

Режимы импульсных разрядов, позволяющие моделировать аналоги красных спрайтов

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

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**VFT@loi.hcei.tsc.ru*

Abstract. В воздухе при давлениях 0.2–2 Торр проведены экспериментальные исследования импульсных разрядов, имеющих фотографируемое и визуально наблюдаемое излучение красного цвета. При возбуждении от импульсных генераторов и источника постоянного напряжения с конденсатором в системе из трёх последовательно установленных кварцевых трубок с внутренними диаметрами 1.8, 8 и 1.8 см изучены излучательные и вольт – амперные характеристики различных режимов разрядов, в том числе, обеспечивающие формирование плазменных диффузных струй (ПДС). Установлено, что при медленном росте напряжения между электродами, расположенными на торцах кварцевых трубок можно формировать ПДС красного цвета с миллисекундной длительностью импульсов тока на полувьсоте.

Ключевые слова: плазменные диффузные струи, импульсный разряд в воздухе, давление 0.2–2 Торр; plasma diffuse jets, pulsed discharge in air, pressure 0.2–2 Torr.

1. Введение

Импульсные атмосферные разряды на высотах 40–100 км над уровнем моря в настоящее время исследуются во многих странах, см. [1, 2] и ссылки в этих работах. При этом, наибольшее внимание уделяется изучению красных спрайтов [3–5]. Наблюдения проводятся как с помощью аппаратуры, расположенной на поверхности Земли, так и с использованием приборов, устанавливаемых на самолётах, спутниках и Международной космической станции. Кроме того, проводится экспериментальное моделирование некоторых свойств аналогов красных спрайтов [6, 7], которые имеют малые размеры по сравнению с разрядами, наблюдаемыми в природных условиях [3–5]. В частности, в работе [7] приведены результаты исследований оптических и спектральных характеристик разряда в воздухе при давлениях от 7.5 мТорр до 20 Торр и зарегистрировано излучение первой (1+) и второй (2+) положительных систем азота.

В работах, проведённых нами ранее [8–11], сообщалось о формировании плазменных диффузных струй красного цвета при низких давлениях воздуха (3 Торр и менее). ПДС распространялись от плазмы ёмкостного разряда, создаваемой импульсно-периодическими генераторами с микросекундной длительностью импульсов. Длина ПДС достигала 100 см и ограничивалась длиной используемой кварцевой трубки. Параметры плазмы в ПДС были подобны измеряемым в столбчатых красных спрайтах. Длительность импульсов излучения 1+ системы азота в красной области спектра при микросекундной длительности импульса напряжения составляла в ПДС около 10 мкс и определялась временем жизни уровней молекулярного азота в состоянии $V^3\pi_g$.

Цель данной работы – изучение лабораторных аналогов столбчатых спрайтов, имеющих красный цвет, при различных схемах инициирования разряда с частотой 10 Гц и менее.

2. Экспериментальная установка и методики

Исследования проводились с применением двух установок, в которых были использованы, кварцевые трубки разного диаметра герметично соединённые между собой. Внутренний объём кварцевых трубок откачивался форвакуумным насосом и заполнялся атмосферным воздухом, температура и влажность которого контролировалась перед напуском в камеру. Измерения проводились при давлениях от 0.2 до 2 Торр.

Для формирования различных режимов разряда применялись два генератора высокого напряжения с микросекундной длительностью импульсов и источник постоянного напряжения. Фронт и спад импульсов напряжения генераторов имели длительность около 0.4 мкс. Режимы разряда изменялись за счёт вариации схемы подключения источника постоянного напряжения, а также импульсных генераторов и их полярности. Блок – схема установки №1 показана на рис. 1.

