

УДК 537.527.9; 537.53

Формирование стримеров в неоднородном электрическом поле при низких давлениях воздуха

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

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 24.05.2021 г.;
после доработки 9.06.2022 г.;
принята к печати 15.07.2022 г.

Проведены экспериментальные исследования условий формирования стримеров красного цвета при давлении атмосферного воздуха 0,1–10 торр. Реализован режим генерации стримеров из плазмы безэлектродного емкостного разряда с длиной в десятки сантиметров. Показано, что при увеличении давления и напряжения разряд между металлическими электродами с малым радиусом кривизны переходит в стационарный режим, в котором стримеры не формируются. С помощью ICCD-камеры подтверждено, что цилиндрические стримеры стартуют с электрода, имеющего положительную полярность. Установлено, что при импульсных и непрерывных разрядах можно реализовать режимы, в которых при давлении воздуха ~ 1 торр цвет формируемой плазмы соответствует окраске красных спрайтов.

Ключевые слова: разряд в атмосферном воздухе низкого давления, моделирование спрайтов, промежутки острей–острие, емкостной разряд, стримеры красного цвета; discharge in low-pressure atmospheric air, sprite modeling, tip-to-point gap, capacitive discharge, red streamer.

В настоящее время большое внимание уделяется изучению высотных атмосферных разрядов (красных спрайтов, голубых струй, альфов и др.), а также их теоретическому и экспериментальному моделированию [1–16]. Благодаря фотографированию с высоким временным разрешением установлено, что красные спрайты состоят из ветвящихся струй большой протяженности, которые стартуют с высоты ~ 70–90 км, как правило, по направлению к Земле. Имеются данные, согласно которым наблюдаемые спрайты движутся не только по направлению к Земле, но и от нее [11, 12]. В ряде публикаций предполагается влияние паров микрометеоритов на иницирование и цвет красных спрайтов [13, 14]. Достоверно установлено, что начиная с высоты ~ 50 км цвет красных спрайтов может меняться на голубой, а гигантских голубых струй – на красный [10–12]. Изменение голубого цвета разряда на красный наблюдалось при уменьшении давления воздуха в лабораторных экспериментах и в результате теоретического моделирования излучения стримеров [15]. В большинстве работ предполагается, что спрайты – это стримеры (волны ионизации) больших размеров (см., например, [10–12]). Теоретические работы также подтверждают возможность формирования стримеров при низких давлениях воздуха [3, 6, 8, 16].

Параллельно с натурными исследованиями проводится экспериментальное моделирование свойств высотных атмосферных разрядов, в частности красных спрайтов [5–7, 14, 15]. Так, в [5] показано, что положительный столб тлеющего разряда при давлении воздуха 1,1 торр был красного цвета. Спектр излучения этой части разряда содержал излучение 1+ системы азота и соответствовал спектру излучения спрайтов на высотах 50 км и выше. Однако цвет излучения у катода при том же давлении в [5] был голубой. Плазма наносекундного разряда при давлении порядка единиц торр (см. [14]) также была голубого или фиолетового цвета.

Цель настоящей работы – реализовать в атмосферном воздухе низкого давления режим разряда, при котором формируются стримеры красного цвета.

Исследование характеристик излучения различных режимов разрядов проводилось на установке, состоящей из кварцевой трубки длиной 120 см с внутренним диаметром 5 см, расположенной параллельно поверхности Земли, двух источников питания и регистрирующей аппаратуры. Кварцевая трубка откачивалась до давления 10^{-2} торр, а затем заполнялась комнатным воздухом с влажностью $\approx 23\%$. С источником питания № 1, который обеспечивал постоянное напряжение (1–20 кВ) положительной и отрицательной полярности, использовались электроды из нихромовой проволоки диаметром 1 мм с заостренными концами, имеющими радиус закругления ~ 200 мкм. Они крепились на фланце из капролона, установленном на левом торце кварцевой

* Евгений Хаимович Бакшт (beh@loi.hcei.tsc.ru); Никита Петрович Виноградов (vinikitavin@mail.ru); Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru).

трубки. Расстояние между электродами составляло 10 мм. Напряжение на них подавалось по высоковольтному кабелю длиной 3 м через сопротивление 100 МОм. Форма этих электродов показана на рис. 1, а.

