

## **ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРА И ВЫТЯГИВАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА И ВЫХОД ОЗОНА**

Соколова М.В.<sup>1</sup>, Кривов С.А.<sup>1</sup>, Хулка Л.<sup>2</sup>, Питч Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Московский энергетический институт (технический университет)*

<sup>2</sup> *Технический университет Аахена (Германия)*

Представлены результаты экспериментального исследования электрического разряда по поверхности керамического барьера толщиной 0,5 – 1 мм при воздействии высокого переменного напряжения частотой 14 кГц. Установлено, что структура разряда существенно зависит не только от диэлектрической проницаемости барьера, но от его химического состава и структуры поверхностного слоя. Увеличение шероховатости ведет к более интенсивному разряду и увеличению выхода озона при меньших энергозатратах на его получение. Наложение внешнего постоянного поля ведет к появлению постоянного тока, плотность которого может достигать сотен мкА/см<sup>2</sup>. Воздействие постоянного напряжения сопровождается некоторым изменением структуры разряда, но выход озона и активная мощность разряда при этом практически не меняются.

### **Введение**

Поверхностный разряд (ПР) является разновидностью барьерного электрического разряда в электродной системе, в которой один из электродов в виде соединенных между собой полос расположен на верхней поверхности диэлектрической пластины, а второй – на ее нижней поверхности. При приложении к нижнему сплошному электроду высокого импульсного или переменного напряжения (верхний электрод при этом заземляется) с краев полос развивается поверхностный разряд. Разряд состоит из отдельных микроразрядов, возникающих из разных точек края полос. Разряд подобного типа описан в ряде работ [1-4], где показано, что существенное влияние на характеристики ПР оказывает материала барьера. Показано также, что хотя область, занятая разрядом невелика, он может быть эффективным источником химически активных продуктов (например, озона). Делались попытки расширить область, занятую разрядом, за счет наложения постоянного электрического поля, перпендикулярного поверхности барьера [5]. Показано, что в этом случае устройство может быть источником ионов для зарядки

мелких частиц для их последующего удаления и очистки газа [6]. Кроме того, высказывалось предположение, что наложение постоянного поля может привести к разделению области образования озона и области его разложения, что позволит увеличить его выход [7]. Однако нет сведений о том, какое влияние оказывает дополнительное постоянное поле на структуру поверхностного разряда. Подобные сведения позволяют оценить возможность дальнейшего использования разряда в трех электродной системе для технологического применения.

Одним из способов повышения эффективности работы устройства с поверхностным разрядом может быть выбор материала диэлектрического барьера, обеспечивающего форму поверхностного разряда, при которой выход продукта наибольший. Для этого необходимо установить связь свойств барьера, структуры поверхностного разряда и выхода полезного продукта. Решению такой задачи и посвящена предлагаемая работа.

### Экспериментальная часть

Экспериментальное исследование проводилось в специальной разрядной камере из диэлектрика, в потоке сухого искусственного воздуха (расход газа составлял от 0,5 до 3 л/мин).

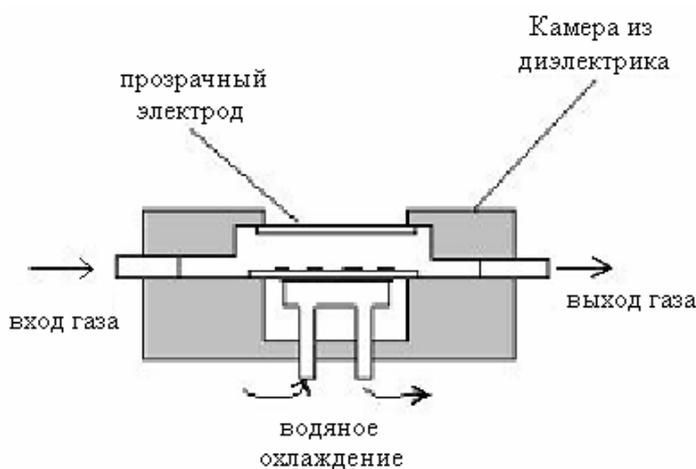


Рис. 1а. Разрядная камера

На рис. 1а показан разрез экспериментальной камеры с расположением электродов. Нижний электрод, к которому прикладывается переменное напряжение, охлаждается водой. Использование прозрачного верхнего электрода позволяет вести наблюдение за поверхностным разрядом с помощью CCD-камеры, работа которой синхронизирована с переменным напряжением, приложенным к системе электродов. Время экспозиции 10 микросекунд. Задержка открытия затвора камеры позволяет получать изображение в разные полупериоды действующего напряжения. В качестве диэлектрического барьера

использовались керамические пластины (поликор, ситал, керамика ВК 94-1). Значения диэлектрической проницаемости и толщина пластин  $d$  приведены в таблице 1.

