

04

## Аналог эффекта нормальной плотности тока в барьерном разряде

© Д.А. Малик, К.Е. Орлов, А.С. Смирнов

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

Поступило в Редакцию 10 июня 2004 г.

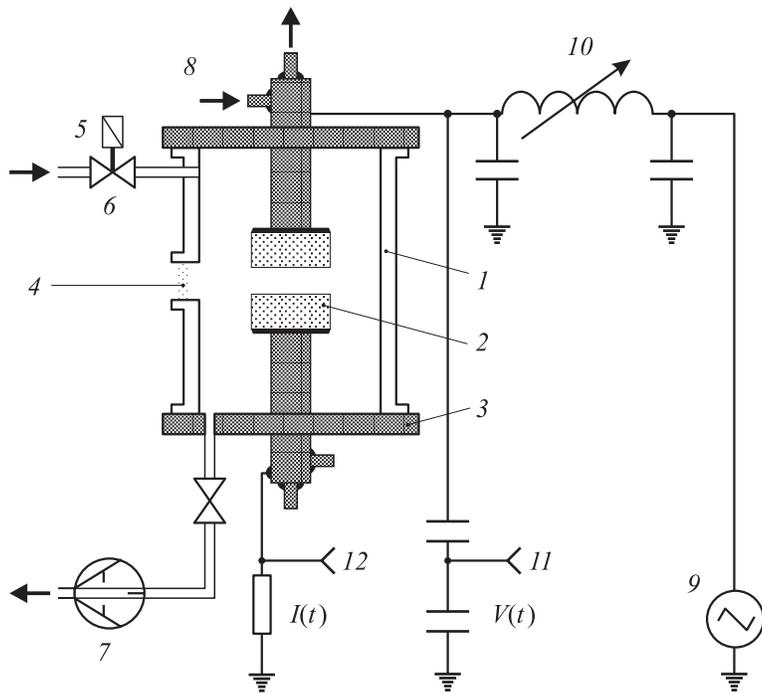
Исследованы режимы однородного горения барьерного разряда в воздухе при пониженных давлениях. Экспериментально показано, что при горении барьерного разряда проявляется эффект, аналогичный эффекту „нормальной плотности тока“ в разряде постоянного тока.

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 века 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 (*filamentary mode*), в виде пространственно организованных пятен (*spots mode*) или пространственно однородной форме (*diffuse mode*). В последнем случае происходит однородный по всему объему пробой разрядного промежутка и формируется неравновесная плазма, заполняющая весь зазор. Протекание тока через плазму приводит к постепенному уменьшению напряжения в зазоре из-за зарядки поверхности диэлектрического барьера. В момент, когда электрическое поле в зазоре становится недостаточным для поддержания необходимой ионизации, начинается распад плазмы. После изменения полярности приложенного к электродам напряжения снова происходит пробой и протекание тока в обратном направлении.

Последняя форма барьерного разряда в последнее время обозначается в литературе как Atmospheric Pressure Glow и 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. Несмотря на постоянно растущее число публикаций по данной тематике, сценарии нарушения однородности горения разряда в настоящее время не выявлены и не объяснены в достаточной степени.

