

04;12

Пространственная макроскопическая структура импульсного разряда микросекундного диапазона в промежутках барьер—металл с неоднородным распределением электрического поля

© С.Н. Буранов, В.В. Горохов, В.И. Карелин, А.А. Тренькин

Российский федеральный ядерный центр
 Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
 607190 Саров, Нижегородская область, Россия
 e-mail: karelin@ntc.vniief.ru

(Поступило в Редакцию 1 декабря 2003 г.)

Исследованы электрические и пространственные характеристики микросекундного импульсно-периодического барьерного разряда в геометриях: треугольная призма, пластина и гофрированный электрод, касающиеся диэлектрической пластины и образующие с ней двугранный угол. Установлено, что в пространстве двугранного угла области горения разряда представляют собой чередующиеся цилиндрические слои с осью на линии касания. При этом первый проводящий слой образуется на удалении от кромки касания электрода. Число и расположение слоев определяются углом между электродом и диэлектрической пластиной. Предложена физическая модель, объясняющая основные закономерности формирования структуры.

Введение

Интерес к исследованиям барьерного разряда обусловлен его широким использованием: синтез озона, деструкция вредных примесей в воздухе, наработка эксимеров, органический и неорганический синтез [1–3]. В последние годы интенсивно развивается новое направление медицины — озонотерапия, технологическое оснащение которой потребовало создания специальной аппаратуры — медицинских озонаторов [4].

Важным требованием, предъявляемым к медицинским озонаторам, является стабильность наработки озона в широком диапазоне выходных концентраций. Здесь особую сложность представляет точный стабильный синтез O_3 низких концентраций. Для решения этой задачи потребовались переход к микросекундным импульсам питания разряда и стабилизация пробоя газового промежутка в каждом импульсе [5]. Исследования [5,6] показали сложность выполнения этих требований в промежутках с однородной геометрией поля при запитке импульсами микросекундного диапазона: необходимы высокие напряжения, высокая точность изготовления электродной системы, введение иницирующих электродов. Эти обстоятельства предопределили переход к разрядным камерам с неоднородной геометрией поля [6]. Вместе с тем следует отметить, что к настоящему времени число работ, посвященных изучению барьерного разряда, возбуждаемого микросекундными импульсами в промежутках даже с однородным распределением поля, весьма ограничено, а разряд в ячейках с неоднородным распределением практически не исследован [5–7].

Цель настоящей работы — изучение электрических и пространственных характеристик разряда, возбуждае-

мого импульсами микросекундной длительности в промежутках барьер—металл с неоднородной геометрией поля.

Экспериментальная аппаратура

Разряд исследовался в воздухе атмосферного давления на стенде (рис. 1), включающем в себя источник питания (PS), электродную систему (ES) и диагностическую аппаратуру. В качестве источника питания использовался транзисторный генератор высоковольтных импульсов чередующейся полярности, предназначенный для работы на нелинейную резистивно-емкостную нагрузку. Генератор выполнен по схеме резонансного инвертора с последующим магнитным сжатием фронта и повышением амплитуды импульса высоковольтным трансформатором. Каждый импульс состоял из двух полувольт противоположной полярности. Параметры генератора: энергия в импульсе 16 мДж, напряжение холостого хода 22 кВ, время нарастания 700 нс, длительность первой полуволны на полувысоте 3.5 мкс, частота следования от однократных до 25 Гц.

Электродная система установленная в камеру (C), поддерживаемую диэлектрическими подставками ($D.s$), представляет собой два электрода: плоский сетчатый 1 и профилированный 2, разделенных диэлектрическим барьером 3. Электрод 1 изготовлен из никелевой сетки (диаметр проволоки 80 мкм) с ячейкой 150×150 мкм, геометрическая прозрачность сетки 5%. Сетка приварена к торцу металлической шайбы внешним диаметром 50 мм и плотно прижата к барьеру, в качестве которого использовалась кварцевая пластина толщиной 1 мм и диаметром 60 мм. Использовались несколько конфигураций

