

Моделирование красных спрайтов в лабораторных экспериментах

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

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**vinikitavin@mail.ru*

Аннотация. Представлены результаты экспериментального моделирования красных спрайтов при давлениях 0.1–10 Торр. Для инициирования волн ионизации (стримеров) были применены два режима разряда. В первом, использовались постоянное напряжение и два электрода с малым радиусом кривизны, во втором, безэлектродный разряд с частотой следования импульсов напряжения 21 кГц. Показано, что при микросекундных импульсах с амплитудой в единицы киловольт и давлении воздуха 0.4–3 Торр формируются волны ионизации красного цвета с длиной до 50 см. Измерены скорость фронта стримера и его спектр излучения в области 200–1200 нм на различных расстояниях от области инициирования разряда.

Ключевые слова: экспериментальное моделирование красных спрайтов, стримерный разряд в воздухе, давление доли – единицы Торр.

1. Введение

Исследованиям атмосферных разрядов уделялось и уделяется большое внимание. Они влияют на жизнедеятельность человека, кроме того, физические процессы в них остаются до конца не изученными. Три последних десятилетия во многих научных группах интенсивно исследуются так называемые транзиентные световые явления, к которым относятся красные спрайты, голубые струи, эльфы и другие высотные разряды [1–7]. Выполняются работы по их моделированию в лабораторных условиях [8, 9]. Одним из таких типов разрядов, который иницируется на высотах 70–80 км от поверхности Земли и наблюдается над областями грозовой активности являются красные спрайты [1–5]. Их наблюдают в области высот 40–100 км, а цвет красных спрайтов может изменяться с красного на голубой на высоте около 50 км [7]. К настоящему времени установлено, что спрайты можно сопоставлять со стримерами (волнами ионизации), которые за счет низких давлений на больших высотах имеют длину в десятки километров [1–4]. Считается, что красный цвет спрайтов определяется излучением первой положительной (1+) системы азота [1]. Важные данные о характеристиках излучения спрайтов были получены благодаря наблюдению за ними с самолётов и международной космической станции [6]. В частности, измерены длительность их свечения, спектры излучения и скорости распространения. Однако многие процессы, которые наблюдаются при формировании красных спрайтов требуют дальнейших исследований, в том числе в лабораторных условиях. Одно из таких свойств спрайтов – это направление их распространения. Остается неясным механизм инициирования красных спрайтов.

Цель данной работы – экспериментально исследовать в импульсно-периодическом режиме характеристики стримерных разрядов, которые имеют красный цвет при давлении воздуха 0.1–10 Торр.

2. Экспериментальная установка и методики

В лаборатории оптических излучений ИСЭ СО РАН была создана установка, позволяющая проводить исследования оптических характеристик разряда при давлениях, которые соответствуют давлениям воздуха в области наблюдений красных спрайтов. Установка состояла из кварцевой трубки длиной 120 или 30 см, имеющей внутренний диаметр 50 мм и толщину стенки 2.5 мм, высокочастотного генератора (U_g), а также источника постоянного напряжения (U). Полярности напряжения генератора и источника могли изменяться. Также можно было регулировать амплитуду напряжения. Торцы трубки

закрывались фланцами из капролона. В правом фланце было отверстие диаметром 5 мм для откачки и напуска воздуха. Левый фланец имел кварцевое окно, или на нём устанавливались два дополнительных электрода из нихромовой проволоки диаметром 1 мм, концы которой были загнуты и заострены, Рис.1.

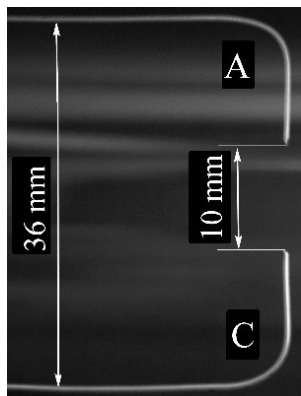


Рис.1. Фотография дополнительных электродов на левом торце кварцевой трубки. А – анод. С – катод.

