

УДК 537.523

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МИКРОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО
РАЗРЯДА**

Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И., Репин П.Б..

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Нижегородская обл.

Аннотация

Приведены результаты исследований электрических, оптических и пространственных характеристик барьерного разряда микросекундного диапазона, формируемого в воздухе атмосферного давления в однородном электрическом поле. Для измерения токовых характеристик отдельных микроканалов использовался метод секционирования электрода. Установлено, что микроразряды первой серии характеризуются относительно низкой (до 280 А/см^2) плотностью тока. Микроразряды повторных серий имеют ярко выраженную канальную структуру с высокой плотностью тока. На металлическом аноде автографы каналов представляют собой микрократеры диаметром до 4 мкм глубиной до 0,5 мкм.

В последние годы импульсно-периодический барьерный разряд (БР), микросекундного диапазона, находит все более широкое применение в технике и, в частности, в озонотерапевтической аппаратуре [1,2]. При импульсном питании в газовом промежутке могут быть реализованы объемные (диффузные) режимы горения разряда, с высокой эффективностью наработки озона [3,4]. Однако, в отличие от БР, запитываемого синусоидальным напряжением промышленных частот, структура и микроскопические характеристики которого детально изучены, и высокочастотных БР с длительностью полупериода более 100 мкс, результаты исследований которых можно найти в литературе, сведения о параметрах серий микроразрядов и характеристиках микроканалов БР, формируемых кратковременными импульсами напряжения, ограничены [3, 5]. Это обстоятельство стимулировало исследования БР микросекундного диапазона, результаты которых представлены в данной работе.

Исследовались характеристики БР в воздухе атмосферного давления в промежутке с однородной геометрией электрического поля. Экспериментальная установка аналогична [5]. Для возбуждения разряда использовался генератор высоковольтных импульсов, разработанный по схеме [6]. Генератор работал в режиме однократных импульсов или с частотой следования импульсов от долей Гц до нескольких кГц. При этом на электродах

разрядной камеры формировались квазисинусоидальные импульсы напряжения, состоящие из двух полувольт. Амплитуда первой полувольты достигала 9 кВ при скорости роста напряжения 4 кВ/мкс, длительность полувольты 5 мкс. Во второй полувольте амплитуда не превышала 2,5 кВ. Разрядный промежуток камеры образован кольцевыми электродами с внешним и внутренним диаметром 48 мм и 24 мм, соответственно. Площадь электродов составляла $13,5 \text{ см}^2$. Электроды изготовлены из нержавеющей стали и устанавливались на изоляторе. Между электродами, на расстоянии $d = 0,6 \text{ мм}$ от каждого, на диэлектрических вставках размещалась пластина толщиной 1 мм. Пластина изготовлена из кварца типа КУ-1. Ввод и вывод воздуха осуществлялся через отверстия в электродах. Объемная скорость потока равнялась 1 л/мин. Для стабилизации пробоя использовалась предварительная автоионизация промежутка излучением коронного разряда с иницирующими элементами. Элементы иницирования представляют собой дуги, изготовленные из полосок никелевой фольги шириной 2 мм, толщиной 0,1 мм. Полоски располагались над центральными отверстиями электродов и касались поверхности диэлектрика.

В экспериментах регистрировались напряжение U на электродах, интегральный ток I разряда, токи $I_{\text{кан}}$ отдельных микроканалов и их отпечатки, а также излучение J разряда в ультрафиолетовой области 0,3–0,36 мкм и спектр разряда. По осциллограммам токов I и $I_{\text{кан}}$ вычислялся заряд Q , переносимый серией микрозарядов и заряд q , переносимый отдельным микрозарядом.

