

04

О возможности получения объемного диэлектрического барьерного разряда в воздухе при атмосферном давлении

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

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург
E-mail: m_malashin@mail.ru

Поступило в Редакцию 23 октября 2012 г.

Получена однородная объемная форма диэлектрического барьерного разряда в воздухе при атмосферном давлении и естественной влажности. Описываются условия получения однородного разряда. Показана определяющая роль влияния скорости нарастания напряженности электрического поля в межэлектродном зазоре на однородность разряда.

Импульсно-периодический электрический разряд в газе, где один или оба электрода изолированы от плазмы диэлектриками, известный как диэлектрический барьерный разряд (ДБР) [1], был впервые продемонстрирован Вернером фон Зименсом (Wernner von Siemens) в 1957 году. В последнее время ДБР широко применяется для накачки газовых лазеров, поверхностной обработки материалов и в плазменных дисплеях [2]. Интерес к этому виду разряда также вызван его перспективами применения в плазменной медицине, плазмохимии, а также в аэродинамике в качестве источников ионов для создания управляемых газодинамических потоков.

Несмотря на длительную историю изучения данного вида разряда в различных газовых смесях, до настоящего времени в литературе отсутствует описание получения сильноточного (~ 10 А) однородного объемного диэлектрического разряда в воздухе при атмосферном давлении и естественной влажности воздуха. Обычно в воздухе и других электроотрицательных газах при атмосферном давлении ДБР имеет форму многочисленных микрозарядов. Это является следствием высокой скорости ионизации азота при характерных для ДБР значениях

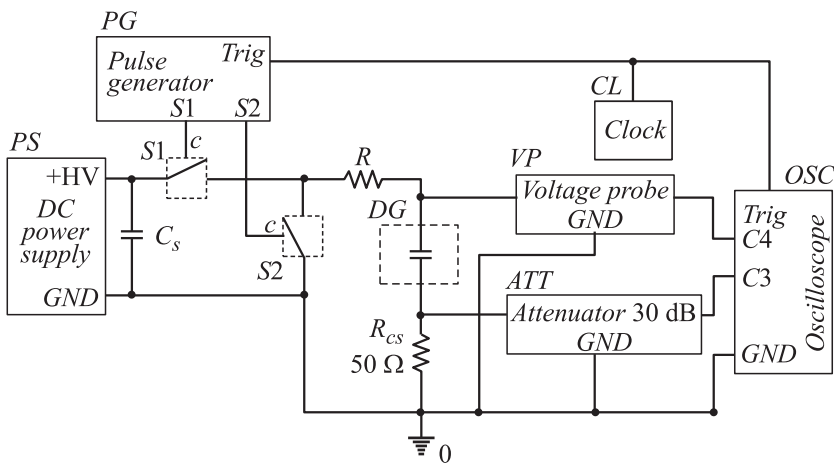


Рис. 1. Электрическая схема лабораторной установки: *PS* — источник постоянного напряжения (0–15 kV), *PG* — генератор on/off импульсов управления ключами *S1* и *S2*, *CL* — генератор тактирующих импульсов, *OSC* — осциллограф, *ATT* — аттенуатор, *VP* — высоковольтный пробник напряжения, *S1* и *S2* — высоковольтные ключи, *R* — малоиндуктивный высоковольтный резистор, *DG* — разрядный промежуток, *R_{cs}* — резистор для регистрации сигнала тока.

параметра E/N , а также эффективного гашения метастабилей азота $A^3\Sigma_u^+$ молекулами кислорода [3,4].

В предлагаемой статье описано получение сильноточного однородного объемного ДБР в воздухе при атмосферном давлении, комнатной температуре и естественной влажности.

Электрическая схема лабораторной установки для получения однородного объемного ДБР представлена на рис. 1. Установка состоит из источника постоянного напряжения *PS* с плавной регулировкой в диапазоне от 0 до 15 kV, накопительного конденсатора *C_s*, высоковольтных ключей *S1* и *S2* [5,6], включение и выключение которых осуществляется генератором импульсов *PG*, высоковольтного малоиндуктивного резистора *R* и разрядного промежутка *DG*. Запуск развертки осциллографа *OSC* и генератора импульсов *PG* осуществляется синхронно посредством генератора тактирующих импульсов *CL*, обладающего возможностью плавной регулировки частоты. Регистрация

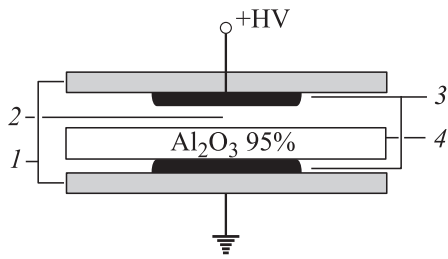


Рис. 2. Схема разрядного промежутка *DG*: 1 — стеклотекстолитовая подложка электродов, 2 — разрядный промежуток, 3 — электроды, 4 — изолятор.

