

04;07

Исследование излучения поверхностного разряда в сухом воздухе

© М.В. Соколова, К.В. Козлов, С.А. Кривов,
В.Г. Самойлович, П.А. Татаренко

Московский энергетический институт (ТУ)
Московский государственный университет
E-mail: sokolova@fee.mpei.ac.ru

В окончательной редакции 10 октября 2008 г.

Исследовалось излучение электрического разряда, развивающегося в сухом воздухе под действием переменного напряжения частотой 5–14 kHz по поверхности керамической пластины с края тонкого алюминиевого электрода. Измерялась интенсивность излучения поверхностных микрозарядов для второй положительной ($\lambda = 337.1$ nm) и первой отрицательной ($\lambda = 391.5$ nm) систем излучения азота. С помощью линзы и системы щелей поток излучения, поступающий на монохроматор и ФЭУ, сканировался с разрешением 0.2 mm по ширине и 2 mm по длине канала, что позволило анализировать структуру излучения микрозаряда и установить местоположение его канала по отношению к поверхности барьера.

PACS: 52.80.Tn, 52.70.Kz

Приводимые в литературе [1–3] экспериментальные данные показывают, что поверхностный разряд при любой полярности электрода состоит из каналов дискретных микрозарядов, форма и интенсивность которых определяется приложенным напряжением. Многие закономерности развития таких микрозарядов до сих пор неясны, поэтому целью данной работы было получение новых экспериментальных данных об особенностях излучения поверхностных микрозарядов и определение местоположения их каналов у поверхности твердого диэлектрика (барьера).

Все измерения проведены для разряда в слабом потоке сухого воздуха (влажность не более 0.7%) при температуре 23–25°C и атмосферном давлении. Расход воздуха не превышал 70 l/h. В качестве диэлектрического барьера использовались пластины керамики 22ХС и ситалла 50–1–1–0.5. Толщина барьера составляла 1–1.2 mm, размер

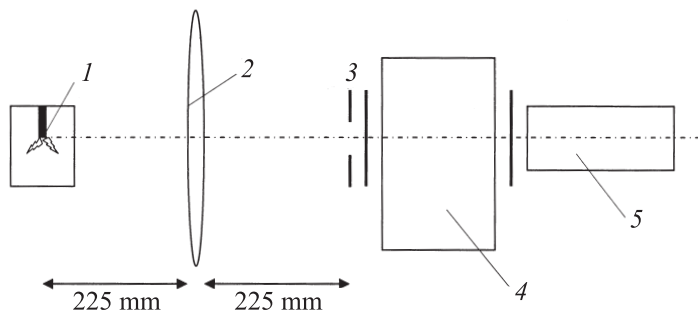


Рис. 1. Схема расположения устройств для измерения распределения интенсивности излучения по каналу разряда: 1 — диэлектрическая пластина с электродом и разрядом с его кончика; 2 — линза; 3 — горизонтальная и вертикальные входные щели монохроматора; 4 — монохроматор; 5 — выходная вертикальная щель монохроматора и ФЭУ.

пластин 40×60 mm. Электродная система включает коронирующий заземленный электрод площадью около 0.5 cm^2 , выполненный в виде металлизации, нанесенной на поверхность диэлектрической пластины, и высоковольтный электрод площадью 1 cm^2 , в виде металлизации, нанесенной на обратную сторону пластины. Все края электродов, кроме участка длиной 1.5 mm на коронирующем электроде, залиты эпоксидным компаундом. С открытого участка электрода в разные полупериоды приложенного высокого напряжения ($2.2\text{--}2.8 \text{ kV}$) частотой $5\text{--}14 \text{ kHz}$ развивается не более 3 разрядов. Электродная система помещена в разрядную ячейку с кварцевыми окнами.

Система регистрации спектрально разрешенного излучения микроразрядов состоит из фокусирующей кварцевой линзы диаметром 50 mm , монохроматора МДР-2, обладающего высокой светопередачей, и ФЭУ-106, работающего в режиме счета единичных фотонов. На входе и выходе монохроматора установлены вертикальные щели шириной $20 \mu\text{m}$. Источник излучения (развивающийся вертикально канал поверхностного микроразряда) и входная щель монохроматора расположены в фокальных плоскостях линзы (рис. 1), так что на щель попадает сфокусированное изображение канала разряда. Интегральный поток излучения от всего канала сканируется по расстоянию от поверх-

ности пластины. При горизонтальном перемещении линзы с шагом $200\ \mu\text{m}$ (в пределах $\pm 2\ \text{mm}$ от центра) на входную вертикальную щель монохроматора попадает изображение разных продольных участков канала микроразряда. Подобная процедура позволяет определить распределение интенсивности излучения $I(x)$ по ширине канала и его местоположение относительно барьера. После монохроматора через его выходную вертикальную щель излучение с заданной длиной волны поступает на вход ФЭУ, который измеряет интенсивность излучения как количество фотонов с энергией, соответствующей длине волны 337.1 или $391.5\ \text{nm}$, за $1\ \text{s}$.