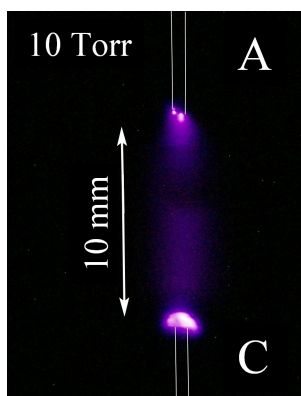


Рис.2. Фотография разряда между дополнительными электродами при давлении воздуха 10 Торр. Источник U .

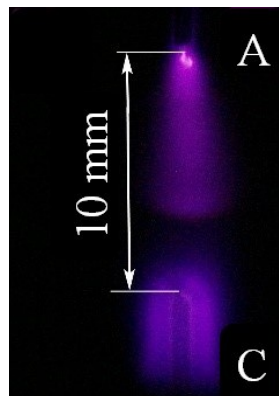


Рис.3. Фотография разряда между дополнительными электродами при давлении воздуха 3 Торр. Источник U .

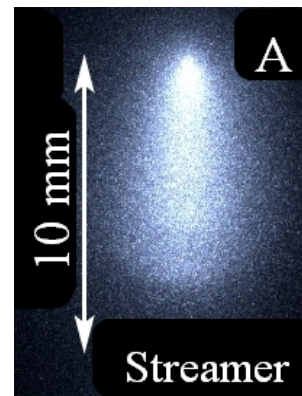


Рис.4. Изображение стримера, полученное с помощью ICCD камеры при давлении воздуха 3 Торр. Источник U .

Радиус кривизны электродов составлял ~ 0.1 мм, а зазор между ними равнялся 10 мм. На дополнительные электроды подавалось постоянное напряжение от источника U , при этом форма разряда зависела от давления и напряжения.

В экспериментах с высокочастотным генератором и кольцевыми электродами дополнительные электроды снаружи камеры соединялись и заземлялись, или на них (на обе соединённые части) подавалось напряжение от источника U . Для инициирования стримерных разрядов в отсутствии контакта плазмы с электродами применялся импульсно-периодический генератор U_g . Генератор подключался к кольцевым электродам из фольги, расположенными в центре на внешней поверхности трубки. Ширина кольцевых электродов равнялась 1 см, а расстояние между ними 6 см. Левый электрод был заземлен, а на правый подавались импульсы напряжения с фронтом и спадом ~ 350 нс, амплитудой 7 кВ и длительностью на полувысоте ~ 2 мкс.

Напряжение на промежутке измерялось делителем АКТАКОМ АСА-6039, а ток разряда шунтом. Сигналы с делителя и шунта подавались на осциллограф Tektronix MDO 3104 (1 GHz, частота дискретизации 5GS/s). Оптическое излучение плазмы разряда регистрировалось цифровым фотоаппаратом Sony A100, четырехканальной ICCD камерой HSFC-PRO и спектрометром Ocean Insight HR2000+ES.

Скорость стримера определялась с помощью фотодиода PD025 компании Photek с наносекундным временным разрешением и максимальной чувствительностью в области 250–500 нм (катод LNS20). Фотодиодом регистрировали излучение из областей разряда шириной 4 см, центры которых находились от края заземленного кольцевого электрода на расстоянии 3, 13 и 23 см. Остальная часть трубки закрывалась черным экраном. Напряжение от генератора U_g подавалось на кольцевые электроды.

Кварцевая трубка откачивалась до давления 10^{-2} Торр, а затем заполнялась комнатным воздухом с влажностью $\approx 23\%$.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Разряд между дополнительными электродами

Данный эксперимент был проведен для определения влияния полярности иницирующего разряда электрода на формирование стримеров красного цвета при низких давлениях воздуха. Постоянное напряжение от источника по кабелю длиной 3 м через сопротивление 100 МОм подавалось на дополнительные электроды, установленные на левом фланце, см. Рис.1.

