

03:04

Об однородности диффузного барьерного разряда в атмосферном воздухе между плоскими цилиндрическими электродами

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

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург
E-mail: eshershunova@gmail.com

Поступило в Редакцию 19 ноября 2014 г.

Исследована степень однородности диффузного диэлектрического барьерного разряда в миллиметровых воздушных промежутках при атмосферном давлении. Анализ однородности разряда проведен на основании распределения яркости свечения в поперечном сечении разрядного промежутка с учетом цилиндрической формы электродов. Показано, что степень однородности разряда зависит как от частоты прикладываемых к разрядному промежутку импульсов напряжения, так и от материала барьера.

В работе [1] сообщалось о реализации объемно-диффузного диэлектрического барьерного разряда (ДБР) в атмосферном воздухе естественной влажности 40–60% в 2-мм разрядном промежутке (РП) без дополнительных источников внешней предыонизации при подаче на электроды прямоугольных импульсов напряжения с наносекундными временами нарастания, формирующихся попеременным замыканием высоковольтных твердотельных ключей [2,3], и использовании в качестве барьера алюмооксидной керамики (АК). Было отмечено, что важную роль в формировании диффузного ДБР играет скорость нарастания напряженности электрического поля в РП и сопротивление внешней цепи. Влияние материала барьера на степень однородности этого разряда не изучалось. В данной работе приводится исследование диффузного ДБР в атмосферном воздухе для двух материалов барьера при частотах следования импульсов напряжения от 30 до 3000 Hz, а также проводится оценка степени однородности полученных разрядов.

Экспериментальная установка для зажигания ДБР была аналогична приведенной в работе [1]. Для инициации ДБР на РП подавались прямоугольные импульсы напряжения амплитудой 0–16 kV, длительностью

$60 \mu\text{s}$ со скоростью нарастания 0.4 kV/ns . Частота следования импульсов изменялась в диапазоне от 30 Hz до 3 kHz . Система электродов имела плоскопараллельную конфигурацию. Поперечное сечение каждого из электродов представляло собой окружность диаметром 30 mm . В качестве материала барьера применялись диэлектрические пластинки из АК с 95%-м содержанием Al_2O_3 и полиметилметакрилата (ПММА). Размер пластин составлял $50 \times 50 \times 2 \text{ mm}$.

Величина воздушного зазора для керамики составляла 2.3 mm , а для оргстекла — 1.75 mm , что обеспечивало одинаковую эквивалентную емкость системы электродов

$$C_{eq} = \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} = 2.6 \text{ pF}, \quad (1)$$

где C_a — емкость воздушного промежутка и C_b — емкость барьера оценивались по известной формуле для плоского конденсатора. При этом емкости барьеров равнялись 27 и 11 pF для керамики и ПММА соответственно.

Характеристики разряда оценивались по осциллограммам разрядного тока и фотографиям свечения, исходящего из РП, сделанным с помощью фотокамеры. Подобная техника широко применяется для исследования разрядов [4–9]. Время экспозиции выбиралось таким образом, чтобы картина свечения в РП отвечала одиночному импульсу напряжения, прикладываемому к электродам. Степень однородности оценивалась исходя из анализа распределения яркости изображения в поперечном сечении середины РП (высота слоя выборки $\sim 70 \mu\text{m}$).

Распределение яркости свечения ДБР в РП было получено путем оцифровки фотографий разряда. Для анализа степени однородности полученного разряда это распределение сравнивалось с идеальной кривой распределения яркости свечения, полученной в предположении однородного и изотропного свечения разряда без учета поглощения. Для цилиндрических электродов эта кривая описывается формулой зависимости длины перпендикулярной хорды от горизонтальной координаты в поперечном сечении (от одного края электрода до другого)

$$l(x) = \frac{\sqrt{2Rx - x^2}}{2}, \quad (2)$$

где R — радиус электрода, x — горизонтальная координата.

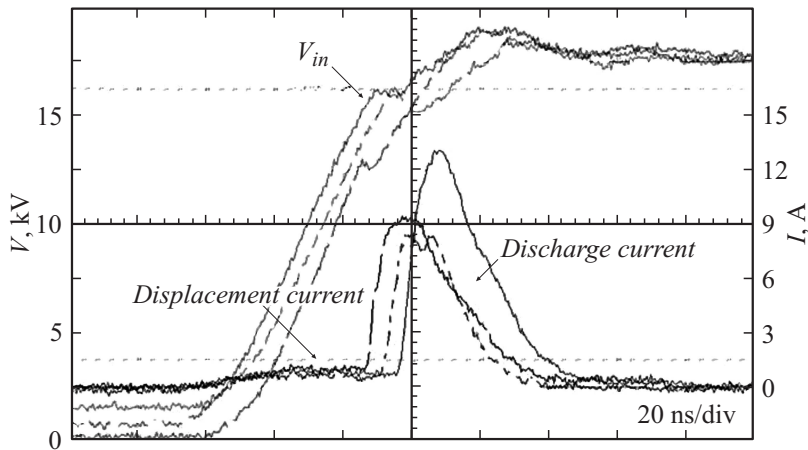


Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения при нарастании напряжения на РП в случае барьера из АК при различных частотах: 30 Hz — сплошная линия, 300 Hz — прерывистая линия, 3 kHz — прерывистая линия с длинными штрихами.

