

УДК 541.13

Плазмохимический генератор озона с повышенной однородностью микроразрядных процессов в барьерном разряде

В.В. Андреев, А.Н. Матюнин, Ю.П. Пичугин

В работе представлены результаты исследования по увеличению однородности микроразрядов в ячейке диэлектрического барьерного разряда (ДБР). Результаты исследования важны для оптимизации плазмохимических процессов. В частности, в созданном макете плазмохимического генератора озона на ДБР с магнитодиэлектрическими барьерами производительность по озону на 30-40% выше, чем в случае использования обычных диэлектриков в качестве барьера.

PACS 52.80.Tn

Ключевые слова: микроразряд, диэлектрический барьерный разряд, магнитодиэлектрик, высокоомный электрод, плазмохимический генератор, синтез озона.

Введение

В настоящее время интенсивно развиваются технологии, основанные на применении приповерхностной плазмы, генерируемой в разрядных ячейках объёмного, поверхностного и компланарного барьерных электрических разрядов. Плазменные и плазмохимические технологии могут быть эффективны, в частности, при разработке методов плазменного (так называемого «сухого») травления [1], технологий формирования поверхностных слоев [2], методов направленного изменения физико-химических свойств поверхностных слоев материалов [3–5]. Также приповерхностная плазма привлекает существенный интерес в создании технологий управления высокоскоростными потоками воздуха, обтекающими движущиеся в воздухе объекты, путём воздействия на характеристики пограничного слоя с помощью электрических разрядов [6, 7]. Кроме того, широкое применение находят плазмохимические реакторы на основе диэлектрического барьерного разряда в качестве промышленных источников озона [8–12]. Следует отметить, что озон является мощным окислителем, а также обладает высокой способностью уничтожать бактерии, споры и одноклеточные организмы. Небольшие дозы озона оказывают профилактическое и терапевтическое воздействие (известно, что предельно допустимая концентрация (ПДК) озона в воздухе рабочей зоны составляет 0,1 мг/м³).

В данной работе представлены результаты исследования по увеличению однородности микроразрядов в

ячейке диэлектрического барьерного разряда (ДБР). Результаты исследования важны для оптимизации плазмохимических процессов.

Экспериментальные результаты и их анализ

Диэлектрический барьерный разряд (ДБР) состоит из совокупности отдельных микроразрядов, каждый из которых имеет характерную длительность порядка нескольких десятков наносекунд [8, 11]. Однако в ДБР, как правило, наблюдается широкий разброс амплитуд токов отдельных микроразрядов.

В работе [13] предложен способ создания одинаковых условий формирования микроразрядов. При этом однородность ДБР обеспечивается за счёт применения высокоомных электродов и равномерного их подключения к высоковольтному источнику питания.

Для измерения и исследования параметров электрической цепи отдельного микроразряда была создана разрядная ячейка ДБР с одним плоским и одним игольчатым электродами (рис. 1). Последовательно с игольчатым электродом подключено подстраиваемое сопротивление R . С помощью ключа K параллельно к электродам 1 и 2 можно подключить конденсатор с ёмкостью C .

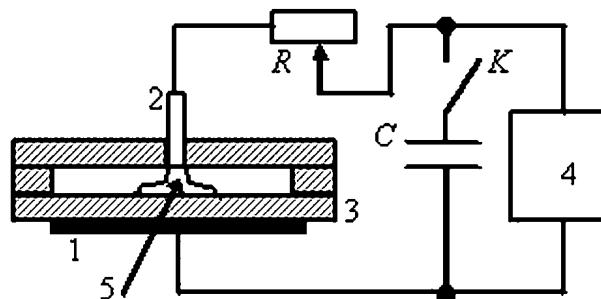


Рис. 1. Ячейка диэлектрического барьерного разряда с одним игольчатым и одним плоским электродами: 1 – плоский металлический электрод; 2 – игольчатый металлический электрод; 3 – диэлектрик; 4 – высоковольтный источник питания; 5 – канал микроразряда.

Андреев Всеволод Владимирович, доцент, заведующий кафедрой.

Матюнин Алексей Николаевич, ассистент.

Пичугин Юрий Петрович, доцент.

Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова.

Россия, 428015, г. Чебоксары, Московский пр., 15.

Тел.: 8-9022870512.

E-mail: andreev_vsevolod@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21 мая 2014 г.

