

04;14;15

Компактный источник вспышечной короны для биологических и медицинских применений

© С.И. Мошкун, В.Ю. Хомич, Е.А. Шершунова[¶]

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

[¶]E-mail: eshershunova@gmail.com

Поступило в Редакцию 30 августа 2017 г.

Создан компактный источник низкотемпературной плазмы для биологических и медицинских применений, работающий в килogerцевом диапазоне частот в режиме положительной вспышечной короны с энергией в импульсе 0.1 мДж. Тестовые испытания источника проведены на примере плазменной предобработки семян салата. Облученные семена показали повышенную всхожесть (более 25%) в сравнении с контрольной группой.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.02.45471.17018

Низкотемпературная атмосферная плазма — смесь заряженных частиц, радикалов и ультрафиолетового излучения — вызывает в последние годы все больший интерес, что связано с перспективностью ее использования в ряде биологических и медицинских приложений [1–5].

При атмосферном давлении низкотемпературную плазму получают, как правило, в барьерном и коронном разрядах. Для инициации барьерного разряда из-за наличия диэлектрического барьера между электродами необходимо переменное высоковольтное напряжение [6,7], а для коронного — достаточно постоянного. В воздухе атмосферного давления возможна реализация прерывистой или вспышечной короны, для которой характерно наличие периодических импульсов тока с частотами до 10 кГц [8]. Коронный разряд, как известно, возникает в резко неоднородных полях, например, в конфигурации электродов острие–плоскость. Реализуют также многоострийную корону, один из электродов которой выполнен в виде множества острий, как например в [9–11]. Корона с такой конфигурацией электродов достаточно часто

применяется в биолого-медицинских целях, когда необходимо увеличивать зону плазменного воздействия.

Для реализации многоострийной вспышечной короны необходим киловольтный источник постоянного напряжения, как правило, достаточно громоздкий вследствие использования повышающего трансформатора. Однако для зажигания коронного разряда не требуется больших мощностей, поэтому закономерно использовать другой подход — применять схему инвертора совместно с каскадным умножителем напряжения, что и предлагается в настоящей работе.

На рис. 1 представлена блок-схема источника низкотемпературной плазмы, работающего в режиме периодического коронного разряда, вспышечной короны. Условно можно разделить установку на два основных блока: высоковольтный источник для зажигания коронного разряда (на рисунке слева) и разрядный блок (на рисунке справа внизу — *discharge block*).

Как видно из рисунка, питание высоковольтного источника осуществляется от сети переменного напряжения 220 V, 50 Hz. От напряжения сети питается и ШИМ-контроллер¹ (*PWM-controller*) после преобразования 220 V в 12 V. Между инвертором и сетью установлены фильтр электромагнитных помех (EMI), подавляющий помехи от инвертора, и мостовой выпрямитель (AC–DC) для преобразования переменного напряжения.

По сигналу с ШИМ-контроллера открываются полевые транзисторы инвертора *K1* и *K2*, в результате чего формируется переменное напряжение частотой 200 kHz. С инвертора напряжение идет на вход несимметричного восьмикаскадного умножителя напряжения. В результате на выходе формируется постоянное напряжение 4 kV, которое подается на требуемую нагрузку. Такой подход позволяет уменьшить габариты трансформатора, который работает при относительно низком выходном напряжении ≤ 600 V.

Тестирование 4 kV-источника постоянного напряжения было сначала проведено при работе на резистивную нагрузку 250 k Ω . Напряжение на нагрузке измерялось мультиметром с помощью высоковольтного пробника PD-28. Ток регистрировался амперметром. Согласно результатам измерений, средний ток через нагрузку составил 16 mA, амплитуда напряжения на выходе 4 kV. Таким образом, выходная мощность при

¹ ШИМ — широтно-импульсная модуляция.

