

04

## Исследование распределения вытягиваемого ионного тока при встречном развитии каналов поверхностного барьерного разряда

© В.В. Воеводин<sup>1,2</sup>, О.И. Коржова<sup>1</sup>, В.Ю. Хомич<sup>1</sup>, В.А. Ямщиков<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: vvvoevodin@ieeras.ru

Поступило в Редакцию 23 июля 2024 г.

В окончательной редакции 7 октября 2024 г.

Принято к публикации 7 октября 2024 г.

Представлены результаты регистрации пространственно-временного распределения ионного тока и перенесенного заряда из плазмы поверхностного барьерного разряда при встречном развитии его каналов. Показано влияние на него расстояния между двумя электродами и полярности высокого напряжения.

**Ключевые слова:** поверхностный барьерный разряд, ионный ток, импульсное напряжение, электрогидродинамика.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.03.59819.20069

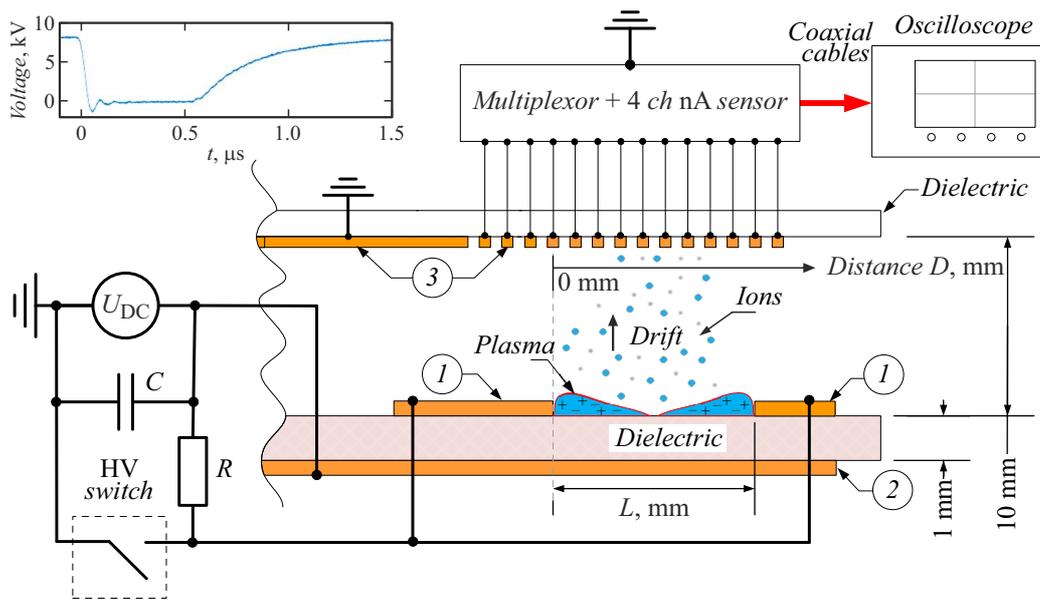
Поверхностный барьерный разряд (ПБР) активно исследуется как в России, так и за рубежом на протяжении нескольких десятилетий и успел найти применение в различных технологических задачах в воздухе при атмосферном давлении: от управления воздушными течениями до биотехнологий [1–3]. Электродная система ПБР обычно состоит из двух электродов: широкой подложки и плазмогенерирующего электрода (узкой полоски), разделенных диэлектриком (далее барьер). Из литературы известна электродная конфигурация с дополнительным третьим электродом, размещаемым над поверхностью барьера и создающим электрическое поле, называемое „вытягивающим“ [4]. Она позволяет формировать направленный поток ионов и химически активных частиц из области разряда, а также мощные электрогидродинамические потоки. Чаще всего для измерения создаваемого ионного тока исследователи используют стрелочные микроамперметры [4,5], которые не позволяют оценить его временные характеристики.

