

04

Изучение метастабильных плазменных формирований, возникающих из атмосферных разрядов

© П. Сайдел

Институт модификации поверхности им. Лейбница, Лейпциг, Германия
E-mail: Peter-Seidel@gmx.de

Поступило в Редакцию 19 декабря 2005 г.

Лабораторный трансформатор на 10 kV, 2 kW использовался для создания разрядов между сферическими латунными электродами диаметром 15 mm и с зазором 8 mm. После поджига двигающаяся электрическая дуга образовывала автономное плазменное образование. Зависимость его времени жизни, измеренного по видеоизображениям, полученным с интервалом 40 ms, от размера образования аппроксимируется линейной функцией. Применение алгоритма, позволяющего из цилиндрически-симметричных изображений получать радиальные профили, позволило обнаружить, что плазменные образования имеют вихревую структуру. Автономные плазменные вихри диаметром 2.5 cm, распались примерно за 120 ms. На опыте не было обнаружено значительной зависимости от температуры воздуха в пределах от 10 до 30°C и от относительной влажности от 10 до 100%. Радиальный профиль температуры плазменного вихря оценивался по кривым светимости черного тела в четырех длинах волн, задаваемых оптическими фильтрами. Средняя температура излучения плазменного вихря оценена в 2000 K и убывала примерно на 300 K за миллисекунду.

Образование воспроизводимых метастабильных автономных плазменных вихрей, созданных атмосферными высоковольтными разрядами, описанное в литературе, было подтверждено в лабораторном масштабе. Их пространственные размеры и температура излучения, так же как и их время жизни, были измерены. Описанное явление, возможно, может рассматриваться как физическое объяснение появления шаровой молнии в природе. Будущие исследования следует сфокусировать на экспериментальном определении профилей потока и на построении самосогласованной теоретической модели для описания накопления и переноса энергии.

PACS: 92.60.Pw

Введение. Феномен шаровой молнии, засвидетельствованный примерно 1000 раз [1–5], имеет различные возможные объяснения. Прос-

тое и, возможно, наиболее часто применяемое объяснение, что это оптическая иллюзия [6]. Но кроме этого физиологического объяснения существуют еще несколько физических трактовок. Так, например, одна из моделей — это диффузионное горение водорода, получаемого катализом ниже предела поджига, которое образует так называемое светящееся облако, движущееся вдоль старого канала молнии [7,8]. По другой хорошо известной модели — это атмосферный микроволновый разряд [9].

Настоящая работа посвящена проверке выполненных ранее исследований [10–13], в которых автономные плазменные формирования, образованные от высоковольтных разрядов с металлических электродов, как сообщалось, достигали диаметров вплоть до 25 см, а их время жизни достигало 400 ms.

Метод. Разряды в атмосфере между твердыми сферическими латунными электродами диаметром 15 mm и с зазором 8 mm создавались при помощи лабораторного трансформатора на 10 kV, 2 kW. После поджига возникала движущаяся электрическая дуга. Дугу выключали во время развития автономного плазменного формирования. Для этого использовался фоторезистор, включенный при помощи коммутирующего триггера Шмитта в цепь реле первичной обмотки трансформатора. Фоторезистор имел круглую активную поверхность диаметром 5 mm, что примерно соответствовало диаметру электрической дуги после поджига. Он находился примерно на высоте 20 mm выше линии, соединяющей электроды, вдоль которой обычно и происходило зажигание. Время отклика фоторезистора, триггера Шмитта и реле оценивалось примерно в 10 ms.

Времена жизни автономных плазменных формирований измерялись по последовательности видеок кадров, которые снимались через каждые 40 ms. Для этого использовалась коммерческая CCD(ПЗС) видеокамера (Canon VC200E). Применение системы зеркал позволило одновременно получать изображения одного и того же плазменного формирования под разными углами и на разных длинах волн. Измерения интенсивности на четырех длинах волн производились при помощи оптических интерференционных фильтров UFS-2 (средняя длина волны 345 nm; диапазон 40 nm), SZS-21 (средняя длина волны 425 nm; диапазон 22 nm), SZS-22 (средняя длина волны 544 nm; диапазон 26 nm) и F606N (средняя длина волны 606 nm; диапазон 19 nm).

Температура излучения плазменного вихря оценивалась по кривой излучения черного тела (рис. 5) с использованием формулы Планка

$$u(\lambda) \propto \left(\frac{1}{\lambda}\right)^5 \frac{1}{\exp(hc/k_B T \lambda) - 1}. \quad (1)$$

Здесь λ — длина волны, T — температура излучения твердого тела, $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ — постоянная Планка, $c = 2.9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ — скорость света, $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ — постоянная Больцмана.