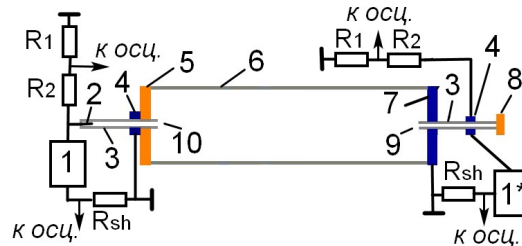


Рис. 1. Блок – схема установки №1 для изучения плазменных диффузных струй в воздухе низкого давления. 1 и 1* – импульсные генераторы, формирующие импульсы напряжения отрицательной и положительной полярности длительностью на полувысоте ≈ 1.3 мкс; 2 – электрод с малым радиусом кривизны; 3 – кварцевые трубки; 4 – кольцевые электроды из нержавеющей стали шириной 1 см; 5 – торцевой фланец из капролона с отверстием для левой трубки 3; 6 – трубка из кварца КУ длиной 28 см, имеющая внутренний диаметр 8 см; 7 – торцевой фланец из дюралюминия с отверстием для правой трубки 3; 8 – торцевой фланец из капролона; 9 и 10 – открытые торцы кварцевых трубок с внутренним диаметром 18 мм, которые выступали на 1 см от фланцев 5 и 7 внутрь трубки 6. R_1 и R_2 – сопротивления делителей напряжения АКТАКОМ АСА-6039, R_{sh} – сопротивления шунтов.

В схеме установки №1 импульсы напряжения от генераторов 1 и 1*, имеющих напряжение холостого хода ≈ 8 кВ подавались на электроды 2–4 и 7–4. Это приводило к первоначальному пробою в трубках 3. Ток разряда был ограничен диэлектрическим барьером у электродов 4. После запуска генераторов с одинаковой или противоположной полярностью, в кварцевой трубке 6 диаметром 8 см формировались ПДС. На установке №1 можно было регулировать задержку между запуском генераторов 1 и 1*, а также включать только один из генераторов. Ниже будут приводятся результаты, полученные при одновременном запуске генераторов 1 и 1*.

В установке №2, блок – схема которой показана на рис. 2, использовались источник постоянного напряжения U и один импульсный генератор.

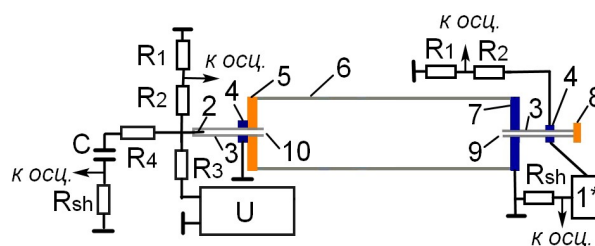


Рис. 2. Блок – схема установки №2 для получения плазменных диффузных струй в воздухе низкого давления при длительности импульсов тока разряда на полувысоте до ≈ 20 мс. 1* – импульсный генератор, формирующие импульсы напряжения отрицательной или положительной полярности с длительностью на полувысоте 1.3 мкс; 2 – электрод с малым радиусом кривизны; 3 – кварцевые трубки; 4 – кольцевые электроды из нержавеющей стали шириной 1 см; 5 – торцевой фланец из капролона с отверстием для левой трубки 3; 6 – трубка из кварца КУ длиной 28 см с внутренним диаметром 8 см; 7 – торцевой фланец из дюралюминия с отверстием для правой трубки 3; 8 – торцевой фланец из капролона; 9 и 10 – открытые торцы кварцевых трубок 3 с внутренним диаметром 18 мм. R_1 и R_2 – сопротивления делителей напряжения АКТАКОМ АСА-6039, R_3 – зарядное сопротивление 5 МОм; R_4 – сопротивление 10 кОм, установленное последовательно с конденсатором $C = 255$ нФ; R_{sh} – сопротивления шунтов.