Для получения распределения интенсивности излучения по длине канала микроразряда проводится вертикальное сканирование потока излучения с шагом $2\ \text{mm}$ (в пределах $\pm 7\ \text{mm}$ от оптической оси). Для этого непосредственно на входную вертикальную щель монохроматора помещается горизонтальная щель шириной $30\ \mu\text{m}$, а линза в каждом ее положении по горизонтали перемещается в вертикальном направлении. Подобное двойное сканирование потока излучения канала позволяет получить двумерную картину распределения интенсивности излучения канала по его длине и ширине. Следует отметить, что полученные данные являются усредненными для многих микроразрядов, возникающих в разные полупериоды приложенного напряжения, но развивающихся по одному и тому же пути, что подтверждается фотографиями каналов разряда с кончика электрода, показывающими четкое наложение каналов друг на друга.

На рис. 2 дано схематичное представление области излучения канала разряда и кривой $I(x)$, дающей интенсивность интегрального излучения за $1\ \text{s}$ на каждом шаге сканирования по горизонтали (на узком участке Δx) как функцию расстояния этого участка x от поверхности барьера. Зона максимальной интенсивности излучения (участок BC на кривых) соответствует каналу разряда. В таблице представлены параметры кривых $I(x)$ для разных условий разряда. Факторами, в наибольшей степени влияющими на максимальное значение интенсивности излучения I_{max} (для точки H на кривой), являются приложенное напряжение, его частота и характеристики барьера (его материал, структура поверхностного слоя). Если при анализе кривых $I(x)$ предположить, что начало резкого роста значений I на кривых (точка A) совпадает с поверхностью барьера, то область BC , соответствующая

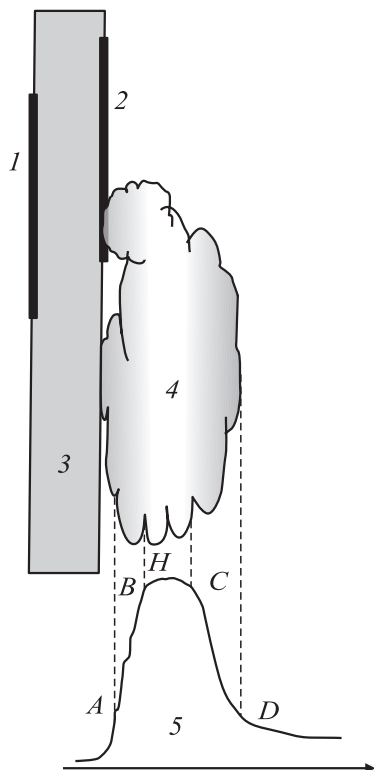


Рис. 2. Схематичное изображение области канала микро разряда у поверхности барьера и соответствующая кривая $I(x)$; 1 — высоковольтный электрод; 2 — коронирующий электрод; 3 — диэлектрическая пластина; 4 — область интегрального свечения канала микро разряда; 5 — кривая зависимости $I(x)$.

каналу, отстоит от поверхности пластины как минимум на расстояние $AB = 0.5-1.3$ mm (см. таблицу).

Картины распределения интенсивности излучения микро разряда при 2-мерном сканировании представлены на рис. 3, $a-d$, где значения x дают расстояния от поверхности барьера, причем значение $x = 0$ не означает поверхность барьера, а соответствует координате начальной точки измерений. По оси S указаны расстояния от кончика электрода,