Площадь, занятая разрядом, играет важную роль в плазменных технологиях. Ширина разрядной зоны ПБР при атмосферных условиях ограничена расстоянием в 2–5 мм от плазмогенерирующего электрода [6,7], что связано с процессами зарядки барьера оседающими на него ионами при развитии разряда. В стремлении увеличить площадь, занятую плазмой, используют несколько параллельных плазмогенерирующих электродов, располагаемых на расстоянии  $L$  друг от друга [6,8]. Исследования показывают, что расстояние  $L$  оказывает непосредственное влияние на электрофизические характеристики ПБР из-за взаимодействия встречно развивающихся каналов разряда [9]. В трехэлектродной системе ПБР это влияние проявляется и в характеристиках создаваемого ионного тока. В работах [5,10] были проведены косвенные измерения ионного тока при питании ПБР синусоидальным напряжением высокой ча-

стоты, показавшие изменение характера распределения в пространстве вытягиваемых заряженных частиц при разных значениях  $L$ . В то же время в известной литературе данные по прямым измерениям пространственно-временного распределения ионного тока, в особенности при импульсном питании разряда, отсутствуют.

В связи с этим представляется актуальным проведение измерений подобного распределения с помощью созданной ранее экспериментальной установки с секционированным третьим электродом [11] при питании ПБР импульсами напряжения с наносекундной длительностью фронта.

В настоящей работе использовались два варианта плоской электродной системы (рис. 1) с двумя параллельными плазмогенерирующими электродами 1 из меди (с толщиной  $50\ \mu\text{m}$  и рабочей длиной  $45\ \text{mm}$ ) с расстоянием  $L = 10$  и  $5\ \text{mm}$  между ними. Расстояние от поверхности диэлектрического барьера из алюмооксидной керамики 22ХС до третьего электрода 3 составляло  $1\ \text{cm}$ . Третий электрод состоял из 12 расположенных на расстоянии  $0.5\ \text{mm}$  друг от друга изолированных медных секций-полосок шириной  $0.5\ \text{mm}$ . Для создания поля, вытягивающего ионы, на плазмогенерирующие электроды и нижний электрод-подложку 2 подавалось постоянное напряжение смещения  $U_{\text{DC}}$ . Стабильность напряжения поддерживалась высоковольтным конденсатором ( $C = 100\ \text{nF}$ ). Разрядное напряжение на электродах формировалось генератором импульсов [12] путем их кратковременного замыкания на землю на время  $\tau = 500\ \text{ns}$  с частотой  $f = 2\ \text{Hz}$ , время спада напряжения составило  $50\ \text{ns}$ . Восстановление напряжения на электродах 1, подключенных через резистор ТВО ( $R = 1\ \text{k}\Omega$ ), происходило до уровня  $U_{\text{DC}}$  за  $400\ \text{ns}$ , напряжение на них регистрировалось с помощью делителя Tektronix P6015A. Для измерения пространственно-временного распределения ионного тока использовался



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки и электродной системы. 1 — плазмогенерирующие электроды (осциллограмма напряжения на них приведена на вставке слева вверху), 2 — подложка, 3 — третий электрод,  $C = 100 \text{ nF}$ ,  $R = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{DC} = \pm 8 \text{ kV}$  — источник постоянного высокого напряжения,  $D$  — расстояние по горизонтали от края плазмогенерирующего электрода вдоль третьего электрода,  $L = 5, 10 \text{ mm}$  — расстояние между плазмогенерирующими электродами.

