

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 537.527.9; 537.53

**О наблюдении в лабораторных разрядах,
инициируемых пучком убегающих электронов,
мини-спрайтов и голубых мини-струй**

В.Ф. Тарасенко, Д.В. Белоплов, М.И. Ломаев, Д.А. Сорокин*

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

Поступила в редакцию 7.08.2014 г.

При повышенных давлениях воздуха и азота в разряде, инициируемом пучком убегающих электронов, экспериментально зарегистрированы области диффузного разряда различного цвета. Обнаруженные области имеют свечение, по цвету аналогичное излучению спрайтов, гало и голубых струй, наблюдаемых в верхних слоях атмосферы. Установлено, что в независимости от полярности импульсного генератора области, имеющие излучение красного цвета, преимущественно формируются у плоского электрода, а области голубого цвета – у электрода с малым радиусом кривизны. Показано, что данные области регистрируются на фоне диффузного разряда у ярких пятен на электродах. Наибольшую интенсивность области красного и голубого цвета имеют в азоте при давлении 3 атм в условиях контрагирования разряда.

Ключевые слова: импульсный разряд в воздухе и азоте, пучок убегающих электронов, мини-спрайты, голубые мини-струи; pulse discharges in air and nitrogen, beam of runaway electrons, mini sprites, mini blue jets.

Введение

В последние годы достигнут значительный прогресс в изучении импульсных разрядов, которые происходят в атмосфере Земли. В частности, в верхних слоях атмосферы зарегистрировано излучение разрядов, имеющих разный цвет [1–3]. В красной области спектра на высотах более 50 км преимущественно излучают разряды, получившие названия спрайт (sprites) и гало (halos). Спрайты на высотах 50–70 км имеют форму, похожую на диффузные стримеры большого размера, а на высотах 70–90 км – форму в виде диффузного облака. Гало появляется на высотах 75–85 км и имеет диаметр до 100 км. В сине-голубой области спектра излучают разряды, получившие название голубые струи (blue jets). Blue jets появляются на более низких высотах (до 50 км) и имеют голубой цвет. Спектральные исследования атмосферных разрядов показали, что красный цвет разряда определяет в основном излучение системы азота 1+, а сине-голубой – излучение систем азота 2+ и 1-. Природу атмосферных разрядов также изучают с помощью лабораторных разрядов [4–6]. Однако основное внимание при этом уделяется разрядам в виде молний, которые имеют наибольшую интенсивность в нижних слоях атмосферы [7].

Цель данной работы – экспериментально показать, что при импульсных разрядах, инициируемых убегающими электронами, в воздухе и азоте можно наблюдать миниатюрные аналоги спрайтов и голубых струй.

Установка и методики

Используемая установка, подробно описанная в работе [8], состоит из разрядной камеры и генератора РАДАН-220. Импульсы напряжения с амплитудой ~250 кВ от генератора через короткую передающую линию подавались на трубчатый электрод с малым радиусом кривизны. Этот потенциальный электрод был изготовлен из фольги из нержавеющей стали толщиной 100 мкм, свернутой в трубку диаметром 6 мм. Заземленный плоский электрод располагался на расстоянии 13 мм от торца потенциального электрода. Длительность импульса напряжения при согласованной нагрузке составляла ~2 нс, а длительность фронта импульса напряжения в передающей линии ~1 нс.

Ток разряда измерялся с помощью шунта, который был изготовлен из чип-резисторов. Длительность тока разряда в промежутке зависела от давления и сорта газа и могла достигать сотен наносекунд при низких давлениях. Одновременно с током через промежуток и импульсом напряжения при его отрицательной полярности коллектором

* Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru); Дмитрий Викторович Белоплов; Михаил Иванович Ломаев (Lomaev@loi.hcei.tsc.ru); Дмитрий Алексеевич Сорокин.