Нижний дополнительный электрод был заземлен через шунт, а к верхнему прикладывалось напряжение положительной или отрицательной полярности. Кольцевые электроды в этом случае не устанавливались. Излучение разряда при давлении 6 Торр и более с электродами, показанными на Рис.1, наблюдалось в основном у их заостренных концов, Рис.2. Ток разряда и напряжение на промежутке в этих условиях были постоянными. Стримеры при повышенных давлениях и постоянном токе разряда не регистрировались.

Формирование стримеров наблюдалось при сравнительно низком напряжении источника и давлении 1–3 Торр. Фотография разряда в этом режиме показана на Рис.3. Видно свечение у электродов и стример, распространяющийся с анода. Изображение стримера, полученное с помощью ICCD камеры показано на Рис.4. Уменьшение длительности кадра позволило регистрировать свечение стримера без излучения плазмы у противоположного электрода. Длина стримера в импульсно-периодическом режиме была меньше межэлектродного зазора. Напряжение на промежутке и ток разряда имели импульсную и постоянную составляющие, Рис.5.

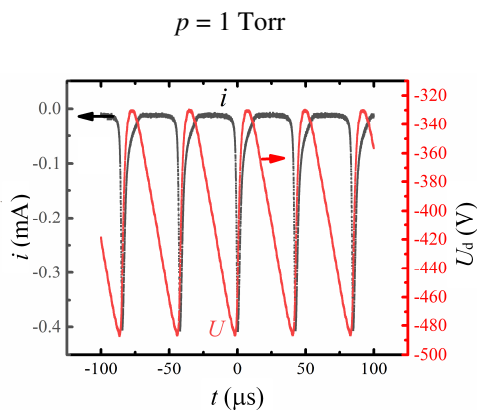


Рис.5. Осциллограммы напряжения U_d и тока разряда i . Источник U .
Напряжение –5 kV.

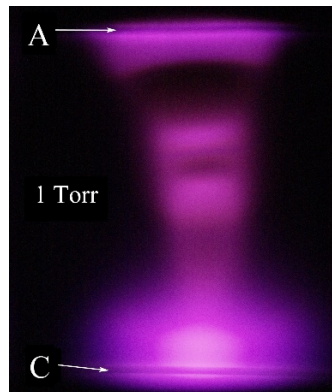


Рис.6. Фотография разряда между подводами к дополнительным электродам.
А – анод. С – катод.
Источник U .

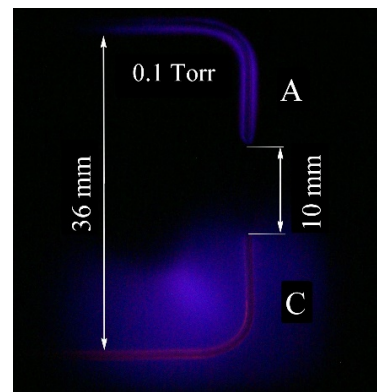


Рис.7. Фотография разряда между дополнительными электродами. А – анод.
С – катод. Источник U .

В этих условиях напряжение пробоя промежутка было на порядок меньше подаваемого от источника, а импульсный ток разряда составляет ~0.65 мА. При увеличении напряжения источника частота следования импульсов тока увеличивалась. Данный режим разряда обусловлен формированием цилиндрических стримеров, которые не успевают замкнуть промежутки, Рис.4. Из-за наличия большого сопротивления (100 МОм) между источником и электродами, а также малой величины межэлектродной емкости при формировании стримера напряжение на промежутке быстро уменьшается и его скорость уменьшается, а затем он останавливается. Это приводит к реализации импульсного режима тока разряда, в котором

величина тока после спада напряжения уменьшается на порядок и более. После рекомбинации плазмы стримера, сопротивление промежутка возрастает, и напряжение снова начинает увеличиваться. При достижении пороговой величины, опять формируется стример. Эксперименты подтвердили, что и при низких давлениях воздуха стримеры формировались с положительного электрода. Причем, этот электрод может быть, как высоковольтным, так и заземленным.