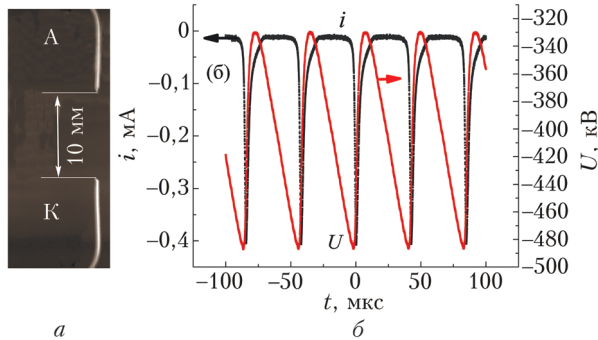


Рис. 1. Фотография электродов (а) (А – анод, К – катод), а также осциллограммы напряжения U и тока разряда i при давлении воздуха ≈ 1 торр (б)

Для инициирования стримерных разрядов при отсутствии контакта плазмы с электродами применялся импульсно-периодический источник питания № 2. Иницирующий стримеры разряд формировался между кольцевыми электродами из фольги шириной 1 см, которые располагались в центре кварцевой трубки на ее внешней поверхности. Расстояние между электродами составляло 6 см. Левый электрод был заземлен, а на правый подавались импульсы напряжения отрицательной полярности с фронтом и спадом ~ 150 нс, амплитудой 7 кВ и длительностью на полувысоте $\approx 1,5$ мкс.

Напряжение на промежутке измерялось делителем АКТАКОМ АСА-6039, а ток разряда – шунтом. Сигналы с делителя и шунта подавались на осциллограф MDO 3104 (1 ГГц, частота дискретизации – 5 выборок/нс). Оптическое излучение плазмы разряда регистрировалось четырехканальной ICCD-камерой HSFC-PRO, цифровым фотоаппаратом SONY A100 и спектрометром HR2000+ES.

В экспериментах с источником № 2 с помощью фотодиода PD025 компании Photech, который имел наносекундное временное разрешение и максимальную чувствительность в области 250–500 нм (катод LNS20), определялась скорость стримера. Фотодиодом регистрировали излучение из областей разряда шириной 4 см. Центры этих областей находились на расстоянии 5, 13 и 23 см от края заземленного кольцевого электрода. Остальная часть трубки закрывалась черным экраном.

В работе основное внимание было уделено изучению свойств плазмы разряда при давлениях воздуха (0,4–3 торр). В этих условиях регистрировались стримеры красного цвета. Как известно, в атмосфере Земли при таких давлениях наблюдаются красные спрайты, состоящие из нескольких стримеров [8–10]. Отметим, что в наших экспериментах интенсивность излучения плазмы отдельных стримеров была низкой. Это не позволяло определить динамику формирования отдельного стримера даже при использовании ICCD-камеры. Поэтому изобра-

жения, приведенные ниже, показывают интегральное свечение нескольких стримеров. При съемке камерой SONY A100 из-за ее низкой чувствительности длительность экспозиции приходилось увеличивать, и на одной фотографии фиксировалось интегральное излучение десятков тысяч стримеров.

Было установлено, что с источником № 1 при повышенном напряжении и давлении ток разряда не меняется и стримеры не формируются. Для реализации стримерного режима разряда необходимо было использовать определенное напряжение и давление. Осциллограммы напряжения на промежутке и тока разряда в условиях формирования стримеров показаны на рис. 1, б при отрицательной полярности источника № 1. От источника на балластное сопротивление подавалось напряжение $U_0 = -5$ кВ. Напряжение U на промежутке возрастало, а затем за счет образования стримеров резко уменьшалось на ~ 150 В. При этом регистрировались импульсы тока с частотой ~ 20 кГц. Стримеры цилиндрической формы, как и следовало ожидать, стартовали от электрода положительной полярности. На рис. 2 показаны интегральные фотографии свечения разряда при напряжении источника $U_0 = -5$ и -15 кВ.

