

Үсенов Е.А., Габдуллин М.Т.,
Досболаев М.К., Данияров Т.Т.,
Рамазанов Т.С.

**Электрические и оптические
свойства диэлектрического
барьерного разряда**

В данной работе приведены результаты исследования оптических и электрических характеристик диэлектрического барьерного разряда при электродных конфигурациях плоскость – плоскость и плоскость – острие. Исследована динамическая вольт-амперная характеристика разряда при разных конфигурациях электродов. Методом оптико-эмиссионной спектроскопии был получен спектр плазмы воздуха диэлектрического барьерного разряда. Из результатов измерения разрядного тока видно, что барьерный разряд горит в стримерном режиме и применение острого электрода приводит к уменьшению стримерных каналов и микрозарядов. Спектр плазмы воздуха показал наличие активных компонентов и радикалов, которые могут быть применены для обработки живых тканей и материалов.

Ключевые слова: диэлектрический барьерный разряд, электрические и оптические свойства, острые электроды, спектр плазмы.

Ussenov Y.A., Gabdullin M.T.,
Dosbolayev M.K., Daniyarov T.T.,
Ramazanov T.S.

**Investigation of electrical and
optical properties of dielectric
barrier discharge**

In this paper the results of optical and electrical characteristics of dielectric barrier discharge are presented where were used plane to plane and pin to plane electrode configurations. The dynamic current-voltage characteristics of discharge at different electrode configurations were investigated. The plasma spectrum of air of dielectric barrier discharge was obtained by optical emission spectroscopy method. The results of measurement of the discharge current showed that the barrier discharge generated in the streamer mode and used pin electrode reduces the streamer channels and micro discharges. The plasma spectrum of air showed active components and radicals which can be used for treatment of living tissues and materials.

Key words: dielectric barrier discharge, electrical and optical properties, pin – to – plane electrodes, plasma spectrum.

Үсенов Е.А., Габдуллин М.Т.,
Досболаев М.К., Данияров Т.Т.,
Рамазанов Т.С.

**Диэлектрлік барьерлік
разрядтың оптикалық және
электрлік қасиеттері**

Берілген жұмыста жазықтық-жазықтық және үшкір сым – жазықтық электрод конфигурацияларындағы диэлектрлік барьерлік разрядтың электрлік және оптикалық қасиеттерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Разрядтың динамикалық вольт-амперлік сипаттамасының электрод геометриясына тәуелділігі зерттелген. Эмиссиялық спектроскопия әдісімен ауадағы барьерлік разряд плазмасының спектрі алынған. Разряд тоғын өлшеу нәтижелері плазманың стримерлік режимде пайда болатынын және үшкір электродты қолдану стримерлік каналдардың (микроразрядтардың) азаюына алып келетіндігін көрсетті. Оптикалық диагностика нәтижесі плазма құрамында материалдар беті мен тірі ұлпаларды өңдеуге қажетті активті радикалдар мен химиялық компоненттердің бар екендігін көрсетті.

Түйін сөздер: диэлектрлік барьерлік разряд, электрлік және оптикалық қасиеттер, үшкір электродтар, плазма спектрі.

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И
ОПТИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА****Введение**

Диэлектрический барьерный разряд (ДБР) – это разряд, который получают при атмосферном давлении между двумя металлическими электродами один из которых покрыт диэлектриком [1]. В последние десятилетия низкотемпературная плазма барьерного разряда широко используется для обработки живых тканей и для уничтожения раковых клеток [2, 3], для стерилизации инструментов, упаковок и семян разных культур [4], для улучшения поверхностных свойств полимерных и текстильных материалов, а так же для нанесения разных тонкопленочных покрытий и осадений [5]. Важную роль при получении плазмы атмосферного давления в диэлектрическом барьерном разряде играет форма металлических и диэлектрических электродов. В частности, существуют конфигурации как «плоскость-плоскость», «острие-плоскость», «поверхностное расположение электродов», «коаксиальное расположение электродов» и т.д. Система электродов барьерного разряда определяет основные электрические, оптические и энергетические свойства барьерного разряда. В работе [6] экспериментально исследован коронный разряд переменного тока с барьерным электродом. Один из электродов имел плоскую геометрию и был покрыт диэлектриком, тогда как второй электрод был в форме острия. Эксперименты были проведены при атмосферном давлении в среде воздуха, гелия, аргона и азота. Результаты показали, что при применении электрода в форме острия пробивное напряжение падает по сравнению с обычным барьерным разрядом, но ток значительно увеличивается. Разные режимы разряда при геометрии электродов плоскость-острие были исследованы в работе [7]. Различные режимы разряда были получены при приложенных напряжениях 3 кВ и 6 кВ и в отрицательных и положительных полупериодах. Было показано, что микро-тлеющий разряд имеет иерархическую структуру, такую же как в тлеющем разряде низкого давления. В работе [8] характеристики модифицированного диэлектрического барьерного разряда (то есть, геометрия плоскость-острие) в среде гелия были изучены в зависимости от приложенного напряжения переменного тока, воздушного за-