© Андреев В.В., Матюнин А.Н., Пичугин Ю.П., 2014

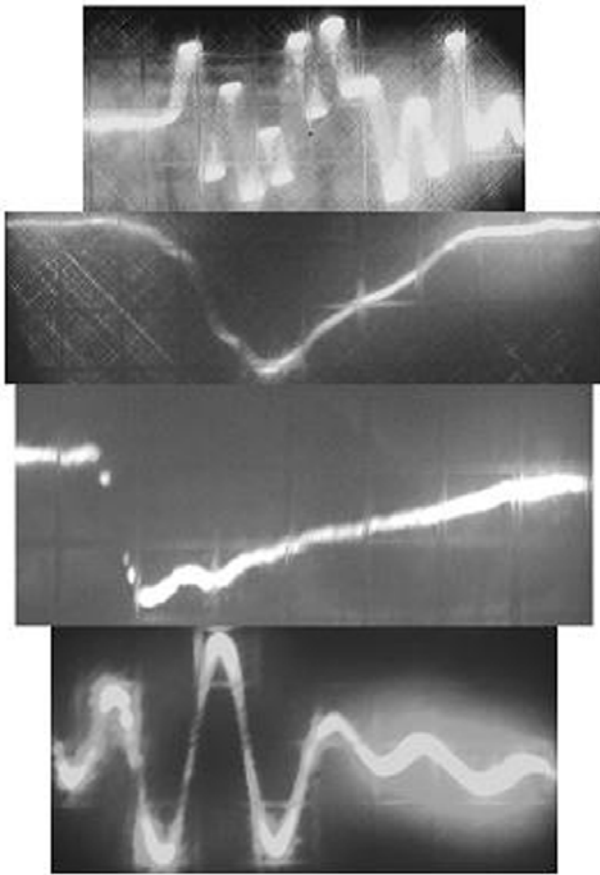


Рис. 2. Осциллограммы токов микроразряда в ячейке ДБР (масштаб по вертикали – 6,67 мА/дел, а по горизонтали – 50 нс/дел). Нижняя осциллограмма получена в случае подключения индуктивности L вместо активного сопротивления R и при замкнутом ключе K (масштаб по вертикали – 16,7 мА/дел, а по горизонтали – 50 нс/дел).

Газоразрядный промежуток между электродом 2 и перпендикулярным ему нижним диэлектриком составляет 1 мм, а толщина диэлектрика равна также 1 мм. Спереди и сзади (см. рис. 1) ячейка открыта. На металлические электроды 1 и 2 в ходе экспериментов подавалось переменное напряжение с действующим значением $U = 9$ кВ.

На рис. 2 представлены осциллограммы токов микроразряда. Как видно из первой сверху осциллограммы, переходный процесс микроразряда имеет сильно колебательный характер, и время микроразряда составляет $T_p = 120$ нс. Это можно объяснить тем, что в разрядной ячейке с предельно секционированным электродом произошло уменьшение ёмкости микроразряда. В этом случае выполняется неравенство:

$$R_{\text{мр}}^2 / (4L_{\text{мр}}^2) < 1 / (L_{\text{мр}} C_{\text{мр}}). \quad (1)$$

Здесь $R_{\text{мр}}$ – активное сопротивление микроразряда, определяемое сопротивлением плазмы канала микроразряда; $C_{\text{мр}}$ – ёмкость микроразряда, определяемая ёмкостью плазмы канала микроразряда; $L_{\text{мр}}$ – индуктивность микроразряда, определяемая индуктивностью вторичной (высоковольтной) обмотки трансформатора источника питания 4 (см. рис. 1).

Вторая сверху осциллограмма тока микроразряда получена в случае $R = 0$ при включённом параллельно к электродам 1 и 2 конденсаторе с ёмкостью $C = 1000$ пФ (на рис. 1 ключ K замкнут). Этот конденсатор предназначен для увеличения ёмкости микроразряда с целью сделать

характер процесса близким к реальным условиям в разрядной ячейке с большими площадями поверхности электродов. В результате увеличения ёмкости микроразряда характер переходного процесса микроразряда изменился с колебательного на апериодический. Кроме того, амплитуда тока микроразряда увеличилась примерно в 30 раз, а длительность процесса микроразряда уменьшилась примерно в 2,5 раза ($T_p \sim 50$ нс).

