

УДК 533.9.08

## Радиальное распределение тока наносекундного барьерного разряда в воздухе при атмосферном давлении

М. В. Малашин, С. И. Мошкунов, В. Ю. Хомич, Е. А. Шершунова

*В работе представлены экспериментальные результаты исследования радиального распределения тока наносекундного барьерного разряда в плоских миллиметровых воздушных промежутках при атмосферном давлении и относительной влажности 40—60 % при скорости нарастания напряжения на электродах 250 В/нс. Установлено, что при высоте разрядного промежутка больше 3 мм наблюдается возрастание временной задержки между возникновением разрядных токов от центра к периферии воздушного промежутка, что коррелирует с появлением контрагированных каналов на фоне объемной плазмы барьерного разряда. На основании критерия лавинно-стримерного перехода установлено, что развитие наносекундного барьерного разряда в воздушных промежутках  $l=3$  мм происходит по стримерному механизму.*

PACS: 52.80.-s

*Ключевые слова:* наносекундный барьерный разряд, атмосферный воздух, разрядный ток, стримерный механизм.

### Введение

Барьерный разряд, характеризуемый единственным разрядным импульсом тока с наносекундной длительностью, или наносекундный барьерный разряд в атмосферном воздухе при относительной влажности 40—60 % был впервые предложен для обработки поверхностей в 2009 году [1]. Несколькими годами позже он был также реализован и другими научными группами [2, 3]. Проведены обширные исследования разряда от параметров внешней цепи [4], от материала барьера [5], прокачки разрядного промежутка [6]. В литературе также встречаются работы, посвященные исследованию пространственного распределения разряда [7], однако приведенные там результаты, основанные на 2-нс фотографиях послесвечения разряда, не позволяют провести анализ пространственного

распределения наносекундного барьерного разряда с достаточной точностью.

Целью данной работы было экспериментальное исследование разрядных токов в равных объемах разрядного промежутка и проведение численной оценки механизма развития разряда в миллиметровых воздушных промежутках при атмосферном давлении и естественной влажности.

### Методика эксперимента

Разряд зажигался в миллиметровых воздушных промежутках между двумя плоскими металлическими электродами. Оба электрода были выполнены в виде плат из двухстороннего металлизированного текстолита. Верхний электрод представлял собой круг радиусом 15 мм. Нижний был выполнен в виде четырех концентрических колец одинаковой площади с максимальным радиусом 15 мм, его детальное описание приведено в работе [8]. Оба электрода были закрыты керамическими пластинами с  $\epsilon = 9$  и размером  $50 \times 50 \times 2$  мм.

На электроды разрядного промежутка с частотой следования 30 Гц от специально разработанного твердотельного составного генератора, принцип работы которого описан в [9], подавались униполярные прямоугольные импульсы напряжения амплитудой 0—20 кВ, длительностью 600 нс, с временем нарастания и спада (по уровню 0,1—0,9) 40 нс, что соответствовало скорости нарастания напряжения на электродах 250 В/нс.

---

Малашин Максим Владимирович, зав. лабораторией.  
 Мошкунов Сергей Игоревич, зав. лабораторией.  
 Хомич Владислав Юрьевич, вр. и.о. директора.  
 Шершунова Екатерина Александровна, старший научный сотрудник.

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.  
 Россия, 191186, г. Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18.  
 Тел. (812) 315-17-57. E-mail: eshershunova@gmail.com

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2016 г.

---

© Малашин М. В., Мошкунов С. И., Хомич В. Ю., Шершунова Е. А., 2016

Регистрация токов в выделенном объеме проводилась путем измерения падения напряжения на сопротивлении, включенном последовательно участку разрядного промежутка, отвечающему соответствующему сегменту. Синхронизация измерения токов в сегментах обеспечивалась одинаковой длиной кабелей. Стоит отметить, что наличие барьера на сегментированном электроде может приводить к регистрации токов из соседних сегментов. По нашим экспериментальным оценкам, погрешность, обусловленная влиянием тока в соседнем сегменте, составляет не более 15 %.

