

04

Эффект нормальной плотности тока в барьерном разряде

© Д.А. Малик, К.Е. Орлов, И.В. Мирошников, А.С. Смирнов

С.-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: orlov@phtf.stu.neva.ru

Поступило в Редакцию 24 февраля 2005 г.

Исследована эволюция свечения однородного барьерного разряда в течение одного импульса тока. Экспериментально показано, что при горении барьерного разряда проявляется эффект, аналогичный эффекту „нормальной плотности тока“ в разряде постоянного тока.

Барьерный разряд известен как весьма эффективный способ создания неравновесной плазмы при высоких (порядка одной атмосферы) давлениях рабочего газа. Первые опыты с барьерным разрядом проводились более полутора веков назад [1], однако наиболее интенсивные исследования физики барьерного разряда датируются последними двумя десятилетиями. Барьерные разряды широко применяются для получения озона, модификации поверхностей, напыления покрытий, разрушения окислов азота, возбуждения эксимерных ламп и плазменных дисплеев [2]. В настоящий момент известно несколько форм существования барьерного разряда [2–4]. В зависимости от состава и давления рабочего газа, толщины и материала диэлектрика и межэлектродного зазора разряд может существовать в шнуровой форме, в виде пространственно организованных пятен или в пространственно однородной форме. В последнем случае происходит однородный по всему объему пробой разрядного промежутка и формируется неравновесная плазма, заполняющая весь зазор. Диффузную форму барьерного разряда называют Atmospheric Pressure Glow; она привлекает особое внимание исследователей как перспективный и относительно простой способ получения однородной неравновесной плазмы при больших давлениях. Как правило, наиболее просто получить однородную форму горения таких разрядов в гелии или в смесях с подавляющим содержанием гелия [5]. Однородная форма барьерного разряда достаточно легко реализуется также при

пониженных давлениях. В работе [6] показано также, что переход между искровой и однородной формой горения барьерного разряда может определяться режимом согласования ВЧ-генератора с разрядом. Опубликован также целый ряд работ, исследующих зависимости режима горения барьерного разряда от одного из возможных параметров (в частности, толщина и материал диэлектрика или давление рабочего газа) [7–11]. Несмотря на постоянно растущее число публикаций по данной тематике, сценарии формирования однородной структуры барьерного разряда в настоящее время не выявлены и не объяснены в достаточной степени. Кроме того, отсутствуют приемлемые и обоснованные законы подобия для таких разрядов.

В предыдущей работе [12] авторами было экспериментально показано, что при использовании резонансной системы согласования генератора с разрядом наблюдаются режимы горения разряда с частичным заполнением электродов. В таком режиме изменение средней мощности, вкладываемой в разряд, происходит при практически постоянной форме и амплитуде напряжения на электродах с одновременным изменением площади, занимаемой видимым свечением разряда. Авторами было введено понятие „нормальной плотности мощности“ для барьерного разряда по аналогии с известным эффектом нормальной плотности тока в разрядах постоянного тока.

В данной работе представлены результаты измерения эволюции свечения разряда в течение одного импульса тока. Эксперименты проводились на установке, описанной в работе [12]. Разряд зажигался между двумя алюминиевыми электродами диаметром 33 mm. Electroды были покрыты диэлектрическим барьером из оксида алюминия. Толщина оксидного покрытия составляла 100 μm , межэлектродное расстояние 2.4 mm. Напряжение частотой 100 kHz подавалось к электродам через перестраиваемую резонансную систему согласования. Регистрация свечения разряда производилась с помощью ПЗС камеры (прибора с зарядовой связью) с усилителем светового сигнала (ICCD ProScan). Время экспозиции составляло 200 ns. Запуск камеры синхронизировался с заданными фазами импульса разрядного тока. Для получения одного кадра проводилось накопление по 100 последовательным импульсам разрядного тока одной полярности (т.е. с частотой 50 kHz). Кадры снимались с шагом 100 ns.

На рис. 1, *b* показаны фотографии свечения разрядного промежутка в различные моменты времени. Видно, что разряд развивается в

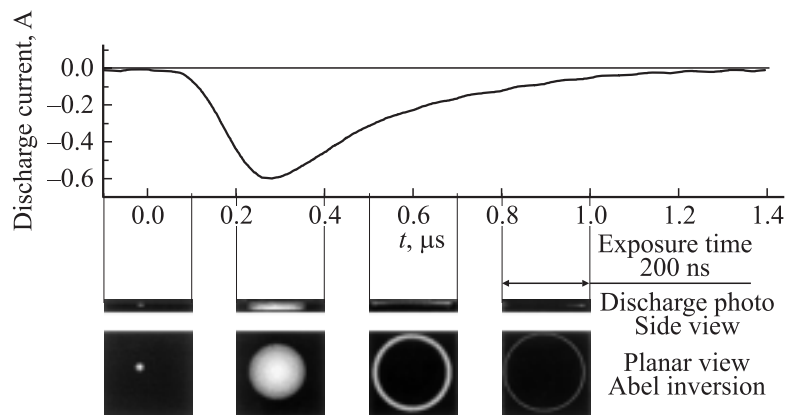


Рис. 1. Разрядный импульс тока (а), фотографии свечения разрядного промежутка в различные моменты времени (b) и планарные проекции свечения разряда (с), полученные путем численного преобразования Абеля в предположении аксиальной симметрии распределения свечения в плоскости электродов. Межэлектродное расстояние 2.4 см, разряд в смеси $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He}$ (1:1:8), давление 40 Торг.

