

04

Периодические неоднородности свечения плазменной диффузной струи при разряде в воздухе низкого давления

© В.Ф. Тарасенко, В.А. Панарин, В.С. Скакун, Н.П. Виноградов

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

Поступило в Редакцию 25 июня 2024 г.

В окончательной редакции 26 августа 2024 г.

Принято к публикации 26 августа 2024 г.

Получены экспериментальные данные о неоднородном свечении плазмы импульсного разряда при давлениях воздуха 0.4 и 1 Торг. Пробой осуществлялся в кварцевых трубках с внутренними диаметрами 1.8 и 8.4 см, которые располагались последовательно. Обнаружен переход от режима плазменных диффузных струй с однородным распределением интенсивности излучения к режиму с формированием периодической структуры. Показано, что второй режим сопровождается появлением дополнительных пиков синхронно на импульсах напряжения и тока разряда с длительностью на полувысоте $< 1 \mu\text{s}$.

Ключевые слова: плазменные диффузные струи, воздух низкого давления, периодические структуры излучения, аналоги столбчатых спрайтов.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.01.59520.20036

Атмосферные разряды в стратосфере и мезосфере отличаются разнообразием и привлекают большое внимание исследователей [1–4]. Наиболее изученными в настоящее время являются столбчатые красные спрайты. Однако, как показано с помощью скоростной съемки, которая производилась с наземных лабораторий, самолетов, спутников и Международной космической станции, они также имеют сложное строение [3–5]. Установлено, что столбчатые спрайты инициируются в большинстве случаев из нижней части гало стримерами, которые направлены к поверхности Земли. Наибольшую интенсивность излучения имеет область основного столба спрайта, примыкающая к гало. В нижней части треков стримеров наблюдаются периодически расположенные области яркого свечения (четки, beads) в виде цепочек, находящихся на одной линии [5,6]. Однако физическая природа их формирования к настоящему времени однозначно не установлена.

Цель настоящей работы — создать в воздухе плазменные диффузные струи (ПДС) красного цвета, которые являются миниатюрными аналогами столбчатых красных спрайтов и состоят из стримеров, имеющие при распространении периодическую структуру.

Отметим, что известны работы, в которых проводились исследования миниатюрных аналогов красных спрайтов [7–10], разрядов атмосферного давления с четкой структурой [11,12] и тлеющих разрядов низкого давления со стратами [13,14].

Для проведения исследований была создана экспериментальная установка, которая показана на рис. 1, а.

Для получения различных режимов свечения варьировались величины емкости конденсатора, зарядного сопротивления R_3 и давления воздуха. На торцах трубки 6 устанавливались фланцы из диэлектрика (слева) и

металла (справа), в которые входили тонкие кварцевые трубки 3. Возбуждение осуществлялось от конденсатора C , заряжаемого от источника постоянного напряжения U через сопротивление R_3 . При изменении величин емкости конденсатора и (или) R_3 , а также напряжения источника питания U можно было регулировать величину паузы между пробоями промежутка с электродами 2–7 от 30 ms до 1 s. Кроме того, вариация емкости конденсатора, величин R_3 , R_4 и давления позволяла изменять длительность импульса тока разряда. Трубки 3 и 6 заполнялись воздухом до давления 0.4 или 1 Торг.

Напряжение на разрядном промежутке измерялось делителем АКТАКОМ АСА-6039, а ток разряда — шунтом из резисторов марки ТВО. Сигналы с шунта и делителя подавались на осциллограф MDO 3104 (1 GHz, частота дискретизации 5 GS/s) корпорации Tektronix. Фотографирование разряда осуществлялось фотоаппаратом Canon 2000D.

Типичные осциллограммы импульсов напряжения и тока разряда в импульсно-периодическом стационарном режиме приведены на рис. 1, б. Пробойное напряжение при первом включении источника U отличалось, поэтому фотографирование разряда проводилось в установившемся режиме. При достижении пробойного напряжения в трубке 6 формировался разряд в виде ПДС, напряжение на электроде 2 при этом уменьшалось, и ток разряда обрывался. Далее снова происходил заряд конденсатора C , который приводил к последующему пробоем между электродами 2–7.