Из третьей сверху осциллограммы тока микроразряда (см. рис. 2), полученной для случая $R = 1,2$ кОм и $C = 1000$ пФ, видно, что при последовательном включении к игольчатому электроду 2 активного сопротивления усилился апериодический характер переходного процесса микроразряда. Кроме того, по сравнению со случаем, представленным на предыдущей осциллограмме, длительность микроразряда $T_p \sim 275$ нс увеличилось примерно в 5,5 раза, а амплитуда тока микроразряда уменьшилась примерно в 20 раз.

Нижняя осциллограмма тока микроразряда на рис. 2 получена в случае подключения вместо активного сопротивления R индуктивности $L = 9$ мкГн (см. рис. 1). При этом ключ K замкнут, а величина ёмкости $C = 1000$ пФ. В результате, длительность микроразряда составляет $T_p \sim 350$ нс. По сравнению со случаем, представленным на второй сверху осциллограмме, характер переходного процесса микроразряда изменился с апериодического на колебательный, а длительность микроразряда T_p увеличилась примерно в 7 раз. Амплитуда тока микроразряда также уменьшилась, примерно, в 7 раз.

Таким образом, характер отдельного микроразряда в ячейке ДБР существенным образом зависит от параметров цепи канала микроразряда. При этом чем больше сопротивление электродов, тем выше однородность барьерного разряда. Однако применение более высокоомных электродов ограничивается, с одной стороны, необходимостью увеличения напряжения источника питания, а с другой стороны, – дополнительными джоулевыми потерями.

Также был исследован диэлектрический барьерный разряд в ячейке, представленной на рис. 3 [14].

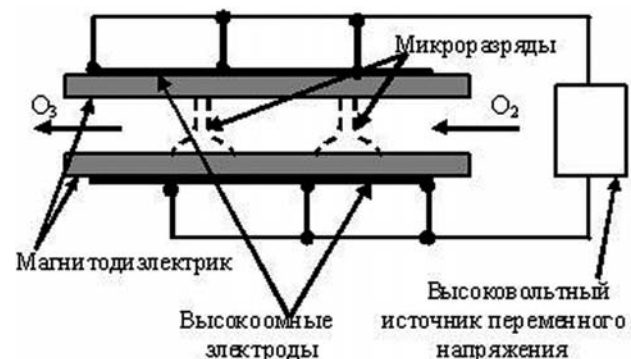


Рис. 3. Ячейка диэлектрического барьерного разряда с высокоомными электродами.

Установка работает следующим образом. На высокоомные электроды подаётся переменное напряжение высоковольтного источника питания. Через газоразрядный зазор, образуемый магнитодиэлектрическими барьерами, продувается кислородсодержащий газ. В ячейке диэлект-

рического барьерного разряда происходит синтез озона. Однородность микроразрядных процессов в предлагаемой установке поддерживается как за счёт высокого активного сопротивления каждой микроразрядной цепи, так и за счёт повышения собственной индуктивности микроразряда.

Высокоомные электроды в плазмохимическом генераторе, схематически представленном на рис. 3, представляют собой слой толщиной 0,5 мм кремний-органического лака, в который добавлены графит и сажа. От пропорции последних зависит электропроводность электрода. Магнитодиэлектрик представляет собой слой толщиной 1 мм кремнийорганического лака с добавкой ферромагнитного порошка.

Заключение

Исследования, проведённые на действующем макете плазмохимического генератора с высокоомными электродами, показали, что производительность по озону при использовании барьеров из магнитодиэлектрика на 30% выше, чем в случае использования обычных диэлектриков в качестве барьера.

Также были проведены эксперименты, в которых для сравнения применялись действующие макеты с высокопроводящими (металлическими) электродами и барьерами из обычного диэлектрика. При этом в макете с магнитодиэлектрическими барьерами также использовались электроды из высокопроводящего материала. Производительность по озону макета с магнитодиэлектрическим барьером оказалась на 40% выше.