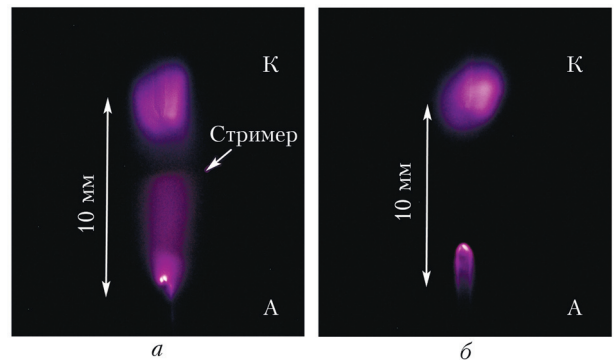


Рис. 2. Фотографии разряда при $U_0 = -5$ кВ и экспозиции 4 с (а), $U_0 = -15$ кВ и экспозиции 1 с (б) (цв. рисунок см. на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.09>); $p = 3$ торр

Фотоаппарат фиксировал как излучение стримера, форма которого отдельно показана на рис. 3, а, так и свечение стационарного тлеющего разряда. В таком режиме и стример, и свечение плазмы у обоих электродов были красного цвета, который соответствует излучению спрайтов [1, 2, 6, 9–12].

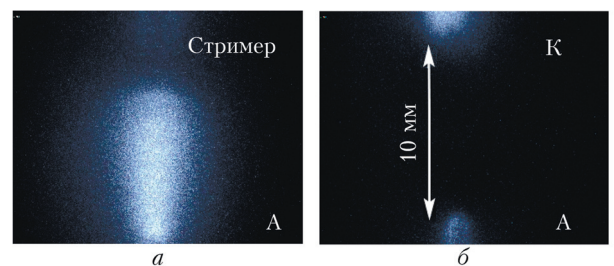


Рис. 3. Изображения, полученные с помощью ICCD-камеры при $U_0 = -5$ (а) и -15 кВ (б); $p = 3$ торр; экспозиция – 100 мкс

Форма разряда, а также осциллограммы напряжения и тока, как мы уже отмечали, зависели от давления воздуха и от напряжения источника № 1. В частности, при давлении 3 торр с увеличением напряжения стримеры не регистрировались (рис. 2, б), а напряжение и ток разряда были постоянные. Изображение стримера, полученное с помощью ICCD-камеры в условиях рис. 2, а, показано на рис. 3, а.

ICCD-камера не передавала цвета изображений, но позволяла разделить вклад различных составляющих в свечение плазмы разряда. При экспозиции 100 мкс видны изображение стримера цилиндрической формы и яркая точка на аноде (рис. 3, а). С ростом напряжения стримеры не формировались (рис. 3, б), но красный цвет разряда при низких давлениях (1 и 3 торр) сохранялся. При увеличении давления до 10 торр стационарный разряд без стримеров наблюдался в более широком диапазоне напряжений.

Изменение полярности источника при низком давлении воздуха не влияло на появление стримера с электрода положительной полярности (рис. 4).

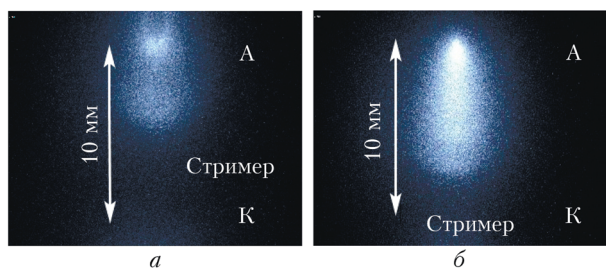


Рис. 4. Изображение стримера, полученное с помощью ICCD-камеры при $p = 1$ торр и экспозиции 500 мкс (а), $p = 3$ торр и экспозиции 100 мкс (б); $U_0 = +10$ кВ