Измерения временных и амплитудных характеристик сигналов производились с помощью осциллографов НР 54542А и НР 54720D. Для измерения межэлектродного напряжения U применялся малоиндуктивный резистивный делитель. Интегральный ток I регистрировался поясом Роговского. Для измерения токов проводимости $I_{\text{кан}}$ отдельных микрозарядов использовалась методика секционирования электродов [7]. Регистрация осуществлялась двумя токоприемными площадками диаметром $D = 1,5 \text{ мм}$, монтируемыми в диаметрально противоположных отверстиях диаметром 2,5 мм, в одном из электродов на расстоянии 37 мм друг от друга. Токоприемники подключались к шунтам, изготовленным из высокочастотных резисторов сопротивлением 1 Ом и размещенным в коаксиальные обратные токопроводы.

Структура микрозарядов БР изучалась по эрозионным пятнам, возникающим на измерительных площадках после прохождения импульсов тока $I_{\text{кан}}$. Отпечатки каналов фотографировались микроскопом с увеличением до 400 раз. С целью повышения контрастности отпечатков в некоторых экспериментах на поверхность площадок и электродов наносился тонкий ($< 0,25 \text{ мкм}$) слой сажи. После каждого опыта электрод

заново полировался.

Временная привязка к моменту пробоя и принадлежность микроразряда к порядковому номеру серии осуществлялась по осциллограммам напряжения, интегрального тока и излучения. С помощью токоприемных площадок регистрировалась и задержка t_1 между появлением микроразрядов в пределах одной серии.

Излучение разряда выводилось по кварцевому световоду диаметром 0,6 мм. Апертура световода составляла 25° и охватывала центральную область разрядного промежутка (11-12% объема межэлектродного пространства). При этом измерительные площадки находились вне апертуры. Излучение регистрировалось фотоумножителем типа СНФТ-3. Перед детектором помещались светофильтры и ослабители. Для регистрации спектра разряда использовался спектрограф ИСП-30 с шириной щели 20–40 мкм, устанавливаемый вместо фотоумножителя на выходе световода. Регистрация спектра производилась при частоте 1,6 кГц, время экспозиции 4–6 часов.

Эксперименты показали, что БР возбуждается на фронте или в максимуме импульса напряжения в диапазоне 4.5–9 кВ и горит только во время первых полуволн импульсов. Типичные осциллограммы U , I , J , и $I_{\text{кан}}$ для одной и нескольких серий микроразрядов представлены на рис.2 и рис.3.

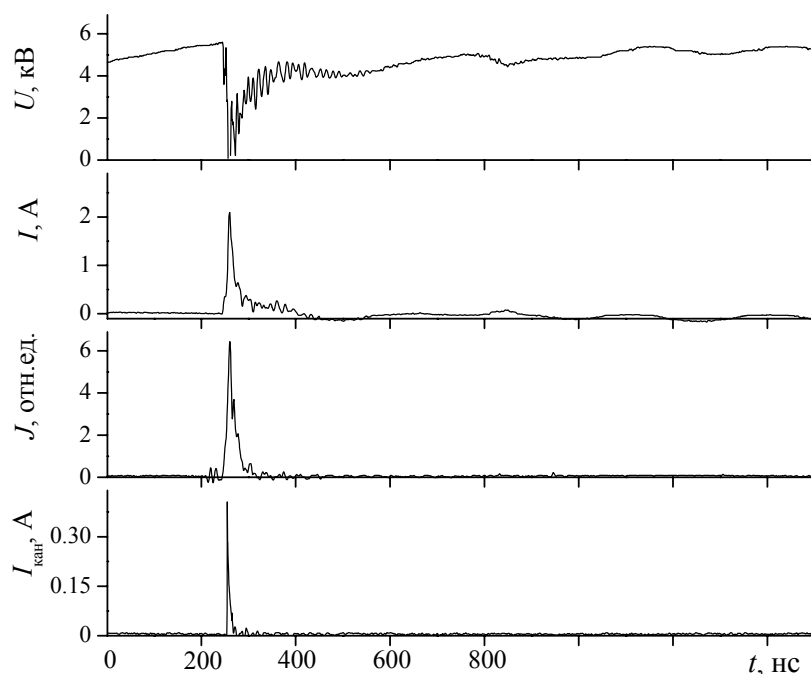


Рис. 2. Осциллограммы сигналов одной серии микроразрядов.