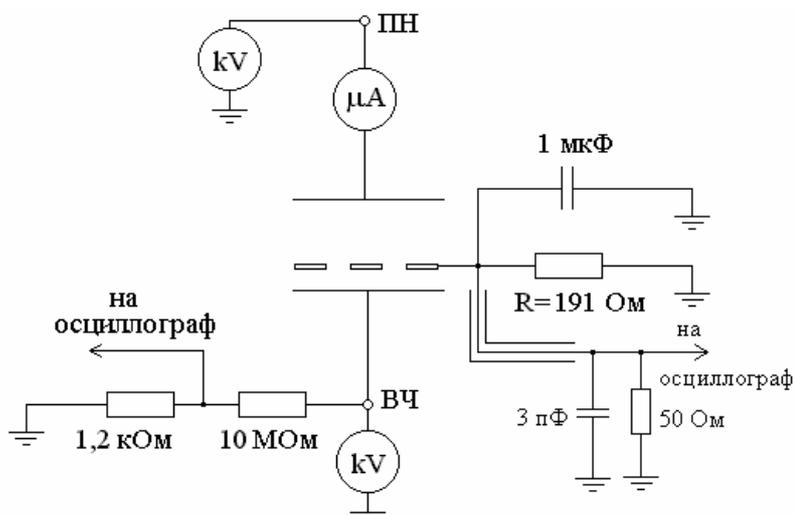


Рис.1 б. Электрическая схема

Таблица 1.

Характеристики керамических барьеров и измеренные амплитуды импульсов тока микрозарядов, происходящих в разных условиях

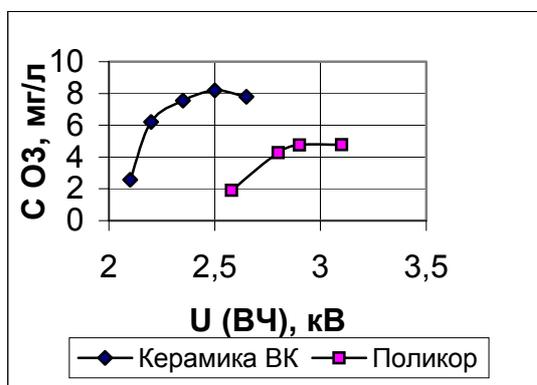
Тип керамики	$U_{HF}$ , кВ	$U_{DC}$ , кВ	Положительные, импульсы мА	Отрицательные, импульсы мА
Поликор ( $\epsilon=9,3$ ; $d=1$ мм)	2.8	-	8 - 60	2 - 10
	2.8	+ 9.25	10 - 70	2 - 10
Ситал( $\epsilon=4$ ; $d=0,5$ мм) (гладкая поверхность)	2.1	-	10	10
	2.1	- 6	13	10
ВК 94-1( $\epsilon=9$ ; $d=1$ мм)	2.5	-	100 - 300	10 - 20
	2.5	- 6	300 - 500	4 - 15

В процессе экспериментов проводились измерения амплитуд импульсов тока поверхностного разряда, активная мощность разряда, концентрация озона и значения “вытягиваемого” тока, возникающего при приложении постоянного напряжения. Электрическая схема измерений дана на рис.1б. Для измерения активной мощности разряда использовался метод вольт-кулоновых характеристик, при этом параллельно емкости для измерения заряда включается активное сопротивление для создания цепи постоянному току от приложенного постоянного напряжения. Кроме того, при измерении активной мощности на входе осциллографа подключается схема отсечки высокочастотных колебаний, создаваемых поверхностными микрозарядами, для обеспечения четкого изображения параллелограмма мощности. Для измерения электрических сигналов использовался осциллограф TDS 754D. Измерения концентрации

озона проводились с помощью спектрофотометра СФ-46. Поскольку измеряемые величины имеют статистический разброс (порядка  $\pm 5\%$ ), на всех рисунках и для анализа используются усредненные значения.