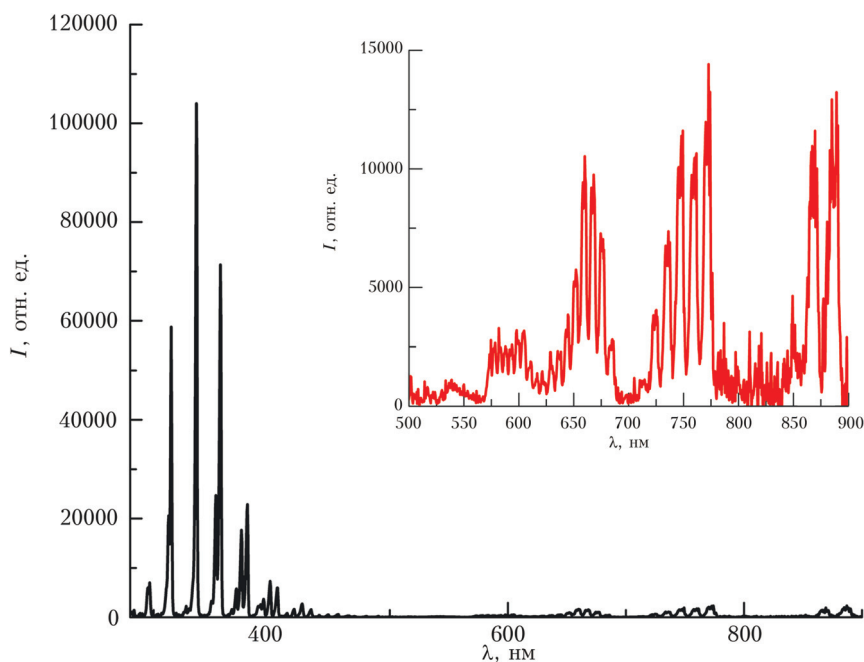


Рис. 5. Спектры излучения разряда в области 280–900 (внизу) и в области 500–900 нм при установке светофильтра ЖС-12 (вставка); $p = 1$ торр

Размеры стримера и интенсивность излучения зависели от давления и напряжения источника № 1. Однако его цвет, как показало фотографирование разряда, не изменялся. Отметим, что реализация режима разряда, ток и напряжение которого показаны на рис. 1, б, наблюдалась если стример не успевал замкнуть промежуток.

На рис. 5 приведены спектры излучения плазмы разряда между металлическими электродами при давлении воздуха 1 торр. Измерения с учетом чувствительности спектрометра подтвердили, что в воздухе при уменьшении давления спектральная плотность энергии излучения полос первой положительной 1+ системы азота увеличивается. Кроме того, в этих условиях было зарегистрировано уменьшение отношения спектральной плотности энергии излучения второй положительной 2+ системы азота относительно 1+. Подобная тенденция была показана ранее при уменьшении давления апокампиического разряда [15]. Было установлено, что красный цвет плазмы разряда, который наблюдается визуально и фиксируется в таких экспериментах на фотографиях при уменьшении давления, связан с увеличением абсолютной и относительной интенсивностей 1+ системы азота.

Свечение 1+ системы азота регистрировалось в области 500–900 нм, а 2+ – в области 280–450 нм. С источником № 1 относительная интенсивность 1+ системы азота с уменьшением давления от 30 до 1 торр возросла в шесть раз.

Кроме регистрации стримеров красного цвета между металлическими электродами в работе показана возможность формирования стримеров красного цвета, стартующих из плазмы импульсно-периодического емкостного разряда. На рис. 6 приведена интегральная фотография излучения разряда с источником № 2.

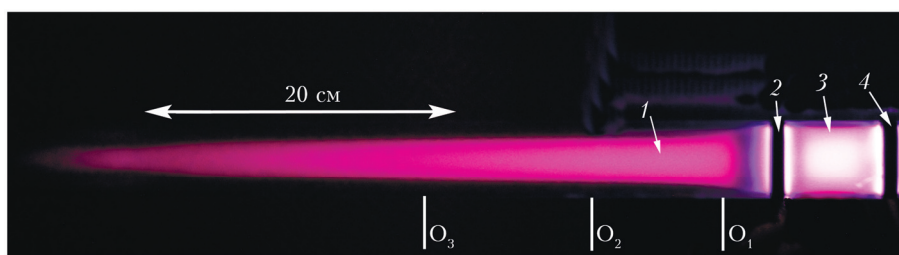


Рис. 6. Фотография свечения плазмы разряда воздуха в кварцевой трубке при возбуждении емкостным разрядом от источника № 2 с отрицательной полярностью (цвет. рисунок см. на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.09>) при $p = 1$ торр: 1 – область свечения стримера (волны ионизации); 2 – заземленный кольцевой электрод; 3 – область свечения основного емкостного разряда; 4 – высоковольтный кольцевой электрод; O_1 , O_2 и O_3 – центры областей разряда шириной 4 см, из которых с помощью фотодиода регистрировалось излучение стримера