центральной части и затем распространяется в радиальном направлении к краям электродов. Понятно, что боковая фотография свечения в межэлектродном зазоре представляет собой хордовые проекции свечения между дисковыми электродами. Из общей структуры полученных фотографий можно сделать вывод о том, что распределение свечения близко к аксиально-симметричному. Для получения планарных проекций свечения использовалось обратное преобразование Абеля. Результаты представлены на рис. 1, с совместно с экспериментально полученными фотографиями свечения разряда. Видно, что разряд эволюционирует в виде расширяющегося кольца. Считая, что область свечения приблизительно соответствует области, занимаемой разрядом, можно по полученным планарным проекциям оценить площадь, занимаемую разрядом в различные моменты времени. На рис. 2 показаны осциллограмма полного тока, протекающего через разрядный промежуток, и результаты оценки площади, занимаемой разрядом в различные моменты времени. Как видно из графика, разрядный ток и площадь,

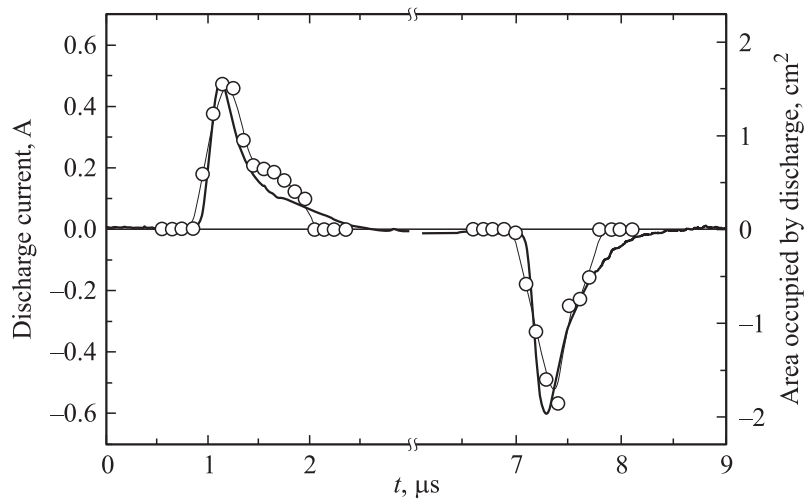


Рис. 2. Импульсы разрядного тока и оцененные величины площади, занимаемой разрядом, для условий, приведенных на рис. 1.

занимаемая разрядом, пропорциональны. При этом величина плотности тока составляет 300 mA/cm^2 , что по порядку величины соответствует величине нормальной плотности тока аналогичной газовой смеси для разряда постоянного тока.

Из полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы. Во-первых, зарядка поверхности диэлектрика происходит не одновременно по всей площади электрода, а последовательно, с одновременным перемещением пятна горения разряда по поверхности электрода. Во-вторых, в любой локальной области электрода перезарядка происходит с постоянной величиной плотности тока и занимает времена порядка сотен наносекунд. Относительно большая длительность импульса полного разрядного тока (порядка $1 \mu\text{s}$) определяется в основном ограничением полного разрядного тока системой согласования. Следует отметить, что система согласования определяет также величину и форму напряжения на электродах. В частности, использованная в данной работе резонансная система согласования обеспечивала низкое выходное сопротивление на частоте возбуждения

и частотах, соответствующих импульсу разрядного тока. В результате форма напряжения на электродах была близка к синусоидальной, а амплитуда определялась потерями мощности в разряде. При использовании для возбуждения разряда усилителя (генератора) со значительным выходным сопротивлением форма напряжения на электродах сильно искажается при протекании импульса тока, что значительно осложняет интерпретацию результатов.

Полученные экспериментальные результаты показывают также, что одномерное моделирование не может корректно описать процессы в барьерном разряде.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04–02–16483–а).

Список литературы

- [1] *Siemens W.* // Poggendorff's Ann. Phys. Chem. 1857. V. 102. P. 66.
- [2] *Kogelschatz U.* // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2003. V. 23. N 1. P. 1.
- [3] *Kogelschatz U.* // IEEE Trans. Plasma. Sci. 2002. V. 30. N 4. P. 1400.
- [4] *Pietsch G.J.* // Contrib. Plasma Phys. 2001. V. 41. N 6. P. 620.
- [5] *Massines F., Rabeli A., Decomps P.* et al. // J. Appl. Phys. 1998. V. 83. N 6. P. 2950.
- [6] *Zhiyu Chen* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. V. 30. N 5. P. 1922.
- [7] *Tochikubo F., Chiba T., Watanabe T.* // Jpn. J. Appl. Phys. 1999. V. 38. N 9A. P. 5244.
- [8] *Gherardi N., Gouda G., Gat E., Ricard A., Massines F.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2000. V. 9. P. 340.
- [9] *Gibalov V.I., Pietsch G.J.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. V. 33. P. 2618.
- [10] *Golubovskii Yu.B., Maiorov V.A., Behnke J., Behnke J.F.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. V. 35. P. 751.
- [11] *Mangolini L., Anderson C., Sittig K., Zhang P., Hur M., Heberlein J., Kortshagen U.* // 16th International Symposium on Plasma Chemistry. Taormina, Italy, June 22–27, 2003.
- [12] *Малик Д.А., Орлов К.Е., Смирнов А.С.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 2. С. 44.