регистрировался сверхкороткий лавинный электронный пучок (СЛЭП). Для регистрации СЛЭП анод был выполнен из AlMg-фольги толщиной 50 мкм, которая располагалась за металлической сеткой диаметром 1 см с прозрачностью 14%, а коллектор находился за анодом. Разрядная камера заполнялась воздухом или азотом. Эксперименты проводились в режиме однократных импульсов при двух полярностях генератора. Давление газов изменялось от 100 торр до 3 атм. Сигналы с емкостного делителя напряжения, шунта и коллектора подавались на осциллограф DPO70604 (6 GHz, 25 GS \times s⁻¹). Интегральные спектры излучения снимались спектрометром EPP-2000C (StellarNet Inc.). Свечение разряда фотографировалось зеркальным фотоаппаратом Sony A100.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как и в известных работах (см. обзор [9] и ссылки в нем), при подаче на промежуток с неоднородным распределением электрического поля импульсов напряжения отрицательной и положительной полярности формировался объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ). При сокращении промежутка и (или) увеличении давления ОРИПЭЛ мог переходить в искру. Цвет ОРИПЭЛ при давлении ~1 атм на большинстве фотографий был сине-голубой, а в спектр излучения основной вклад давали полосы 2+ системы азота. При изменении давления и сорта газа в ряде импульсов наблюдалось изменение формы и цвета разряда. Подробное изучение фотографий при различных условиях показало следующие особенности разряда, которые ранее не наблюдались или не были описаны в известных нам работах. У ярких электродных пятен на интегральных фотографиях излучения разряда (рис. 1) были обнаружены области красного (слева от надписи «mini sprite») и голубого (справа от надписи «mini blue jets») цвета. Разряд (рис. 1) получен в воздухе при положительной полярности импульса высокого напряжения. В азоте (рис. 2) эти области имели большую интенсивность свечения, которая увеличивалась с ростом давления до 3 атм (рис. 3). Кроме того, с ростом давления увеличился размер «mini sprite» и «mini blue jets».

Полярность импульса напряжения, как видно из рис. 2 и 3, не оказывала в этих условиях существенного влияния на появление областей красного и голубого цвета. Их интенсивность, как правило, возрастала при увеличении размеров и интенсивности излучения яркого пятна на электродах. Повышение давления азота и контрагирование разряда (см. рис. 3) приводили к увеличению интенсивности излучения областей красного и голубого цвета. Отметим, что «mini sprite» и «mini blue jets» появлялись не в каждом импульсе и в разных местах,

поэтому пока не удалось зарегистрировать спектр их излучения на фоне мощного излучения ОРИПЭЛ.

Мы предполагаем, что в излучение «mini sprite» основной вклад, как и в излучение sprite в атмосфере Земли, дают полосы системы азота 1+, а в излучение «mini blue jets» полосы системы азота 2+. Подтверждением этого может быть различие в величине напряженности электрического поля у плоского электрода и у электрода с малым радиусом кривизны. По-видимому, излучение «mini blue jets» формируется за счет повторной генерации быстрых электронов в усиленном у электрода с малым радиусом кривизны электрическом поле, а излучение «mini sprites» — за счет тока разряда после основного импульса напряжения в более низком электрическом поле у плоского электрода. Кроме того, в излучение отдельных областей разряда могут давать линии и полосы материалов электродов [10, 11].

Заключение

Проведенные исследования позволили зарегистрировать в разрядном промежутке области, которые имеют диффузное свечение по цвету, аналогичное излучению спрайтов и голубых струй, наблюдаемых в верхних слоях атмосферы Земли. Это подтверждает сложность процессов при наносекундном пробое разрядных промежутков в условиях генерации СЛЭП, которые надо учитывать при использовании ОРИПЭЛ, в частности для очистки и модификации поверхности металлов [12].

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда, проект № 14-29-00052.

1. Raizer Y.P., Milikh G.M., Shneider M.N. Streamer- and leader-like processes in the upper atmosphere: Models of red sprites and blue jets // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2010. V. 115. A00E42 (9 p).
2. Gordillo-Vázquez F.J., Luque A., Simek M. Spectrum of sprite halos // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2011. V. 116. A09319 (11 p).
3. Pasko V.P., Qin J., Celestin S. Toward better understanding of sprite streamers: initiation, morphology, and polarity asymmetry // Surv. Geophys. 2013. V. 34, N 6. P. 797–830.
4. Parra-Rojas F.C., Passas M., Carrasco E., Luque A., Tanarro I., Simek M., Gordillo-Vázquez F.J. Spectroscopic diagnosis of laboratory air plasmas as a benchmark for spectral diagnosis of TLEs // European Planetary Science Congress 2013, London, UK. V. 8. P. 121.
5. Рыбка Д.В., Тригуб М.В., Сорокин Д.А., Евтушенко Г.С., Тарасенко В.Ф. Особенности коронного разряда в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 4. С. 306–310.
6. Белоплотов Д.В., Ломаев М.И., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф. Начальная фаза пробоя промежутка «острие — плоскость», заполненного азотом и SF₆ повышенного давления // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 4. С. 316–320.

7. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 320 с.
8. *Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Sorokin D.A., Tarasenko V.F.* Effect of polarity of the voltage pulse on the appearance of the discharge at the breakdown in the non-uniform electric field // *Phys. Sci. Int. J.* 2014. V. 4, iss 5. P. 686–691.
9. *Levko D., Krasik Ya.E., Tarasenko V.F.* Present status of runaway electron generation in pressurized gases during nanosecond discharges // *Int. Rev. Phys.* 2012. V. 6, N 2. P. 165–195.
10. *Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В.* Излучение диффузного коронного разряда в воздухе атмосферного давления // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 11. С. 1009–1017.
11. *Бакут Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В., Ерофеев М.В.* Точечный источник УФ-излучения с малой длительностью импульса // *Квант. электрон.* 2012. Т. 42, № 2. С. 153–156.
12. *Bakht E.Kh., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V., Shulepov M.A., Tarasenko V.F.* Runaway – electron – preionized diffuse discharge at atmospheric pressure and its application // *J. Phys. D.: Appl. Phys.* 2009. V. 42. 185201 (9 p).

V.F. Tarasenko, D.V. Beloplotov, M.I. Lomaev, D.A. Sorokin. **Laboratory observation of mini sprites and blue jets in discharges initiated by runaway electrons.**

The areas of diffuse discharge with various colors are registered in discharges, initiated runaway electrons at high pressure of air and nitrogen. The observed areas have similar color as sprites, blue jets and halo that observed in the upper atmosphere. It was found that the red areas are mainly formed near flat electrode, and the blue area near an electrode with a small radius of curvature regardless of the polarity of the voltage pulses. It was shown that the color areas are registered near bright spots on the electrodes on the background of the diffuse discharge. It was established that red and blue areas have the highest radiation intensity in nitrogen at a pressure of 3 atmospheres in the discharge with spark.