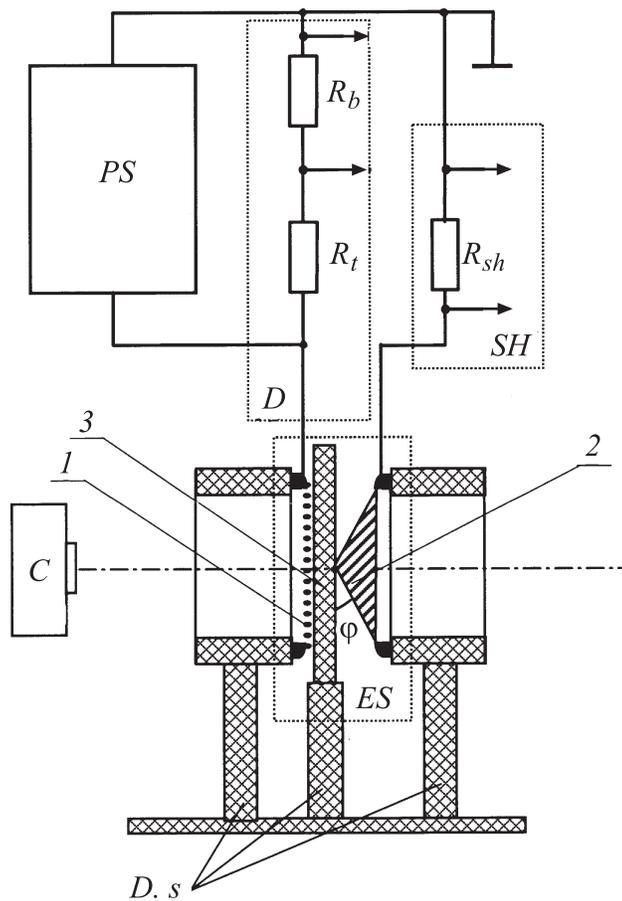


Рис. 1. Схема лабораторного стенда.

электрода 2, обеспечивающих неоднородное распределение поля в промежутке: треугольные призмы, тонкая (0.3 mm) прямоугольная пластина, гофрированный электрод. Во всех случаях электроды ребром касались поверхности пластины, образуя двугранный угол φ . Характерные размеры электродов 2 не превышали диаметра сетчатого электрода. Исследованный диапазон угла $15 \leq \varphi \leq 60^\circ$.

Регистрация напряжения U на разрядном промежутке и тока I разряда производилась с помощью осциллографа Tektronix TDS754C с полосой пропускания 500 MHz. Временное разрешение резистивного делителя напряжения D не хуже 10 ns, низкоиндуктивного коаксиального шунта SH — не хуже 1 ns.

Свечение разряда фотографировалось через сетчатый электрод и сбоку, в направлении линии касания электрода и барьера, при работе генератора на частоте 25 Hz со временем экспозиции 0.5–1 min.

Для визуализации распределения токов поверхность электрода 2 покрывалась тонким слоем ($\sim 1 \mu\text{m}$) сажи. В результате воздействия разряда в областях протекания тока сажа распылялась, оголяя поверхность электрода. При распылении часть сажи осаждалась на кварцевой пластине, в результате чего формировалась картина,

отображающая распределение токов на ее поверхности. Для получения четкой картины распределения электроды обрабатывались в течение 1 min на частоте генератора 25 Hz.

Экспериментальные результаты

Эксперименты показали устойчивое формирование разряда в промежутках барьер–металл с неоднородным распределением поля в каждом импульсе, начиная от однократных. При подаче на разрядный промежуток импульса напряжения ток разряда возникал как на переднем, так и на заднем фронте первой полуволны импульса напряжения. Напряжение пробоя на переднем фронте импульса обеих полярностей менялось от импульса к импульсу и находилось в интервале 4–6 kV.

Исследования электрических характеристик проводились в основном с призмными электродами. На рис. 2 представлена типичная осциллограмма напряжения U и тока I разряда. Плавное нарастание токовой осциллограммы на начальном участке обусловлено зарядкой межэлектродной емкости. При достижении напряжением пробивного значения происходит резкий рост тока. За время 5–25 ns ток достигает амплитудного значения 0.6–2 A, после чего в течение 400–500 ns падает до нуля. На заднем фронте первой полуволны импульса напряжения ток плавно нарастает, достигает амплитудного значения и затем плавно падает. Длительность токового импульса составляет 800 ns. Он обусловлен перезарядкой емкости барьера.

