

Экспериментальное моделирование областей «beads» и «glow» при формировании аналогов красных столбчатых спрайтов

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

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, Томск, Россия, пр. Академический, 2/3, VFT@loi.hcei.tsc.ru*

Проведены исследования плазменных диффузных струй (ПДС), которые являются миниатюрными аналогами красных столбчатых спрайтов и позволяют экспериментально моделировать их свойства. Красные спрайты — это гигантские разряды, наблюдаемые над грозowymi облаками на высотах 40–100 км. ПДС в данной работе инициировались в атмосферном воздухе низкого давления при различных режимах разряда. Аналоги ярких светящихся точек «beads» в красных столбчатых спрайтах были созданы в режиме импульсно-периодического емкостного разряда с внешними электродами на кварцевой трубке. В этом режиме ПДС не имели контакта с металлическими электродами. Подтверждено, что яркие точки и короткие яркие цилиндры, подобные «beads» возникают при взаимодействии стримеров, из которых состоят ПДС. Для этого необходимо реализовать столкновение стримеров различных размеров. При генерации встречных стримеров с задержкой в сотни наносекунд были зарегистрированы одна или две яркие точки. Установлены условия, при которых в условиях инициирования ПДС положительным стримером, увеличивается интенсивность излучения разряда, как и в области «glow». Получен режим разряда, при котором интенсивное свечение ПДС регистрируется при однократном пробое. Показано, что усиление интенсивности свечения в ПДС достигается за счёт перехода в режим квазистационарного тлеющего разряда.

Ключевые слова: плазменные диффузные струи, воздух низкого давления, аналоги красных спрайтов; plasma diffuse jets, red sprites, columnar glow, beads.

Введение

При изучении красных столбчатых спрайтов — разрядов в атмосфере Земли на высотах 40–100 км над уровнем моря — регистрируется ряд особенностей в их свечении [1, 2]. В нижней части первичного «столба» спрайта, формируемого положительным стримером, который распространяется от гало вниз, появляется тёмная область, а затем яркие светящиеся точки «beads». Интенсивность излучения основной части «столба» со временем обычно усиливается, а из его верхней части в ряде случаев стартуют вверх отрицательные стримеры. Это приводит к формированию красных спрайтов, получивших название морковные. Участки столбчатых красных спрайтов с наибольшей яркостью излучения называют «glow». При этом, цвет областей «glow» в столбах красных спрайтов, точек «beads» на фотографиях, сделанных с поверхности Земли, самолётов и спутников, существенно не отличается от цвета свечения столбчатых спрайтов, не имеющих области «glow», а также от цвета отрицательных стримеров, направленных вверх от поверхности Земли. В известной литературе имеются различные версии появления участков «glow» и ярких точек «beads», см., например, [2].

Цель настоящей работы — создать в лабораторных условиях в плазменных диффузных струях — миниатюрных аналогах красных столбчатых спрайтов — яркие точки «beads» и области «glow». Данные исследования продолжают наши предыдущие эксперименты, см. статьи [3–5] и ссылки в них.

Экспериментальная установка и методики измерений

Для изучения формы и светимости разряда при низких давлениях воздуха применялись две установки. Это позволяло варьировать условия возбуждения и форму плазменных диффузных струй (ПДС). Установка №1, в которой использовалась кварцевая трубка 1 длиной 2,2 м с внутренним диаметром 50 мм и толщиной стенки 2,5 мм, показана на рис. 1.

Плазменные диффузные струи формировались от плазмы, создаваемой за счет ограниченного двумя барьерами емкостного разряда между электродами 2–3 и 4–5, на которые подавались импульсы напряжения от двух генераторов U_1 . Импульсы напряжения следовали с частотой 21 кГц и имели амплитуду ≈ 7 кВ. Длительность импульсов на полувывоте равнялась $\approx 1,3$ мкс, а их фронт и спад составляли $\approx 0,4$ мкс. Генераторы включались одновременно или с задержкой, которая регулировалась.

В установке №2 использовались трубка из поликарбоната ESALUX TX с внутренним диаметром 14,2 см, которая была прозрачной в видимой области спектра, или трубка из кварца с внутренним диаметром 8,4 см. Увеличенный диаметр трубок позволял создавать ПДС с увеличенными поперечными размерами. Длина кварцевой трубки равнялась 28 см, а трубки из поликарбоната 55 или 150 см. Схема экспериментальной установки №2 с фотографией свечения разряда показана на рис. 2.

