04.1

Формирование аргоновой плазменной струи при питании пакетами биполярных высоковольтных импульсов напряжения

© М.Э. Пинчук, О.М. Степанова

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: pinchme@mail.ru

Поступило в Редакцию 9 октября 2023 г.
В окончательной редакции 18 декабря 2023 г.
Принято к публикации 28 декабря 2023 г.

Исследовалась аргоновая плазменная струя в окружающем воздухе, создаваемая на выходе кварцевой трубки барьерным разрядом с электродной системой, состоящей из центрального стержневого и внешнего кольцевого электродов, при питании напряжением в форме пакетов биполярных импульсов изменяемой длительности. Наблюдалась воспроизводимая от пакета к пакету динамика распространения направленных стримеров, формирующих плазменную струю. Зарегистрировано увеличение расстояния, которое проходит каждый последующий стример, по сравнению с предыдущим в каждом последующем положительном импульсе в пакете. Съемка проводилась в присутствии диэлектрической мишени: фиксировалось приближение струи к ее поверхности вплоть до касания. Показано, что, изменяя длительность пакетов и время между ними, можно регулировать режим распространения струи к мишени.

Ключевые слова: аргоновая плазменная струя атмосферного давления, направленный стример, контроль динамики распространения стримера, барьерный разряд.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.08.57517.19760

Разработка источников низкотемпературной слабоионизованной сильно неравновесной плазмы атмосферного давления в настоящее время является областью активных исследований и имеет перспективы ближайшего внедрения в ряде практических приложений [1,2]. Для локальной обработки термочувствительных поверхностей наиболее подходят холодные плазменные струи на основе барьерного разряда в потоке гелия или аргона [3]. Видимая непрерывная плазменная струя представляет собой последовательность проходящих по потоку рабочего газа из разрядной трубки стримеров или ионизационных волн, возникающих в каждом периоде питающего напряжения [4–6]. При определенных условиях каждый новый стример проходит строго по пути предыдущего, что обусловливает название „направленный стример“ (guided streamer).

В настоящее время появилась концепция адаптивных плазменных струй [7]. Она подразумевает непосредственный оперативный контроль воздействия струи на объект при изменении его характеристик в реальном времени [2], что особенно важно для живых мишеней. Предлагаются различные стратегии построения управляемой плазменной струи и настройки управляющих параметров источника струи в соответствии с откликом мишени (см., например, [7,8]). Динамика распространения стримеров в плазменной струе взаимосвязана с распределением электрического поля в системе, наработкой активных химических компонентов, переносом заряда на мишень. Управление режимом распространения стримеров дает возможность оказывать на мишень контролируемое воздействие [8].

Использование питающего напряжения специальной формы позволяет влиять на динамику направленных стримеров в плазменной струе и определять режим касания струей мишени, как это было продемонстрировано нами для струи в гелии [9,10]. Зафиксирован ступенчатый режим распространения стримера вблизи мишени и показана возможность остановки стримера у ее поверхности с точной и плавной регулировкой режима касания [10,11].

В настоящей работе представлены данные по распространению направленного стримера в аргоновой плазменной струе к поверхности диэлектрической мишени при питании напряжением в форме пакетов биполярных импульсов. Изменение длительности τ_{bunch} пакетов напряжения и паузы τ_{pause} между ними позволяет плавно управлять касанием струей мишени.