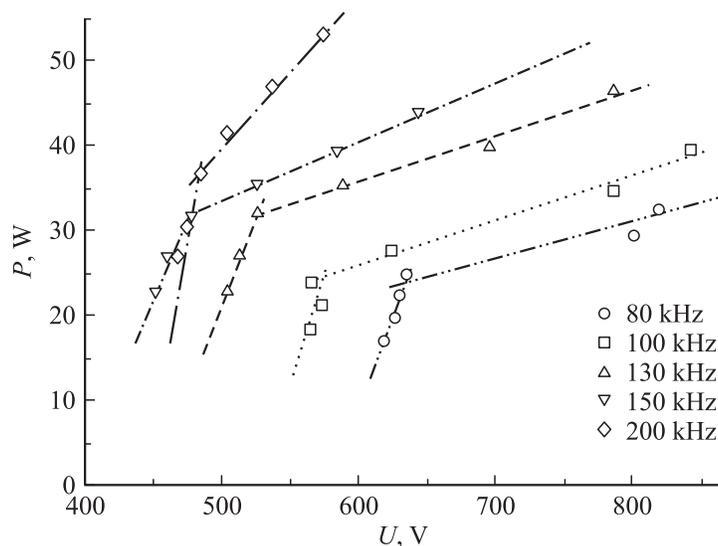
В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований электрических параметров барьерного разряда в воздухе при пониженных давлениях. Эксперименты проводились на установке, схематично показанной на рис. 1. Разряд зажигался между двумя алюминиевыми электродами диаметром 30 мм. Electroды покрыты диэлектрическим барьером из оксида алюминия. Толщина оксидного покрытия составляла в разных экспериментах 40–200 мкм, межэлектродное расстояние варьировалось в пределах 2–6 мм. Напряжение частотой от 50 до 200 кГц подавалось к электродам через перестраиваемую резонансную систему согласования. Усилитель мощности (100 W) работал в ключевом режиме. Для измерения напряжения на электродах и разрядного тока использовались емкостный делитель и шунт. Форма сигналов регистрировалась цифровым осциллографом с полосой пропускания 50 МГц и записывалась в компьютер для цифровой обработки. Мощность, вкладываемая в разряд, вычислялась как усредненное по многим периодам произведение мгновенных значений тока на напряжение.

Типичные зависимости вкладываемой в разряд мощности от напряжения на электродах приведены на рис. 2. Видно, что на характеристике имеются два выраженных участка с различными наклонами. При минимальном прикладываемом напряжении свечение разрядной плазмы занимает только часть поверхности электродов. При увеличении напряжения на электродах область свечения расширяется и одновременно наблюдается рост мощности, что соответствует левой части



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — плексиглазовая камера, 2 — алюминиевые электроды, 3 — латунная подставка, 4 — кварцевое окно, 5 — подача газа, 6 — контроль потока газа, 7 — откачка, 8 — водяное охлаждение, 9 — ВЧ генератор, 10 — система согласования, 11 — делитель напряжения, 12 — токовый шунт.

характеристики на рис. 2. Точка перегиба характеристики соответствует ситуации, когда вся поверхность электродов заполнена плазмой. При дальнейшем увеличении напряжения вкладываемая мощность растет значительно медленней. При этом наблюдается постепенный выход разряда на боковые поверхности электродов. Можно предположить, что рост мощности на правой части характеристики частично обусловлен продолжением роста эффективной площади разряда. В таком случае при использовании электродов с большим отношением линейных размеров



**Рис. 2.** Зависимость мощности, вкладываемой в разряд, от напряжения на электродах. Газ — воздух, давление — 20 Торг, межэлектродный зазор — 4.4 mm, толщина диэлектрического покрытия электродов — 140  $\mu\text{m}$ .

к межэлектродному зазору правая часть характеристики окажется еще более полой или горизонтальной.

Описанный эффект сходен с эффектом „нормальной плотности тока“ в тлеющем разряде постоянного тока. Однако из-за принципиальной нестационарности протекания тока через плазму в барьерном разряде удобнее ввести величину „нормальной плотности мощности“, соответствующей точке перегиба характеристики на рис. 2. Величина нормальной плотности мощности растет с увеличением частоты прикладываемого напряжения, что приблизительно соответствует постоянной энергии, вкладываемой в единичном импульсе разрядного тока. При увеличении давления рабочего газа величина нормальной плотности также растет. Однако при прочих заданных параметрах (толщина диэлектрика, частота прикладываемого напряжения и величина межэлектродного зазора) существует пороговое значение давления, при превышении которого разряд переходит в искровую форму.

Наблюдение эффекта нормальной плотности мощности, по-видимому, стало возможным благодаря принципиальным особенностям использованной системы согласования. Роль резонансной системы согласования эквивалентна балластному сопротивлению в цепи разрядов постоянного тока. Так же как и в разрядах постоянного тока, оказывается возможным получить режимы горения барьерного разряда с частичным заполнением поверхности электродов и выявить эффект нормальной плотности.

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.