Результаты измерений показали, что в трубке 6 ПДС можно получать в широком диапазоне экспериментальных условий. Плазменная струя при коротких импульсах тока ($\sim 50 \mu\text{s}$ на уровне 0.1 и менее) имела однородное свечение (рис. 2, а).

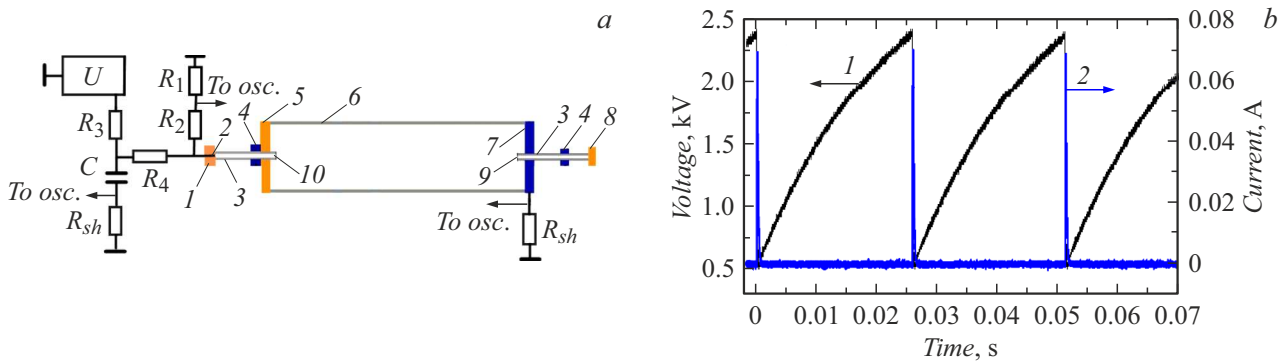


Рис. 1. *a* — схема установки для получения ПДС в воздухе низкого давления при длительности импульсов тока разряда на полувысоте от $1 \mu\text{s}$ до 20ms . 1, 8 — торцевые фланцы из капролона; 2 — стальной электрод с малым радиусом кривизны ($\sim 0.5 \text{mm}$); 3 — кварцевые трубки с внутренним диаметром 1.8cm ; 4 — кольцевые электроды из нержавеющей стали шириной 1cm ; 5 — торцевой фланец из капролона с отверстием для первой трубки 3; 6 — трубка из кварца КУ длиной 28cm с внутренним диаметром 8.4cm ; 7 — торцевой фланец из дюралюминия с отверстием для второй трубки 3; 9 и 10 — открытые торцы кварцевых трубок 3, которые выступали на расстояние 1cm внутрь трубки 6. U — источник постоянного напряжения положительной полярности; R_1 и R_2 — сопротивления делителя напряжения; R_3 — зарядное сопротивление величиной $1, 18$ или $43 \text{M}\Omega$; R_4 — сопротивление величиной $10 \text{k}\Omega$ для ограничения тока разряда; C — конденсатор емкостью $10, 65$ или 238nF ; R_{sh} — сопротивления шунтов величиной 24Ω . *b* — осциллограммы импульсов напряжения (1) и тока (2) разряда с правого относительно читателя шунта при емкости конденсатора 10nF , $R_3 = 1 \text{M}\Omega$ и давлении $p = 1 \text{Torr}$.