Струя плазмы создавалась барьерным разрядом в кварцевой трубке с внутренним и наружным диаметрами 2 и 4 mm соответственно. Электродная система состояла из высоковольтного центрального скругленного на конце стержня диаметром 0.9 mm и заземленного внешнего кольца шириной 4 mm. Край стержневого и кольцевого электродов отстоял от торца трубки на 4 mm. Диск из полированного кварцевого стекла толщиной 4 mm и диаметром 22 mm располагался в 15 mm от торца разрядной трубки. Под диском располагалась медная шайба, соединенная с землей через измерительный конденсатор (200 pF). Аргон высокой чистоты 99.998% пропускался через разрядную трубку с объемным расходом 1 l/min. Плазменная струя была направлена вниз (рис. 1, *a*). Электрический разряд в трубке генерировался при питании пакетами изменяемой длительности биполярных им-

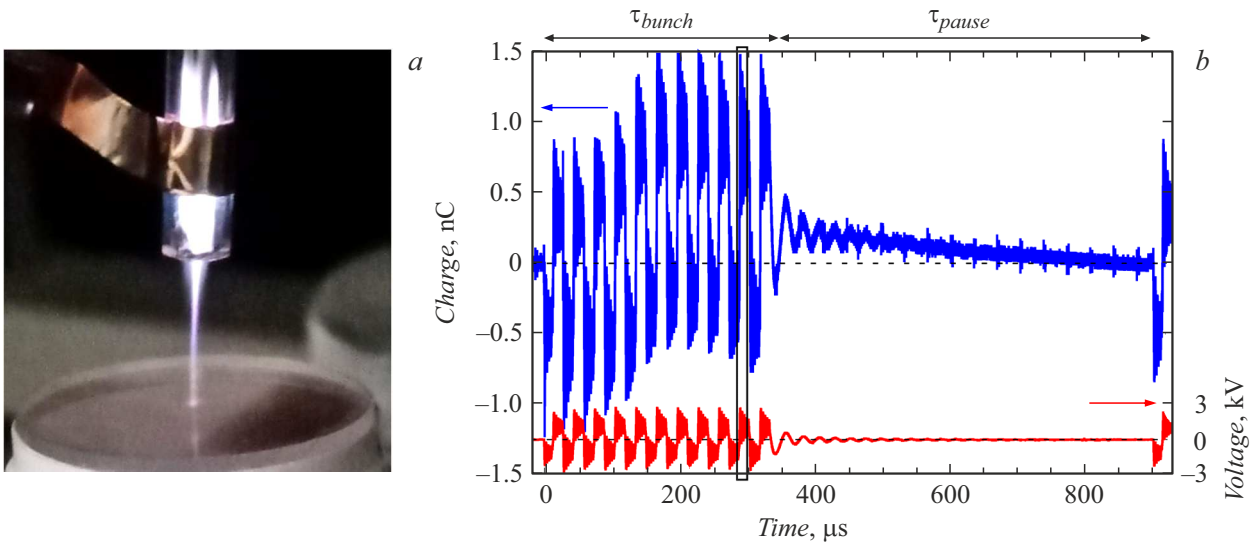

Рис. 1. Вид аргоновой плазменной струи (*a*) и сигналы пакетов импульсов питающего напряжения и заряда на измерительном конденсаторе в цепи мишени (*b*).