зора между электродами и плотностью электродов в виде острия. Была исследована потребляемая мощность разряда при разных плотностях острых контактов высоковольтного электрода. В статье [9] изучена статическая вольт-амперная характеристика барьерного разряда с электродной конфигурацией плоскость-острие и было показано, что ток разряда уменьшается с увеличением межэлектродного расстояния. В работе [10] на основе уравнения непрерывности и уравнении Пуассона для электрического поля составлена двумерная модель барьерного разряда азота для геометрии острие-плоскость. Результаты численного анализа показывают, что характеристики разряда определяются распределением переменного электрического поля, которое большую часть периода велико в области электрода острия, что обусловлено его кривизной. Разные геометрии электродов реактора барьерного разряда были использованы в работе [11] для диссоциации молекул углекислого газа. Применение конфигурации электродов острие-плоскость показало значительную энергоэффек-

тивность по сравнению с геометрией электродов плоскость-плоскость.

Исследование барьерного разряда при разной геометрии электродов дает новые результаты для оптимизации режимов горения разряда и позволяет увеличить эффективность и продуктивность применения плазмы атмосферного давления ДБР в разных приложениях.

Экспериментальная установка

В процессе разработки экспериментальной установки на основе диэлектрического барьерного разряда были собраны две конфигурации электродной системы. Первая состоит из двух плоских электродов, один из которых покрыт диэлектрическим материалом. Во второй конфигурации заземленный электрод заменен металлическим стержнем с острым наконечником. За счет этого достигается эффект короны. Ниже на рисунке 1 приведены общая схема экспериментальной установки и принципиальные схемы электродных систем барьерного разряда.