На рис. 1 представлены экспериментально полученные типичные осциллограммы тока и напряжения ДБР в случае использования барьера из АК. Как видно из рисунка, ток газового разряда при нарастании напряжения представляет собой единичный колоколообразный импульс. Его амплитуда составляет $\sim 9\text{--}12$ А, а длительность по полувысоте ~ 30 ns. Аналогичные осциллограммы были получены и для ПММА. В этом случае разрядный ток появляется с некоторой случайной задержкой относительно тока смещения на низких частотах. При этом амплитуда разрядного тока при нарастании напряжения на РП составила ~ 18 А, а его длительность ~ 12 ns. Для килогерцевых частот ситуация меняется: разброс задержек возникновения импульса разрядного тока уменьшается [10]. На спаде напряжения разрядный ток всегда частично совмещен с током смещения вне зависимости от материала барьера и частоты следования импульсов и всегда возникает с одной и той же задержкой относительно начала спада напряжения на РП. Его амплитуда всегда ниже, чем амплитуда разрядного тока при нарастании напряжения.

Следует также отметить, что с увеличением частоты прикладываемых к РП импульсов напряжения при сохранении постоянной

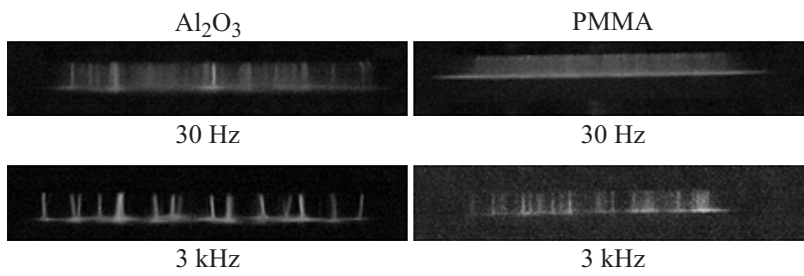


Рис. 2. Фото ДБР при различных материалах барьера и разных частотах.

формы разрядных импульсов на осциллограммах внешний вид разряда изменяется: начинает шнуроваться, особенно на килогерцевых частотах (рис. 2). Полученные данные хорошо согласуются с [11], где также говорится, что наличие одиночного колоколообразного разрядного импульса тока не может служить критерием диффузности и однородности барьерного разряда.

Для анализа степени однородности разряда было изучено распределение яркости свечения по горизонтальной оси в центре РП с учетом цилиндрической формы электродов. Для этого фотографии ДБР были представлены в виде матрицы значений яркости пикселей. Полученные экспериментальные данные были аппроксимированы относительной функцией распределения яркости свечения для цилиндрических электродов

$$L(\alpha, i) = \frac{\alpha \sqrt{2Ri - i^2}}{2}, \quad (3)$$

где i — горизонтальная координата, соответствующая номеру пикселя, R — радиус электрода, α — коэффициент нормировки. Коэффициент α соответствовал минимальному значению функции, полученной по методу наименьших квадратов:

$$F(\alpha) = \sum_{i=1}^n (D_i - L(\alpha, i))^2, \quad (4)$$

где D_i — приведенные значения вектора яркости пикселей в центре РП, полученные путем вычитания из экспериментальных данных среднего шума фонового излучения.

