

04;12

Получение автономных долгоживущих плазменных образований в свободной атмосфере

© Л.В. Фуров

Владимирский государственный университет,
600000 Владимир, Россия
e-mail: golovn@vpti.vladimir.ru

(Поступило в Редакцию 23 октября 2003 г. В окончательной редакции 16 июня 2004 г.)

Приведены результаты экспериментов по получению автономных долгоживущих плазменных образований в свободной атмосфере с временем жизни до 2 с в видимом диапазоне длин волн. Дано описание экспериментальной установки и результатов наблюдений в виде осциллограмм и фотографий. Определены энергетические условия их гарантированного получения.

Введение

Исследования долгоживущих плазменных образований (ДПО) связывают прежде всего с решением проблемы шаровой молнии (ШМ). В этом направлении теоретические и экспериментальные исследования имеют солидную историю, которая хорошо отражена в работах [1–12].

Исследование автономных долгоживущих плазменных образований, удаленных как от стенок разрядной камеры, так и от источников энергии, представляется актуальным для понимания природы шаровой молнии, испытания устройств грозозащиты; плазмохимии, создания импульсных источников мощного оптического излучения открытого типа, аккумуляции и транспортировки электромагнитной энергии.

В сборнике статей [13] представлены результаты экспериментальных работ ответственных авторов, в которых некоторые отдельные свойства природной ШМ (форма и размер, цвет, скорость движения, время жизни, распад) удалось полностью или частично повторить в лаборатории. Способы получения ДПО различны. Это эрозионный разряд [14,15], капиллярный разряд [16,17], сверхвысокочастотный разряд и его модификации [18] и др. Так как природные ШМ наблюдаются в свободной атмосфере, то большинство экспериментов проводилось при атмосферном давлении, где рабочей средой является атмосферный воздух.

Особенно перспективными являются эксперименты, в которых в качестве рабочей среды используется воздух с насыщенными водяными парами, потому что такая ситуация наиболее точно моделирует естественные условия рождения ШМ. В результате эрозионного разряда могут быть получены светящиеся образования диаметром $\sim 7\text{--}19\text{ см}$ и временем жизни $0.5\text{--}1\text{ с}$ [19,20]. Как показывают эксперименты, время жизни ДПО зависит от целого ряда факторов: от размера и геометрической формы центрального электрода, напряжения между электродами, величины и длительности импульса тока, температуры и электропроводности воды, нанесенной на электрод [21].

В подавляющем числе экспериментов в качестве источника энергии использовались конденсаторные батареи (например, в работе [14] емкость изменялась от $650\text{ }\mu\text{F}$ до 5 мF и запасаемая электрическая энергия от 50 до 200 Дж , а в работе [15] — $216\text{ }\mu\text{F}$ и 100 кJ соответственно), время электрического импульса которых составляет микросекунды. Это приводит к тому, что за такой короткий промежуток времени подвода электрической энергии к разряду ДПО не успевает сформироваться в устойчивую структуру и распадается, не сформировавшись окончательно.

В настоящей работе ставилась задача получить ДПО с временем послесвечения до 2 с, с использованием индукционного накопителя энергии (время электрического импульса составляет $\sim 100\text{ мс}$) и значительным запасом электрической энергии (около 500 кJ) в свободной атмосфере (т.е. при атмосферном давлении). При этом не используются различные присадки к разрядной плазме, за исключением материала эрозии электродов.

Установка для получения ДПО

Комплекс устройств для получения и исследования ДПО состоит из четырех основных частей: устройств энергопитания, коммутации, генерации и регистрации параметров долгоживущих плазменных образований [12,22,23]. Структурная схема установки представлена на рис. 1. Питание накопительной индуктивности осуществляется от блока из девяти выпрямителей типа ВАКГ-12/6-3200, соединенных параллельно. Основные технические данные агрегата: напряжение питающей сети $380 \pm 38\text{ В}$, частота питающей сети 50 Hz , номинальная мощность на выходе 38.4 kW , номинальный выпрямленный ток 3200 А , номинальное выпрямленное напряжение: режим I — 12 В , режим II — 6 В . Накопление электрической энергии осуществляется с помощью индуктивного накопителя (запасаемая энергия при токе питания 3000 А около 500 кJ , общий вес 4000 кг). Силовые цепи питания коммутируются выключателями МГГ-10-УЗ (номинальный ток отключения 45 кA , собственное время включения $\leq 0.4\text{ с}$, время отключения до