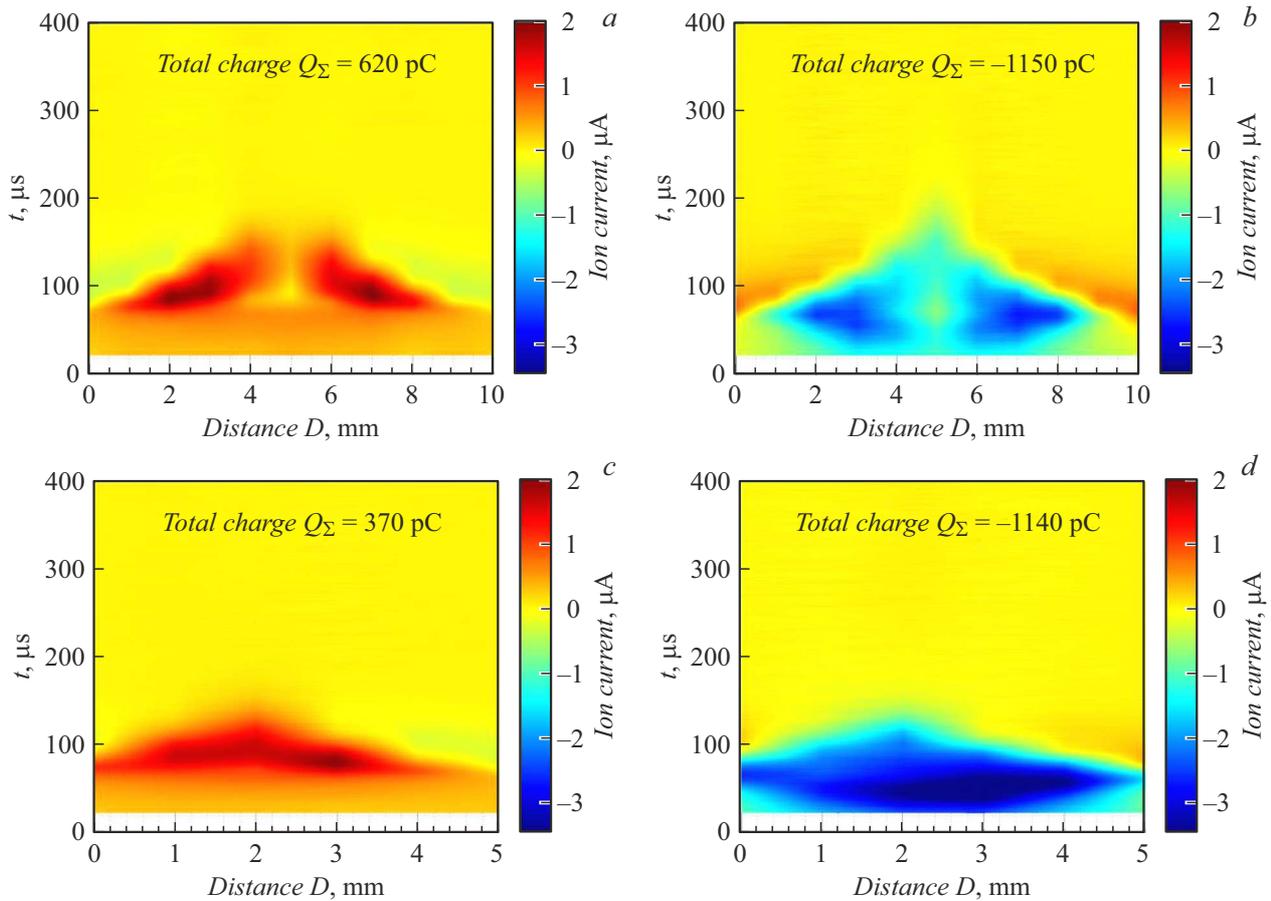
электронный четырехканальный наноамперметр, разработанный в ИЭЭ РАН [11]. Секции третьего электрода подключались к мультиплексору и поочередно заземлялись через каналы наноамперметра. Секции, не используемые для регистрации тока, при этом заземлялись, минуя измеритель. За точку отсчета расстояния  $D$  по горизонтали от каждой секции принимался край первого плазмогенерирующего электрода. Сигналы наноамперметра регистрировались и записывались с помощью осциллографа LeCroy Waverunner 104Xi-A. Эксперименты проводились в атмосферном воздухе при относительной влажности  $30 \pm 4\%$  и температуре  $22 \pm 3^\circ\text{C}$ . Перед их началом измерительная схема калибровалась.

По зарегистрированным осциллограммам ионного тока через секции была построена поверхность (рис. 2), отражающая распределение амплитуды тока (показано цветом) во времени и пространстве. Изначально дискретное пространственное распределение при обработке сглажено с помощью сплайн-интерполяции. Регистрация сигналов наноамперметра запускалась в момент замыкания высоковольтного коммутатора и формирования импульса напряжения на плазмогенерирующих электродах. При обработке осциллограмм был отсечен период времени от 0 до  $20 \mu\text{s}$  из-за помех, возникающих по причине емкостной связи между третьим и плазмогенерирующими электродами. Интегрирование ионного тока по времени позволило определить суммарный заряд  $Q_{\Sigma}$  ионов, достигших третьего электрода.