Напряжение на электродах разрядного промежутка  $U_{in}$  измерялось высоковольтным пробником Tektronics P6015A. Напряжение на электродах и токи в сегментах выводились на экран четырехканального цифрового осциллографа LeCroy WaveRunner 104Xi-A. Напряжение внутри разрядного промежутка  $U_{dg}$  рассчитывалось на основании эквивалентной электрической схемы разрядного промежутка [10], которая представляет собой делитель напряжения с коэффициентом делителя  $k$ , обусловленный наличием емкости воздушного промежутка  $C_a$  и емкости барьера  $C_b$ . При этом справедливо соотношение:

$$U_{dg} = kU_{in} = \frac{C_b}{C_b + C_a} \times U_{in}. \quad (1)$$

Напряжение зажигания разряда рассчитывалось для трех высот разрядного промежутка  $d = 1, 2$  и  $3$  мм на основании экспериментальных значений напряжения на электродах в момент появления разрядного тока по формуле (1).

Пробивная напряженность поля для плоскопараллельных разрядных промежутков оценивалась по формуле:

$$E = \frac{U_{dg}}{d} = \frac{C_b U_{in}}{(C_b + C_a) d}. \quad (2)$$

Зная коэффициент делителя  $k$  и скорость нарастания напряжения на электродах, можно также легко посчитать скорость нарастания напряженности поля в разрядном промежутке:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dU_{in}}{dt} \times \frac{k}{d} = \frac{dU_{in}}{dt} \times \frac{C_b}{C_b + C_a}. \quad (3)$$

### Результаты исследования и их обсуждение

Согласно экспериментальным данным, наносекундный барьерный разряд зажигался при пробивных полях от 73 кВ/(см нс) до 56 кВ/(см нс) с увеличением высоты воздушного промежутка  $d$  от 1 мм до 3 мм при сохранении скорости нараста-

ния напряжения на электродах 250 В/нс, или в приведенных значениях электрического поля  $E/N$  от 272 до 200 Тд, где  $N$  — число молекул воздуха в единице объема при атмосферном давлении и комнатной температуре, соответствующее постоянной Лошмидта  $N_L = 2,687 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$ .

На рис. 1 представлены рассчитанные нами в онлайн-программе BOLSIG+ по экспериментальным данным базы данных Morgan [11] зависимости приведенного коэффициента ударной ионизации ( $\alpha/N$ ), приведенного коэффициента прилипания ( $\eta/N$ ) и эффективного коэффициента ионизации ( $\alpha\eta/N$ ) от  $E/N$  в атмосферном воздухе в предположении состава  $N_2:O_2$  в пропорции 0,8:0,2 в диапазоне  $E/N = 140 \div 280$  Тд. В этом диапазоне для коэффициента ударной ионизации ( $\alpha/N$ ) наблюдается сильная зависимость от поля, при которой он заметно увеличивается. Коэффициент прилипания ( $\eta/N$ ) в этом диапазоне почти не изменяется, что также согласуется с данными из работ других исследователей [12]. При высоте воздушного промежутка до 3 мм или  $E/N > 200$  Тд эффективный коэффициент ионизации ( $\alpha\eta/N$ ) определяется в основном коэффициентом ударной ионизации  $\alpha/N$ . При  $E/N$  меньше 200 Тд и соответственно высотах воздушного промежутка  $\geq 3$  мм прилипание оказывает значительное влияние на процесс ионизации разрядного промежутка.

На основании данных, приведенных на рис. 1, и критерия лавинно-стримерного перехода Мика и Леба  $(\alpha\eta)d = 20$  [13], получаем, что для диапазона  $E/N = 200 \text{—} 272$  Тд при заданных в эксперименте высотах реализуется стримерный механизм развития разряда.

Стримерный механизм развития наносекундного барьерного разряда также подтверждается данными коэффициента перенапряжения  $K = (U_{dg} - U_s)/U_s$  относительно напряжения статического пробоя в воздушных промежутках  $U_s$  [14]. Коэффициенты перенапряжения для трех рассматриваемых случаев больше 0,4 и лежат выше кривой лавинно-стримерного перехода  $K(\alpha_{ef}, d)$  (см. рис. 2); построенной с учетом критерия лавинно-стримерного перехода и основной эмпирической формулы Таунсенда в условиях атмосферного давления 760 Торр для рассматриваемого диапазона полей в разрядном промежутке

$$K(\alpha_{ef}, d) = \frac{U_t - U_s}{U_s} = K(\alpha_{ef}, d) = \frac{-193 \times 10^3 \times d}{U_s \ln(1,54 \times 10^4 \times \alpha_{ef})}, \quad (4)$$

где  $U_t$  — напряжение зажигания разряда в условиях лавинно-стримерного перехода.