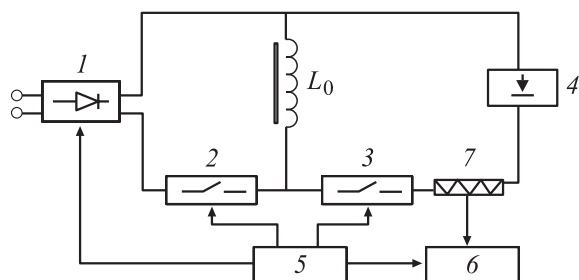


Рис. 1. Структурная схема установки: 1 — блок из 9 выпрямителей ВАКГ-12/6-3200, 2 — выключатель МГГ-10-УЗ, 3 — выключатель ВМГ-10, 4 — плазменная пушка, 5 — программный механизм, 6 — измерительно-регистрирующая аппаратура, 7 — шунт 75ШСМУЗ, L_0 — накопительная индуктивность.

погасания дуги 0.14 s) и ВМГ-10. Генерация ДПО осуществляется с помощью плазменной пушки, выполненной полностью из немагнитных материалов.

Установка работает следующим образом. При замыкании выключателя 2 типа МГГ-10-УЗ накопительная индуктивность $L_0 = 6.5 \cdot 10^{-4}$ Н подключается к блоку выпрямителей 1. После накопления в индуктивности магнитной энергии срабатывает выключатель 3 типа ВМГ-10, который соединяет накопитель с нагрузкой 4 (плазменной пушкой). Через 0.07 s размыкается выключатель 2, и экстраток размыкания используется как рабочий ток для взрыва диафрагмы, установленной в плазменной пушке. Промежуток времени в 0.07 s выбран так, что с одной стороны, диафрагма еще не успевает сгореть при напряжении питания 4 V, а с другой стороны, в выключателе 2 образуется достаточно надежный контакт. Управление выключателями, выпрямителями и измерительно-регистрирующей аппаратурой 6 осуществляется программным механизмом 5. Шунт 7 предназначен для измерения силы тока в цепи разряда.

Важнейшей частью установки является устройство для получения и формирования ДПО (плазменная пушка), которое позволяет получать в свободной атмосфере автономные ДПО с временем послесвечения до 2 s в видимом диапазоне длин волн. Конструкция устройства генерации ДПО в свободной атмосфере представлена на рис. 2. Инициатором разряда является проводящая диафрагма 4 в форме круга диаметром 100 mm, составленная из 7 слоев алюминиевой фольги, каждый из которых имеет толщину $8 \mu\text{m}$. Такое количество слоев, как показали эксперименты, является оптимальным. Диафрагма располагается на диэлектрической подложке 3 (текстолит, плексиглас, картон и др.) и прижимается к ней кольцевым токоподводом 2, выполненным из немагнитного материала (нержавеющая сталь, латунь). В центр диафрагмы устанавливается токоподвод 1 из скрученных проволочек диаметром 1.0–2.4 mm, количество которых в зависимости от условий опыта может изменяться от 2 до 8. Другой конец проволочек крепится по кругу на токоподвод 6. С целью уменьшения влияния

на формирование ДПО магнитного поля, создаваемого токоподводом 6, он располагается ниже области разрядного промежутка, а к токоподводу 5 импульс тока подводится по направляющим 7. Все элементы конструкции выполнены из немагнитных материалов и крепятся на стойке 8. Эксперименты показали, что при использовании магнитных материалов не происходит формирования устойчивого ДПО. Это выражается прежде всего в том, что время послесвечения составляет десятки доли секунды. Конструкция устройства отличается компактностью и позволяет регулировать размеры ДПО за счет изменения внутреннего диаметра D кольцевого токоподвода от 60 до 150 mm.