Постоянное напряжение положительной полярности от источника U подавалось на электрод с малым радиусом кривизны 2, соединённый с конденсатором C , второй вывод которого заземлялся через R_4 . Длительность импульса тока разряда могла регулироваться за счёт изменения величины конденсатора C и сопротивления R_4 . В данных экспериментах использовались $C = 255$ нФ и $R_4 = 10$ кОм. Фланец 7, который служил вторым электродом, был заземлён, рис. 2. На электроды 4–7, расположенные с правой стороны установки, относительно читателя, могли подаваться импульсы высокого напряжения от генератора 1*. Полярность генератора 1* могла быть как положительной, так и отрицательной. Фланцы 5 и 7 имели форму дисков с отверстием в центре, через которое проходила кварцевая трубка 3 с внешним диаметром 21 мм и толщиной стенок 1.5 мм. Эта трубка выступала над поверхностью фланцев внутрь основной трубки 6 на 1 см.

Форма импульсов напряжения измерялась с помощью делителей АКТАКОМ АСА-6039. Сопротивления делителя были 900 кОм (низковольтное плечо) и 900 МОм (высоковольтное). Ток разряда определялся с помощью шунтов с сопротивлением 3 Ом, которые включались последовательно с заземлёнными электродами и генераторами. Сигналы с делителей и шунтов подавались на осциллограф RIGOL DS2302A (300 МГц, частота дискретизации 2 выборки/нс). Оптическое излучение плазмы разряда в трубке регистрировалось цифровым фотоаппаратом Canon 2000D. Фотографирование разряда проводилось в отсутствие постороннего освещения.

3. Результаты измерений и их обсуждение

Исследования проведённые с применением установки №1 показали, что плазменные диффузные струи (ПДС) в центральной трубке 6 можно получать в широком диапазоне экспериментальных условий. На рис. 3 приведены фотографии свечения разряда при положительной полярности генераторов 1 и 1*, а на рис. 4 при включении одного генератора 1, расположенного с левой стороны установки.

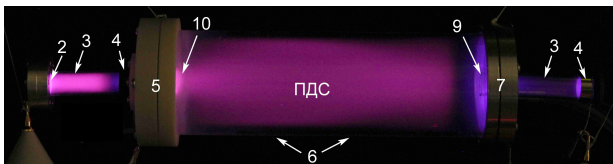


Рис. 3. Фотография свечения разряда на установке №1 при одновременном включении генераторов 1 и 1* с положительной полярностью. Частота следования импульсов напряжения $f = 10$ Гц. Экспозиция 2 с. Давление воздуха $p = 1$ Торр. Цифрами обозначены элементы установки на рис. 1.

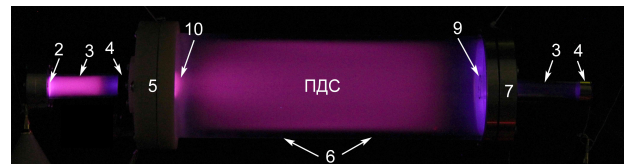


Рис. 4. Фотография свечения разряда на установке №1 при включении одного генератора 1 с положительной полярностью импульса, $f = 10$ Гц. Экспозиция 2 с. $p = 1$ Торр. Цифрами обозначены элементы установки на рис. 1.

При подаче импульсов напряжения от генератора 1 на высоковольтный электрод 2 и на кольцевой электрод 4 на левой трубке 3, а также от генератора 1* на расположенный справа кольцевой высоковольтный электрод 4 и электрод 7 наблюдалась следующая картина свечения разряда при давлении воздуха 1 Торр, рис. 3. Во-первых, не смотря на одинаковую полярность генераторов, цвет свечения плазмы в трубках малого диаметра 3 слева и справа существенно отличался. Слева, начиная от электрода 2, видна область ярко светящейся плазмы красного цвета, которая заканчивается перед внешним кольцевым электродом 4, а затем с меньшей яркостью продолжается за фланцем из капролона 5 в трубке 6. В этой области формировались плазменные диффузные струи, см. [8, 9]. В трубке 3 справа свечение разряда имело голубой цвет, который также виден в трубке 6 слева от плоского электрода 7. Во-вторых, между областью голубого свечения и ПДС красного цвета наблюдалась

сравнительно узкая тёмная область. Отметим, что в данном режиме левый кольцевой электрод 4 был заземлён и экранировался от плазмы разряда стенкой кварцевой трубки 3. С правой стороны установки №1 высокое напряжение подавалось на кольцевой электрод 4, а был заземлён металлический электрод 7, который контактировал с плазмой разряда.