### Экспериментальные результаты

Измерения параметров поверхностного разряда, концентрации озона и активной мощности, проведенные с разными керамическим пластинами, показали, что помимо значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и толщины барьера, существенное влияние на все характеристики оказывает химический состав материала. Сравнение выхода озона и активной мощности разряда, измеренных для пластин из керамики ВК и поликора, имеющих практически одинаковое значение  $\epsilon$  и равную толщину, показывает существенное различие (рис.2 и 3) результатов измерения. При этом большее значение начального напряжения зажигания поверхностного разряда на поликоре [3] приводит к большим затратам мощности для получения сопоставимых значений  $C_{O_3}$ , что видно по рис.4, где приведены удельные значения, отнесенные к единице длины коронирующего электрода. В итоге энергозатраты на получение озона при использовании барьера из поликора оказываются существенно выше, чем с керамикой ВК (табл.2). Даны



эффективные значения  $U_{ВЧ}$ .

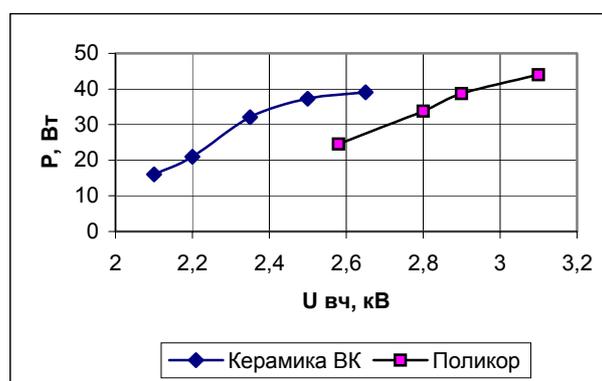


Рис. 2.

Рис. 3.

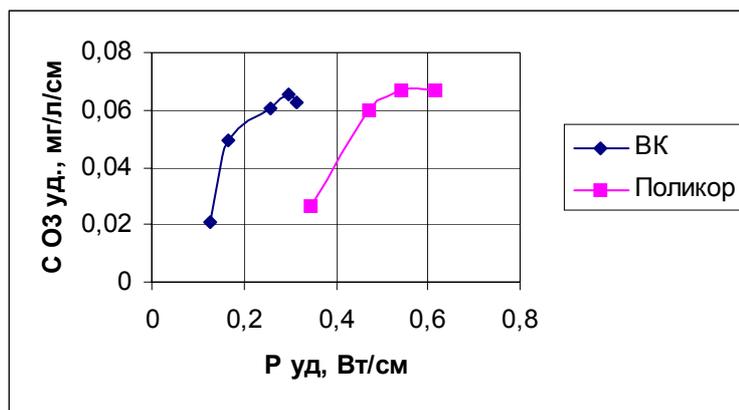


Рис.4

При наложении внешнего постоянного поля на объем газа с поверхностным разрядом происходит “вытягивание” заряженных частиц в объем, что создает постоянный ток во внешней цепи (см. рис.1б). Значения постоянного тока зависят от интенсивности поверхностного разряда, что проявляется в значительном возрастании тока при увеличении (рис.5). При этом значения тока, полученные при разряде по керамике ВК, существенно выше, чем с поликором. На рис.5 представлены данные, полученные с положительным “вытягивающим” напряжением.