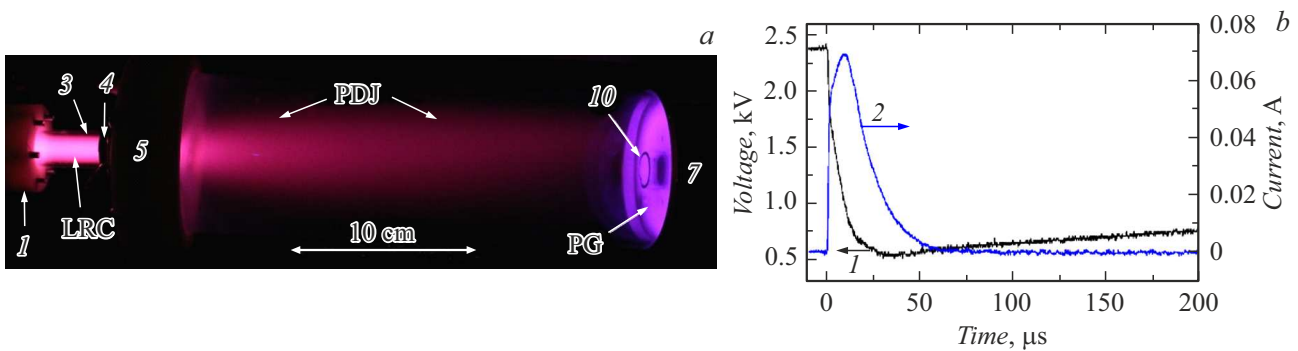


Рис. 2. *a* — фотография свечения разряда при емкости конденсатора 10nF , $R_3 = 1 \text{M}\Omega$ и давлении $p = 1 \text{Torr}$. Обозначения 1, 3, 4, 5, 7 и 10 те же, что на рис. 1, *a*. LRC — разряд в трубке 3, PDJ — плазменная диффузная струя в трубке 6, PG — фиолетовое свечение плазмы разряда у электрода 7. Длительность кадра при фотографировании $\Delta t = 0.5 \text{s}$. *b* — осциллограммы импульсов напряжения (1) и тока (2) разряда с правого шунта для тех же условий, что и на фрагменте *a*.

Фотографирование разряда проводилось в установившемся режиме. Частота следования импульсов тока разряда составляла $\sim 40 \text{Hz}$. Интенсивность излучения плазменных струй и ее распределение по длине трубки 6 зависели от емкости конденсатора C , сопротивления R_3 , давления воздуха и напряжения источника U . Начальный пробой воздуха инициировался в трубке 3 однобарьерным емкостным разрядом между электродами 2 и 4, последний находился под плавающим потенциалом. Металлический электрод 7 был катодом. Поэтому свечение у электрода 7 было фиолетовым (PG). ПДС имела, как и в работах [8–10], красный цвет, а ее длина в трубке 6 превышала 20cm . В тонкой левой трубке 3 цвет разряда имел большую яркость и также был красным.

На рис. 2, *b* приведены осциллограммы импульсов напряжения и тока разряда, показанного на рис. 2, *a*, при

более высоком временном разрешении, чем на рис. 1, *b*. Видно, что пробой воздуха происходит при достижении на электроде 2 напряжения $\sim 2380 \text{V}$. Амплитуда тока разряда составила $\sim 66 \text{mA}$, а его длительность на полувысоте $20 \mu\text{s}$. Минимальное напряжение на промежутке, при котором ток разряда уменьшался до нуля, составляло $\sim 550 \text{V}$, а затем за время $\sim 26 \text{ms}$ оно снова увеличилось до $\sim 2380 \text{V}$ (рис. 1, *b*). Данный режим являлся квазистационарным и наблюдался длительное время, которое составляло в данных экспериментах не менее нескольких минут. На осциллограммах тока и напряжения отсутствовали дополнительные короткие пики.

На рис. 3, *a* приведена фотография свечения разряда, полученная при увеличении длительности и амплитуды импульсов тока разряда за счет конденсатора C с емкостью 65nF .