Установлено, что основными параметрами, определяющими число серий микроразрядов N , формируемых в течение импульса питания и их длительность, являются

напряжение пробоя первой серии $U_{пр}$ и заряд, переносимый первой серией микрозарядов. Так при $U_{пр} > 8$ кВ, разряд, как правило, представлен только одной серией. Длительность, соответствующего ей импульса излучения J , составляет на полувысоте $t_j = 5-15$ нс. При меньших $U_{пр}$, напряжение в течение импульса питания вновь поднимается до пробивного и в промежутке формируются повторные серии. Так для $U_{пр} < 6$ кВ, $N = 1-5$ при среднем значении $N = 4$. При этом для первой серии $t_j = 5-30$ нс, для повторных $t_j = 50-300$ нс. При высоких $U_{пр}$ токи первых серий обычно превышают токи повторных. Зависимость N от заряда, перенесенного в первой серии, – обратная. Даже для относительно невысоких $U_{пр}$ при больших Q , разряд может быть представлен единственной серией (рис.2).

Исследования микрозарядов показали, что амплитуды $I_{кан}$, их длительности на полувысоте $\tau_{0,5}$ и размеры отпечатков микроканалов лежат в широком диапазоне величин. В случае положительной полярности напряжения на токоизмерительных площадках, при $U_{пр} > 8$ кВ (единственная серия) зарегистрированы токи $I_{кан}$ амплитудой до 5 А, длительностью $\tau_{0,5} = 0,5-2$ нс. При этом отпечатков токовых каналов не обнаружено, в том числе и в тех опытах, когда площадки и электроды покрывались сажей.

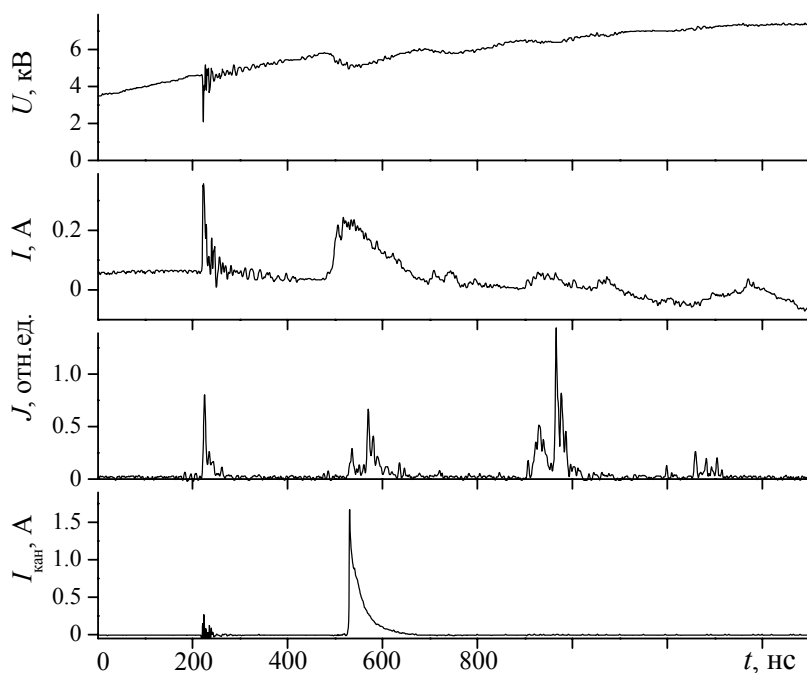


Рис. 3. Осциллограммы сигналов четырех серий микрозарядов.