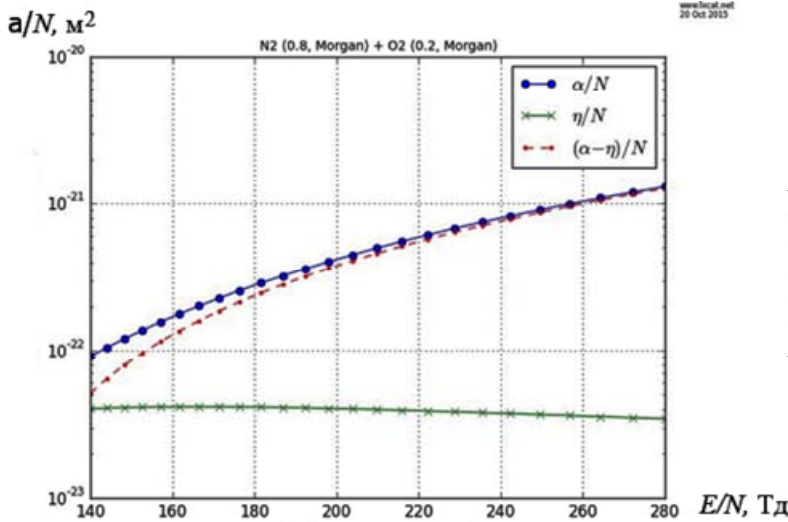


Рис. 1. Рассчитанные в программе BOLCIG+ зависимости приведенного ударного коэффициента ионизации  $\alpha/N$ , коэффициента прилипания  $\eta/N$  и приведённого эффективного коэффициента ионизации  $(\alpha-\eta)/N$  от приведенного электрического поля в разрядном промежутке  $E/N$ . Воздух.  $P = 1$  атм.

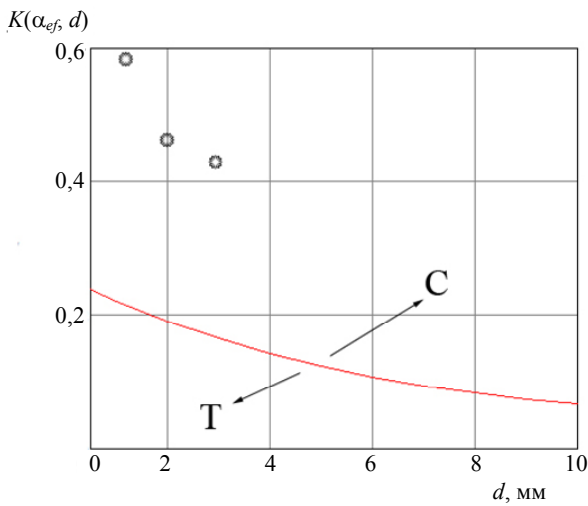


Рис. 2. Кривая лавинно-стримерного перехода в атмосферном воздухе. С — стримерный механизм, Т — таунсендовский. Точками отмечены значения коэффициентов перенапряжения, полученные в экспериментах.

В зависимости от  $E/N$  были реализованы два случая радиального распределения токов (рис. 3): при  $E/N > 200$  Тд, когда разрядные токи стартуют практически синхронно с задержкой друг относительно друга не более 1 нс в случайном порядке, и при  $E/N \leq 200$ , когда явно наблюдается четкая очередность возникновения токов в сегментах, при этом они возникают с задержкой более 3 нс.

Распределение токов в первом случае характерно для наносекундного барьерного разряда, реализованного в воздушных промежутках высотой 1÷2 мм при скорости нарастания напряженности поля  $dE/dt = 1 \div 1,7$  кВ/(см нс). При увеличении высоты разрядного промежутка более 3 мм разряд развивается радиально из центра к периферии. В этом случае скорость нарастания напряженности поля составляла  $\leq 0,7$  кВ/(см нс).