Для оценки внутренней структуры и вычисления профиля интенсивности излучения плазменного формирования к видеокдрам автономного плазменного формирования применялся алгоритм восстановления цилиндрически симметричной структуры.

Цилиндрическая симметрия предполагает, что плазма состоит из колец с постоянными значениями интенсивности внутри (рис. 1). Если в плазме можно пренебречь процессами поглощения, что соответствует модели идеальной прозрачности, то интенсивность, регистрируемая пикселем c_i ($i = 0, 1, \dots$), может быть записана как сумма интенсивностей, приходящих от каждого из n колец. Интенсивность излучения c_0 , приходящего в пиксель $i = 0$ от самого внешнего кольца, имеющего исходную интенсивность C_0 , может быть записана как

$$c_0 = C_0 \frac{A_0}{A_{02}}, \quad (2)$$

где отношение площадей может быть вычислено согласно

$$\begin{aligned} A_0 &= \pi(r_0^2 - r_1^2), \\ A_{01} &= 2 \int_{r_2}^{r_1} (\sqrt{r_0^2 - x^2} - \sqrt{r_1^2 - x^2}) dx, \\ A_{02} &= 2 \int_{r_1}^{r_0} \sqrt{r_0^2 - x^2} dx. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, пользуясь отношением площадей, можно вычислить исходную интенсивность C_0 кольца 0 через интенсивность c_0 , регистрируемую пикселем. Аналогично может быть вычислена исходная

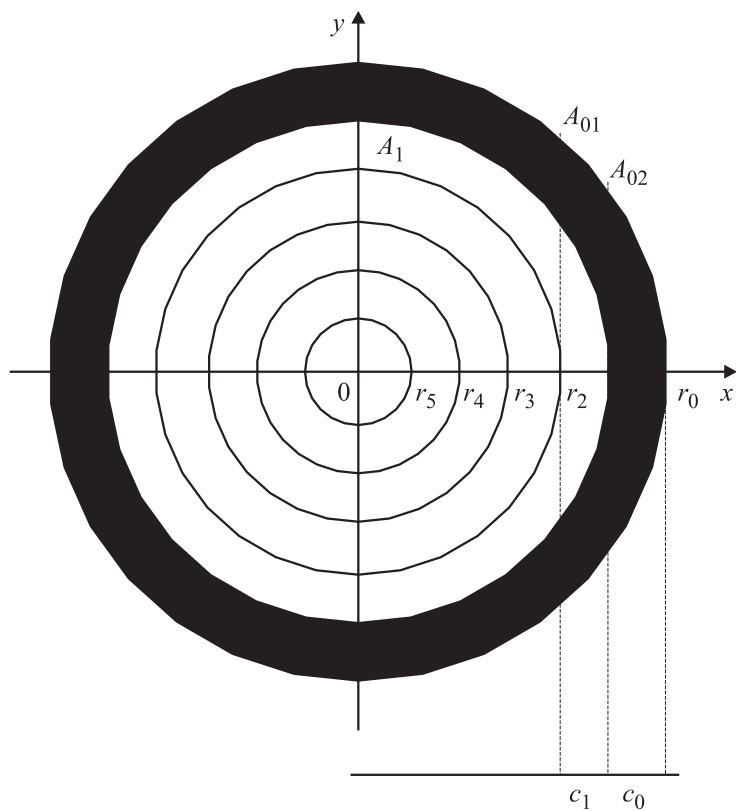


Рис. 1. Определение параметров проецирования цилиндрически симметричной области.

интенсивность S_1 , излучаемая кольцом 1. Применяя такой итерационный метод, может быть построен профиль излучения всей области. Для этого используем первообразную встречающихся интегралов

$$\int \sqrt{a^2 - x^2} dx = \frac{1}{2} \left(x \sqrt{a^2 - x^2} + a^2 \arcsin\left(\frac{x}{a}\right) \right). \quad (4)$$

Этот алгоритм проецирования был реализован в разработанной нами специальной Turbo Pascal программе.