При $U_{пр} = 6-8$ кВ токи микрозарядов достигают $I_{кан} = 2$ А как в первой, так и в повторных сериях, их длительность составляет в первой серии $\tau_{0,5} = 1-3$ нс и $\tau_{0,5} = 7-10$ нс в повторных. Отпечатки обнаружены при $I_{кан} \geq 0,5-1$ А, причем только в опытах с сажевым покрытием площадок, и только для микрозарядов повторных серий. Диаметр

отпечатков не превышает 1 мкм. В случае нескольких автографов, обнаруженных на площадке, ток $I_{\text{кан}}$ промодулирован и число пиков совпадает с числом отпечатков. Интервал между пиками 2–5 нс. Для $U_{\text{пр}} < 6$ кВ в микрозарядах первой серии $I_{\text{кан}}$ не превышают 0,5 А при длительности $\tau_{0,5} = 3–7$ нс. В повторных сериях токи $I_{\text{кан}}$ достигают 1,7 А при $\tau_{0,5} = 8–25$ нс. И в этом случае зарегистрированные отпечатки принадлежат микрозарядам только повторных серий. На напыленных электродах микрозаряды распыляют сажу, оголяя поверхность электрода или вжигают её в электрод, и оставляют отпечатки диаметром до 7 мкм. На поверхности ненапыленных площадок и электродов автографы представляют собой микрократеры диаметром до $D_{\text{кан}} = 4$ мкм глубиной до $h = 0,5$ мкм, причем внутри кратеров диаметром более 2 мкм расположен керн.

Эксперименты показали, что смена полярности электрода на характеристики микрозарядов первой серии влияния не оказывает. Вместе с тем, обнаружено, что токи микрозарядов повторных серий при отрицательной полярности заметно ниже, чем в случае положительной. Так максимальное зарегистрированное значение $I_{\text{кан}}$, для первой серии равно $I_{\text{кан}} = 5$ А, для повторных $I_{\text{кан}} = 0,5$ А, при этом эрозионные пятна не зарегистрированы.

Типичные значения заряда $Q = \int I(t)dt$, переносимого первой и последующими сериями микрозарядов, вычисленные для различных $U_{\text{пр}}$ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Величины заряда, переносимого в сериях микрозарядов

$U_{\text{пр}}$, кВ	первая серия		повторные серии	
	Q , нКл	q , нКл	Q , нКл	q , нКл
8–9	16–40	0,5–10	—	—
6–8	8–20	0,2–5	1–20	0,1–20
5–6	0,4–10	0,05–3	1–50	0,05–45

Измерения t_1 показали, что задержка между двумя микрозарядами первой серии, регистрируемыми измерительными площадками, лежит в диапазоне от нуля до максимального значения, определяемого $U_{\text{пр}}$. С увеличением $U_{\text{пр}}$ разброс значений t_1 уменьшается. Так при $U_{\text{пр}} < 6$ кВ максимальное значение $t_1 = 25$ нс, а при $U_{\text{пр}} > 8$ кВ задержка не превышает 10 нс. В отличие от первой, в последующих сериях появление микрозарядов происходит с большим временным разбросом (t_1 до 300 нс). Количество микрозарядов в них изменяется в широких пределах и зависит от переносимого заряда: при $q > 20$ нКл серию может представлять всего один микрозаряд.

В спектре разряда зарегистрированы яркие полосы второй положительной системы азота: 405,9 нм (полоса 0–3), 380,5 нм (полоса 0–2), 357,7 нм (полоса 0–1), 337,1 нм (полоса 0–0), 315,9 нм (полоса 1–0), а также полоса 391,4 нм первой отрицательной системы азота. Время жизни соответствующих состояний не превышает 1 нс и излучение должно повторять форму импульса тока. Однако, корреляция между импульсами I и J наблюдается только для первой серии микроразрядов; отношение их амплитуд I/J изменяется от импульса к импульсу не более чем на 50%. Это означает, что в первой серии микроразряды распределены в промежутке достаточно однородно. В повторных сериях излучение микроразрядов часто не попадает в апертуру световода, что вызывает несоответствие между отдельными импульсами на осциллограммах I и J (рис. 3).