На основе построенных картин (рис. 2) установлено, что характер распределения ионного тока по третьему электроду различен для положительной и отрицательной

полярности приложенного напряжения  $U_{DC}$ , а также подвержен влиянию расстояния  $L$  между плазмогенерирующими электродами. При положительной полярности  $U_{DC}$  в промежуток времени  $20\text{--}50 \mu\text{s}$  регистрируется ток смещения амплитудой  $100\text{--}300 \text{ nA}$  (рис. 2, *a, c*), обусловленный перемещением ионного облака в промежутке барьер—третий электрод. Максимум ионного тока к моменту времени  $80\text{--}100 \mu\text{s}$  соответствует приходу основной части положительного заряда к измерительным секциям [11]. Отрицательные же частицы достигают третьего электрода приблизительно на  $50 \mu\text{s}$  раньше (рис. 2, *b, d*). Это может быть связано с различием в сорте вытягиваемых заряженных частиц, так как из литературных данных для влажного воздуха известно, что для рассматриваемых времен основными в зоне дрейфа являются положительные  $[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$  и отрицательные  $[\text{CO}_3^-] \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$ ,  $[\text{O}_2^-] \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$  кластерные ионы [13] с подвижностью  $1.4$  и  $1.7 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  соответственно [14]. Некоторые исследователи выдвигают предположения о наличии в регистрируемом токе электронной компоненты [14,15], но возникающие в установке импульсные помехи не позволили нам на данном этапе сделать какие-либо выводы о ее существовании.

При отрицательной полярности  $U_{DC}$  зарегистрированная амплитуда ионного тока в  $1.3\text{--}2$  раза, а суммарный заряд  $Q_{\Sigma}$  в  $1.9\text{--}3$  раза превышает таковые для положительной полярности. Данные по амплитуде согласуются с результатами других исследований, в которых проводилось измерение ионного тока в трехэлектродной конфигурации [5]. Данный эффект может быть объяснен разной структурой ПБР при различной



**Рис. 2.** Пространственно-временное распределение ионного тока при  $U_{DC} = \pm 8$  kV. *a* —  $L = 10$  mm, +8 kV; *b* —  $L = 10$  mm, -8 kV; *c* —  $L = 5$  mm, +8 kV; *d* —  $L = 5$  mm, -8 kV. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

полярности напряжения. В случае  $-U_{DC}$ , при замыкании коммутатора, на электродах *I* (рис. 1) возникает положительный фронт импульса, при котором ПБР имеет выраженную канальную структуру, в то время как при  $+U_{DC}$  на отрицательном фронте импульса возникает более однородный (диффузный) по структуре разряд [6,7]. Канальная форма разряда в меньшей степени подвержена эффекту самоограничения [8], при прочих равных условиях ширина ее разрядной зоны может превышать в 1.4 раза таковую для диффузного разряда.

В полученном распределении тока (рис. 2) при  $L = 10$  mm можно распознать две пространственные компоненты шириной по 4.5 mm, которые, вероятно, обусловлены выносом заряда из области развития встречных каналов от электродов. При этом количественное распределение тока отдельных компонент аналогично полученному ранее для системы с одним плазмогенерирующим электродом [11], неравномерность которого была обусловлена искажением электрического поля в дрейфовом промежутке осевшим на барьер зарядом, поверхностная плотность которого может достигать  $20$  nC/cm<sup>2</sup> [11]. Уменьшение межэлектродного расстояния  $L$  до 5 mm приводит к значительному повышению однородности распределения ионного тока вдоль

оси  $D$  (рис. 2, *c, d*), а центр распределения оказывается на расстоянии 2–2.5 mm от плазмогенерирующих электродов. Небольшое его смещение ( $\pm 0.5$  mm) в сторону одного из электродов может свидетельствовать о необходимости повышения пространственного разрешения в рамках дальнейших измерений при  $L \leq 5$  mm за счет уменьшения ширины измерительных секций и увеличения их количества. Повышение однородности распределения ионного тока может быть следствием сокращения области, в которой осевший на барьер заряд не нейтрализуется обратным разрядом, возникающим на спаде импульса напряжения [6]. В результате дрейфующее от барьера ионное облако не подвергается деформации под действием поля осевшего заряда. При отрицательной полярности  $U_{DC}$  наблюдается увеличение максимального значения тока в 1.4 раза и суммарного заряда в 3 раза по сравнению со случаем  $L = 10$  mm, что может быть эффектом от сочетания описанного выше фактора с большей подвижностью отрицательных частиц.