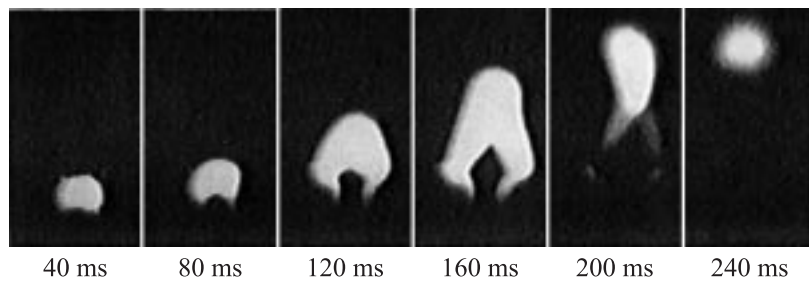


Рис. 2. Пример пяти видеокадров дугового разряда. Момент выключения 160 ms, тогда же формировался автономный плазменный вихрь со временем жизни 80 ms (размер изображений 80×40 mm).

Результаты. С помощью вариации параметров экспериментальной установки, особенно размеров электродов и межэлектродного зазора, а также подбора процедуры переключения, автономные плазменные образования получались по крайней мере в 9 из 10 разрядов. На рис. 2 показаны примеры пяти видеокадров дугового разряда, который выключали через 160 ms, и пример образования автономного плазменного вихря со временем жизни около 80 ms. Поле зрения этих изображений составляет 80 на 40 mm.

Используя описанный алгоритм, мы обнаружили вихревую структуру плазменного образования. Иногда (но не всегда) эта структура выглядела подобно луковице (рис. 3). При применении алгоритма проецирования к изображениям исходной дуги, картины со структурой, подобной вихрю или луковице, не наблюдались.

Максимальное время жизни автономных плазменных образований, генерируемых при данных экспериментальных условиях, было оценено в 120 ms. Корреляция между временем жизни и геометрическим размером плазменного вихря относительно хорошо ($R^2 = 0.61$) соответствует линейной зависимости (рис. 4); таким образом, плазменный вихрь диаметром 2.5 cm имеет время жизни порядка 120 ms. Было обнаружено незначительное воздействие температуры воздуха в пределах от 10 до 30°C и относительной влажности от 10 до 100%.

Средняя температура излучения плазменного вихря оценена в 2000 K (рис. 5) и убывает примерно на 300 K за миллисекунду

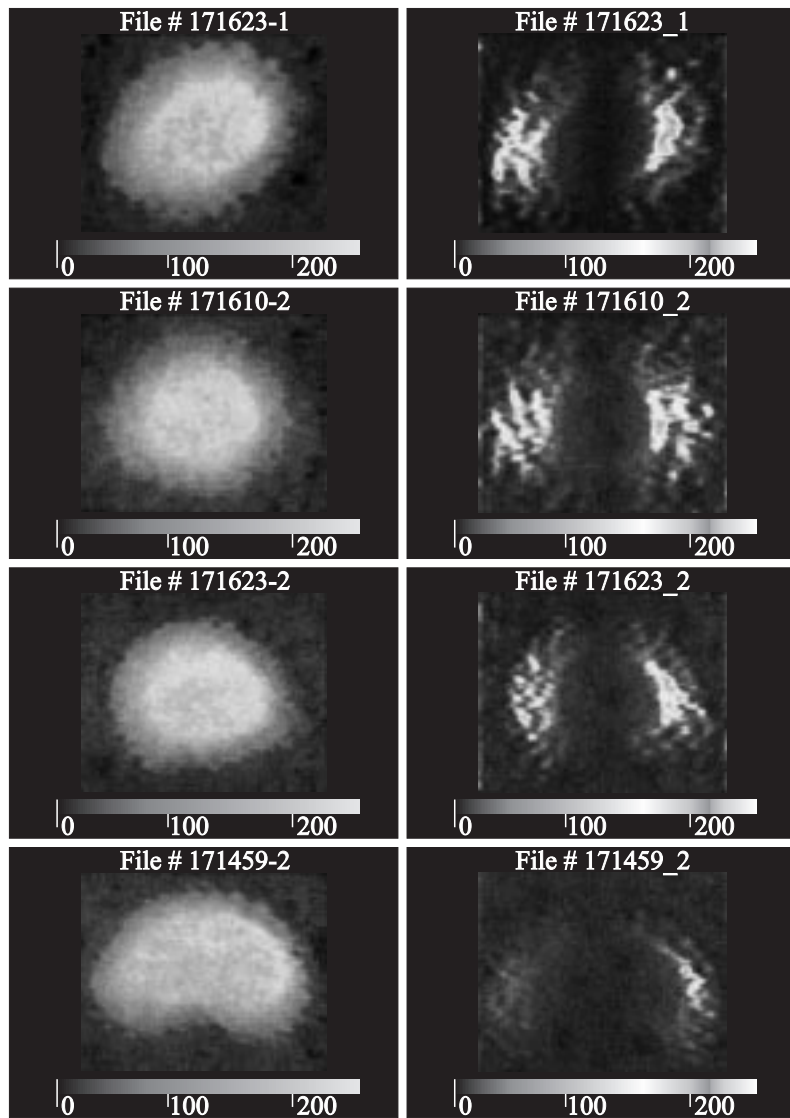


Рис. 3. Четыре распределения интенсивности излучения автономного плазменного вихря и их профили (размер изображений 15×12 mm).