Таблица 2

Энергозатраты на получение озона в поверхностном разряде на керамике ВК и поликоре

U <sub>вч</sub> , кВ эфф		2,35	2,5	2,58	2,65	2,8	3,1
Энергозатраты, кВт-ч/кг	ВК	70,8	75,8	82	83,5		
	Поликор			215		131	154

Исследования структуры поверхностного разряда показали, что она может заметно меняться при использовании разных материалов барьера. При этом наибольшее значение

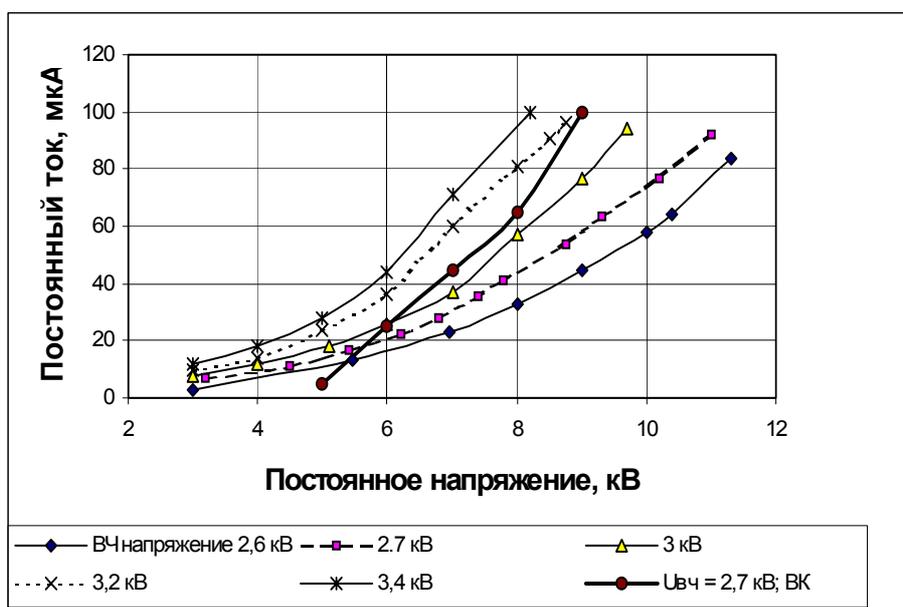


Рис.5

имеет структура поверхностного слоя барьера. Для исключения одновременного влияния разных характеристик барьера на структуру разряда, было проведено исследование поверхностного разряда при изменении лишь одного параметра – степени шероховатости поверхности барьера из ситала. При этом брались одни и те же пластины, но имеющие разную структуру поверхностного слоя. На рис.6-9 представлены картины разряда, происходящего в разный полупериод переменного напряжения, при наличии или отсутствии “вытягивающего” напряжения и при его разной полярности. На рис.6-9 черные полосы – электроды, причем ширина окна между полосами взята разной для оценки особенностей самоограниченного разряда [3]. Представленные фотографии разряда показывают: 1) существенное различие структуры разряда в разные полупериоды приложенного напряжения (рис. 6а и 7а), 2) существенное различие разряда при разных поверхностях барьера, 3) заметное влияние “вытягивающего” поля на структуру разряда в положительный полупериод, в особенности на с шероховатой поверхности.

Различие структуры ПР для разной структуры поверхности барьера, разной полярности и при воздействии постоянного напряжения проявляется в различии амплитуд тока микроударов (табл.1), причем наиболее мощные разряды имеют место для положительного полупериода переменного напряжения, воздействия отрицательного постоянного напряжения и при использовании барьера из керамики ВК. Последнее видимо связано с присутствием в материале керамики ВК атомов магния Mg. Однако этот вопрос требует специального изучения.

Различие структуры ПР для разной структуры поверхности барьера и при воздействии постоянного напряжения проявляется в значениях активной мощности разряда, значениях постоянного тока и концентрации озона (рис.10).

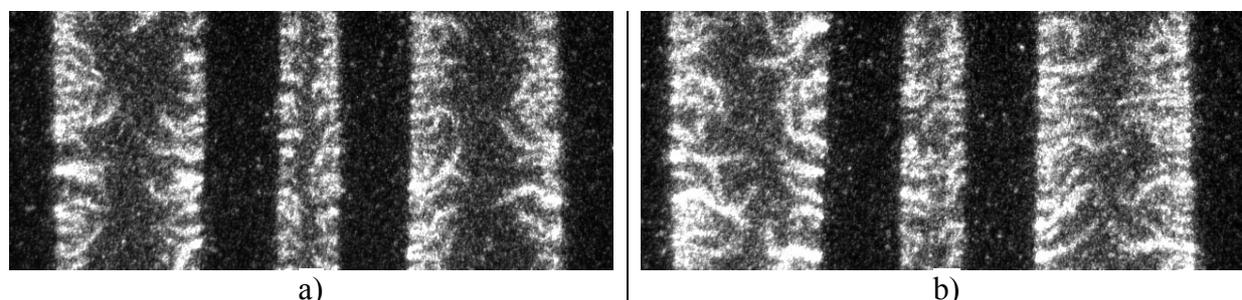


Рис.6. Фотографии ПР на шероховатой поверхности ситала,  $U_{ВЧ} = 2.8$  кВ (эфф.), положительный полупериод. а) без ПН; б) с ПН = 8 кВ.