В экспериментах не проводилось детального исследования зависимости электрических характеристик разряда от угла φ , однако в результате анализа полученных данных указанной зависимости не обнаружено.

Нанесение сажи на поверхность электрода заметно повлияло на электрические характеристики разряда: снизились пробивные напряжения (3.2–3.7 kV), ток разряда нарастал более плавно, без ярко выраженного амплитудного скачка.

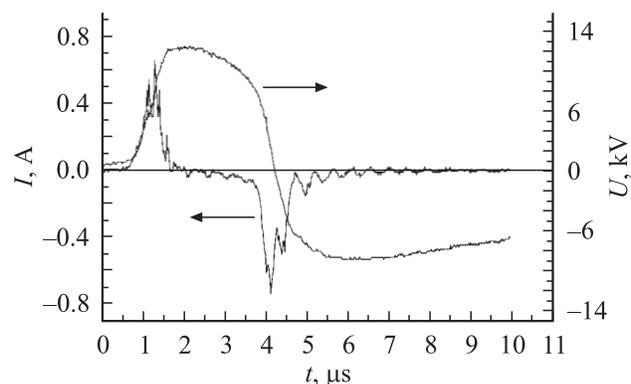


Рис. 2. Осциллограммы напряжения U и тока I разряда (ненапыленный призмный электрод, $\varphi = 15^\circ$).

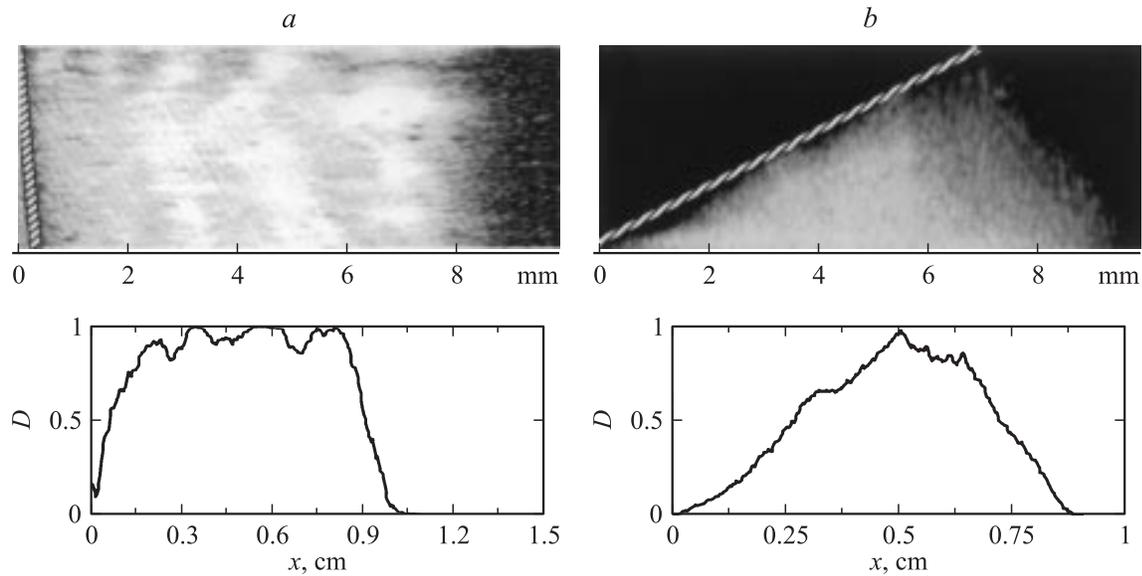


Рис. 3. Фотографии разряда и соответствующие денситограммы (пластина, $\varphi = 15^\circ$).