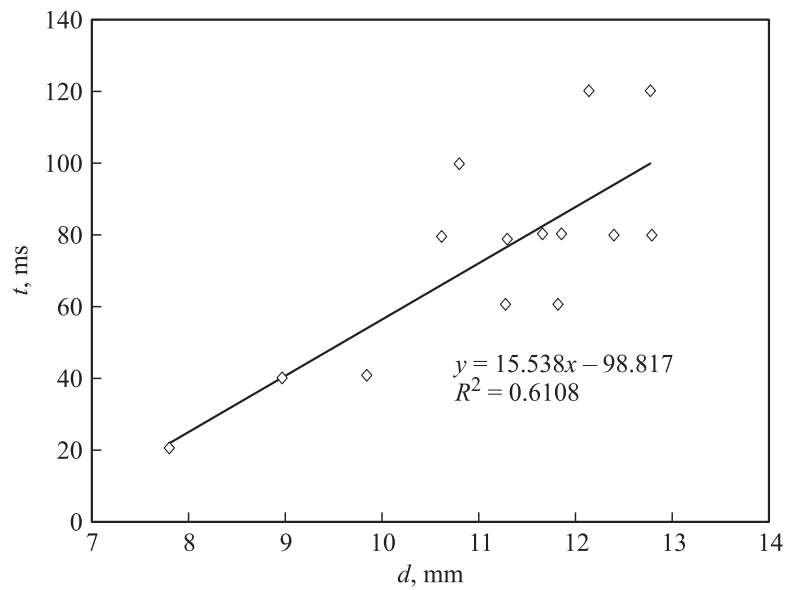


Рис. 4. Корреляция времени жизни и диаметра плазменного вихря.

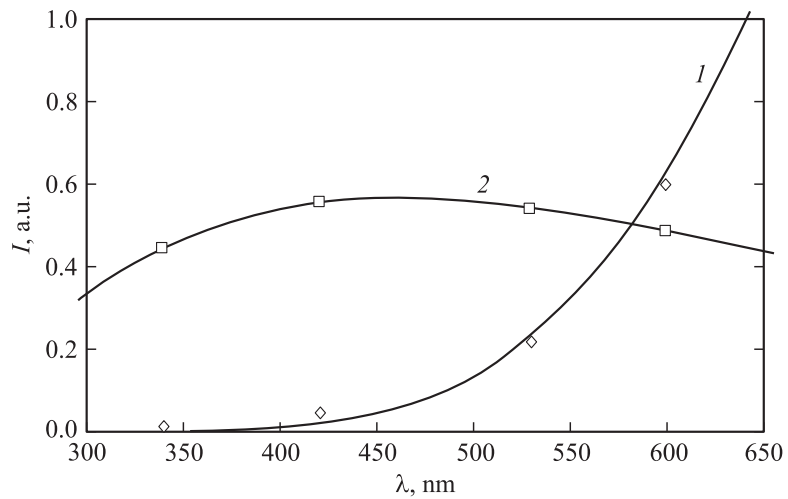


Рис. 5. Оценка температуры излучения плазменного вихря ($T = 1950$ K) согласно Планковской кривой ($T = 6500$ K) для спектральной интенсивности.