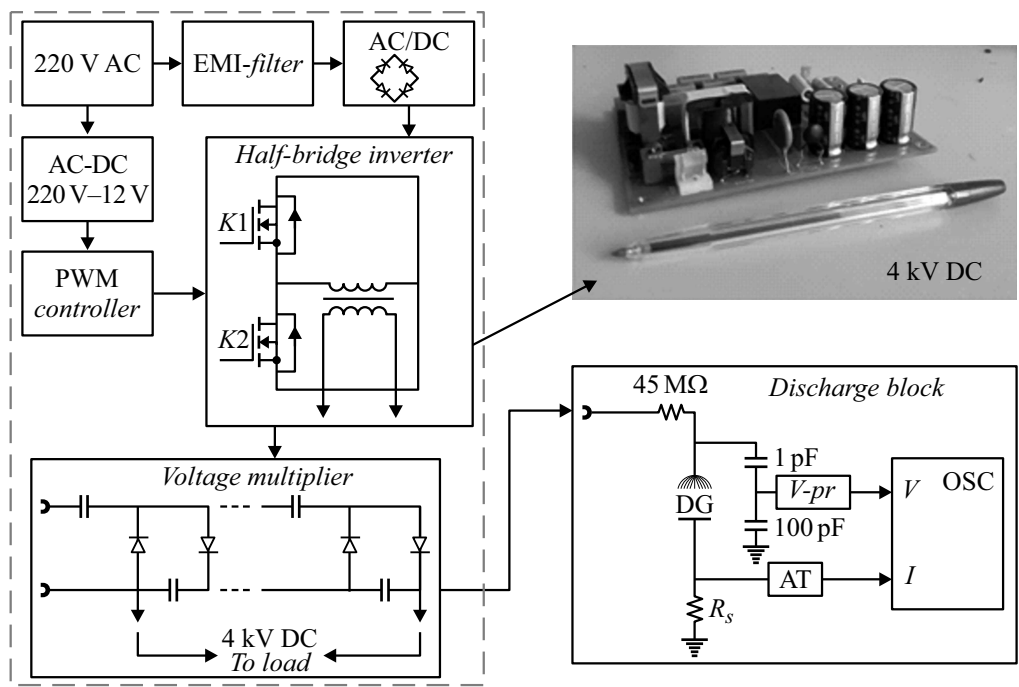


Рис. 1. Блок-схема установки для получения низкотемпературной плазмы коронного разряда. Справа сверху — фотография платы источника питания коронного разряда на 4 kV. DG — разрядный промежуток, AT — аттенюатор, OSC — осциллограф, V-pr — измеритель напряжения.

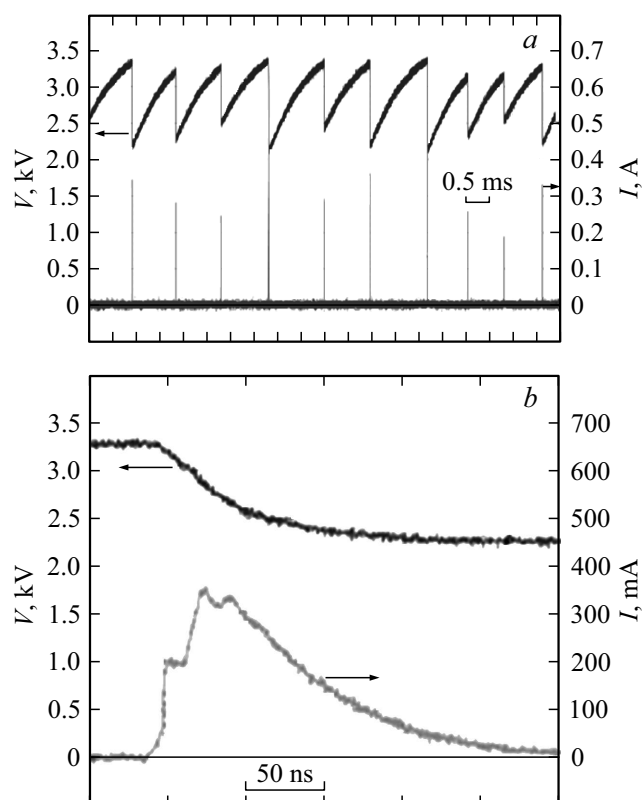


Рис. 2. Типичные осциллограммы напряжения и тока вспышечной короны с разным временным разрешением: *a* — 0.5 ms, *b* — 50 ns.