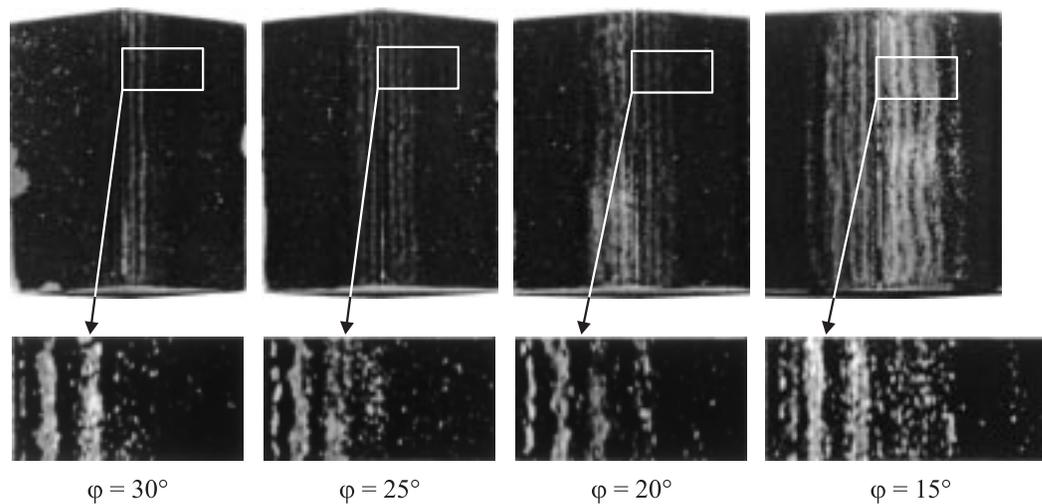


Рис. 4. Электроды после обработки разрядом.

Разряд фотографировался при работе с электродом 2 в виде пластины. Фотографии свечения разряда через сетчатый электрод и сбоку представлены соответственно на рис. 3, *a* и *b*. Заштрихованной областью на рис. 3, *a* указана линия касания, на рис. 3, *b* — расположение электрода. На рис. 3, *a* наблюдаются области чередования свечения разряда в виде полос, ориентированных в направлении линии касания. Изгиб полос обусловлен деформацией поверхности электрода.

При фотографировании сбоку, вдоль линии касания электрода и диэлектрика, регистрируется свечение, усредненное по всей длине межэлектродного промежутка, поэтому структура свечения разряда в этой проекции (рис. 3, *b*) менее выражена. Тем не менее различимы области максимального свечения, близкие по

форме к дугам окружностей с центром в точке касания. Сравнение рис. 3, *a* и *b* обнаруживает соответствие структурных особенностей в свечении разряда в обеих проекциях.

Фотографии покрытых сажей призматических электродов после обработки их рабочей поверхности разрядом приведены на рис. 4. Как видно, область эрозии представляет собой набор полос, практически параллельных и симметричных линии касания. Отметим, однако, что регистрируемая в данных экспериментах структура является макроскопической по отношению к микроструктуре барьерного разряда [1,2,6], которая в данной работе не исследовалась. Эрозионное воздействие разряда пропорционально плотности тока, поэтому светлые полосы соответствуют областям с более высокой плотностью

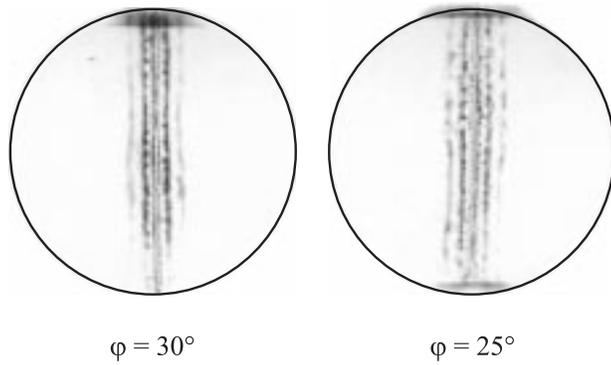


Рис. 5. Поверхность диэлектрической пластины после обработки разрядом.

тока, темные — областям, где ток разряда мал или его нет. На рис. 5 приведена картина, отображающая распределение токов по поверхности диэлектрика. И здесь области горения разряда чередуются с аналогичными по структуре областями, где разряд не горит. Учитывая при этом зарегистрированную структуру разряда сбоку, вдоль линии касания (рис. 3, *b*) можно сделать вывод, что в объеме разрядного промежутка токовые области разряда представляют собой цилиндрические слои с осью на линии касания.