В этих условиях вначале в трубке 6 формируются плазменные диффузные струи, а затем реализуется режим тлеющего разряда. Соответственно, в правой трубке 3 видна область отрицательного свечения тлеющего разряда, а в левой – положительный столб. В трубке большого диаметра 6 свечение красного цвета формируется в основном ПДС, которые, как было показано в [10] состоят из стримеров. На рис. 3 уменьшение интенсивности излучения в центре трубки 6, которое наблюдалось в работе [11] при столкновении двух ПДС с одинаковой полярностью их фронта, не регистрировалось.

Формированию ПДС в данных условиях подтверждают фотографии разряда, полученные при выключенном генераторе 1* и подаче импульсов напряжения положительной полярности от генератора 1 на электроды 2 и 4, рис. 4. Первичный пробой происходил между высоковольтным электродом 2 с малым радиусом кривизны и поверхностью диэлектрика трубки 3 у кольцевого электрода 4, который экранирован от плазмы разряда. Этот пробой приводит к появлению ПДС в трубке 6, которая также имела красный цвет и расширялась при выходе из торца 10 левой трубки 3. Свечение голубого цвета на установке №1 наблюдается как у кромки левого кольцевого электрода 4, так и у левой поверхности электрода 7.

При включении одного генератора 1* как с положительной, так и с отрицательной полярностью, ПДС в центральной трубке 6 с внутренним диаметром 8 см не наблюдались, рис. 5.

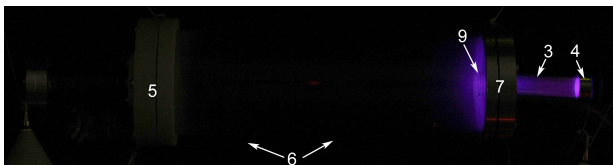


Рис. 5. Фотография свечения разряда при включении одного генератора 1* с положительной полярностью. Установка №1. $f = 10$ Гц. $p = 1$ Торр. Экспозиция 2 с. Цифрами обозначены элементы установки на рис. 1.

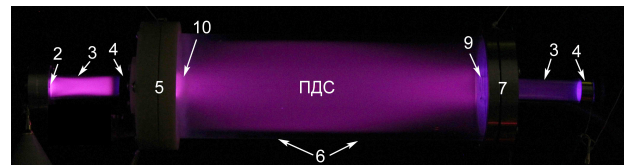


Рис. 6. Фотография свечения разряда при одновременном включении генератора 1 с положительной полярностью и 1* с отрицательной. Установка №1. $f = 10$ Гц. $p = 1$ Торр. Экспозиция 2 с. Цифрами обозначены элементы установки на рис. 1.

Отсутствие ПДС красного цвета на рис. 5 в трубке диаметром 8 см можно объяснить контактом плазмы, созданной генератором 1*, с заземлением электрода 7. Это приводит к малой величине напряжения на плазме, созданной генератором 1*, которого недостаточно для инициирования стримеров, формирующих ПДС.

Фотография свечения разряда, при одновременном включении генератора 1 с положительной полярностью и генератора 1* с отрицательной, показана на рис. 6. ПДС в этих условиях формируются, и свечение красного цвета регистрируется практически по всей длине трубки 6.

Режим разряда с формированием страт и ПДС был получен при использовании источника постоянного напряжения U , установка №2 на рис. 2. При проведении этого эксперимента ставилась задача промоделировать формирования красных спрайтов от гало при сравнительно медленном увеличении напряжения, а также получить длительность импульса тока в ПДС единицы – десятки мс. Подобный сценарий возникновения красных спрайтов описан в работе [2]. Полученные фотографии разряда показаны на рис. 7 и рис. 8.