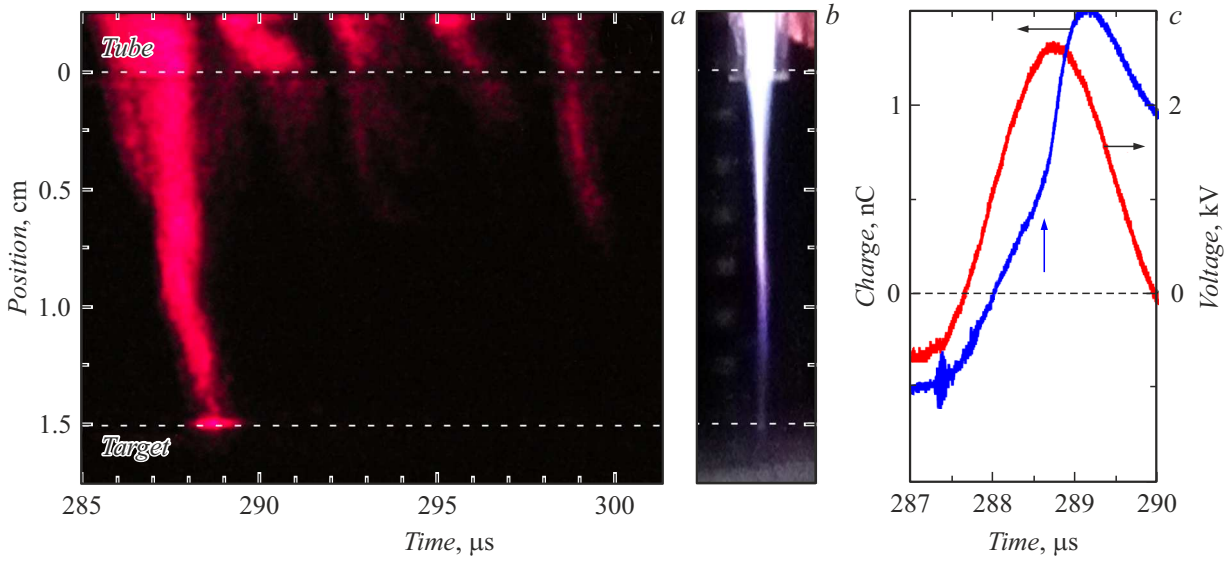

Рис. 2. Скоростная фоторазвертка направленного стримера к поверхности мишени на положительном импульсе в пакете (*a*) (для импульса в прямоугольной рамке на рис. 1, *b*), совмещенная с фоторазверткой фотография струи (*b*) и сигналы напряжения на высоковольтном электроде с зарядом на измерительном конденсаторе в цепи мишени (*c*). Вертикальная стрелка на фрагменте *c* указывает излом на кривой заряда при касании стримером мишени. Скоростное изображение получено с накоплением 100 кадров.

пульсов напряжения с осцилляциями на полке (рис. 1, *b*). Пакеты импульсов напряжения воспроизводятся от пакета к пакету. Воспроизводимость проверялась по записи четырех последовательностей по 50 пакетов импульсов напряжения. Изменение длительности периода импульсов не превышало 6 ns. Изменение амплитуды не превышало 20 V. Все измерения проводились с задержкой не менее 5 min после включения высокого напряжения для исключения влияния различного рода неустановившихся процессов. Использовалась схема проведения экспериментов, измерений и регистрации, описанная в [10].

На рис. 2, *a* представлена скоростная фоторазвертка направленного стримера, достигающего мишень, соотнесенная с фотографией струи (рис. 2, *b*). Моменту касания стримером поверхности соответствует характерный излом на кривой заряда в цепи мишени (рис. 2, *c*). Съемка выполнена на положительном импульсе напряжения, выделенном рамкой на рис. 1, *b*. Для генерации плазменной струи с формированием в потоке газа направленных стримеров с температурой в канале, близкой к комнатной, подбирались оптимальные параметры эксперимента на основе наших предыдущих исследований [9,10,12–14]