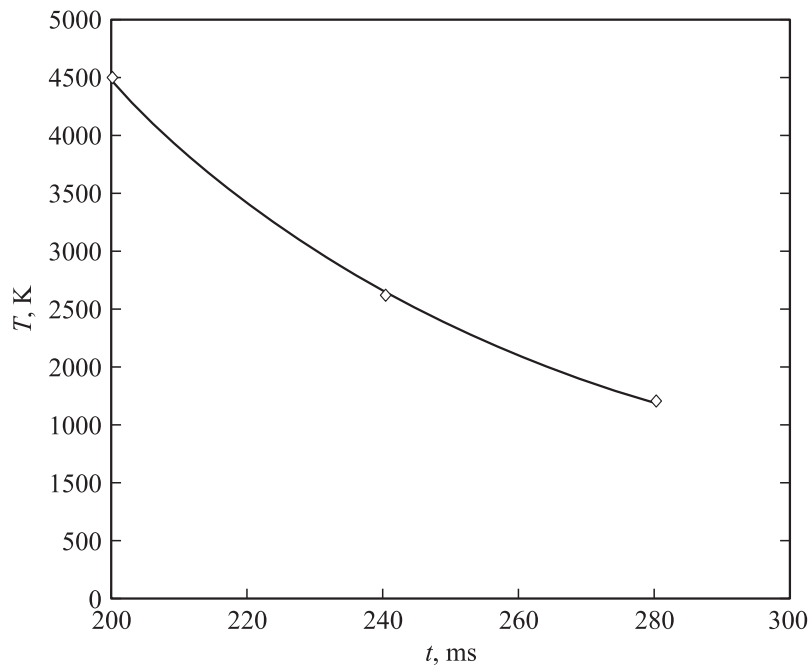


Рис. 6. Уменьшение температуры автономного плазменного вихря (t — время после пробоя).

(рис. 6). Температура излучения вольфрамовой нити накаливания была определена тем же методом на уровне 1900 К.

Выводы. Образование воспроизводимых метастабильных автономных плазменных вихрей, образованных атмосферными высоковольтными разрядами с металлических электродов, которое описано в литературе, было подтверждено в лабораторном масштабе. Применение численного алгоритма проецирования к экспериментальным изображениям позволило оценить распределение интенсивности свечения. Была обнаружена вихревая структура автономных плазменных образований, что находится в согласии с основными литературными данными [7–13].

При помощи спектрального анализа на нескольких длинах волн температура излучения была оценена примерно в 2000 К, что можно

рассматривать как косвенное согласие с литературой [10–13], где было описано, что горючие материалы (хлопок, шерсть) воспламенялись и горели при соприкосновении с подобными плазменными образованиями.

Было измерено время жизни автономного плазменного образования и показано, что имеется корреляция между размером автономного плазменного вихря и его временем жизни. Найденное время жизни 120 ms находится в хорошем согласии со значениями в литературе [10–13], где сообщалось о плазменных формированиях с диаметром вплоть до 25 см и со временем жизни, достигающим 40 ms.

Описанное явление, возможно, может быть физическим объяснением появления в природе шаровой молнии. Будущие экспериментальные исследования следует сфокусировать на экспериментальном определении профилей потока газа в плазменном вихре. Необходимы также теоретические вычисления, предоставляющие самосогласованную модель для описания сохранения и преобразования энергии. Вопрос о сохранении большого количества энергии в плазме на время порядка нескольких сотен миллисекунд является предметом активного изучения и представляет непосредственный интерес для генерации энергии при синтезе в высокотемпературной плазме.

Список литературы

- [1] *Cade Cecil Maxwell, Delphine Davis*. The Taming of the Thunderbolts. New York: Abelard-Schuman Limited, 1969.
- [2] *Golde R.H.* Lightning. Bristol: John Wright and Sons Limited, 1977.
- [3] *Golde R.H.* Lightning V. 1. Physics of Lightning. Academic Press, 1977.
- [4] *Singer Stanley*. The Nature of Ball Lightning. New York: Plenum Press, 1971.
- [5] *Stenhoff Mark*. Ball Lightning, An Unsolved Problem in Atmospheric Physics. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999.
- [6] *Argyle Edward*. // Nature. 1971. V. 230. March 19. P. 179–180.
- [7] *Bergmann-Schäfer*. Lehrbuch der Experimentalphysik. Bd 2 (Elektromagnetismus). Bdch. 8. Auflage de Gryter, 1999. S. 643.
- [8] *Seidel P*. // Junge Wissenschaft. 1994. Bd 34. S. 30–36.
- [9] *Yasui K*. // Physics Letters A. Feb. 22. 1993. V. 173. N 6. P. 451–455.
- [10] *Emelin S.E., Belisheva N.K., Skvortsov G.E., Beznisko E.V., Khassani A.K., Semenov V.S.* // Tech. Phys. Lett. 1996. V. 22 (12). P. 1005–1006.

- [11] *Emelin S.E., Semenov V.S., Bychkov V.L., Belisheva N.K., Kovshik A.P.* // Tech. Phys. 1997. V. 42 (3). P. 269–277.
- [12] *Emelin S.E., Pirozerski A.L., Semenov V.S., Skvortsov G.E.* // Phys. Lett. 1997. V. 23 (10). P. 758–759.
- [13] *Emelin S.E., Kovshik A.P., Rjuntsev E.I.* // Heat and Mass Transfer under Plasma Conditions / (Eds) P. Fauchais, J. van der Mullen, J. Heberlein. (Pub.) Annals of the New York Academy of Sciences. 1999. V. 891. P. 449–456.