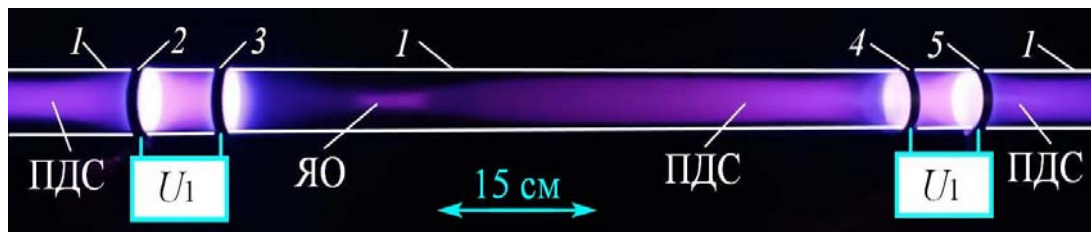


Рис. 1. Схема экспериментальной установки №1 для изучения условий появления ярких областей (ЯО) при встрече стримеров в плазменных диффузных струях (ПДС), инициируемых емкостным разрядом от двух пар наружных кольцевых электродов, а также встроенная фотография излучения ПДС: 1 — трубка из кварца; 2 и 5 — высоковольтные электроды, соединенный с генераторами U_1 ; 3 и 4 — заземленные электроды, соединенные с генераторами U_1 и плоской металлической плитой экспериментального стенда. Фотография сделана в темном помещении при экспозиции 0.25 сек. Давление воздуха $p = 1$ Торр

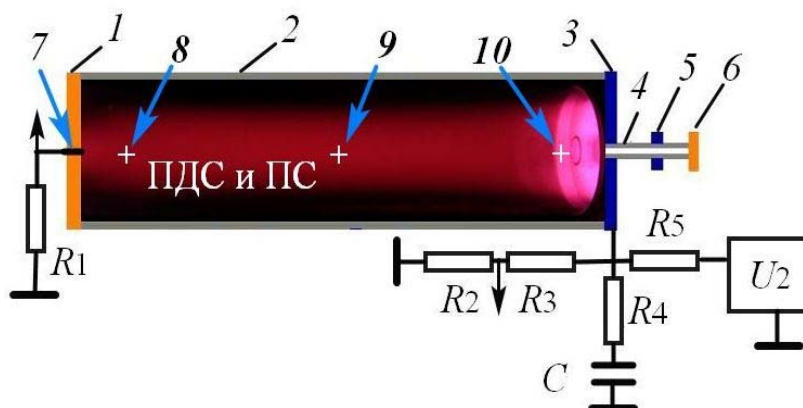


Рис. 2. Схема экспериментальной установки №2 с вставленной фотографией свечения плазменной диффузной струи (ПДС) и положительного столба тлеющего разряда (ПС) при давлении воздуха 0,4 Торр. Изображение разряда получено при экспозиции 3,2 с и однократном включении установки: 1 и 6 — фланцы из капрлона; 2 — трубка из кварца или из поликарбоната; 3 — высоковольтный плоский электрод из дюралюминия; 4 — кварцевая трубка с внешним диаметром 21 мм и толщиной стенки 1,5 мм, вставленная в сквозное отверстие электрода 3; 5 — внешний кольцевой электрод из стальной фольги шириной 10 мм; 7 — заземленный электрод из стали с радиусом кривизны 0,5 мм, который был вставлен в изолятор 1; 8, 9 и 10 — места установки торца световода снаружи трубки для регистрации импульсов и спектров излучения. U_2 — источник постоянного напряжения. R_1 — шунт, R_2 и R_3 — сопротивления делителя напряжения, R_4 — сопротивление для ограничения тока разряда, R_5 — зарядное сопротивление конденсатора C

От источника постоянного регулируемого напряжения U_1 положительной полярности с амплитудой до 10 кВ через сопротивление $R_5 = 1$ МОм заряжался конденсатор $C = 10$ нФ, который был подключен к высоковольтному электроду 3. Второй вывод конденсатора C через металлическую плиту экспериментального стенда и шунт $R_1 = 20$ Ом подключался к дополнительному электроду 7, установленному в центре фланца 1 из капрлона. Электрод 5 находился под плавающим потенциалом. Напряжение пробоя при его скорости нарастания ~ 100 В/нс на электроде 7 составляло единицы киловольт.