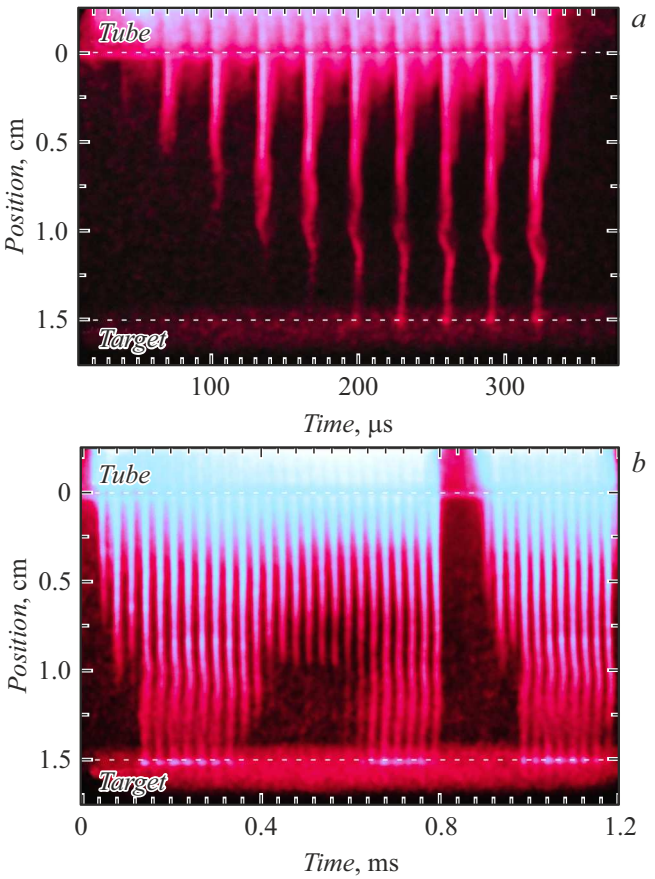

Рис. 3. Скоростные фоторазвертки распространения направленных стримеров при длительности пакета напряжения $340\,\mu$s (a) (для сигнала напряжения на рис. 1, b) и $800\,\mu$s (b). Скоростные изображения получены с накоплением 100 кадров.

и данных [15,16]. Формирование направленного по потоку стримера без ветвлений и без образования узкого горячего канала определяется длительностью фронта питающего напряжения и амплитудой напряжения при заданных геометрических характеристиках потока газа [13,15,16]. В слишком широком газовом потоке при высоком напряжении стример будет ветвиться. При высоком напряжении будет формироваться горячий разрядный канал на мишень. В то же время для чрезмерно узкого потока при низком напряжении плазменная струя не будет формироваться. Максимальная длина плазменной струи получается при расходе газа вблизи перехода от ламинарного течения к турбулентному [12,14].

При питании пакетами импульсов для выбранных условий эксперимента происходит регулярный процесс формирования направленных стримеров в аргоновой плазменной струе. Направленный стример последовательно и монотонно увеличивает проходимую им дистанцию на каждом последующем положительном питающем импульсе в пакете вплоть до достижения мишени. Данный процесс показан на рис. 3, a для случая питания напряжением, представленным на рис. 1, b. Этот процесс обусловлен остаточной ионизацией после прохождения предыдущего стримера (в англоязычной литературе memory effect) и описан для плазменных струй в гелии [5,9,17,18].

При увеличении длительности пакета импульсов τ_{bunch} после определенного импульса стримеры в пакете перестают достигать мишени, как это видно на рис. 3, b. По-видимому, это происходит вследствие накопления нескомпенсированного заряда в пространстве и на мишени, экранирующего поле стримера [19,20]. Постепенное накопление заряда можно наблюдать по кривой сигнала с измерительного конденсатора в цепи мишени (рис. 1, b). Касание положительного стримера поверхности всегда сопровождается изломом на кривой заряда на мишень (рис. 2, c). На отрицательных импульсах напряжения изломы на кривой заряда не заметны. Периоды времени, когда стример касается поверхности, соответствуют большему среднему положительному смещению сигнала заряда в цепи мишени. На отрицательных импульсах и при уменьшении среднего смещения на кривой заряда стримеры не достигают поверхности мишени. Отрицательные стримеры формируются, но, по-видимому, не достигают мишени. На рис. 3, a хорошо видны короткие „зубцы“ отрицательных стримеров между длинными „гребнями“ положительных. Перенос заряда на мишень производится в основном положительными стримерами на положительных импульсах напряжения. На мишени и в пространстве формируется нескомпенсированный положительный заряд, который начиная с определенного времени не позволяет достигать стримерам мишени. Достаточно высокая проводимость окружающей среды позволяет разряжаться заряженным поверхностям и объему. По-видимому, после релаксации заряда из области мишени стримеры снова начинают достигать мишени. Начинает проявляться эффект частотной самоорганизации, описанный в [21,22] для гелиевой струи.