напряжения на разрядном промежутке осуществляется высоковольтным пробником VP (Tektronics P6015A). Ток регистрируется малоиндуктивным резистивным датчиком R_{CS} .

Ключ $S2$ включается с задержкой относительно $S1$ в $60 \mu s$. Длительность открытого состояния каждого ключа составляет $300 ns$. Частота повторения f задается генератором CL . Таким образом, верхний электрод разрядного промежутка оказывается попеременно соединен либо с высокопотенциальным выводом накопительной емкости C_s через $S1$ и R , либо с нулевым потенциалом схемы через R и $S2$. Скорость изменения напряжения на разрядном промежутке в таком случае определяется номиналом добавочного резистора R , индуктивностью подвода и эффективной емкостью цепи. Форма сигнала, подаваемого на разрядный промежуток, близка к прямоугольной, с амплитудой напряжения, равной напряжению на накопительной емкости, и длительностью, соответствующей временной задержке включения $S2$ относительно $S1$. Частота такого сигнала соответствует частоте повторения импульсов тактирующего генератора CL .

Схема разрядного промежутка *DG*, применявшегося в настоящем эксперименте, представлена на рис. 2.

Металлические электроды представляют собой круги диаметром $30 mm$, выполненные из луженой меди на стеклотекстолитовой основе. Один из электродов закрыт диэлектриком, представляющим собой керамическую пластину из оксида алюминия ($95\% Al_2O_3$) толщиной $2 mm$. Зазор между поверхностью диэлектрика и вторым электродом составляет $d = 2 mm$.

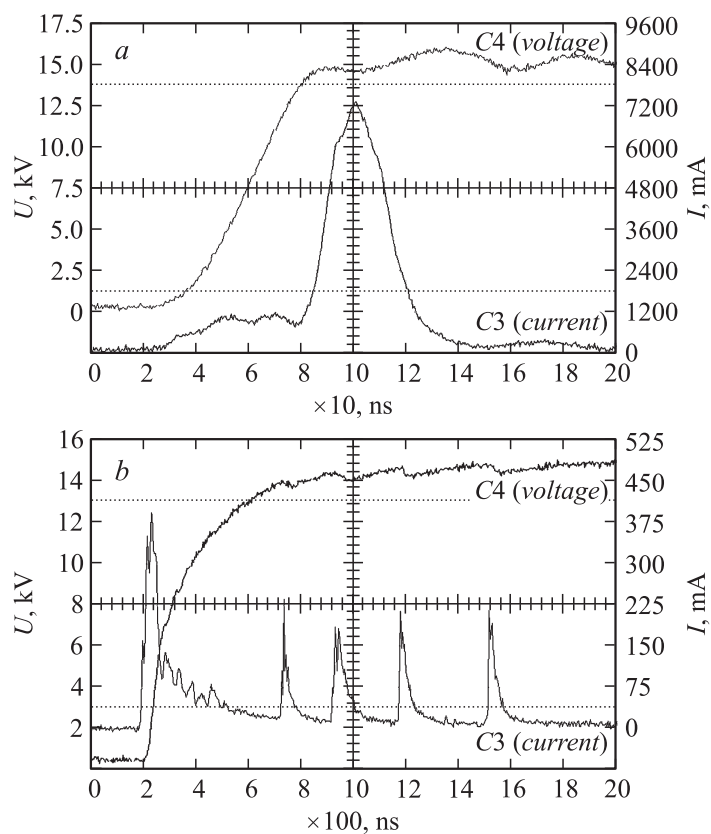


Рис. 3. Осциллограммы напряжения и тока: *a* — однородного ДБР в воздухе, *b* — неоднородного ДБР в воздухе.