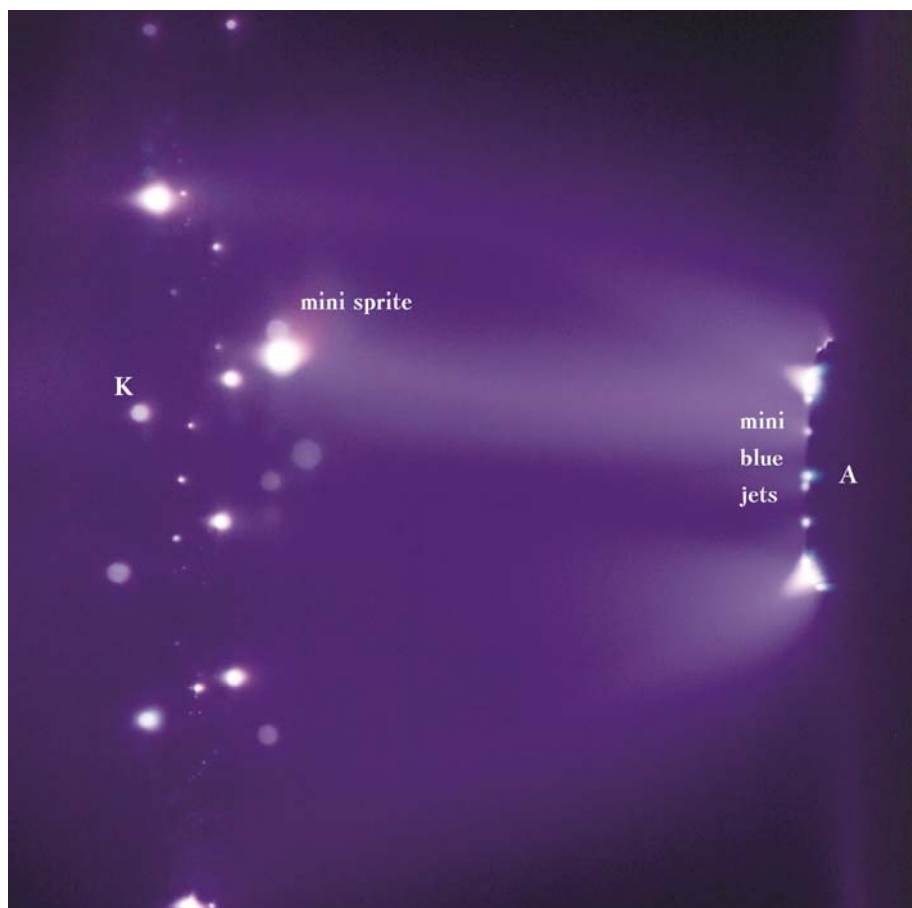


Рис. 1. Разряд в воздухе при давлении 100 торр. Импульс напряжения положительной полярности.
Межэлектродный зазор 13 мм

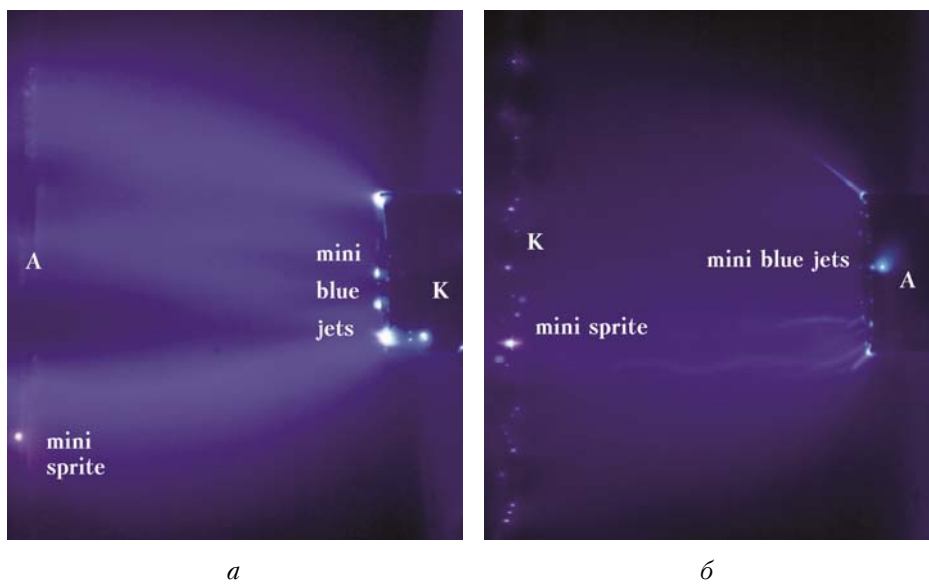


Рис. 2. Разряд в азоте при давлении 100 торр. Импульсы напряжения отрицательной (а) и положительной (б) полярности. Межэлектродный зазор 13 мм

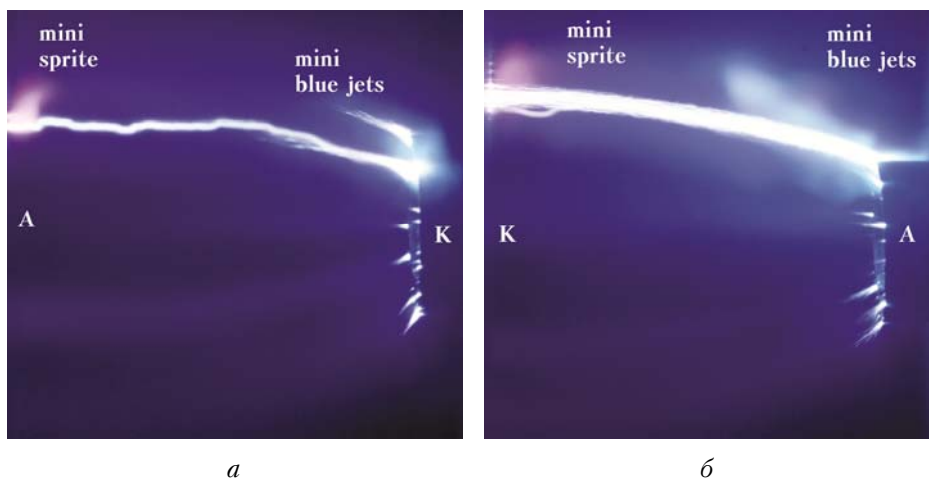


Рис. 3. Разряд в азоте при отрицательной (а) и положительной (б) полярности импульса напряжения. Давление 3 атм. Межэлектродный зазор 13 мм