При уменьшении длины кварцевой трубки до 30 см и давлении ~ 1 Торр плазменные образования красного цвета формировались между подводами к промежутку с зазором между ними 36 мм, Рис.6. Разряд у острый и между ними в промежутке $d = 10$ мм в этих условиях отсутствовал. При уменьшении давления до 0.1 Торр был замечен разряд между подводами дополнительных электродов и у электродов, но его цвет изменился на фиолетовый, Рис.7. Эти режимы разряда планируется исследовать в будущем.

Таким образом эксперимент с использованием металлических электродом подтвердил, что генерация стримеров с электрода положительной полярности, который имеет малый радиус кривизны, происходит при более низких напряжениях, чем с электрода отрицательной полярности. Причем, этот электрод может быть, как высоковольтным, так и заземленным. В данных условиях цвет стримеров и светящейся области у электродов был красный, в том числе в условиях стационарного разряда при давлении от 3 до 9 Торр.

2.2. Характеристики разряда между кольцевыми электродами

Как известно, генерация красных спрайтов происходит в отсутствии металлических электродов, поэтому мы применили, для создания предварительной плазмы, безэлектродный высокочастотный разряд между двумя кольцевыми электродами, см. Рис.8.

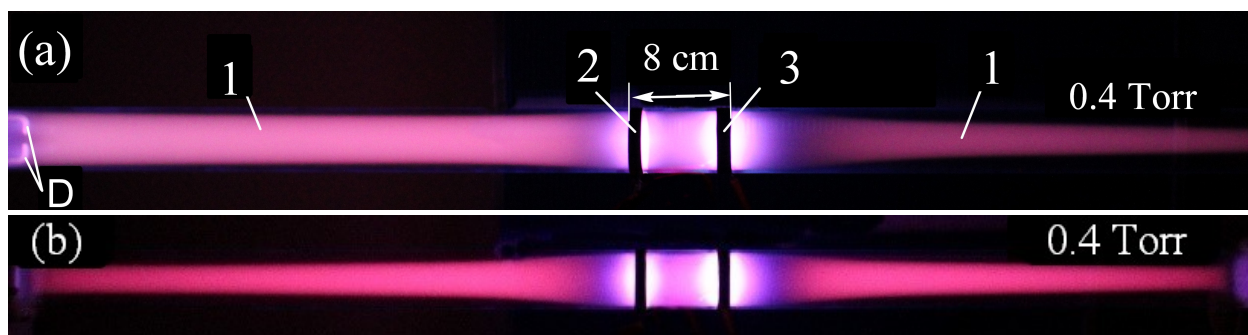


Рис.8 Фотографии безэлектродного разряда в кварцевой трубке с дополнительным электродом D (a) и без (b) при горизонтальном расположении камеры. $U_g = 7$ кВ. 1 – стримерный разряд, 2 – заземлённый электрод, 3 – высоковольтный электрод под положительным напряжением.

В данном режиме удалось сформировать протяжённые стримерные разряды 1 при давлениях 0.4–3 Торр. На Рис.8 приведены фотографии свечения разряда при $p = 0.4$ Торр с использованием дополнительного электрода и без него. На каждом снимке регистрируется интегральное свечение за несколько тысяч импульсов. Разряд инициировался в области наибольшего электрического поля у кольцевых электродов. Цвет разряда был красный и зависел от наличия контакта с дополнительным электродом. При уменьшении давления до 0.4 Торр стримеры достигали левого торца камеры с дополнительным электродом, что приводило к некоторому изменению цвета разряда. Дальнейшее уменьшение давления, даже без установки дополнительного электрода, приводило к контакту стримеров с торцами камеры. Их длина в этом случае достигала ~ 50 см. Изменение полярности высоковольтного кольцевого электрода 3 не оказывало сильного влияния на форму и цвет разряда, Рис.9.