Эксперименты проводились в воздухе при атмосферном давлении и естественной влажности 40–60%. Форма импульсов напряжения, подаваемого на разрядный промежуток, и форма тока, протекающего в цепи, регистрировались при помощи осциллографа LeCroy WaveRunner 104Xi-A 1 GHz 10 CS/s.

На рис. 3 представлены осциллограммы однородного, объемного ДБР (рис. 3, *a*) и „шнурованного“ ДБР (рис. 3, *b*) в воздухе. Оба вида

ДБР разряда получены в одинаковых и неизменных в ходе эксперимента внешних условиях. Источник постоянного напряжения PS поддерживал на накопительной емкости C_s постоянное напряжение $U = 14 \text{ kV}$, частота повторения импульсов тактирующего генератора CL составляла $f = 30 \text{ Hz}$. Единственным изменяемым параметром в экспериментах была величина электрического сопротивления резистора R . Однородная объемная форма ДБР была получена при $R = 100 \Omega$, тогда как неоднородной форме ДБР соответствует $R = 12 \text{ k}\Omega$.

Время нарастания напряжения по уровню 0.1–0.9 на разрядном промежутке DG в случае однородной формы разряда составило 40 ns, в случае неоднородной формы разряда — 400 ns. Напряженность поля, при которой загорелся однородный объемный ДБР в воздухе, составила 70 kV/cm .

Как видно из осциллограммы на рис. 3, *a*, сигнал тока, протекающего через разрядный промежуток DG в случае однородного ДБР, представляет собой сумму токов: заряда емкостной составляющей в отсутствие разряда (временной промежуток с 20 по 80 ns) и одиночного колоколообразного импульса тока с характерной амплитудой $\approx 7 \text{ A}$ и шириной по полувысоте $\approx 15 \text{ ns}$, обусловленного возникновением разряда. Ток однородного ДБР на спаде напряжения (включение S2) близок по форме и амплитуде, но противоположен по знаку.

Сигнал тока в случае неоднородного ДБР (рис. 3, *b*) представляет собой множество отдельных импульсов с высокой скоростью нарастания и более медленным, чем нарастание, спадом. Характерная амплитуда таких импульсов $\sim 200 \text{ mA}$, ширина по полувысоте $\sim 30 \text{ ns}$. Большинство этих импульсов сосредоточено вблизи фронтов нарастания и спада подаваемого напряжения, однако они возникают случайным образом в течение всего времени приложения высокого напряжения к разрядному промежутку DG. Первые шнурующиеся каналы зажигаются при напряженностях поля $\sim 34 \text{ kV/cm}$, с увеличением напряженности поля увеличивается количество шнурующихся каналов за один импульс.

Полученные разряды хорошо различимы невооруженным глазом и при фоторегистрации, а также сопровождаются различным для однородного и неоднородного разряда звуком. Звук однородного ДБР в воздухе более приглушенный в сравнении с неоднородным.

Таким образом, получен сильноточный однородный объемный диэлектрический барьерный разряд в воздухе при атмосферном давлении. Показано, что определяющую роль в формировании однородной формы

в воздухе играет скорость нарастания напряженности электрического поля в зазоре. Скорость нарастания электрического поля в воздушном зазоре, полученная в данной работе, составляла $1.1 \text{ kV}/(\text{cm} \cdot \text{ns})$ для однородного ДБР, скорость нарастания поля в случае неоднородной формы разряда составила $0.1 \text{ kV}/(\text{cm} \cdot \text{ns})$. Напряженность поля, при которой зажегся однородный объемный ДБР в воздухе, составила $70 \text{ kV}/\text{cm}$.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12–08–01085-а).

Список литературы

- [1] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский дом „Интеллект“, 2009. 736 с.
- [2] Kogelschatz U., Eliasson B., Egli W. // Pure Appl. Chem. 1999. V. 71. N 10. P. 1819–1828.
- [3] Maïorov V.A., Golubovskii Yu.B. // Plasma Sources Science and Technology. 2007. N 16. P. 67–75.
- [4] Branderburg R., Navratil Z., Jansky J., St'Ahel P., Trunec D., Wagner H.E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. N 8. P. 085 208.
- [5] Иванов Е.В., Мошкунев С.И., Хомич В.Ю. // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 1. С. 88–90.
- [6] Грязнов О.В., Иванов Е.В., Малашин М.В., Мошкунев С.И., Хомич В.Ю. // Прикладная физика. 2008. № 5. С. 32–34.