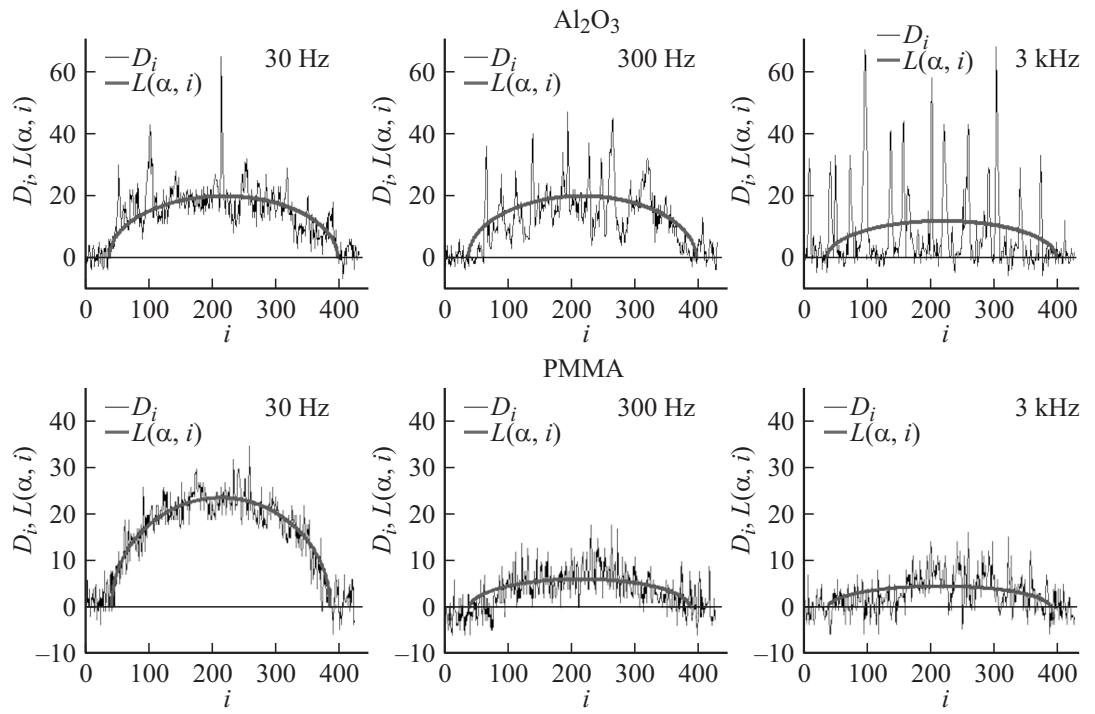


Рис. 3. Распределение яркости свечения в поперечном сечении РП при разных барьерах и частотах.

Полученные распределения яркости свечения в поперечном сечении разряда представлены на рис. 3. Из сравнения полученных распределений хорошо видно, что распределение яркости разряда в случае барьера из ПММА более приближено к идеальному распределению яркости свечения, что позволяет говорить о том, что разряд в этом случае является более однородным, нежели с барьером из АК. При увеличении частоты следования импульсов отклонения от идеального распределения становятся все больше. Область свечения ДБР разбивается на отдельные яркие уплотнения, или шнуры. Особенно хорошо это видно при частоте следования 3 кГц в случае использования барьера из АК.

Таким образом, путем сравнения пространственного распределения яркости ДБР в центре разрядного промежутка с функцией зависимости длины хорды от высоты сегмента круга как идеальной функцией распределения яркости для плоскопараллельных электродов круглого сечения была проанализирована степень однородности диэлектрического барьерного разряда в атмосферном воздухе для двух материалов барьера: алюмооксидной керамики и полиметилметакрилата. Полученные результаты показывают, что более однородное свечение диэлектрического барьерного разряда в атмосферном воздухе наблюдается при использовании барьера из полиметилметакрилата, нежели из алюмооксидной керамики. Кроме того, показано, что с увеличением частоты следования прикладываемых к воздушному промежутку импульсов напряжения разряд начинает шнуроваться, что более выражено в случае использования керамического барьера.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 12-08-01085, 13-08-01043).

Список литературы

- [1] Малашин М.В., Мошкунев С.И., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А., Ямщиков В.А. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 5. С. 48–53.
- [2] Малашин М.В., Мошкунев С.И., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А. // ПТЭ. 2014. № 2. С. 53–56.
- [3] Khomich V.Yu., Malashin M.V., Moshkunov S.I., Rebrov I.E., Shershnova E.A. // EPE Journal. 2013. V. 23. N 4. P. 51–54.
- [4] Wild R., Schumann T., Stollenwerk L. // Plasma Sources Science and Technology. 2014. V. 23. N 5. P. 054004.

- [5] *Ammelt E., Astrov Y.A., Purwins H.G.* // *Physical Review. E.* 1997. V. 55. N 6. P. 6731.
- [6] *Lifang D., Weili F., Yuyang P.* // *Plasma Science and Technology.* 2010. V. 12. N 2. P. 172.
- [7] *Борискин В.Н., Закутин В.В., Решетняк Н.Г., Романовский С.К., Ромасько В.П., Чертищев И.А., Семенов А.В.* // *ВАНТ.* 2010. Вып. 3. Сер. Ядерно-физические исследования (53). С. 89–91.
- [8] *Саркисов Ю.С., Антипов В.Б., Цыганок Ю.И., Елугачева Н.С., Лиленко Е.П., Спирин Е.Н., Аметов В.А., Тузовский А.И.* / Патент РФ № 2305274. Дата патента: 23.01.2006.
- [9] *Liu Ch., Dobrynin D., Fridman A.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2014. V. 47. N 25. P. 252 003–252 014.
- [10] *Khomich V., Malanichev V., Malashin M., Moshkunov S., Shershunova E.* // *Book of contributions. HAKONE XIV.* 2014. Zinnowitz, Germany. P. 27–31.
- [11] *Becker K.H., Kogelschatz U., Schenbach K.H., Barker R.J.* *Non-Equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure.* Bristol: IOP Publishing LTD, 2005. 700 p.