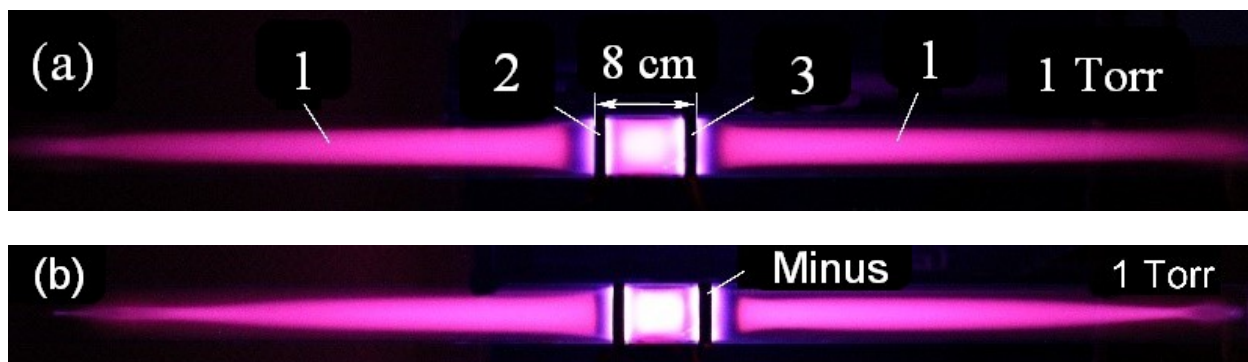


Рис.9. Фотографии свечения воздуха в кварцевой трубке без дополнительного электрода при положительной полярности генератора (a) и отрицательной (b). $U_g = 7$ кВ.

Видно, что форма и цвет разряда без дополнительного электрода на левом фланце слабо зависят от полярности высоковольтного электрода. Некоторые отличия при увеличении давления регистрировались у торцевых фланцев. При дальнейшем увеличении давления длина стримеров уменьшалась.

С помощью фотодиода было установлено, что скорость фронта волны ионизации (стримера), соответствуют средней скорости распространения красных спрайтов и постепенно замедляется. При давлении воздуха 1.5 Торр на расстояниях от кольцевого заземленного электрода 13 и 23 см она составила 0.17 и 0.12 см/нс, соответственно.

Спектры излучения плазмы на расстоянии 13 см от левого электрода приведены с учетом чувствительности спектрометра на Рис.10 и Рис.11.

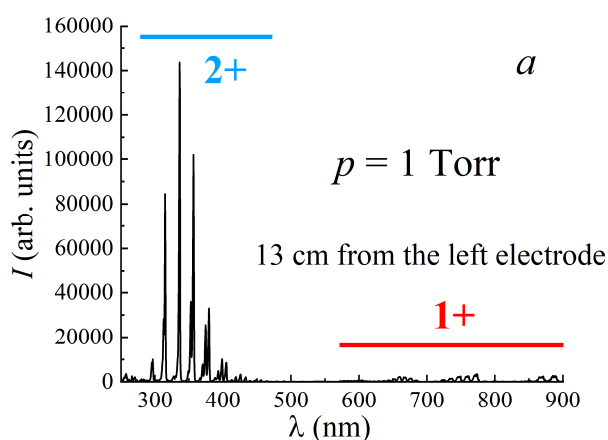


Рис.10. Спектр излучения воздуха, полученный при положительной полярности генератора. $U_g = 7$ кВ. 2+ и 1+ – полосы второй и первой положительных систем азота, соответственно.