Форма импульсов напряжения измерялась с помощью делителя АКТАКОМ АСА-6039. Сопротивления делителя были $R_2 = 900$ кОм и $R_3 = 900$ МОм. Ток разряда определялся с помощью шунта с сопротивлением 20 Ом. Сигналы с делителя, шунта и ФЭУ подавались на осциллограф MDO 3104 (1 ГГц, частота дискретизации 5 выборок/нс). Оптическое излучения плазмы разряда регистрировалось цифровым фотоаппаратом Canon 2000D, а также через световод спектрометром HR2000+ES (диапазон 200–1150 нм; оптическое разрешение $\approx 0,9$ нм). Спектральные чувствительности HR2000+ES и световода были известны. Форма импульсов излучения определялась с помощью кремниевого ФЭУ (Si-PM) в составе модуля MicroFC-SMA-10035. Время нарастания переходной характеристики ФЭУ составляло 0,3 нс, время восстановления ячеек — 180 нс. Максимальную чувствительность ФЭУ имеет на длине волны 420 нм, и она плавно уменьшается в обе стороны от максимума, при этом на краях диапазона (320–800 нм) чувствительность равнялась $\approx 15\%$ от максимальной. При измерениях записывалось 3–5 импульсов излучения, форма и амплитуда которых повторялись с отклонением от среднего не более 10%. ФЭУ регистрировали излучение из областей разряда шириной ≈ 1 см. Центры этих областей находились в установке №2 на ее центральной оси на расстояниях 2, 14,5 и 27 см от левой поверхности электрода 3. Остальная часть трубки закрывалась черным экраном. Спектры излучения на этой установке определялись в тех же областях, где регистрировались импульсы излучения с ФЭУ. Фотографирование разряда, регистрация импульсов излучения с помощью ФЭУ и измерения спектров проводились в отсутствие внешнего освещения. Относительная влажность воздуха в лабораторном помещении равнялась $\approx 24\%$, а температура 23 °С.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показана фотография разряда, полученная при давлении атмосферного воздуха 1 Торр. Генераторы U_1 формировали импульсы напряжения одинаковой полярности. Так как интенсивность свечения ПДС, размеры которой на несколько порядков меньше чем у спрайтов, за один импульс было малой, то использовался импульсно-периодический режим для их фотографирования. Изображение на рис. 1 было получено за 5250 импульсов возбуждения. ПДС имели красный цвет с голубым оттенком, который близок к цвету нижней части спрайтов [2]. Данное изображение было получено при задержке между запуском генераторов. Правый генератор включался на 300 нс позднее. Эта задержка привела к появлению яркой области (ЯО). Изменяя задержку и давление воздуха, можно было получать одну или две ЯО и изменять их размеры и местоположение между электродами 3 и 4. Было установлено, что ЯО появляются в области столкновения стримеров, распространяющихся навстречу друг другу от двух пар электродов (2–3 и 4–5). Стримеры инициировали встречные ПДС, а поперечные размеры ПДС и фронта стримера уменьшались при удалении от электродов. Эти результаты подтверждают данные по формированию ярких точек (ЯО), полученные нами ранее в работе [4].

Для моделирования увеличения интенсивности излучения разряда в исследуемых аналогах красных столбчатых спрайтов была применена схема, показанная на рис. 2. В данной схеме для варьирования длительности импульса тока был использован конденсатор C , который присоединялся к электродам 3 и 7. Кроме того, к электроду 3 через сопротивление R_5 подключался источник постоянного напряжения U_2 . За счет конденсатора формировался импульс тока с большей амплитудой и(или) длительности, чем на установке №1. Кроме того, при сопротивлении $R_5 = 1$ МОм и менее, между электродами 3 и 7 можно было зажигать непрерывный тлеющий разряд. Таким образом, благодаря использованию конденсатора C , двух электродов 2 и 7, а также источника U_2 , можно было на установке №2 после формирования ПДС зажигать тлеющий разряд как в режиме однократных импульсов, так и в непрерывном режиме. Разряд на установке №2 переходил в тлеющий с положительным столбом в трубке 2, где перед этим распространялась ПДС. В таком режиме яркость свечения разряда существенно увеличилась, см. фотографию за один импульс на рис. 2. Отметим, что катодная часть разряда на рис. 2 не показана. В области около электрода 2, который являлся катодом, цвет излучения изменялся, как и должно быть в случае тлеющего разряда.

Применение сопротивления R_4 , а также оптимизация емкости конденсатора C позволила исключить при увеличении длительности разряда образование в положительном столбе тлеющего разряда страт, которые наблюдались в работе [5]. Важным результатом, полученным на данной установке в режиме однократных импульсов, оказалось инициирование разряда за счет положительного стримера при малой скорости нарастания напряжения. Фронт импульса напряжения при получении фотографии на рис. 2 равнялся ~ 20 мс, а скорость роста напряжения составляла ~ 100 В/мс.