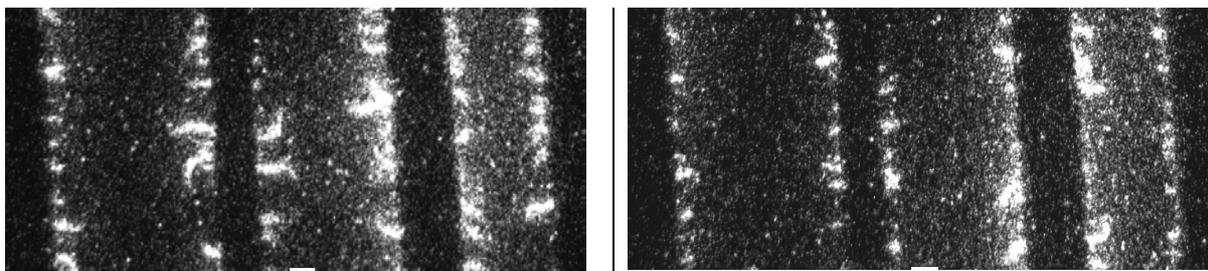


Рис. 7. То же, что на рис.6, но для отрицательного полупериода

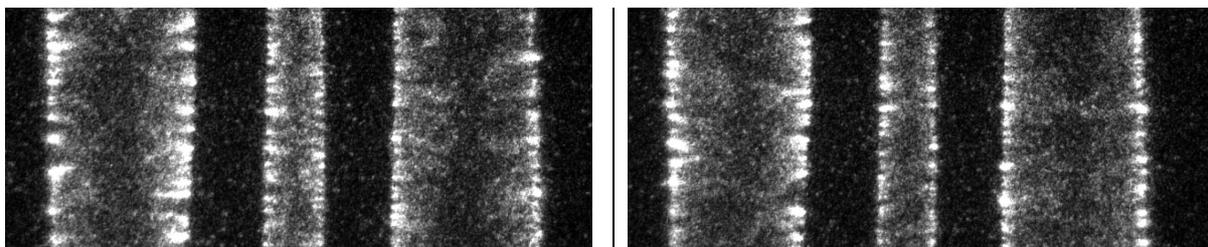


Рис.8. Картины разряда на гладкой поверхности ситала,  $U_{вч} = 2.8$  кВ эфф, положительный полупериод, а) без ПН; б) при отрицательном ПН,  $U = -8$  кВ.

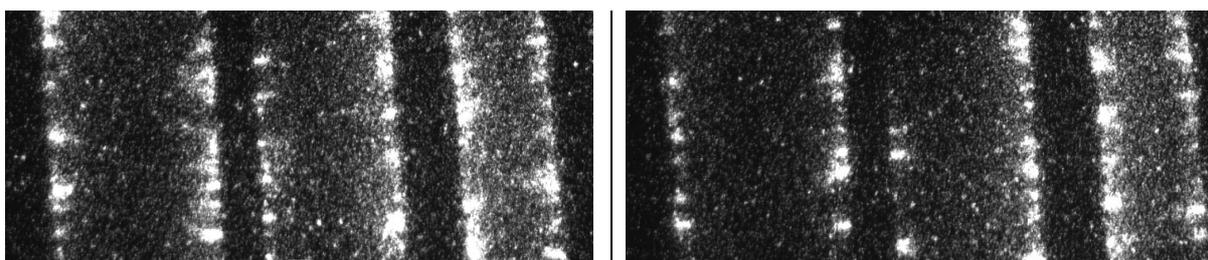


Рис.9. То же, что на рис.8, но для отрицательного полупериода

Наложение “вытягивающего” поля, к сожалению, не вызывает заметного изменения выхода озона (рис.10), причем отрицательное поле вызывает даже снижение концентрации озона, особенно заметное для разряда на поликоре. Активная мощность разряда при наложении постоянного поля практически не меняется.