Благодаря применению импульсов напряжения с коротким фронтом длина стримеров значительно увеличилась, но их красный цвет сохранился. Доказательство реализации стримерного режима с источником № 2 – высокая скорость появления свечения плазмы на различных расстояниях от заземленного электрода. С помощью фотодиода были определены задержки импульсов излучения в различных областях кварцевой трубки слева от заземленного электрода (рис. 6) относительно импульса тока. Средняя скорость движения фронта стримера между первой областью (ее середина O_1 находится на расстоянии 5 см от левого края заземленного кольцевого электрода 2 см, рис. 6) и второй (O_2 на 13 см от 2) составила 0,17 см/нс, а между второй и третьей (O_2 и O_3 , соответственно, на 13 и 23 см от 2) – 0,12 см/нс. Эти значения соответствуют скоростям распространения стримеров при низких давлениях [16]. Спектр излучения разряда в этих условиях был подобен спектру излучения, который был получен при давлении 1 торр с источником № 1 между металлическими электродами. Часть спектра, выделенная со светофильтром ОС-12 (пропускание начинается с 440 нм, а в области 500–1500 нм составляет ~90%), приведена на рис. 5 (вставка). Этот спектр был зарегистрирован на расстоянии 13 см от заземленного кольцевого электрода за 80 тыс. имп.

Таким образом, в настоящей работе при низких давлениях воздуха показана возможность формирования стримеров, цвет которых определяется переходами 1+ системы азота. Изображения свечения разряда между металлическими электродами с источником № 1, полученные с помощью фотоаппарата и ICCD-камеры, показали, что при длительности одного кадра в единицы секунд фотоаппарат при давлениях 1 и 3 торр одновременно регистрирует непрерывное излучение разряда и интегральное излучение стримеров. С помощью ICCD-камеры были получены интегральные изображения стримеров.

Эксперименты подтвердили, что стримеры стартуют с электрода положительной полярности. Цвет плазмы разряда, включая цвет стримеров, наблюдаемый визуально и полученный на фотографиях, а также спектры излучения показывают наличие интенсивных полос 1+ системы азота, которая, со-

гласно [1, 2, 8, 9] и нашей работе, определяет цвет излучения красных спрайтов при аналогичных давлениях.

С применением ICCD-камеры за счет выбора длительности одного кадра было зарегистрировано излучение стримера и суммарное излучение стримера и квазистационарного разряда в паузе между стримерами. Это позволило установить, что интенсивность излучения стримера существенно больше интенсивности излучения разряда при квазистационарном токе. Цвет стационарного разряда и стримеров в данных условиях существенно не отличался.

При инициировании пробоя плазмой импульсно-периодического разряда с частотой ~ 20 кГц (рис. 6) были сформированы стримеры красного цвета длиной в десятки сантиметров. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что голубой и фиолетовый цвета наносекундных разрядов при тех же давлениях (1 и 3 торр), регистрируемые в [14], не связаны с давлением воздуха, а обусловлены более высоким электрическим полем при коротких импульсах.

Предлагаем для изучения свойств красных спрайтов, а также других высотных атмосферных разрядов использовать режим формирования стримеров, инициируемых импульсно-периодическим емкостным разрядом.

Благодарности. Авторы благодарят Д.С. Печеницына за создание высоковольтных источников.

Финансирование. Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-1026 от 15.11.2021).

Список литературы

1. Hampton D.L., Heavner M.J., Wescott E.M., Sentman D.D. Optical spectral characteristics of sprites // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23, N 1. P. 89–92.
2. Armstrong R.A., Suszcynsky D.M., Lyons W.A., Nelson T.E. Multi-color photometric measurements of ionization and energies in sprites // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27, N 5. P. 653–656.
3. Pasko V.P. Red sprite discharges in the atmosphere at high altitude: the molecular physics and the similarity with laboratory discharges // *Plasma Sources Sci.*