В отличие от большинства исследованных БР [3, 4] разряд сформирован при $pd < 200$ Торр·см и, как показали оценки, во всем диапазоне напряженностей поля в газовом промежутке ($E/p < 70$ В/см·Торр) длина лавино-стримерного перехода превышает d , что характерно для таунсендовского механизма пробоя. Вместе с тем, малые времена запаздывания пробоя ($< 2,5$ мкс) дают основания полагать, что в отличие от классического таунсендовского разряда, здесь стадия лавинных поколений обеспечивается фотопроцессами [8].

Во всем диапазоне $U_{пр}$ в первых сериях микроразряды распределены по поверхности электродов практически равномерно и, по-видимому, диффузны. Оценку снизу плотности тока $j_{кан}$ в этих каналах можно получить, полагая диаметр канала $D_{кан}$ равным диаметру D токоприемной площадки, что дает $j_{кан} = 28–280$ А/см². В таблице 2 приведены результаты обсчета осциллограмм для максимальных $I_{кан}$ при двух значениях $U_{пр}$ и оценки параметров каналов, выполненные в этом же предположении. Здесь U_d – напряжение на газовом промежутке d в момент пробоя, рассчитанное с учетом отношения емкости газового промежутка к емкости диэлектрического барьера, τ_f , $\tau_{0,1}$ – фронт и длительность импульса тока по уровню 0,1. Энерговыведение в канале $W_{кан} = \int I_{кан} U dt$, удельная мощность $P = j_{кан} E$, максимальная плотность электронов $n \approx j_{кан} / ev$, где e и v – заряд и скорость дрейфа электронов.

Таблица 2. Параметры микроразрядов

$U_{пр}$	U_d	$I_{кан}$	τ_f	$\tau_{0,5}$	$\tau_{0,1}$	E/p	$j_{кан}$	$W_{кан}$	P	q	n
кВ	кВ	А	нс	нс	нс	В/см·Торр	А/см ²	мкДж	W/см ³	пС	см ⁻³
9	6,35	5	0,6	1	5,7	70	280	50	$1,7 \cdot 10^7$	10	$6 \cdot 10^{13}$
6,5	4,6	1,2	2	2,5	5	50	67	8	$3 \cdot 10^6$	3	$2 \cdot 10^{13}$

Как следует из таблицы 2, несмотря на существенно большие амплитудные значения $I_{\text{кан}}$ и мощности, такие параметры как плотность тока, концентрация электронов и энергосодержание каналов в исследуемом БР близки к параметрам микроразрядов, регистрируемым в БР на промышленных частотах и полученным в теоретических расчетах [9]. Экспериментальные данные позволяют оценить рост температуры ΔT в каналах первой серии как $\Delta T \approx W_{\text{кан}} / \rho C_p V_{\text{кан}}$, где ρ , C_p – плотность и удельная теплоемкость воздуха, $V_{\text{кан}}$ – объем канала в предположении $D_{\text{кан}} = D$. Полагая, что вся введенная энергия идет на нагрев, для данных таблицы 2, получаем $\Delta T = 6\text{--}35$ К.

Следует отметить значительные заряды, переносимые в первой серии при $U_{\text{пр}} > 8$ кВ (таблица 1). Очевидно, большой перенесенный заряд обуславливает спад напряжения на промежутке, что объясняет зависимость N от напряжения и от Q первой серии.