Параметры работы установки и параметры ДПО синхронно записывались на фотобумагу УФ-67-135 светочувствительного осциллографа К-115. В качестве примера на рис. 3 приведена характерная осциллограмма силы тока I , падения напряжения U и потока излучения P в оптическом диапазоне длин волн, зарегистрированная на светолучевом осциллографе К-115. Ток в цепи разряда

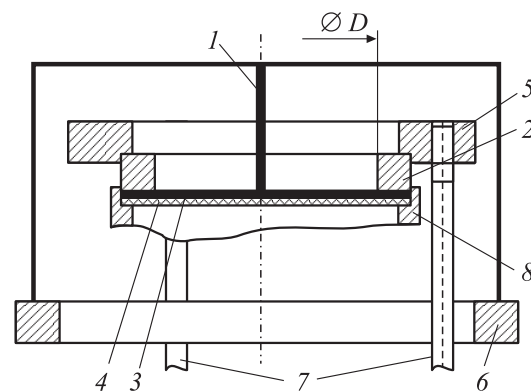


Рис. 2. Плазменная пушка: 1 — центральный токоподвод; 2 — кольцевой токоподвод; 3 — диэлектрическая подложка; 4 — проводящая диафрагма; 5, 6 — токоподвод; 7 — направляющие стойки; 8 — стойка.

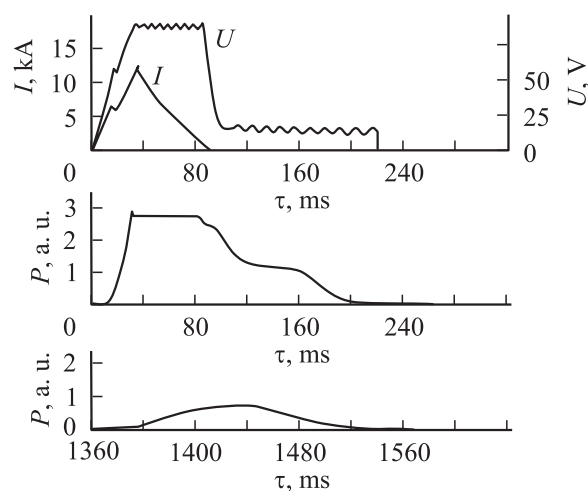


Рис. 3. Характерные зависимости силы тока I , падения напряжения U и потока излучения P от времени τ .

регистрировался на осциллографе косвенным методом по падению напряжения на шунте 75ШСМУЗ. Падение напряжения на разрядном промежутке измерялось прямым методом между аксиальным и кольцевым токоподводами, включая падение напряжения на приэлектродных слоях. При регистрации падения напряжения и силы тока в цепи разряда в светолучевом осциллографе использовались гальванометры МО14-1200, погрешность которых составляет 5%. Для снятия оптических характеристик ДПО использовался фотометр типа АИЕЦ2-С с вакуумным фотоэлементом типа Ф-2. При уровне относительной чувствительности фотокаатода 50% диапазон принимаемых длин волн от 320 до 600 nm. Специально поставленные эксперименты показали, что постоянная времени фотометра составляет не более 5 ms.

Эксперимент

Результат экспериментальной реализации автономного долгоживущего плазменного образования представлен на рис. 4, 5. Фотосъемка проводилась вручную на цветную пленку „Кодак-400“ фотоаппаратом „Зенит ЕТ“ с объективом МИР-1В (диафрагма 8, выдержка 1/125 s)



Рис. 4. Долгоживущее плазменное образование в момент формирования.

