Heumesser, K. Dimitriadou, F. Christiansen, C. Budtz-Jørgensen, I. Kuvvetli, C.J. Eyles, *Science*, **367** (6474), 183 (2020). DOI: 10.1126/science.aax3872
- [10] R.J. Nemiroff, J.T. Bonnell, J.P. Norris, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **102** (A5), 9659 (1997). DOI: 10.1029/96JA03107
- [11] Л.М. Василяк, С.В. Костюченко, Н.Н. Кудрявцев, И.В. Филюгин, *УФН*, **164** (3), 263 (1994).
DOI: 10.3367/UFNr.0164.199403b.0263 [L.M. Vasilyak, S.V. Kostyuchenko, N.N. Kudryavtsev, I.V. Filyugin, *Phys. Usp.*, **37** (3), 247 (1994).
DOI: 10.1070/PU1994v037n03ABEH000011].
- [12] Y.Z. Ionikh, *Plasma Phys. Rep.*, **46**, 1015 (2020).
DOI: 10.1134/S1063780X20100049
- [13] B. Huang, C. Zhang, J. Qiu, X. Zhang, Y. Ding, T. Shao, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **28** (9), 095001 (2019).
DOI: 10.1088/1361-6595/ab3939
- [14] V.F. Tarasenko, N.P. Vinogradov, E.Kh. Baksht, D.A. Sorokin, *J. Atmos. Sci. Res.*, **5**, 26 (2022).
DOI: 10.30564/jasrv5i3.4858
- [15] D.A. Sorokin, V.F. Tarasenko, E.Kh. Baksht, N.P. Vinogradov, *Phys. Plasmas*, **30** (8), 083515 (2023).
DOI: 10.1063/5.0153509
- [16] V.F. Tarasenko, E.K. Baksht, V.A. Panarin, N.P. Vinogradov, *Plasma Phys. Rep.*, **49** (6), 786 (2023).
DOI: 10.1134/S1063780X23700393
- [17] V.F. Tarasenko, D.V. Rybka, *High Voltage*, **1** (1), 43 (2016).
DOI: 10.1049/hve.2016.0007
- [18] T. Shao, V.F. Tarasenko, C. Zhang, A.G. Burachenko, D.V. Rybka, I.D. Kostyrya, M.I. Lomaev, E.Kh. Baksht, P. Yan, *Rev. Sci. Instrum.*, **84**, 053506 (2013).
DOI: 10.1063/1.4807154
- [19] J.A. Gledhill, *J. Phys. A*, **6** (9), 1420 (1973).