Доказательством формирования стримера с плоского электрода является измерение с помощью ФЭУ свечения разряда из областей 8, 9 и 10 шириной 1 см, которые показаны на рис. 2 и отмечены знаком +. Свечение фронта стримера появлялось вначале у электрода 3 в области 10, затем регистрировалось в центральной части трубки 2 в области 9 и далее у фланца 1 в области 8. Длительность импульса излучения на полувысоте при прохождении стримера составляла ~ 100 нс, что согласуется с измерениями в работе [3]. Средняя скорость распространения стримера составила 1.8 мм/нс на первом участке от области 10 до области 9 и 1,1 мм/нс на втором участке от области 9 до области 8 после прохождения центральной части трубки 2.

Было установлено, что при низких давлениях воздуха и малой скорости нарастания напряжения инициирование разряда происходит за счет положительного стримера, который формирует ПДС, переходящую в режим тлеющего разряда. Длительность разряда, а также его режим в этом случае зависят от величин C , R_4 , R_5 и давления воздуха. Изменение величин C , R_4 , R_5 и напряжения источника U_2 позволяет изменять длительность импульса возбуждения, и, соответственно, длительность импульса излучения. Увеличение сопротивления R_5 до 18 МОм для установки на рис. 2 приводило к ограничению тока от источника U_2 и разряд из-за разрядки конденсатора прекращается за время ~ 10 мс. Инициирование пробоя положительным стримером было зарегистрировано как в трубке с внутренним диаметром 8,4 см, так и в трубке с внутренним диаметром 14,2 см.

Отметим, что в предварительных экспериментах на установке №2 при использовании генератора U_1 интенсивность излучения ПДС также была малой, как и на установке №1. Поэтому для фотографирования ПДС надо было увеличивать частоту следования импульсов и время экспозиции. В этом варианте схемы генератор U_1 подключался к электродам 5 (высоковольтный вывод) и 3 (заземленный вывод), а конденсатор C и источник U_2 отсоединялись.

Сравнения цвета разряда в условиях возбуждения с генератором U_1 , рис. 1, и источником питания U_2 , рис. 2, показало, что цвет разряда отличается, в том числе, при одинаковых давлениях воздуха. Голубой оттенок разряда характерен для ПДС, получаемых от генератора U_1 , и он более заметен при больших давлениях. С увеличением вклада в интегральное излучение разряда положительного столба тлеющего разряда, рис. 2, цвет разряда более соответствовал излучению красных столбчатых спрайтов, см., например, фотографию на рисунке под номером 1 в работе [2].

Спектр излучения на установке №2 при основном вкладе положительного столба тлеющего разряда приведен на рис. 3. Основной вклад в спектр излучения давали полосы второй (2+) и первой положительной (1+) систем молекулярного азота с длинами волн 315,8; 337,1 и 357,6 нм. При этом спектральная плот-

ность энергии излучения трех основных полос 2+ системы азота была значительно больше, чем у полос 1+ системы, которая определяла красный цвет ПДС, имея широкие полосы в красной области спектра. Особенностью исследованного режима на установке №2 является отсутствие полос первой отрицательной системы (1–) молекулярного иона азота, что соответствует результату, полученному для области glow при измерении спектров излучения красных спрайтов [6]. Кроме того, на установке №2 по сравнению со спектрами излучения, полученными в работах [3, 4], была зарегистрирована в ближней ИК области спектра высокая интенсивность излучения полос 1+ системы азота с длинами волн 869,5 и 888,3 нм.

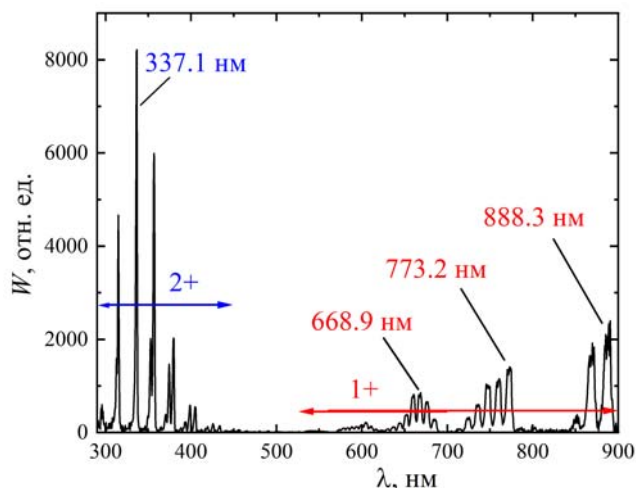


Рис. 3. Спектр излучения для условий на рис. 2 из области, находящейся на расстояниях 14,5 см от левой поверхности электрода 3. Время экспозиции – 30 с. $C = 10$ нФ, $R_3 = 1$ МОм, $R_4 = 10$ кОм, $p = 0,4$ Торр