При этом пауза между пакетами, достаточная для релаксации системы накопившихся зарядов, приводит к повторению эволюции динамики стримеров (рис. 3, b). При паузе τ_{pause} между пакетами $\sim 100\,\mu$s достигается исчезновение выраженного влияния прошедшего пакета импульсов на формирование стримеров в струе в настоящем пакете, поскольку за время $\sim 100\,\mu$s происходит релаксация зарядов в окружающем пространстве и на поверхностях [9]. Деионизация аргоновой плазмы в струе происходит за время $\sim 1\,\mu$s [23]. Выбор оптимальной паузы между пакетами импульсов позволяет обеспечить воспроизводимую динамику стримеров в каждом пакете импульсов. Наличие постепенного накопления положительного заряда положительными стримерами без разрядки отрицательными стримерами приводит к возможности плавной регулировки режима касания мишени путем изменения длительности пакетов напряжения и паузы между ними.

Таким образом, режим питания пакетами импульсов предоставляет возможность управлять распространени-

ем аргоновой плазменной струи в окружающем воздухе по направлению к мишени. Изменение длительности пакетов и паузы между ними позволяет контролировать режим касания мишени направленными стримерами.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01215 (https://rscf.ru/project/22-29-01215/).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Ю.С. Акишев, Изв. вузов. Химия и хим. технология, **62** (8), 26 (2019). DOI: 10.6060/ivkkt.20196208.5908

[2] I. Adamovich, S. Agarwal, E. Ahedo, L.L. Alves, S. Baalrud, N. Babaeva, A. Bogaerts, A. Bourdon, P.J. Bruggeman, C. Canal, E.H. Choi, S. Coulombe, Z. Donkó, D.B. Graves, S. Hamaguchi, D. Hegemann, M. Hori, H.-H. Kim, G.M.W. Kroesen, M.J. Kushner, A. Laricchiuta, X. Li, T.E. Magin, S. Mededovic Thagard, V. Miller, A.B. Murphy, G.S. Oehrlein, N. Puac, R.M. Sankaran, S. Samukawa, M. Shiratani, M. Šimek, N. Tarasenko, K. Terashima, E. Thomas, Jr., J. Trieschmann, S. Tsikata, M.M. Turner, I.J. van der Walt, M.C.M. van de Sanden, T. von Woedtke, J. Phys. D: Appl. Phys., **55**, 373001 (2022). DOI: 10.1088/1361-6463/ac5e1c

[3] H.-R. Metelmann, T. von Woedtke, K.-D. Weltmann, *Comprehensive clinical plasma medicine*, 1st ed. (Springer International Publ., 2018). DOI: 10.1007/978-3-319-67627-2

[4] M. Teschke, J. Kedzierski, E.G. Finantu-Dinu, D. Korzec, J. Engemann, IEEE Trans. Plasma Sci., **33**, 310 (2005). DOI: 10.1109/TPS.2005.845377

[5] X. Lu, G.V. Naidis, M. Laroussi, K. Ostrikov, Phys. Rep., **540**, 123 (2014). DOI: 10.1016/j.physrep.2014.02.006

[6] Yu.S. Akishev, V.B. Karalnik, M.A. Medvedev, A.V. Petryakov, N.I. Trushkin, A.G. Shafikov, J. Phys.: Conf. Ser., **927**, 012051 (2017). DOI: 10.1088/1742-6596/927/1/012051

[7] L. Lin, Z. Hou, X. Yao, Y. Liu, J.R. Sirigiri, T. Lee, M. Keidar, Phys. Plasmas, **27**, 063501 (2020). DOI: 10.1063/5.0003528

[8] S.A. Norberg, G.M. Parsey, A.M. Lietz, E. Johnsen, M.J. Kushner, J. Phys. D: Appl. Phys., **52**, 015201 (2018). DOI: 10.1088/1361-6463/aae41e