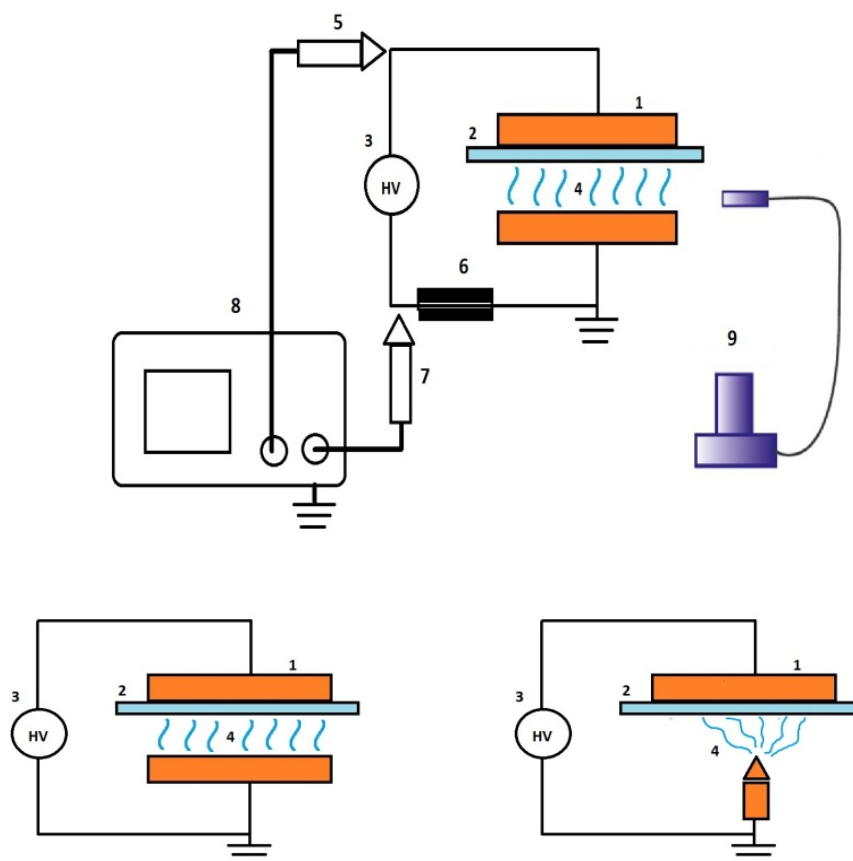


Рисунок 1 – Экспериментальная установка и конфигурации электродов ДБР

В качестве плоских электродов использовался медный цилиндр с диаметром $d=45$ мм, толщиной $l = 4,5$ мм. На поверхности плоского электрода было расположено кварцевое стекло с диаметром $d=75$ мм, толщиной $l = 6$ мм и с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3,5$. В качестве высоковольтного электрода в случае конфигурации острие-плоскость использовался острый металлический стержень длиной $l=28$ мм и диаметром $d = 8$ мм. Межэлектродное расстояние во всех экспериментах составляет 2 мм. Для получения плазмы высоковольтное напряжение синусоидальной формы с амплитудой до 15 кВ и частотой до 20 кГц подавалось из высоковольтного источника питания. Приложенное напряжение измерялось с помощью цифрового осциллографа LeCroy через высоковольтный щуп Tektronix P6015, а ток регистрировался через низковольтный щуп LeCroy и шунтовый резистор с номиналом 100 Ом. Для измерения вольт-кулоновской характеристики резистор был заменен на высоковольтный конденсатор с емкостью 68 пФ.

Для измерения оптических характеристик был использован оптико-эмиссионный спектрометр Solar Systems. Спектрометр состоит из оптической системы собранной в единый блок для регистрации сигнала, оптического волокна для передачи излучения и из самого спектрометра. Далее полученный сигнал обрабатывался через персональный компьютер. Для визуального наблюдения за разрядом была использована CCD камера с частотой 25 кадров/секунд.

Результаты экспериментов

После подачи высоковольтного синусоидального напряжения на плоские электроды между диэлектрической поверхностью и металлом образуется разряд в стримерном режиме.

Как видно из рисунка 2 разряд состоит из множества микроканалов (или стримеров) по которому переносится ток разряда. Обычно при случае, когда только один из электродов покрыт диэлектриком, ширина микроканала в области диэлектрического барьера больше чем на поверхности металлического электрода. На рисунке 3 приведены динамические вольт-амперные характеристики разряда при постоянном напряжении в 15 кВ и разной геометрии электродов. Верхний рисунок соответствует геометрии электродов «плоскость-плоскость», тогда как нижний соответствует геометрии электродов «плоскость-острие».

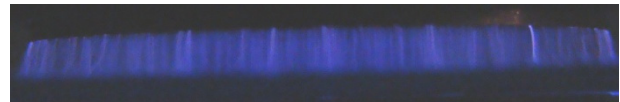


Рисунок 2 – ДБР в рабочем режиме при геометрии электродов «плоскость-плоскость»

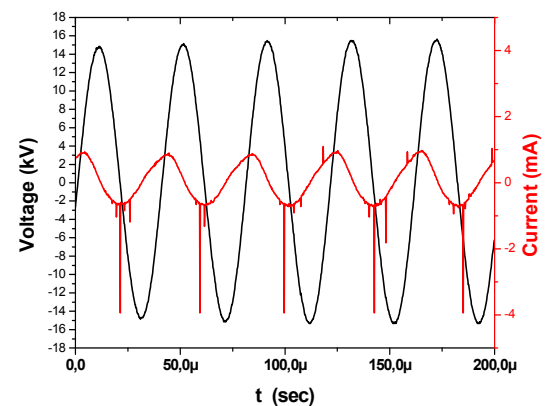
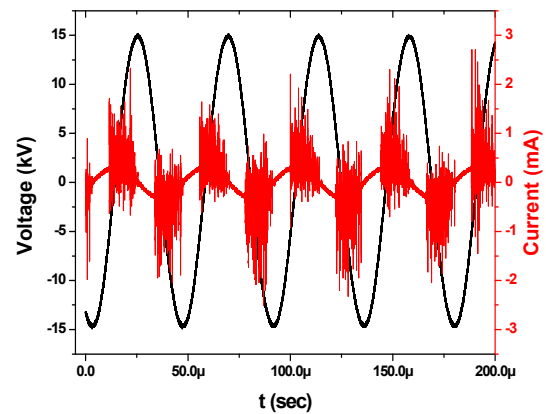


Рисунок 3 – Динамическая вольт-амперная характеристика диэлектрического барьерного разряда: верхний-геометрия электродов «плоскость-плоскость», нижний – геометрия электродов «плоскость-острие»