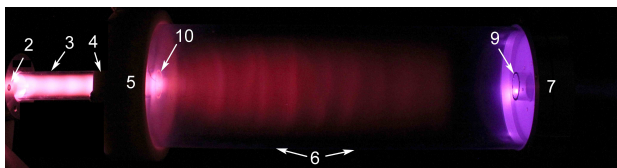


Рис. 7. Фотография свечения разряда при подаче напряжения положительной полярности от источника U на электрод 2 (высоковольтный) и 7 (заземлённый) в условиях периодического пробоя при напряжении $U_m \approx 1.45$ кВ, инициируемого от генератора 1* с частотой ≈ 0.6 Гц, $p = 0.4$ Торр. Экспозиция 0.3 с. Установка №2.

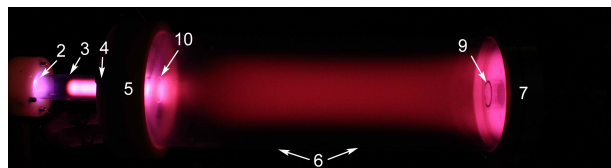


Рис. 8. Фотография свечения разряда в условиях периодического самопробоя с частотой 0.6 Гц при напряжении $U_m \approx 1.3$ кВ. Источник U с конденсатором C и сопротивлением R_4 в установке №2 был размещён справа и соединён с высоковольтным электродом 7 и заземлённым 2. $p = 0.5$ Торр. Генераторы 1 и 1* убраны. Экспозиция 1 с.

В режиме с подачей напряжения на электроды 2 и 7 только от источника U и инициированием разряда от генератора 1* удалось получить режим разряда красного цвета, но с формированием страт, наблюдаемых как в левой трубке 3, так и трубке 6, см. рис. 7. Без включения генератора 1* происходил самопробой воздуха между электродами 2-7, но частота следования импульсов и характер свечения разряда существенно не изменялось. Увеличение давления воздуха приводило к увеличению числа страт и уменьшению расстояния между ними.

При подаче высокого напряжения от источника U на электрод 7, а также подключения к нему конденсатора C , страты формировались только в левой трубке 3, рис. 8. В трубке 6 при этом наблюдалось свечение в виде однородной струи.

Типичные формы импульсов напряжения и тока разряда в условиях самопробоя на установке №2 показаны для различных давлений на рис. 9 и рис. 10.

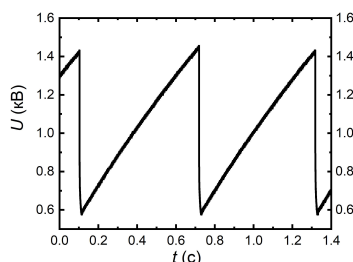


Рис. 9. Осциллограммы импульсов напряжения положительной полярности от источника U при периодическом самопробое между электродами 2 и 7. Установка №2. $p = 0.4$ Торр. Генератор 1* отключён.

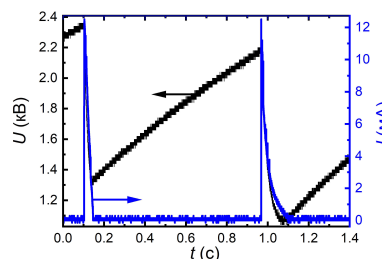


Рис. 10. Осциллограммы импульсов напряжения и тока разряда в трубках 6 и 3 при самопробое с частотой ≈ 1 Гц. Напряжение от источника U подавалось на электрод 7 (высоковольтный) и 2 (заземлённый). $p = 1$ Торр. Генераторы 1 и 1* отключены.

Видно, что с увеличением давления напряжение пробоя воздуха увеличивается, а частота самопробоев уменьшается. Длительность импульса тока разряда в таком режиме зависит от величин C и R_4 , а также давления. Для импульсов на рис. 10 она составила ≈ 20 мс на полувысоте, что близко к длительности импульсов излучения красных спрайтов [1, 2, 5].