В отличие от первой, в последующих сериях разряд имеет ярко выраженную канальную структуру и по совокупности параметров, близок к искровому [8]. Микроразряды повторных серий отличаются большими длительностями, здесь достигаются большие значения q и $W_{\text{кан}}$ (до 100 мкДж). Особо отметим наличие эрозионных пятен. Если предположить, что весь ток микроразряда протекает через анодное пятно, то оценка плотности тока для рис. 4 ($D_{\text{кан}} \approx 3,5$ мкм, $I_{\text{кан}} = 1,7$ А) дает $j_{\text{кан}} \approx 1,7 \cdot 10^7$ А/см². Очевидно, что это завышенная оценка и не учитывает тока по периферии пятна. Вместе с тем, наличие эрозионных пятен глубиной до 0,5 мкм на поверхности металла, температура испарения которого $\sim 3300^\circ\text{К}$, говорит о высоком локальном энерговыделении. Оценки энергии, необходимой для образования микрократера на рис. 4 ($D_{\text{кан}} \approx 3,5$ мкм, $h \approx 0,5$ мкм), дают $W \sim 1$ мкДж при энергосодержании канала $W_{\text{кан}} \approx 90$ мкДж. Тонкая структура БР изучалась в основном оптическими методами и, согласно результатам измерений, минимальные диаметры каналов микроразрядов составляют 0,1–0,3 мм [3, 4]. Однако в литературе неоднократно отмечалась сложность измерений “геометрических” параметров токовых каналов (диаметров стримеров и искр, распределений плотностей токов) оптическими и электронно-оптическими методами [10]. Это обусловлено низкой (не лучше 0,1 мм) интегральной разрешающей способностью аппаратуры, особенно в составе высоковольтных установок. С другой стороны, на фоне светящейся внешней оболочки большого диаметра внутренняя структура канала может быть не различима. Результаты, полученные в данной работе, дают основания предполагать возможность формирования аналогичных микроканалов и в частотных типах БР.

Причина различного характера разряда в первой и в последующих сериях не вполне ясна. Возможно, контракция БР обусловлена предисторией: повторные серии формируются в промежутке, однородное поле которого искажено зарядами, перенесенными микроразрядами первой серии.

Таким образом, число серий микроразрядов БР определяется напряжением пробоя и зарядом, переносимым первой серией микроразрядов. Параметры микроразрядов первой и последующих серий БР различны. Микроразряды первой характеризуются относительно низкой плотностью тока и температурой и, по-видимому, диффузны. В последующих сериях БР контрагирован. Микроразряды повторных серий имеют выраженную канальную структуру с высокой плотностью тока, диаметры микроканалов существенно меньше, зарегистрированных в БР ранее. Предположительно, формирование канальной структуры обусловлено неравномерным распределением зарядов, перенесенных на диэлектрический барьер первой серией микроразрядов.

Литература

1. Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И., Репин П.Б. Озонатор для медицинских целей // Тез. докл. II Всеросс. научно-практической конф. "Озон в биологии и медицине", Н. Новгород, 1995, С. 103.
2. Пантелеев В.И., Косарев А.В. Генератор озона ОЗОН-М-50 // Тез. докл. III Всеросс. научно-практической конф. "Озон и методы эфферентной терапии в медицине", Н. Новгород, 1998, С. 232.
3. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: МГУ, 1989.
4. Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона, М.: МГУ, 1998.
5. Buranov S.N., Gorokhov V.V., Karelin V.I., Repin P.B. Wide-Range Medical Ozonator with Precise Concentration Ozone Generation // Digest of Techn. Papers 12 IEEE International Pulsed Power Conf. Monterey, USA, 1999, Vol. 2, P. 1421-1424.
6. Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И. Репин П.Б. // ПТЭ, 1999, № 1, С. 134-136.
7. Verhaart H.F.A., Laan P.C.T. // J. Appl. Phys, 1982. Vol. 53, № 3, P. 1430-1436.
8. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде, Новосибирск: Наука, 1982.
9. Гибалов В.И., Пич Г. // Журнал физической химии. 1994, Т. 68, № 5, С. 931-938.
10. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. М.: МФТИ, 1997.