Из осциллограммы тока видно, что при плоских электродах наблюдается множество пиков в начале каждого полупериода напряжения. Данные мульти пики соответствуют множеству микро-разрядам (стримерам) в разрядном промежутке. В случае, когда заземленный плоский металлический электрод заменен острым электродом на осциллограмме тока видны только единичные импульсы, которые соответствуют одиночному стримерному каналу. Надо отметить, что ток, протекающий через этот канал, относительно большой и составляет около 4 мА, тогда как в случае плоских электродов и множестве микро-разрядов

ток не превышает 2,5 мА. Так же видно, что при геометрии электродов «плоскость-острие» ток проходит через межэлектродный промежуток только в отрицательном полупериоде напряжения, что связано с эффектом накопления заряда на поверхности электродов.

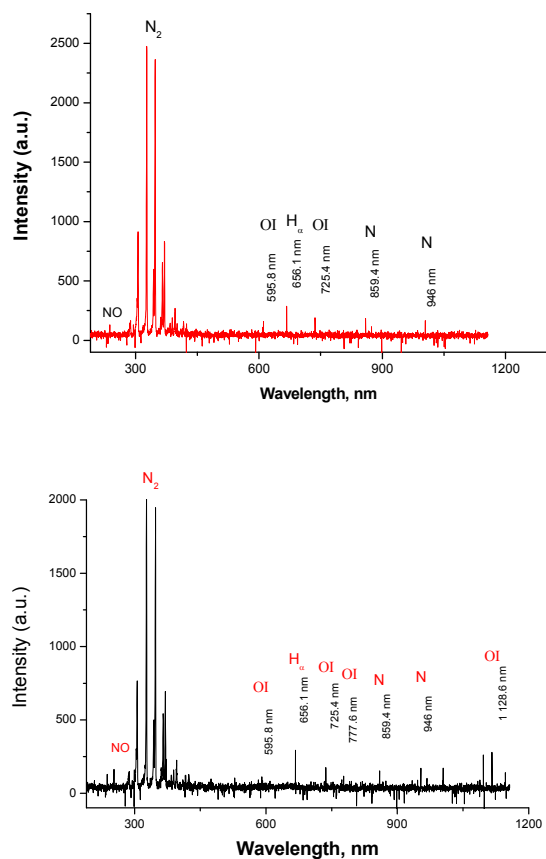


Рисунок 4 – Спектр плазмы воздуха при приложенном напряжении разряда 15 кВ. Верхний – плоские электроды, нижний – один из электродов в виде острия

Для определения активных химических компонентов барьерного разряда был измерен спектр плазмы воздуха в диапазоне волн от 200 нм до 1200 нм при приложенном постоянном напряжении в 15 кВ и при атмосферном давлении. Результаты показали наличие линий азота и кислорода. Основными активными компонентами в плазме является N_2 и N_2^+ и атомарный кислород. Также, есть соединения NO и OH. Данные спектры являются ключевыми при обработке живых тканей, клеток и оказывают дезинфицирующий эффект. На рисунке 4 показаны спектры плазмы, полученные при геометрии электродов «плоскость – плоскость» (верхний график) и «плоскость – острие» (нижний график). Интенсивность линий N_2 при геометрии «плоскость – плоскость» незначительно выше чем спектральные линии при применении острого электрода.

Заключение

Исследована динамическая вольт-амперная характеристика диэлектрического барьерного разряда и спектры плазмы воздуха при электродных конфигурациях плоскость – плоскость и плоскость – острие. Показано, что применение острого электрода способствует уменьшению стримерных каналов и протеканию основного тока только в отрицательном полупериоде напряжения. Результаты оптико-эмиссионной спектроскопии показали уменьшение интенсивности при геометрии электродов «плоскость-острие». Полученные экспериментальные данные могут быть полезны при исследовании физических процессов в ДБР при разной комбинации геометрии электродов.