работе на резистивную нагрузку составила 64 W. При потребляемой мощности 72 W КПД созданного источника составляет $\sim 89\%$. Высоковольтный источник выполнен на двусторонней плате, имеет достаточно маленькие габаритные размеры 10×13 cm (рис. 1) и вес меньше 1 kg.

Для зажигания и диагностики вспышечной короны (*discharge block* на рис. 1) от описанного выше 4 kV-источника питания постоянное напряжение через токоограничивающее сопротивление марки КЭВ-1 номиналом 45 M Ω подавалось на коронирующий многоострый элек-

трод, выполненный в виде пучка из нескольких проволок диаметром 1 mm. Нижний электрод был выполнен в виде круга диаметром 30 mm на плате из металлизированного текстолита.

Коронный разряд зажигался в атмосферном воздухе при нормальной комнатной температуре 20°C, давлении 744 mm Hg при относительной влажности воздуха 61%. Расстояние между электродами составляло 2 mm.

Ток разряда оценивался по падению напряжения на резисторе R_s номиналом 50 Ω . К нижнему электроду через bnc-разъем был также подключен 50 Ω -аттенуатор для ослабления сигнала перед входом в осциллограф.

Напряжение на разрядном промежутке было установлено исходя из падений напряжения на емкостном делителе и падения напряжения на ограничивающем резисторе. При измерениях напряжения на разрядном промежутке проводилось восстановление постоянной составляющей сигнала с емкостного делителя. Напряжение на емкости делителя 100 pF было измерено пробником LeCroy PP007-WS. Падение напряжения на токоограничивающем резисторе было определено как произведение сопротивления резистора и значения тока, измеренного микроамперметром, включенным последовательно с резистором, при горении разряда.

Осциллограммы тока разряда и напряжения на емкости делителя выводились на экран осциллографа LeCroy WaveRunner 6051 с полосой пропускания 500 MHz и возможностью регистрации до 5 GS/s, а также записывались в виде таблиц для дальнейших расчетов.

На рис. 2 показаны типичные полученные осциллограммы тока разряда и напряжения на разрядном промежутке. Как видно из осциллограмм, разряд возникает при напряжении 3.2–3.4 kV, а заканчивается при 2.2–2.4 kV. Импульсы тока разряда следуют с частотой $\sim 6 \pm 1$ kHz. Импульсы тока имеют амплитуду 160–440 mA и длительность по полувысоте около 100 ns.

Эффективность действия созданного плазменного коронного источника была продемонстрирована на семенах зеленого салата. В эксперименте участвовали две группы по 20 семян в каждой: контрольная и обработанная плазмой. Обработка коронным разрядом происходила в течение 10 s.

На основании данных осциллограмм путем интегрирования мощности по времени [12] была рассчитана энергия в импульсе, которая

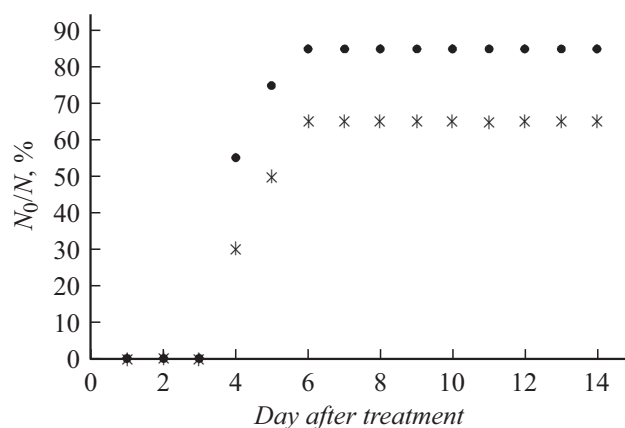


Рис. 3. Относительная зависимость всхожести семян от времени после начала эксперимента. N_0 — проросшие семена, N — общее количество семян в группе. Кружки — семена, перед посадкой обработанные плазмой, крестики — контрольная группа семян.