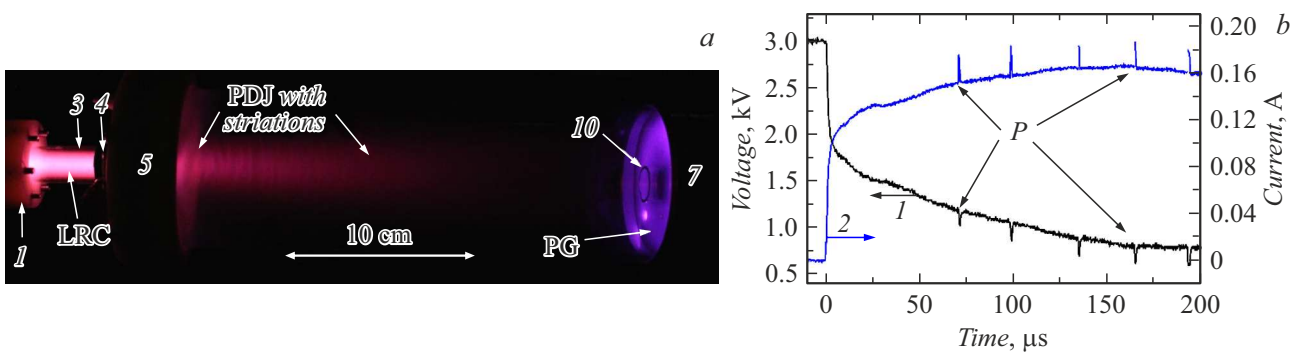


Рис. 3. *a* — фотография свечения разряда при емкости конденсатора 65 nF, $R_3 = 1 \text{ M}\Omega$ и давлении $p = 1 \text{ Torr}$. Обозначения 1, 3, 4, 5, 7 и 10 те же, что на рис. 1, *a*. LRC — яркий разрядный столб, PDJ with striations — плазменная диффузная струя с периодической структурой свечения в трубке *b*, PG — фиолетовое свечение плазмы разряда у электрода 7. $\Delta t = 0.8 \text{ s}$. *b* — осциллограммы импульсов напряжения (1) и тока (2) разряда с правого шунта для тех же условий, что на фрагменте *a*.

Вид свечения разряда изменился. В ПДС появилась периодическая структура, состоящая из ярких и темных полос. При этом на осциллограммах тока разряда и напряжения (рис. 3, *b*) были зарегистрированы короткие пики *P* длительностью $< 1 \mu\text{s}$, подобные по длительности импульсам тока при формировании стримеров в ПДС [8]. Временной интервал между пиками зависел от многих параметров, прежде всего от величины тока разряда в основном импульсе, и составлял при наибольшем токе $\sim 30 \mu\text{s}$. Пробой воздуха в этом режиме происходил при достижении на электроде 2 напряжения $\sim 3000 \text{ V}$. Напряжение на промежутке уменьшалось до $\sim 660 \text{ V}$, а затем за время 32 ms плавно увеличивалось до $\sim 3000 \text{ V}$. Амплитуда основного импульса тока разряда возросла до $\sim 167 \text{ mA}$, а его длительность на полувысоте составила $\sim 0.68 \text{ ms}$. Таким образом, фотография на рис. 3, *a* была получена за три импульса тока. Фотография на рис. 2, *a* была получена за 20 импульсов.

С уменьшением величины тока в основном импульсе пауза между пиками *P* увеличивалась в несколько раз. При уменьшении величины тока до $\sim 20 \text{ mA}$ в основном импульсе короткие пики *P* на осциллограммах пропадали. Также они отсутствовали на фронте основного импульса тока до $\sim 70 \mu\text{s}$ от начала пробоя (рис. 3, *b*). Из этого следует, что возникновение периодической структуры в свечении ПДС связано с появлением коротких пиков тока разряда на основном импульсе. С уменьшением давления воздуха до 0.4 Torr также регистрировались пики тока, напряжения и периодическая структура в излучении разряда. Причина увеличения напряжения пробоя по сравнению с экспериментом при емкости конденсатора 10 nF (рис. 1, *b* и 2, *b*) будет исследована в будущем. Пробойное напряжение в данных экспериментах зависело от многих параметров. Например, с уменьшением давления до 0.4 Torr пробойное напряжение уменьшалось, но при емкости конденсатора 65 nF оно было больше, чем при 10 nF. При включении источника питания пробойное напряжение первого импульса при одинаковой скорости нарастания напряжения на

промежутке было меньше, чем у второго. Поэтому измерения электрических параметров и фотографирование разряда мы проводили в установившемся импульсно-периодическом режиме. Вкладываемая в разряд энергия при емкости конденсатора 65 nF больше, чем при 10 nF. При этом отличалась частота следования импульсов тока, а также форма и длительность спада напряжения на промежутке.