- Technol. 2007. V. 16. P. S13. DOI: 10.1088/0963-0252/16/1/S02.
4. Williams E., Kuo C.L., Byr J., Satori G., Newsome R., Adachi T., Boldi R., Chen A., Downes E., Hsu R.R., Lyons W. Resolution of the sprite polarity paradox: The role of halos // *Radio Sci.* 2012. V. 47. P. RS2002. DOI: 10.1029/2011RS004794.
 5. Williams E.R. Sprites, elves and glow discharge tubes // *Phys. Today.* 2001. V. 54, N 11. P. 41–47.
 6. Opaits D.F., Shneider M.N., Howard P.J., Miles R.B., Milikh G.M. Analysis of UV flashes of millisecond scale detected by a low-orbit satellite // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. P. L14801. DOI: 10.1029/2010GL043996.
 7. Parra-Rojas F.C., Passas M., Carrasco E., Luque A., Tanarro I., Simek M., Gordillo-Vázquez F.J. Spectroscopic diagnostics of laboratory air plasmas as a benchmark for spectral rotational (gas) temperature determination in TLEs // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. V. 118. P. 4649–4661. DOI: 10.1002/jgra.50433, 2013.
 8. Pasko V.P., Yair Y., Kuo C.L. Lightning related transient luminous events at high altitude in the Earth's atmosphere: Phenomenology, mechanisms and effects // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 168, N 1. P. 475–516. DOI: 10.1007/s11214-011-9813-9
 9. Huang A., Lu G., Yue J., Lyons W., Lucena F., Lyu F., Cummer S.A., Zhang W., Xu L., Xue X., Xu S. Observations of red sprites above Hurricane Matthew // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45, N 13. P. 158–165. DOI: 10.1029/2018GL079576.
 10. Neubert T., Østgaard N., Reglero V., Blanc E., Charrion O., Oxborrow C.A., Orr A., Tacconi M., Hartnack O., Bhandari D.D. The ASIM mission on the international space station // *Space Sci. Rev.* 2019. V. 215, N 2. P. 1–17. DOI: 10.1007/s11214-019-0592-z.
 11. Qin J., Celestin S., Pasko V.P., Cummer S.A., McHarg M.G., Stenbaek-Nielsen H.C. Mechanism of column and carrot sprites derived from optical and radio observations // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. N 17. P. 4777–4782.
 12. *Sprites, elves and intense lightning discharges* / M. Füllekrug, E.A. Mareev, M.J. Rycroft (eds.). Netherlands: Springer Science & Business Media, 2006. V. 225.
 13. Zabolotin N.A., Wright J.W. Role of meteoric dust in sprite formation // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28, N 13. P. 2593–2596.
 14. Tarasenko V., Vinogradov N., Beloplotov D., Burachenko A., Lomaev M., Sorokin D. Influence of nanoparticles and metal vapors on the color of laboratory and atmospheric discharges // *Nanomaterials.* 2022. V. 12, N 4. P. 652. DOI: 10.3390/nano12040652.
 15. Sosnin E.A., Babaeva N.Yu., Kozyrev A.V., Kozhevnikov V.Yu., Naidis G.V., Skakun V.S., Panarin V.A., Tarasenko V.F. Modeling of transient luminous events in Earth's middle atmosphere with apokamp discharge // *Phys. Usp.* 2021. V. 64, iss. 2. P. 191–210. DOI: 10.3367/UFNe.2020.03.038735.
 16. Briels T.M.P., van Veldhuizen E.M., Ebert U. Positive and negative streamers in ambient air: measuring diameter, velocity and dissipated energy // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. V. 41, N 23. P. 234008. DOI: 10.1088/0022-3727/41/23/234008.

E.Kh. Baksh, N.P. Vinogradov, V.F. Tarasenko. **Generation of streamers in an inhomogeneous electric field under low air pressure.**

The conditions for generation of red streamers at an atmospheric air pressure of 0.1–10 Torr are experimentally studied. The mode of generation of streamers tens of centimeters in length from the plasma of an electrodeless capacitive discharge is implemented under low pressures. A discharge between metal small-curvature electrodes transforms into a stationary mode, where streamers are not generated, as the pressure and voltage increase. It was confirmed using the ICCD camera that the streamers start from the positive-polarity electrode. The color of the discharge plasma depends on the air pressure in pulsed and continuous discharges and is most consistent with the color of red sprites at a pressure of ~ 1 Torr.