В режимах, реализуемых на установке №1 при микросекундных длительностях импульсов напряжения, спектральная плотность энергии этих полос меньше, чем у полос с наибольшей W на длинах волн 668,9 и 773,2 нм. Отметим, что в излучении красных спрайтов также регистрировалось мощное излучение в ИК области спектра [7].

Заключение

В данной работе при формировании в воздухе низкого давления плазменных диффузных струй (ПДС) реализованы условия, при которых удается получать области свечения, подобные наблюдаемым в области «glow», а также отдельные яркие точки «beads». При первоначальном пробое за счет положительного стримера, усиление интенсивности свечения в его канале было получено за счет дополнительного квазистационарного тлеющего разряда. Установлены условия, при которых интенсивное свечение «glow» наблюдается при однократном пробое воздуха. Аналоги ярких светящихся точек «beads» в красных столбчатых спрайтах были получены в режиме импульсно-периодического емкостного разряда с внешними электродами. В этом случае плазма, инициирующая ПДС, не имела контакта с металлическими электродами. Показано, что ЯО возникают благодаря взаимодействию стримеров, которые инициируют ПДС. Предполагаем, что полученные результаты будут полезны при изучении свойств красных спрайтов.

Благодарности. Авторы благодарят В.А. Панарина и В.С. Скакуна за помощь в проведении экспериментов.

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

Список литературы

1. Williams E., Valente M., Gerken E., Golka R. Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges / Dordrecht: Springer, 2006. P. 237–251.
2. Marskar R. Genesis of column sprites: formation mechanisms and optical structures // Plasma Sources Science and Technology. 2024. V. 33. Art. N 025024. DOI: 10.48550/arXiv.2310.08254.
3. Sorokin D.A., Tarasenko V.F., Bakst E.K., Vinogradov N.P. // Physics of Plasmas. 2023. V. 30. Art. N 083515.
4. Тарасенко В.Ф., Виноградов Н.П., Бакшт Е.Х., Сорокин Д.А., Печеницин Д.С. Яркие области излучения в воздухе низкого давления при встрече плазменных диффузных струй // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37, №4. С. 294–301. DOI: 10.15372/AOO20240405.

5. Tarasenko V.F., Vinogradov N.P., Panarin V.A., Skakun V.S., Sorokin D.A., Baksh E.Kh. Experimental Simulation of Non-uniformity in Column Sprite Glow // Atmospheric and Oceanic Optics. 2024. V. 37, Suppl. 1. P. S183–S191. © Pleiades Publishing, Ltd., 2024. DOI: 10.1134/S1024856024701598.
6. Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G., Haaland R., Luque A. Optical spectra of small-scale sprite features observed at 10,000 fps // J. of Geophysical Research: Atmospheres. 2020. V. 125. Art. N e2020JD033170. DOI: 10.1029/2020JD033170.
7. Siefring C.L., Morrill J.S., Sentman D.D., Heavner M.J. Simultaneous near-infrared and visible observations of sprites and acoustic-gravity waves during the EXL98 campaign // J. Geophys. Res. 2010. 115. Art. N A00E57. DOI: 10.1029/2009JA014862.

V.F. Tarasenko, E.Kh. Baksh, N.P. Vinogradov. Experimental modeling of the "glow" and "beads" regions when forming analogs of red columnar sprites.

In this work, during the formation of plasma diffuse jets (PDJs) in low-pressure air, conditions under which it is possible to obtain "glow" areas similar to those observed in the "columnar glow" region, as well as individual bright points "beads", are realized. Due to an additional quasi-stationary discharge during the initial breakdown with a positive streamer the increasing intensity in "columnar glow" was obtained. Conditions during a single breakdown of air, under which an intense "glow" is observed, are established. Analogues of bright glowing points "beads" in red columnar sprites, during the formation of PDS in the pulse-periodic capacitive discharge mode with external electrodes, were obtained. In this case, the plasma initiating the PDS had no contact with the metal electrodes.