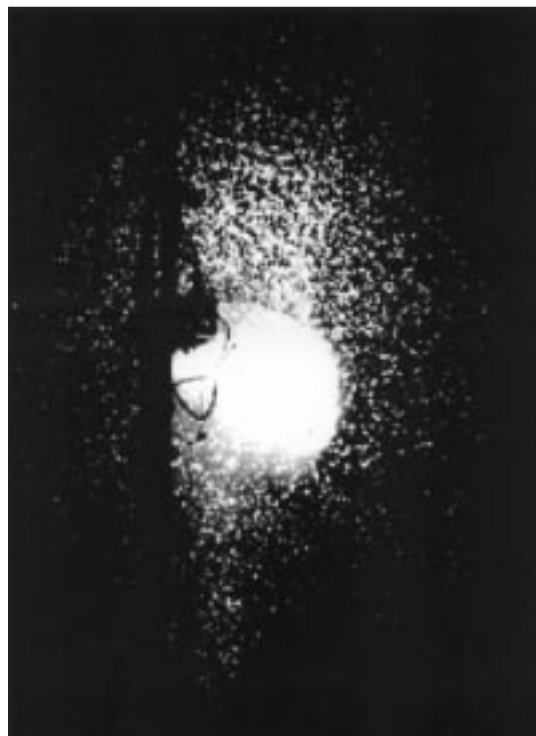


Рис. 5. Долгоживущее плазменное образование в момент завершения формирования.

с расстояния 4 m в затемненной лаборатории в момент завершения формирования ДПО. На фотографии, в самом низу, видны элементы плазменной пушки, а ДПО имеет грибообразную форму (рис. 4) (на момент формирования), затем самопроизвольно трансформируется в шар (рис. 5) диаметром 35–40 см. Следует отметить, что на фотографиях представлены разные опыты. Шар частично находится за стойкой с измерительной аппаратурой. Расстояние от плазменной пушки до центра шара около 70 см на момент съемки 1 s после завершения подвода энергии. В данном опыте сила тока составляла 10.2 kA, длительность импульса тока 100 ms.

Рассмотрение физических процессов по объяснению причин длительного свечения наблюдаемых ДПО является предметом отдельного исследования. Однако следует отметить, что фотометрические измерения величины излучаемой энергии показали, что суммарная радиационная энергия высвечивания ДПО за время его жизни превышает полную расчетную энергию, состоящую из тепловой энергии частиц, энергии ионизации и энергии фазовых переходов в конденсированной дисперсной фазе. В зависимости от условий эксперимента высвечиваемая энергия составляет от 1.6 ± 0.7 до 10.8 ± 4.4 kJ. Следовательно, часть энергии запасается, например, электромагнитным полем, т.е. автономное ДПО является беззеркальной ловушкой фотонов. Этот вывод подтверждается тем, что в определенной доле экспериментов (10%) перед разрушением ДПО его светимость возрастает („бугорок светимости“ на рис. 3), что необъяснимо с позиций остывающей плазмы.

Эксперименты показывают, что существуют некоторые пороговые значения параметров или условий опыта, начиная с которых происходит самоорганизация ДПО, и оно живет в свободной атмосфере значительное время. Обработка экспериментальных данных показала, что зависимость времени послесвечения от энергии разряда, как и для силы тока, нелинейная [19]. В качестве первого приближения была выбрана линейная зависимость, которая строилась методом наименьших квадратов. Следует отметить, что пересечение этой линии с осью абсцисс, т.е. при времени жизни, равном нулю, энергия оказывается равной 40 кДж, что соответствует параметрам разряда при силе тока 10.4 кА. Однако следует признать, что такое построение зависимости времени жизни от энергии не имеет достаточного обоснования, критерий более сложен и в настоящее время еще не обнаружен. Установленную статистическую связь между временем жизни ДПО и подводимой электрической энергией можно рассматривать как умеренную (коэффициент корреляции 0.32 при значимости $\chi^2 = 0.1$). Это говорит о том, что эта связь определяется более сложной комбинацией параметров, поиск которой необходимо продолжить.