Следует также отметить, что данные фотодиагностики послесвечения разряда для двух приведенных случаев также показали различия [15]. При  $E/N < 200$  Тд, что соответствовало в экспери-

менте  $d \geq 3$  мм, наносекундный барьерный разряд переходил в контрагированную форму.

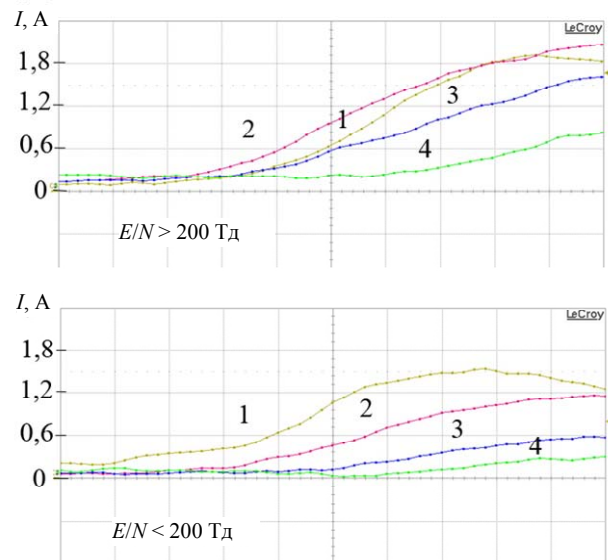


Рис. 3. Осциллограммы разрядных токов в сегментах при разных  $E/N$ : номер соответствует току в соответствующем сегменте. По горизонтали — время: 1 нс/дел.

## Заключение

Проведено исследование радиального распределения наносекундного барьерного разряда в миллиметровых воздушных промежутках при различных  $E/N$  в условиях атмосферного давления и естественной влажности 40—60 %. Произведена численная оценка механизма развития разряда. Экспериментально получены данные о радиальном распределении тока разряда во времени при различных  $E/N$  и скоростях нарастания напряженности в воздушном промежутке.

Из полученных результатов следует, что существует два сценария развития разрядных токов в пространстве и во времени: их одновременный старт с задержкой относительно первого разряда не более 1 нс в случайном месте разрядного промежутка, и распространение разряда из центра промежутка к его периферии с задержкой старта разрядных токов более 3 нс относительно друг друга. В независимости от распределения токов при скорости нарастания напряженности на разрядном промежутке в диапазоне 0,7÷1,7 кВ/(см нс), наносекундный барьерный разряд в миллиметровых воздушных промежутках высотой 1÷3 мм развивается по стримерному механизму, однако пространственно однородное распределение токов, соответствующее объемному разряду, реализуется при  $E/N > 200$  Тд в (1—2)-мм промежутках. Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке эффективных источников объемной низкотемпературной плазмы, широко применяемых в плазмохимии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ayan H., Fridman G., Gutsol A. F., Vasilets V. N., Fridman A., Friedman G. // IEEE transactions on plasma science. 2008. Vol. 36. No. 2. P. 504.
2. Shao T., Yu Y., Zhang C., Zhang D., Niu Z., Wang J., Zhou Y. // IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation. 2010. Vol. 17. No. 6. P. 1830.
3. Малашин М. В., Мошкунов С. И., Хомич В. Ю., Шеришунова Е. А., Ямщиков В. А. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 5. С. 48.
4. Khomich V. Yu., Malashin M. V., Moshkunov S. I., Shershunova E. A., Yamschikov V. A. // IEEE transactions on plasma science. 2014. Vol. 42. No. 10. P. 3314.
5. Малашин М. В., Мошкунов С. И., Хомич В. Ю., Шеришунова Е. А., Ямщиков В. А. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 9. С. 54.
6. Малашин М. В., Мошкунов С. И., Хомич В. Ю., Шеришунова Е. А. // Известия высших учебных заведений. Физика. Т. 58. № 9-2. С. 199.
7. Shao T., Zhang C., Yu Y., Fang Z., Yan P. // Europhysics Letters. 2012. Vol. 97. No. 5. P. 55005.
8. Малашин М. В., Мошкунов С. И., Хомич В. Ю. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 2. С. 1.
9. Малашин М. В., Мошкунов С. И., Хомич В. Ю., Шеришунова Е. А. // ПТЭ. 2016. № 2. С. 71.
10. Shershunova E., Malashin M., Moshkunov S., Khomich V. // Acta Polytechnica. 2015. Vol. 55. No. 1. P. 59.
11. <http://nl.lxcat.net/solvers/BOLSIG+/index.php>
12. Козлов Б. А., Соловьев В. И. // Журнал технической физики. 2009. Т. 79. № 5. С. 18.
13. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Физика импульсного пробоя газов. — М: Наука, 1991.
14. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — Долгопрудный: ИД Интеллект, 2009.
15. Малашин М. В., Мошкунов С. И., Шеришунова Е. А. / Сборник тезисов докладов XLIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород. 2016). С. 211.