4. Выводы

В данной работе на установке с последовательным расположением кварцевых трубок различного диаметра продемонстрирована возможность формирования в воздухе при давлениях ~ 1 Торр плазменных диффузных струй. Проведённые исследования показали, что характеристики разряда, состоящего из плазменных диффузных струй и (или) страт можно регулировать, изменяя условия его инициирования. При формировании ПДС красного цвета

реализован режим разряда с длительностью импульса тока, сопоставимой с наблюдаемой в красных спрайтах.

Благодарности

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-29-00166).

5. Литература

- [1] V.P. Pasko, Y. Yair, and C.L. Kuo, Lightning related transient luminous events at high altitude in the Earth's atmosphere: Phenomenology, mechanisms and effects, *Space science reviews*, vol. **168**, 475, 2012, doi: 10.1007/s11214-011-9813-9
- [2] C.-L. Kuo, T.-Y. Huang, C.-M. Hsu, M. Sato, L.-C. Lee, and N.-H. Lin, Resolving elve, halo and sprite halo images at 10000 Fps in the Taiwan 2020 campaign, *Atmosphere*, vol. **12**, 1000, 2021, doi: 10.3390/atmos12081000
- [3] T. Kanmae, H.C. Stenbaek-Nielsen, M.G. McHarg, and R.K. Haaland, Diameter-speed relation of sprite streamers, *J. of Phys. D: Appl. Phys.*, vol. **45**, 275203, 2012, doi: 10.1088/0022-3727/45/27/275203
- [4] A. Jehl, T. Farges, and E. Blanc, Color pictures of sprites from non-dedicated observation on board the International Space Station, *J. of Geophys. Res.: Space Physics*, vol. **118**, 454, 2013, doi:10.1029/2012JA018144
- [5] A. Huang, G. Lu, J. Yue, W. Lyons, F. Lucena, F. Lyu, S.A. Cummer, W. Zhang, L. Xu, X. Xue, and S. Xu, Observations of red sprites above Hurricane Matthew, *Geophys. Res. Lett.*, vol. **45**, 13, 2018, doi: 10.1029/2018GL079576
- [6] A. Robledo-Martinez, A. Garcia-Villarreal, and H. Sobral Comparison between low-pressure laboratory discharges and atmospheric sprites, *J. Geophys. Res.: Space Physics*, vol. **122**, 948, 2017, doi:10.1002/2016JA023519
- [7] Y. Goto, Y. Ohba, and K. Narita, Optical and spectral characteristics of low pressure air discharges as sprite models, *J. of Atmospheric Electricity*, vol. **27**, 105, 2007, doi: 10.1541/jae.27.105
- [8] V. Tarasenko, N. Vinogradov, E. Baksht, and D. Sorokin, Ionization Waves, Propagating in Opposite Directions, as in Red Sprites, *J. of Atmospheric Science Res.*, vol. **05**, 26, 2022, doi:10.24018/ejgeo.2022.3.6.322
- [9] D.A. Sorokin, V.F. Tarasenko, E.K. Baksht, and N.P. Vinogradov, Analogs of columnar sprites initiated in low-pressure air and nitrogen, *Physics of Plasmas*, vol. **30**, 083515, 2023, doi: 10.1063/5.0153509
- [10] V.F. Tarasenko, E.K. Baksht, V.A. Panarin, and N.P. Vinogradov, Streamers Initiated by a Capacitive Discharge at Air Pressure 0.2–6 Torr, *Plasma Physics Reports*, vol. **49**, 786, 2023, doi: 10.1134/S1063780X23700393
- [11] V.F. Tarasenko, N.P. Vinogradov, E.K. Baksht, and D.S. Pechenitsyn, Collision of Two Plasma Diffuse Jets with the Same and Opposite Front Polarities at Air Pressure of 1 Torr, *Plasma Physics Reports*, vol. **50**, 153, 2024, doi: 10.1134/S1063780X23601736