Выводы

Проведены эксперименты по получению автономных долгоживущих плазменных образований с плотностями энергии, сопоставимыми со среднестатистическими плотностями энергии, характерными для природных шаровых молний. Расчет плотности энергии автономных ДПО с диаметром 30 см и запасаемой энергией 10 кДж составляет $\sim 0.7 \text{ см}^{-3}$, что согласуется с анализом данных, проведенным Дж. Барри [9], о плотностях энергии ШМ. Шаровая молния — явление с относительно малой плотностью энергии; она составляет по порядку величины 1 Дж см^{-3} , а изменения значений охватывают диапазон $2 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^2 \text{ Дж см}^{-3}$.

Анализ осциллограмм кинетики светимости, видео- и фотоинформации показал, что при атмосферном давлении возможно получение автономных ДПО диаметром 30–35 см, время послесвечения которых доходит до 2 с в видимом диапазоне длин волн. В зависимости от условий эксперимента излучаемая энергия составляет от 1.6 ± 0.7 до $10.8 \pm 4.4 \text{ кДж}$.

Список литературы

- [1] Григорьев А.И., Дунаева Т.Н. Шаровая молния. Библиогр. указатель за 1972–1992 г. Сер. Проблемы. Гипотезы. Открытия. Вып. 41. Одесса, 1992. 96 с.
- [2] Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии / Под ред. А.А. Рухадзе, М.М. Фикса. М.: Научный мир, 1996. 264 с.
- [3] Смирнов Б.М. Проблема шаровой молнии. М.: Наука, 1988. 208 с.
- [4] Синкевич О.А. // ТВТ. 1997. Т. 35. № 4. С. 651–664.
- [5] Синкевич О.А. // ТВТ. 1997. Т. 35. № 6. С. 968–982.

- [6] Имянитов И.М., Тихий Д.И. За гранью законов науки. М.: Атомиздат, 1980. 191 с.
- [7] Сингер С. Природа шаровой молнии. Пер. с англ. М.: Мир, 1973. 239 с.
- [8] Ohtsuki Y.-H., Ofuruton H., Kondo N. et al. // Proc. 5th Intern. Sump. on Ball Lightning. Tsugawa-Town, 1997. P. 167.
- [9] Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния. М.: Мир, 1983. 288 с.
- [10] Bychkov V.L., Bychkov A.V., Stadnik S.A. // Physica Scripta. 1996. Vol. 53. P. 749.
- [11] Григорьев А.И., Григорьева И.Д., Ширяева С.О. // Химия плазмы. 1992. № 17. С. 218–249.
- [12] Кунин В.Н. Шаровая молния на экспериментальном полигоне. Владимир: гос. ун-т, 2000. 84 с.
- [13] Шаровая молния в лаборатории. Сб. статей / Под ред. Р.Ф. Авраменко, В.Л. Бычкова, А.И. Климова, О.А. Синкевича. М.: Химия, 1994. 256 с.
- [14] Авраменко Р.Ф., Николаева В.И., Поскачевая Л.П. // Сб. статей / Под ред. Р.Ф. Авраменко и др. М.: Химия, 1994. С. 15–56.
- [15] Александров А.Ф., Бахгат Ю., Скворцов М.Г. и др. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 12. С. 2392–2396.
- [16] Кирко Д.Л., Самончев П.В., Мартынов А.А. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 10. С. 78–81.
- [17] Бычков В.Л., Бычков А.В., Тимофеев А.Б. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 1. С. 128–133.
- [18] Шибков В.М., Александров А.Ф., Кузовников А.А. // Сб. статей / Под ред. Р.Ф. Авраменко и др. М.: Химия, 1994. С. 136–150.
- [19] Егоров А.И., Степанов С.И. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 12. С. 102–104.
- [20] Егоров А.И., Степанов С.И. Препринт ПИЯФ РАН. № 2558/2004. Гатчина, 2004. 18 с.
- [21] Шабанов Г.Д. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 4. С. 81–86.
- [22] Кунин В.Н., Фуров Л.В. // Изв. вузов. Физика. 1990. № 6. С. 119–121.
- [23] Фуров Л.В. // Материалы XII научной конф. ученых Украины, России, Белоруссии. Прикладные задачи математики и механики. Севастополь: СевНТУ, 2003. С. 57–61.