Первая эрозионная полоса на поверхности электрода 2 (рис. 4), а также первая светлая полоса на фотографиях (рис. 3), отображающие положение первого токового слоя, расположены на некотором расстоянии от линии касания. Следовательно, первая проводящая область формируется не с острой кромки электрода 2, касающейся барьера, а в объеме газового промежутка, на некотором удалении от линии касания. Расположение и количество токовых слоев зависят от угла φ : с увеличением φ слои сдвигаются к линии касания, а их число уменьшается. Начиная с некоторого угла φ_k ($50 < \varphi_k < 60^\circ$), остается только один, удаленный от кромки электрода слой, а в промежутке, вдоль поверхности диэлектрика, наблюдается незавершенный скользящий разряд.

Средние расстояния x_i ($i = 1, \dots, 5$) от кромки электрода до i -го токового слоя, полученные обработкой изображений, приведены в таблице. Зависимость расстояний x_1, x_2, x_3, x_4 от φ приближенно можно описать гиперболическим законом.

Расстояния от линии касания до i -й эрозионной полосы

φ, deg	x_i, cm				
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
15	0.14	0.28	0.5	0.7	0.9
20	0.09	0.23	0.42	0.63	0.92
25	0.08	0.2	0.37	0.55	0.85
30	0.05	0.17	0.37	0.55	—

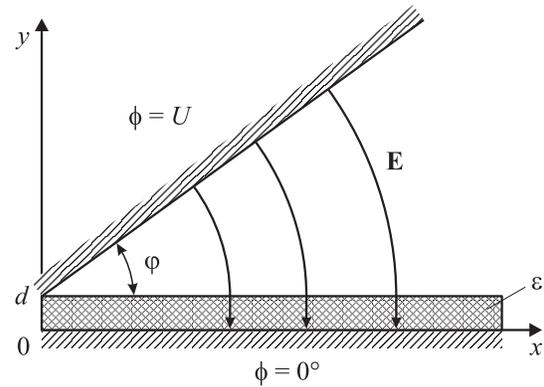


Рис. 6. Модель электродной системы (d — толщина барьера, ϵ — диэлектрическая проницаемость).

Аналогичная структура наблюдалась и в экспериментах с гофрированным электродом 2 (рис. 1).

Формирование структуры разряда в промежутках барьер–металл с неоднородным распределением поля

Для анализа процесса формирования структуры использовалась модель электродной системы (рис. 6), образованная бесконечными металлическими и диэлектрическими пластинами. В такой модели при малых углах φ ($\varphi < 1$) распределение электрического поля в области $d < y < d + \varphi x$ можно аппроксимировать функцией

$$E(x) = \frac{U}{\varphi x + \frac{d}{\epsilon}},$$

которая для каждого фиксированного x описывает поле внутри плоского конденсатора с диэлектрической пластиной, покрывающей одну из обкладок. Численный расчет поля электродной системы дает близкие по величине значения напряженности и показывает, что нормальная компонента поля значительно превосходит тангенциальную. В связи с этим силовые линии поля представим отрезками, параллельными оси Oy .

В начальной фазе разряда (в отсутствие пространственного заряда и заряда на поверхности диэлектрика) движение электронов в промежутке дрейфовое, электроны движутся вдоль силовых линий электрического поля. Пробой промежутка наиболее вероятен в области, где электроном осуществляется максимальное число ионизаций. В качестве параметра, характеризующего скорость ионизации в стадии лавинного размножения электронов, будем использовать интегральный коэффициент размножения [8]

$$\chi(l) = \int_l \alpha(E) dl, \tag{1}$$

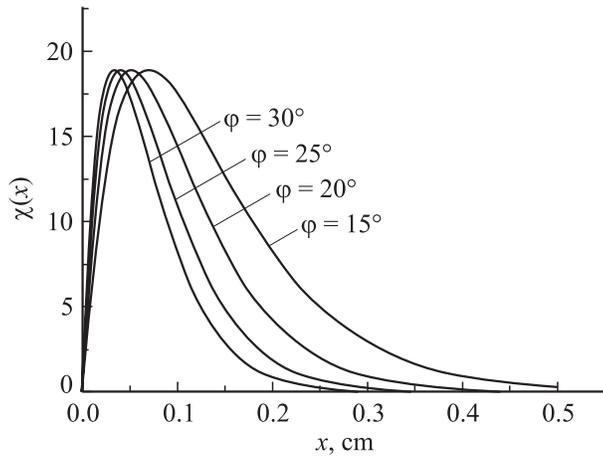


Рис. 7. Распределение интегрального коэффициента размножения электронов $\chi(x)$ к моменту пробоя промежутка.