Полученные данные могут применяться в дальнейших исследованиях по использованию поверхностного барьерного разряда в качестве источника заряженных частиц и для управления газовыми течениями.

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024 г.).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] E. Moreau, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40** (3), 605 (2007). DOI: 10.1088/0022-3727/40/3/S01
- [2] С.И. Мошкунов, С.В. Небогаткин, И.Е. Ребров, В.Ю. Хомич, В.А. Ямщиков, *Прикладная физика*, № 6, 32 (2011).
- [3] B.K.H.L. Boekema, M. Vlig, D. Guijt, K. Hijnen, S. Hofmann, P. Smits, A. Sobota, E.M. van Veldhuizen, P. Bruggeman, E. Middelkoop, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **49** (4), 044001 (2016). DOI: 10.1088/0022-3727/49/4/044001
- [4] S. Müller, R.-J. Zahn, J. Grundmann, *Plasma Process. Polym.*, **4** (S1), S1004 (2007). DOI: 10.1002/ppap.200732317
- [5] S.A. Krivov, I.A. Moralev, A.V. Lazukin, I.V. Selivonin, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **48** (7), 2442 (2020). DOI: 10.1109/TPS.2020.2997979
- [6] M.V. Kozlov, M.V. Sokolova, A.G. Temnikov, V.V. Timatkov, I.P. Vereshchagin, *Plasmas Polym.*, **8** (3), 179 (2003). DOI: 10.1023/A:1024809205202
- [7] M.V. Sokolova, V.V. Voevodin, Ju.I. Malakhov, N.L. Aleksandrov, E.M. Anokhin, V.R. Soloviev, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **52** (32), 324001 (2019). DOI: 10.1088/1361-6463/ab20ef
- [8] А.В. Лазукин, И.В. Селивонин, М.Э. Пинчук, И.А. Моралев, С.А. Кривов, *Изв. вузов. Физика*, **61** (9-2), 152 (2018).
- [9] А.В. Лазукин, А.М. Никитин, Г.А. Романов, *Письма в ЖТФ*, **47** (19), 12 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.19.51505.18812 [A.V. Lazukin, A.M. Nikitin, G.A. Romanov, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (13), 34 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.13.53567.18812].
- [10] G. Neretti, A.C. Ricchiuto, C.A. Borghi, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **51** (32), 324004 (2018). DOI: 10.1088/1361-6463/aacfc6
- [11] V.Yu. Khomich, I.E. Rebrov, V.V. Voevodin, V.A. Yamshchikov, Ya.E. Zharkov, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **55** (27), 275204 (2022). DOI: 10.1088/1361-6463/ac6548
- [12] М.В. Малашин, С.И. Мошкунов, И.Е. Ребров, В.Ю. Хомич, Е.А. Шершунова, *ПТЭ*, № 2, 53 (2014). DOI: 10.7868/S0032816214010285 [M.V. Malashin, S.I. Moshkunov, I.E. Rebrov, V.Yu. Khomich, E.A. Shershunova, *Instrum. Exp. Tech.*, **57** (2), 140 (2014). DOI: 10.1134/S0020441214010242].
- [13] M.J. Johnson, D.B. Go, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **27** (5), 059501 (2018). DOI: 10.1088/1361-6595/aa88e7
- [14] B. Zhang, J. He, Y. Ji, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **24** (2), 923 (2017). DOI: 10.1109/TDEI.2017.006542
- [15] C.A.P. Zevenhoven, R.D.J. Wierenga, B. Scarlett, H. Yamamoto, *J. Electrostat.*, **32** (2), 133 (1994). DOI: 10.1016/0304-3886(94)90004-3