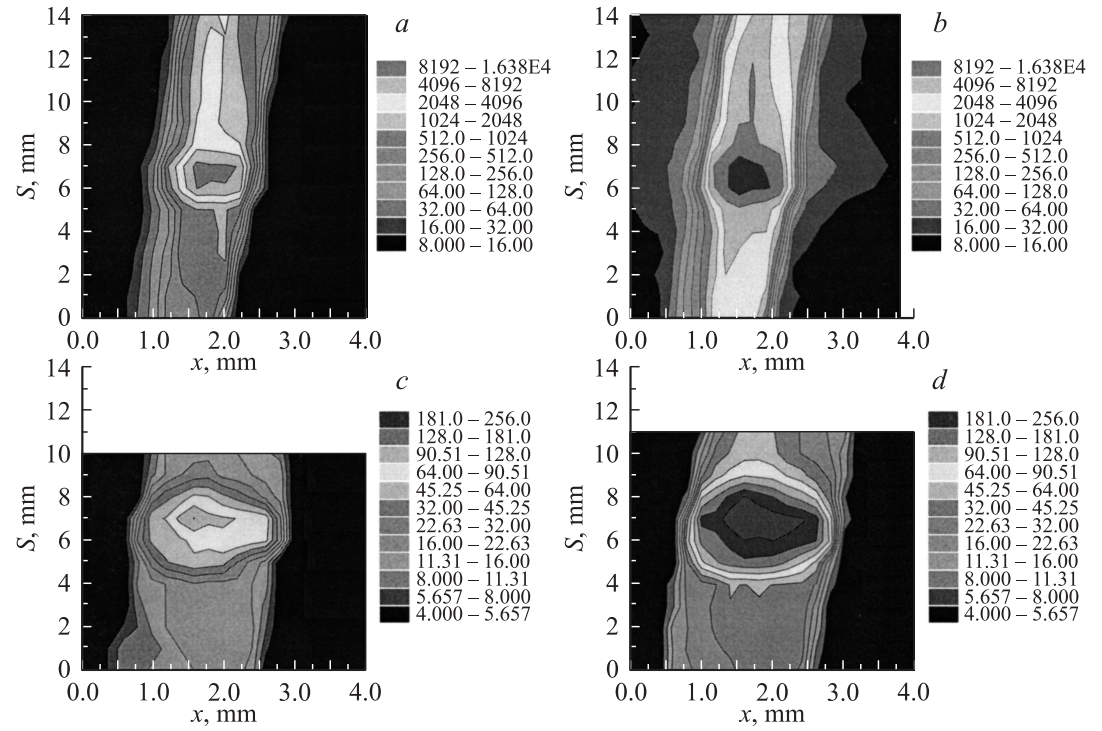


Рис. 3. Картины распределения излучения поверхностных микроразрядов при 2-мерном сканировании. Материал барьера — ситалл, шершавая поверхность: *a* — $U = 2.2 \text{ kV}$, $\lambda = 337.1 \text{ nm}$; *b* — $U = 2.6 \text{ kV}$, $\lambda = 337.1 \text{ nm}$; *c* — $U = 2.2 \text{ kV}$, $\lambda = 391.5 \text{ nm}$; *d* — $U = 2.6 \text{ kV}$, $\lambda = 391.5 \text{ nm}$.

Параметры кривых зависимости $I(x)$

Материал пластины и характеристика ее поверхности	U , kV	f , kHz	I_{\max} , фотонов/s	AB , mm	BC , mm	AH , mm	AD , mm
Ситалл, гладкая поверхность	2.1	5	9000	0.5	0.5	0.6–0.8	1.7
	2.4	5	15000	1.1	0.1–0.3	1.2	2.1
	2.8	5	60000	0.8	0.4	1.2	2.2
Ситалл, шершавая поверхность	2.4	5	24000	0.9–1	0.5	0.65	1.5
	2.4	9	25000	0	0.3	1.1–1.2	2.5
	2.4	14	100000	1.0 1.3	0.2–0.3	1.35	2.6
Керамика 22ХС	2.4	5	43000	0.8	0.2	0.6–1.0	1.1

с которого начинается разряд, вдоль его канала. Разными оттенками обозначены области с разной интенсивностью излучения, значения которой даны на приводимой шкале. Рис. 3, *a* и *b* соответствует излучению с длиной волны $\lambda = 337.1$ nm, рис. 3, *c* и *d* — с длиной волны 391.5 nm. Приведенные картины показывают, что наиболее интенсивное излучение в условиях проведенных экспериментов при обеих длинах волн идет из участка с размерами порядка 1×3 mm, который можно рассматривать как область перед головками стримерных каналов. Ближе к электроду интенсивность свечения существенно снижается.

С ростом действующего значения приложенного напряжения от 2.2 до 2.6 kV увеличивается интенсивность свечения центральной части канала и ее размеры, что наблюдается и для $\lambda = 337.1$ nm и для $\lambda = 391.5$ nm. При этом расширяется область свечения вокруг яркой части, а также несколько увеличивается (с 9° до 11°) угол наклона оси канала по отношению к поверхности барьера. Картины рис. 3 представляют распределение интегрального свечения от многих каналов микро-разрядов, возникающих в оба полупериода приложенного напряжения. Сравнение с аналогичными картинками только для отрицательного или только для положительного полупериодов показывает, что разряды с положительного электрода являются более мощными и именно ими определяется интегральное свечение канала.

Таким образом, с использованием разработанной авторами оригинальной экспериментальной методики установлено, что канал микро-разряда развивается не вдоль поверхности диэлектрического барьера, а отстоит от нее на некотором расстоянии, которое в условиях проведенных экспериментов составляет до 1.6 mm. По мнению авторов, отход канала от поверхности барьера связан с осаждением на нее зарядов из зоны ионизации под действием заряда поляризации. Полученные данные существенно отличаются от описанных в литературе классических поверхностных разрядов и важны при физико-математическом моделировании поверхностных разрядов. Картины распределения интенсивности излучения поверхностных микро-разрядов дают (в соответствии с [4]) материал для анализа распределения плотности электронов в канале (по излучению с $\lambda = 337.1$ nm) и распределения в нем напряженности электрического поля (по излучению с $\lambda = 391.5$ nm).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-08-00334).

Список литературы

- [1] *Kozlov M.V. et al. // Contributed Papers of 8th Int. Symp. on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry. Hakone VIII. Puhajarve, Estonia, 2002. V. 2. P. 43–46.*
- [2] *Saveliev A.B., Pietsch G.J. Contributed Papers of 8th Int. Symp. on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry. Hakone VIII. Puhajarve, Estonia, 2002. V. 2. P. 229–233.*
- [3] *Sokolova M., Hulka L., Pietsch G. // Plasma Processes and Polymers. 2005. V. 2. P. 162–169.*
- [4] *Kozlov K.V., Wagner H.-E., Brandenburg R., Michel P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. P. 1–13.*