где

$$\alpha(E) = pA \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right)$$

— эффективный коэффициент ионизации Таунсенда [9] (p — давление газа, $A = 15$ и $B = 365$ — константы), а интегрирование осуществляется вдоль силовых линий. Интегрируя (1), получим

$$\chi(x) = \varphi x p A \exp\left[-\frac{Bp}{U_1}\left(\varphi x + \frac{d}{\varepsilon}\right)\right].$$

С учетом экспериментальных данных график зависимости $\chi(x)$ к моменту пробоя промежутка ($U_1 = 5 \text{ kV}$) для разных углов представлен на рис. 7.

Положение первого токового слоя будет определяться той областью промежутка x_1 , где функция $\chi(x)$ достигает максимума

$$x_1 = \frac{U_1}{p\varphi B}. \quad (2)$$

Видно, что функция $\chi(x)$ достигает максимума на некотором удалении x_1 от линии касания, поэтому разряд начинает формироваться в области, удаленной от линии касания металлической пластины с диэлектриком. Максимальное значение функции $\chi_{\max} = \chi(x_1)$ не зависит от угла φ , что указывает на существование порогового значения χ_n , являющегося здесь критерием пробоя [8].

Ток проводимости переносит на поверхность диэлектрика заряд, который, распределяясь по пластине, ослабляет электрическое поле вблизи сформировавшегося слоя и затрудняет развитие проводимости в прилегающих областях. Дальнейший рост напряжения U на электродах приводит к образованию новой проводящей области в объеме газового промежутка (на расстоянии x_2 от линии касания), там, где влияние поверхностного заряда незначительно. Процесс повторяется до тех пор, пока выполняется условие $U \geq x_n \varphi E_{bd}$, где E_{bd} —

напряженность пробоя газа, а x_n определяет положение очередной проводящей области.

Полученные из (2) значения величин x_1 занижены относительно экспериментальных результатов. Это может быть связано с тем, что реальные электрические поля вблизи линии касания кромки электрода и диэлектрической пластины превышают модельные.

Заключение

Исследованы электрические и пространственные характеристики импульсно-периодического разряда, возбуждаемого в промежутках барьер—металл с неоднородной геометрией поля.

Установлено, что разряд формируется на некотором удалении от линии касания электрода и диэлектрика и образует пространственную структуру в виде цилиндрических слоев, параллельных линии касания.

Предложена физическая модель формирования разряда, объясняющая основные экспериментальные результаты: развитие разряда на удалении от линии касания электрода и диэлектрика, возникновение пространственной структуры, гиперболический характер зависимости $x_1(\varphi)$.

Список литературы

- [1] Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электролиз озона. М., 1987. 237 с.
- [2] Самойлович В.Г., Гибалов В.Ч., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М., 1989.
- [3] Бугаев С.П., Кувшинов В.А., Сочугов Н.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 17. С. 49–53.
- [4] Перетягин С.П. // Тез. докл. II Всероссийской научно-практической конф. Нижний Новгород, 1995. С. 25–26.
- [5] Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И. и др. // Там же. 102 с.
- [6] Buranov S.N., Gorokhov V.V., Karelin V.I. et al. // Proc. 12th IEEE Intern. Pulsed Power Conf. Monterey (USA), 1999. P. 1421–1424.
- [7] Шалимов В.В., Дауэнгауэр С.А., Беспалова Е.Б. и др. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 6. С. 165–167.
- [8] Разевиг Д.В., Соколова М.В. Расчет начальных и разрядных напряжений газовых промежутков. М., 1977.
- [9] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М., 1987. 592 с.