[9] M. Pinchuk, A. Nikiforov, V. Snetov, Z. Chen, C. Leys, O. Stepanova, Sci. Rep., **11**, 17286 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-96468-4

[10] M.E. Pinchuk, G.B. Sretenović, N. Cvetanović, A.A. Dyachenko, B.M. Obradović, O.M. Stepanova, Eur. Phys. J. D, **77**, 106 (2023). DOI: 10.1140/epjd/s10053-023-00686-6

[11] M.E. Pinchuk, O.M. Stepanova, M. Gromov, A. Nikiforov, Publ. of the Astronomical Observatory of Belgrade, **102**, 163 (2022). http://hdl.handle.net/1854/LU-8767628

[12] M. Pinchuk, O. Stepanova, N. Kurakina, V. Spodobin, J. Phys.: Conf. Ser., **830**, 012060 (2017). DOI: 10.1088/1742-6596/830/1/012060

[13] O. Stepanova, M. Pinchuk, A. Astafiev, Z. Chen, Jpn. J. Appl. Phys., **59**, SHHC03 (2020). DOI: 10.35848/1347-4065/ab75b4

[14] M.E. Pinchuk, Z. Chen, O.M. Stepanova, Appl. Phys. Lett., **119**, 054103 (2021). DOI: 10.1063/5.0053672

[15] Д.А. Малик, К.Е. Орлов, А.С. Мирошников, А.С. Смирнов, Письма в ЖТФ, **31** (12), 21 (2005). [D.A. Malik, K.E. Orlov, I.V. Miroshnikov, A.S. Smirnov, Tech. Phys. Lett., **31** (6), 500 (2005). DOI: 10.1134/1.1969779].

[16] S. Hofmann, A. Sobota, P. Bruggeman, IEEE Trans. Plasma Sci., **40**, 2888 (2012). DOI: 10.1109/tps.2012.2211621

[17] T. Darny, J.-M. Pouvesle, J. Fontane, L. Joly, S. Dozias, E. Robert, Plasma Sources Sci. Technol., **26**, 105001 (2017). DOI: 10.1088/1361-6595/aa8877

[18] N.Y. Babaeva, G.V. Naidis, V.F. Tarasenko, D.A. Sorokin, C. Zhang, T. Shao, Plasma Sci. Technol., **25**, 035406 (2023). DOI: 10.1088/2058-6272/aca18e

[19] Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер, *Физика молнии и молниезащиты* (Физматлит, М., 2001).

[20] P. Viegas, E. Slikboer, Z. Bonaventura, O. Guaitella, A. Sobota, A. Bourdon, Plasma Sources Sci. Technol., **31**, 053001 (2022). DOI: 10.1088/1361-6595/ac61a9

[21] I.V. Schweigert, A.L. Alexandrov, D.E. Zakrevsky, Plasma Sources Sci. Technol., **29**, 12LT02 (2020). DOI: 10.1088/1361-6595/abc93f

[22] А.С. Боровикова, П.П. Гугин, Д.Э. Закревский, Е.В. Милахина, И.В. Швейгерт, Письма в ЖТФ, **48** (19), 8 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.19.53587.19308 [A.S. Borovikova, P.P. Gugin, D.E. Zakrevsky, E.V. Milakhina, I.V. Schweigert, Tech. Phys. Lett., **48** (10), 5 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.10.54787.19308].

[23] М.С. Усачёнок, Ю.С. Акишев, А.В. Казак, А.В. Петряков, Л.В. Симончик, В.В. Шкурко, ЖТФ, **93** (3), 350 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.03.54845.265-22 [M.S. Usachonak, Yu.S. Akishev, A.V. Kazak, A.V. Petryakov, L.V. Simonchik, V.V. Shkurko, Tech. Phys., **68** (3), 325 (2023). DOI: 10.21883/TP.2023.03.55805.265-22].