Литература

- 1 Kogelschatz U, Eliasson B and Egli W. From ozone generators to flat television screens: History and future potential of dielectric-barrier discharges // *Pure Appl. Chem.* – 1999. – Vol. 71(10). – P. 1819-1828.
- 2 Park Y., Park S.J., Choi M.Y., Koo I.G., Byun J.H., Hong J.W., Sim J.Y., Collins G.J and Lee J.K. Atmospheric-pressure plasma sources for biomedical applications // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2012. – Vol. 21(4). – P. 043001.
- 3 Michael K. Plasma for cancer treatment // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2015. – Vol. 24. – P. 033001.
- 4 Lakshman K. R., Gerard J. J. B. de Groot Non-Thermal Plasma Treatment of Agricultural Seeds for Stimulation of Germination, Removal of Surface Contamination and Other Benefits: A Review // *Plasma Process. Polym.* – 2015. – Vol. 12. – P. 608–623.
- 5 Zhao P., Zheng W., Watanabe J., Meng Y.D., Nagatsu M. Highly Conductive Cu Thin Film Deposition on Polyimide by RF-Driven Atmospheric Pressure Plasma Jets under Nitrogen Atmosphere // *Plasma Process. Polym.* – 2015. – Vol. 12. – P. 431–438.
- 6 Akishev Yu.S., Dem'yanov A.V., Karal'nik V.B., Monich A.E., and Trushkin N.I. Comparison of the AC barrier corona with DC positive and negative coronas and barrier discharge // *Plasma Physics Reports.* – 2003. – Vol. 29(1). – P. 82–91.
- 7 Zhe Yu, Zhang Zhi-Tao, Qing-Xuan Yu, Xu Shao-Jie, Yao Jing, Bai Min-Dong, Tian Yi-Ping, Liu Kai-Ying. Atmospheric pressure streamer and glow-discharge generated alternately by pin-to-plane dielectric barrier discharge in air // *Acta Phys. Sin.* – 2012. – 61(19). – P. 195202.
- 8 Yong-Hyuk Lee, Geun-Young Yeom // *Journal of the Korean Physical Society.* – 2005. – Vol. 47(1). – P.74-78.

9 Dineff P. and Gospodinova D. Electrode Configurations and Non-uniform Dielectric Barrier Discharge Properties // *Facta univers., ser.: elec. energ.* – 2009. – Vol. 22(2). – P.217-226.

10 Коданова С.К., Кенжебекова А.И. Математическое моделирование барьерного разряда геометрии острие-плоскость в азоте // *Вестник КазНУ, серия физическая.* – 2014. – № 4(51). – С.90-95.

11 Guaitella O., Douat C., Ponduri S., Brehmer F., Welzel S., M.C.M. van de Sanden, Engeln R. Role of surfaces in CO₂ conversion with dielectric barrier discharges // 42nd European Physical Society Conf. on Plasma Physics, Lisbon, Portugal, 22nd–26th June 2015. – P 1.303.

References

- 1 Kogelschatz U, Eliasson B and Egli W. // *Pure Appl. Chem.*, 1999, Vol. 71(10), P. 1819-1828.
- 2 Y. Park, S. J. Park, M. Y. Choi, I. G. Koo, J. H. Byun, J. W. Hong, J. Y. Sim, G. J. Collins and J. K. Lee. // *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2012, 21, 043001.
- 3 Michael K. // *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2015, 24, 033001.
- 4 Lakshman K. R., Gerard J. J. B. de Groot, *Plasma Process. Polym.*, 2015, 12, 608–623.
- 5 P. Zhao, W. Zheng, J. Watanabe, Y. D. Meng, M. Nagatsu // *Plasma Process. Polym.*, 2015, 12, 431–438.
- 6 Yu. S. Akishev, A. V. Dem'yanov, V. B. Karal'nik, A. E. Monich, and N. I. Trushkin // *Plasma Physics Reports*, 2002, 29(1), 82–91.
- 7 Yu Zhe, Zhang Zhi-Tao, Yu Qing-Xuan, Xu Shao-Jie, Yao Jing, Bai Min-Dong, Tian Yi-Ping, Liu Kai-Ying, // *Acta Phys. Sin.*, 2012, 61(19), 195202.
- 8 Yong-Hyuk Lee, Geun-Young Yeom // *Journal of the Korean Physical Society*, 2005, 47 (1), 74-78.
- 9 P. Dineff and D. Gospodinova // *Facta universitatis, ser.: elec. energ.*, 2009, 22(2), 217-226.
- 10 S.K. Kodanova, A.I. Kenzhebekova // *Vestnik of KazNU (in russian)*, 4(51), 2014, 90-95.
- 11 O. Guaitella, C. Douat, S. Ponduri, F. Brehmer, S. Welzel, M.C.M. van de Sanden, R. Engeln, // 42nd European Physical Society Conference on Plasma Physics, Lisbon, Portugal, 22nd – 26th June 2015, p 1.303.