Литература

1. *Галперин В.А., Данилкин Е.В., Мочалов А.И.* Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010.
2. *Русинов П.О., Бледнова Ж.М., Мышевский И.С., Юркова А.П.* // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т.14. №1(2). С. 577.
3. *Табакон В.П.* Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 2008.
4. *Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н.* // УФН. 2005. Т. 175. № 5. С. 515.
5. *Погребняк А.Д., Кислицын С.Б., Комаров Ф.Ф. и др.* // Поверхность. 2009. № 1. С. 96.
6. *Шибков В.М., Александров А.Ф., Еришов А.П. и др.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 9. С. 857.
7. *Шибков В.М., Александров А.Ф., Еришов А.П. и др.* // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2004. № 5. С. 67.
8. *Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н.* Физическая химия озона. – М.: Изд-во МГУ, 1998.
9. *Андреев В.В., Васильева Л.А., Кравченко Г.А. и др.* // Нелинейный мир. 2009. Т. 7. № 11. С. 811.
10. *Андреев В.В., Васильева Л.А., Матюнин А.Н., Пичугин Ю.П.* // Прикладная физика. 2011. № 1. С. 52.
11. *Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В.* Физическая химия барьерного разряда. – М.: Изд-во МГУ, 1989.
12. *Cieplak T., Yamabe C., Olchowik J.M., Ozonok J.* // Materials Science- Poland. 2006. V. 24. No. 4. P. 1087.
13. *Пичугин Ю.П., Матюнин А.Н.* Патент РФ №2427528 Озонатор. Опубл. 27.08.2011. Бюлл. № 24.
14. *Андреев В.В., Матюнин А.Н., Пичугин Ю.П.* Патент РФ на полезную модель. Генератор озона. Положительное решение. Заявка № 2013130083/05(044821). Приоритет по дате подачи заявки 01.07.2013.

Plasma-chemical ozone generator with the increased uniformity of microdischarge processes in the barrier discharge

V. V. Andreev, A. N. Matyunin, and Yu. P. Pichugin

Chuvash State University
15 Moskovskii av., Cheboksary, 428015, Russia
E-mail: andreev_vsevolod@mail.ru

Received May 21, 2014

In this paper, the research results, devoted to the possibility of increasing of homogeneity of micro-discharges in the cells of dielectric barrier discharge (DBD), are presented. The results of investigation are important for optimization of plasma-chemical processes. In particular, in plasma-chemical ozone generator, designed on the basis of the DBD with magnetodielectric barrier, the productivity by ozone is on 30–40% higher, than in the case of using of usual dielectric as the barrier.

PACS 52.80.Tn

Keywords: micro-discharge, dielectric barrier discharge, magnetodielectric, high-resistance electrode, plasma-chemical generator, ozone synthesis.

References

1. V. A. Galperin, E. V. Danilkin, and A. I. Mochalov, *Processes of Plasma Etching* (BINOM, Moscow, 2010) [in Russian].
2. P. O. Rusinov, Zh. M. Blednova, I. S. Myshevsky, et al., *Izv. Samarsk. Nauch. Tcentr. RAN*, **14**, 577 (2012).
3. V. P. Tabakov, *Formation of Wear-Resistant Ion-Plasma Coating* (Mashinostroyeniye, Moscow, 2008) [in Russian].
4. A. D. Pogrebnyak and Yu. N. Tyurin, *Usp. Phys.* **175**, 515 (2005).
5. A. D. Pogrebnyak, S. B. Kislitsin, F. F. Komarov, et al., *J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech.*, No. 1, 96 (2009).
6. V. M. Shibkov, A. F. Aleksandrov, A. P. Ershov, et al., *Plasma Phys. Rep.* **31**, 857 (2005).
7. V. M. Shibkov, A. F. Aleksandrov, A. P. Ershov, et al., *Moscow Univ. Phys. Bull.*, No. 5, 67 (2004).
8. V. V. Lunin, M. P. Popovich, and S. N. Tkachenko, *Physical Chemistry of Ozone* (MGU, Moscow, 1998) [in Russian].
9. V. V. Andreev, L. A. Vasil'eva, G. A. Kravchenko, et al., *Nelineinyi Mir*, **7**, 811 (2009).
10. V. V. Andreev, L. A. Vasil'eva, A. N. Matyunin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 52 (2011).
11. V. G. Samoilovich, V. I. Gibalov, and K. V. Kozlov, *Physical Chemistry of a Barrier Discharge* (MGU, Moscow, 1989) [in Russian].
12. T. Cieplak, C. Yamabe, J. M. Olchowik, et al., *Materials Science- Poland*, **24**, 1087 (2006).
13. Yu. P. Pichugin, and A. N. Matyunin, RF Patent No. 2427528. Publ. 27.08.2011. Bull. No. 24.
14. V. V. Andreev, A. N. Matyunin, and Yu. P. Pichugin, RF Patent. Request No. 2013130083/05(044821). 01.07.2013.