составила ~ 0.09 мДж. Средняя мощность при усредненной по 1000 событиям на частоте следования 6 ± 1 кГц составила 0.6 ± 0.1 Вт.

После обработки обе группы семян — обработанные плазмой и контрольные — были высажены в универсальный торфогрунт со следующим основным составом: $\text{NH}_4 + \text{NO}_3$ — 150 мг/л, P_2O_5 — 270 мг/л, K_2O — 300 мг/л (при массовой доле влаги не более 65%). pH солевой суспензии 6–6.5. Высаженные семена обильно поливались каждый день с утра обычной водопроводной водой. В результате эксперимента семена из разных групп показали различную всхожесть. Как видно из рис. 3, всхожесть семян, подвергшихся плазменной обработке, оказалась на 25% выше.

Повышенная всхожесть может быть объяснена увеличением угла смачиваемости поверхности семян водой, что наблюдалось в работе [13], опубликованной в 2012 г.

Таким образом, с использованием современной компонентной базы был разработан, создан и исследован компактный источник вспышечного коронного разряда. Благодаря миниатюрности установки, питанию от бытовой сети 220 В, 50 Гц, а также низкой энергии в импульсе

разрядного тока (меньше ста микроджоулей) источник может быть использован в широкой области биологических и медицинских приложений. Испытания источника на семенах салата показали перспективность применения такого источника плазмы в агрокомплексе для повышения всхожести хозяйственных растений.

Список литературы

- [1] Weltmann K.D., Kindel E., Woedtke T., Hähnel M., Stieber M., Brandenburg R. // *Pure Appl. Chem.* 2010. V. 82. N 6. P. 1223–1237.
- [2] Keidar M., Walk R., Shashurin A., Srinivasan P., Sandler A., Dasgupta S., Ravi R., Guerrero-Preston R., Trink B. // *British J. Cancer.* 2011. V. 105. N 9. P. 1295–1301.
- [3] Mitra A., Li Y.F., Klämpfl T.G., Shimizu T., Jeon J., Morfill G.E., Zimmermann J.L. // *Food Bioprocess Technol.* 2014. V. 7. N 3. P. 645–653.
- [4] Sivachandiran L., Khacef A. // *RSC Adv.* 2017. V. 7. N 4. P. 1822–1832.
- [5] Khomich V.Yu., Moshkunov S.I., Shershunova E. // 4th Int. Workshop on plasma cancer treatment (IWPCT). Paris: Institute Curie, 2017. P. 48.
- [6] Kettlitz M., Hoft H., Hoder T., Weltman K.-D., Brandenburg R. // *Plasma Sources Technol.* 2013. V. 22. N 2. P. 025003.
- [7] Малашин М.В., Мошкун С.И., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А. // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 2. С. 71–75.
- [8] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Интеллект, 2009. 736 с.
- [9] Sysolyatina E., Mukhachev A., Yurova M., Grushin M., Karalnik V., Petryakov A., Trushkin N., Ermolaeva S., Akishev Yu. // *Plasma Processes Polymers.* 2014. V. 11. N 4. P. 315–334.
- [10] Pei X., Lu X., Liu J., Liu D., Yang Y., Ostrikov K., Chu P.K., Pan Y. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2012. V. 45. N 16. P. 165205.
- [11] Емельянов О.А., Петрова Н.О., Смирнова Н.В., Шемет М.В. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 16. С. 30–37.
- [12] Shershunova E., Malashin M., Moshkunov S., Khomich V. // *Acta Polytechn.* 2015. V. 55. N 1. P. 59–63.
- [13] Bormashenko E., Grynyov R., Bormashenko Y., Drori E. // *Sci. Rep.* 2012. N 2. P. 741–744.