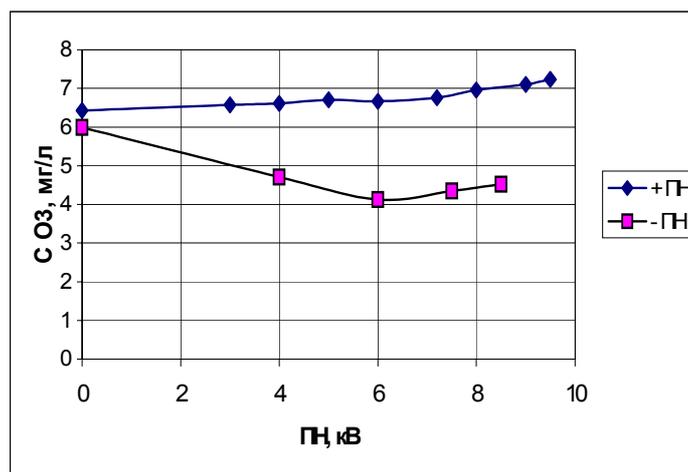


Рис.10

## Заключение

Исследования с использованием CCD-камеры показали, что поверхностный разряд имеет дискретный характер в каждый полупериод переменного напряжения, при этом структура разряда зависит не только от материала и толщины диэлектрического барьера, но и от степени шероховатости его поверхностного слоя. Увеличение шероховатости приводит к более мощному разряду, при котором увеличивается амплитуда положительных импульсов тока поверхностного разряда, что сопровождается увеличением выхода озона. При действии постоянного напряжения происходит некоторое изменение структуры поверхностного разряда, особенно заметное в случае шероховатой поверхности барьера и при положительном постоянном напряжении, при котором имеет место некоторое (порядка 15%) увеличение концентрации озона. При отрицательном постоянном напряжении (порядка 6-9 кВ) на прозрачном электроде выход озона снижается на 20-25%. Наложение постоянного напряжения на промежуток с поверхностным разрядом приводит к появлению постоянного тока, плотность которого может достигать  $200 \text{ mA/m}^2$ , что позволяет рассматривать систему как источник ионов для плазменных технологий. Заметного изменения выхода озона и активной мощности ПР при дополнительном воздействии постоянного напряжения в рассмотренных условиях выявлено не было.

## Литература

- [1] Masuda S., Kiss E. On streamer discharges in ceramic-based ozoniser using high frequency-surface discharge. In: *Inst. Conf. Ser.* No.85. Poster Session 2., ed. IOP Publishing Ltd. Oxford. 1987, pp. 243-248.
- [2] Gibalov, V. I., Pietsch, G. J. (2000). The development of dielectric barrier discharges in gas gaps and on surfaces. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 33, 2618-2636.

- [3] M.V. Kozlov, M.V. Sokolova, A.G. Temnikov, V.V. Timatkov, I.P. Vereshchagin. Surface discharge characteristics for different types of applied voltage and different dielectric materials. *Contr.Papers of HAKONE 7*. 2002. v.2, pp.43-47.
- [4] Saveliev, A. B., Pietsch, G. J. (2002). On the structure of dielectric barrier surface discharges. *Contr. Papers. of Int. Symp. on High Pressure Low Temp. Plasma Chem.* vol. 2, 229-233.
- [5] Yamamoto, H., Shioji, S., Masuda, S. (1992). Synthesis of ultrafine particles by surface discharge-induced plasma chemical process (SPCP) and its application. *IEEE Trans. on Industry Appl.*, 28, 1189-1193.
- [6] Yamamoto, H., Masuda, S. (1991). Electrostatic deposition of CVD particles for fabrication of ultrafine ceramic filter. *IEEE Trans. on Industry Appl.*, 27, 307-310.
- [7] Yasuoka, K., Endo, Y., Ishii, S. (2002) Experimental study of ozone generation using dc driven micro-plasma. *Contr. Papers. of Int. Symp. on High Pressure Low Temp. Plasma Chem.* vol. 2, 217-221.