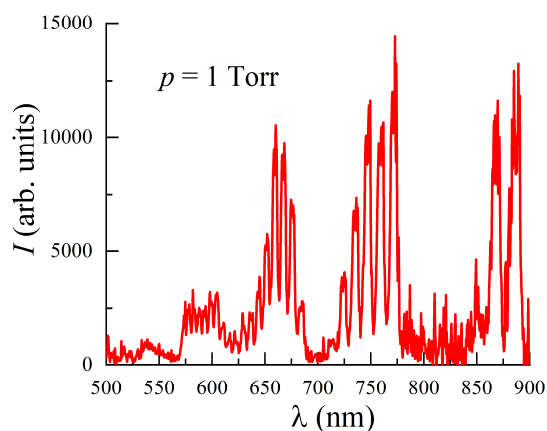


Рис.11. Спектр излучения воздуха через фильтр ЖС-12 полученный на расстоянии 13 см от заземленного кольца слева при положительной полярности генератора. $U_g = 7$ кВ.

Красный цвет плазмы разряда, который наблюдается визуально и фиксируется в данных экспериментах на фотографиях, связан с относительно большой спектральной плотностью энергии излучения 1+ системы азота при малых давлениях. Однако при этом спектральная плотность энергии излучения наиболее интенсивных полос 2+ была существенно больше, чем у 1+. Спектр излучения стримерного разряда на удалении от кольцевых электродов был подобен спектру излучения красных спрайтов [1, 5].

4. Выводы

В результате проведенных исследований показано, что с помощью высокочастотного разряда можно моделировать свойства красных спрайтов в лаборатории. Данная возможность была достигнута за счет регистрации интегрального излучения десятков тысяч отдельных импульсов. При низких давлениях (~ 1 Торр и менее) интенсивности излучения плазмы стримерных разрядов без их перехода в другие формы очень мала. При наблюдении красных спрайтов в атмосфере Земли регистрацию их излучения облегчают огромные размеры спрайтов. Это позволяет их наблюдать визуально и фотографировать [7], в том числе с высоким временным разрешением [5].

Применяя способ регистрации стримерных разрядов, реализованный в работе [9], при низких давлениях была получена плазма со свойствами, реализуемыми в красных спрайтах. Это подтверждают используемые давления воздуха, регистрируемые спектры излучения, скорости распространения волны ионизации, а также наблюдаемый и фотографируемый цвет разряда. Также продемонстрировано, что, используя диффузную безэлектродную плазму, можно генерировать два стримера, распространяющиеся в двух противоположных направлениях.

Благодарности

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-1026 от 15.11.2021.

5. Литература

- [1] Füllekrug M., Mareev E.A., and Rycroft M.J. (Eds.), *Sprites, elves and intense lightning discharges*. (Springer Science & Business Media, 2006); doi.org/10.1007/1-4020-4629-4
- [2] Pasko V.P., *Plasma Sources Sci. Technol.*, **16**, S13, 2007; doi: 10.1088/0963-0252/16/1/S02
- [3] Pasko V.P., Yair Y. and Kuo C.L., *Space Sci. Rev.*, **168**(1), 475, 2012; doi: 10.1007/s11214-011-9813-9
- [4] Williams E., et al., *Radio Sci.*, **47**, RS2002, 2012; doi: 10.1029/2011RS004794
- [5] Huang A., et al., *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 13, 2018; doi.org/10.1029/2018GL079576
- [6] Neubert T., et al., *Space Sci. Rev.*, **215**(2), 1, 2019; doi.org/10.1007/s11214-019-0592-z
- [7] Facebook [online]; <http://www.facebook.com/frankie.lucena.1>
- [8] Parra-Rojas F.C., Passas M., Carrasco E., Luque A., Tanarro I., Simek M., and Gordillo-Vázquez F.J., *J. of Geophys. Res.: Space Physics*, **118**, 4649, 2013; doi: 10.1002/jgra.50433
- [9] Tarasenko V.F., Sosnin E.A., Skakun V.S., Panarin V.A., Trigub M.V., and Evtushenko G.S., *Phys. Plasmas*, **24**, 043514, 2017; doi: 10.1063/1.4981385