## Radial current distribution of a nanosecond barrier discharge in atmospheric air

*M. V. Malashin, S. I. Moshkunov, V. Yu. Khomich, and E. A. Shershunova*

Institute for Electrophysics and Electric Power, RAS  
18 Dvortsovaya nab., St.-Petersburg, 191186, Russia  
E-mail: eshershunova@gmail.com

*Received April 27, 2016*

*The experimental results of the radial current distribution of the nanosecond barrier discharge in flat millimeter air gaps under atmospheric pressure and natural humidity of 40—60 % at a rate of the voltage rise at the electrodes 250 V/ns are presented in the paper. The time delay between discharge currents in the air gap, spreading from the gap center to its edge, was observed to increase with elongation of the gap height more than 3 mm, which correlated with the appearance of constricted channels on the volume plasma background. According to the avalanche-streamer criterion, it was found out that the nanosecond barrier discharge in air gaps of 1÷3 mm developed by a streamer mechanism.*

PACS: 52.80.-s

*Keywords:* nanosecond barrier discharge, atmospheric air, discharge current, streamer mechanism.

## REFERENCES

1. H. Ayan, G. Fridman, A. F. Gutsol, V. N. Vasilets, A. Fridman, and G. Friedman, *IEEE transactions on plasma science* **36**, 504 (2008).
2. T. Shao, Y. Yu, C. Zhang, D. Zhang, Z. Niu, J. Wang, Y. Zhou, *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation* **17**, 1830 (2010).
3. M. V. Malashin, S. I. Moshkunov, V. Yu. Khomich, E. A. Shetshunova, and V. A. Yamshchikov, *Tech. Phys. Lett.* **39** (5), 48 (2013).
4. V. Yu. Khomich, M. V. Malashin, S. I. Moshkunov, E. A. Shershunova, and V. A. Yamschikov, *IEEE transactions on plasma science* **42**, 3314 (2014).
5. M. V. Malashin, S. I. Moshkunov, V. Yu. Khomich, E. A. Shetshunova, and V. A. Yamshchikov, *Tech. Phys. Lett.* **41**. № (9), 54 (2015).
6. M. V. Malashin, S. I. Moshkunov, V. Yu. Khomich, and E. A. Shetshunova, *Russian Physics Journal* **58** (9-2), 199.
7. T. Shao, C. Zhang, Y. Yu, Z. Fang, and P. Yan, *Europhysics Letters* **97**, 55005 (2012).
8. M. V. Malashin, S. I. Moshkunov, and V. Yu. Khomich, *Plasma Phys. Rep.* **42** (2), 1 (2016).
9. M. V. Malashin, S. I. Moshkunov, V. Yu. Khomich, and E. A. Shetshunova, *Instrum. Exp. Tech.*, No. 2, 71 (2016).
10. E. Shershunova, M. Malashin, S. Moshkunov, and V. Khomich, *Acta Polytechnica* **55** (1), 59 (2015).
11. <http://nl.lxcat.net/solvers/BOLSIG+/index.php>
12. B. A. Kozlov and V. I. Solov'ev, *Tech. Phys.* **79** (5), 18 (2009).
13. Yu. D. Korolev and G. A. Mesyats, *Physics of Pulse Breakdown of Gases* (Nauka, Moscow, 1991) [in Russian].
14. Yu. P. Raizer, *Physics of Gas Discharge* (Intellekt, Dolgoprudny, 2009) [in Russian].
15. M. V. Malashin, S. I. Moshkunov, and E. A. Shetshunova, in *Proc. XLIII Intern. Zvenigorod Conf. Plasma Physics* (Zvenigorod, Russia, 2016). P. 211.