Исследования условий формирования ПДС показали, что периодическая структура в свечении разряда возникает с увеличением амплитуды и длительности импульса тока разряда. При использовании импульсов напряжения и тока микросекундной и наносекундной длительности в свечении ПДС периодическая структура отсутствовала. Однако при инициировании двух встречных стримеров с различной полярностью фронта и их столкновении регистрировались отдельные яркие области свечения и при импульсах напряжения микросекундной длительности [9,10]. Мы предполагаем, что в данных экспериментах при увеличении длительности и амплитуды тока разряда создавались условия для формирования последующих стримеров с электрода 2, о чем свидетельствуют одновременные короткие пики тока и напряжения. Распространение вторичных стримеров и их столкновение с предыдущими приводило к появлению периодической структуры областей свечения красного цвета в ПДС. Наличие ярких пятен (beads [5]) при распространении столбчатых спрайтов к поверхности Земли также можно объяснить формированием вторичных стримеров и их столкновением с первичными.

Таким образом, в настоящей работе зарегистрирован переход от однородного свечения плазменных диффузных струй, которые являются миниатюрными аналогами столбчатых красных спрайтов, к появлению в них периодической структуры. Установлено, что этот режим связан с появлением на осциллограммах тока и напряжения коротких пиков с длительностью на полувысоте в данных условиях $< 1 \mu\text{s}$, которые, по-видимому, обусловлены формированием вторичных стримеров.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 24-19-00166.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C.-L. Kuo, T.-Y. Huang, C.-M. Hsu, M. Sato, L.-C. Lee, N.-H. Lin, *Atmosphere*, **12** (8), 1000 (2021). DOI: 10.3390/atmos12081000
- [2] C. Xu, X. Qie, Z. Sun, J. Yang, H. Zhang, A.B.C. Chen, *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, **128** (8), e2022JD037292 (2023). DOI: 10.1029/2022JD037292
- [3] A. Jehl, T. Farges, E. Blanc, *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **118** (1), 454 (2013). DOI: 10.1029/2012JA018144
- [4] 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
- [5] A. Luque, H.C. Stenbaek-Nielsen, M.G. McHarg, R.K. Haaland, *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **121** (3), 2431 (2016). DOI: 10.1002/2015JA022234
- [6] R. Marskar, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **33** (2), 025024 (2024). DOI: 10.1088/1361-6595/ad29c0
- [7] A. Robledo-Martinez, A. Garcia-Villarreal, H. Sobral, *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **122** (1), 948 (2017). DOI: 10.1002/2016JA023519
- [8] V.F. Tarasenko, E.K. Baksht, V.A. Panarin, N.P. Vinogradov, *Plasma Phys. Rep.*, **49** (6), 786 (2023). DOI: 10.1134/S1063780X23601736
- [9] V.F. Tarasenko, N.P. Vinogradov, E.Kh. Baksht, D.S. Pechenitsyn, *Plasma Phys. Rep.*, **50** (1), 130 (2024). DOI: 10.1134/S1063780X23601736
- [10] В.Ф. Тарасенко, Н.П. Виноградов, Е.Х. Бакшт, Д.А. Сорокин, Д.С. Печеницин, *Оптика атмосферы и океана*, **37** (4), 294 (2024). DOI: 10.15372/AOO20240405
- [11] S.P.A. Vayanganie, V. Cooray, M. Rahman, P. Hettiarachchi, O. Diaz, M. Fernando, *Phys. Lett. A*, **380** (7-8), 816 (2016). DOI: 10.1016/j.physleta.2015.12.039
- [12] D.V. Beloplotov, V.F. Tarasenko, *Phys. Lett. A*, **383** (4), 351 (2019). DOI: 10.1016/j.physleta.2018.11.004
- [13] E. Williams, M. Valente, E. Gerken, R. Golka, in *Sprites, elves and intense lightning discharges* (Springer, Dordrecht, 2006), p. 237–251. DOI: 10.1007/1-4020-4629-4_11
- [14] M.M. Tahiyat, J.C. Stephens, V.I. Kolobov, T.I. Farouk, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **55** (8), 085201 (2021). DOI: 10.1088/1361-6463/ac33da