

Эффект «памяти» микрозарядов барьерного разряда в потоке воздуха

*Е. А. Усенов, Ю. С. Акишев, А. В. Петряков, Т. С. Рамазанов,
М. Т. Габдуллин, А. Аширбек, А. К. Акильдинова*

Исследована динамика микрозарядов синусоидального барьерного разряда в рельсовой геометрии электродов, вдоль которых продувался воздух при атмосферном давлении. Цель работы – выяснение роли объемной плазмы и поверхностных зарядов в эффекте «памяти» микрозарядов. На основании анализа изображений микрозарядов, полученных с использованием высокоскоростной съемки, установлено, что перенос плазмы микрозарядов газовым потоком является определяющим в локализации микрозаряда в каждом последующем полупериоде приложенного напряжения. Важную роль играет турбулентность потока и наличие в нем вихрей, которые определяют как скорость переноса плазменных каналов, так и вероятность возникновения микрозарядов в конкретном полупериоде. Результаты работы показывают практическую возможность газодинамического управления параметрами барьерного разряда.

Ключевые слова: барьерный разряд, турбулентный поток, «память» микрозарядов.

Ссылка: Усенов Е. А., Акишев Ю. С., Петряков А. В., Рамазанов Т. С., Габдуллин М. Т., Аширбек А., Акильдинова А. К. // Прикладная физика. 2019. № 5. С. 12.

Reference: E. A. Usenov, Yu. S. Akishev, A. V. Petryakov, T. S. Ramazanov, M. T. Gabdullin, A. Ashirbek, and A. K. Akil'dinova, Prikl. Fiz., No. 5, 12 (2019).

Введение

Неравновесная низкотемпературная плазма (НТП) при атмосферном давлении является эффективным источником биохимически активных частиц (метастабилы, радикалы, атомы и т. д.), конкретный состав которых определяется газовой смесью и типом разряда, используемого для генерации НТП. В частности, объемный барьерный разряд (ОБР) давно и

широко используется в научных и практических целях для создания НТП [1, 2]. ОБР создается синусоидальным или импульсно-периодическим напряжением, прикладываемым между близкорасположенными электродами, по крайней мере, один из которых покрыт диэлектриком. Наличие диэлектрического барьера на электродах приводит к ограничению тока ОБР, что предотвращает его переход в сильноточный дуговой разряд. Кроме

Усенов Ерболат Абуталипулы¹, н.с.
Акишев Юрий Семенович^{2,3}, зав. лаб., д.ф.-м.н., профессор.

Петряков Александр Викторович², н.с.
Габдуллин Маратбек Тулепбергенович^{1,5}, в.н.с., к.ф.-м.н.
Рамазанов Тлеккабул Сабитович⁴, академик НАН РК, д.ф.-м.н., профессор.

Аширбек Азамат⁶, м.н.с.
Акильдинова Айнура Кайратбековна¹, м.н.с.

¹ ННЛОТ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби.
Казахстан, 050040, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71.

² АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ».
Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12.
Тел. 8(495) 841-52-36. E-mail: akishev@triniti.ru

³ НИЯУ МИФИ.

Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

⁴ Национальная академия наук Республики Казахстан.
Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28.

⁵ Казахстанско-Британский технический университет.
Казахстан, 050000, г. Алматы, ул. Толеби, 59.
E-mail: gabdullin@physics.kz

⁶ Институт прикладных наук и информационных технологий.
Казахстан, 050040, г. Алматы, ул. Манас, 34/1.

Статья поступила в редакцию 5 августа 2019 г.

© Акишев Ю. С., Петряков А. В., Габдуллин М. Т., Усенов Е. А., Акильдинова А. К., Рамазанов Т. С., Аширбек А., 2019

того, возникающий в каждом полупериоде ОБР является самоограничивающимся разрядом, поскольку протекание тока между барьерными электродами сопровождается отложением на диэлектриках зарядов противоположного знака, которые создают электрическое поле, направленное против поля, создаваемого внешним источником. В итоге результирующее поле в газовом промежутке между электродами снижается до величины, уже не способной поддерживать разряд в данном полупериоде.

К настоящему времени выполнено большое число работ, посвященных различным аспектам ОБР [1]. В случае ОБР в воздухе большинство исследований проводились в покоящейся газе либо при его слабой прокачке через зону разряда, не превышающей долей метра в секунду. Как правило, в таких условиях разряд в межэлектродном промежутке имеет слабоупорядоченную дискретную структуру, формируемую множеством разнесенных друг от друга микрозарядов, количество которых увеличивается с ростом амплитуды приложенного напряжения [1]. Из-за эффекта самоограничения ОБР микрозаряды возникают заново в каждом полупериоде. Наличие локализованных поверхностных зарядов, отложенных микрозарядами в предыдущем полупериоде, приводит к тому, что в следующем полупериоде, когда приложенное напряжение меняет знак, электрическое поле поверхностных зарядов будет складываться с внешним полем от приложенного напряжения. Указанное явление приводит к усилению результирующего поля в выделенных местах, и потому новые микрозаряды возникнут примерно там же, где были микрозаряды в предыдущем полупериоде. Этот эффект называется «пространственной памятью» ОБР, который позволяет удерживать фиксированное пространственное положение микрозарядов в течение порядка ста периодов синусоидального напряжения. Однако на больших временах все же происходит их медленная и хаотическая миграция по поверхности электродов [3], т. е. пространственная память является ограниченной по времени.

Пространственная память микрозарядов определяется не только их отложенными на барьерах поверхностными зарядами, но и плазмой, создаваемой каждым микрозарядом

в объеме межэлектродного промежутка. Причина в том, что плазменный канал, созданный между барьерами в предыдущем полупериоде, частично сохраняет свою проводимость до следующего полупериода. Поэтому существует большая вероятность, что микрозаряд в следующем полупериоде будет развиваться именно в плазменном канале предыдущего микрозаряда. На такую возможность указывалось в работе [4]. В то же время экспериментальное исследование этой возможности не проводилось. В настоящее время вопрос о соотношении вкладов поверхностных зарядов и объемной плазмы в формирование пространственной памяти микрозарядов в ОБР остается открытым.

Вклад объемного и поверхностного механизмов в пространственную память ОБР можно разделить, если использовать прокачку газа через зону разряда. В этом случае плазменный канал каждого микрозаряда будет перемещаться вместе с газовым потоком вдоль электродов, в то время как поверхностные заряды, отложенные микрозарядом на поверхности диэлектрических барьеров, остаются на прежнем месте, т. е. их локализация фиксирована. Перемещение микрозарядов газовым потоком наблюдалось, например, в работах [5–9], в которых исследовался ОБР между плоскими электродами. Однако плоская геометрия электродов мало подходит для выяснения влияния потока на пространственную память микрозарядов, распределенных по двум направлениям. Причина в том, что при фотографировании большого количества микрозарядов в направлении поперек тока происходит наложение их изображений друг на друга. Более подходящей является электродная система, состоящая из двух длинных и одинаковых трубчатых барьерных электродов, параллельных друг другу – это так называемая рельсовая геометрия электродов. При небольшом диаметре трубчатых электродов между ними будет возбуждаться только один ряд микрозарядов в плоскости симметрии электродной системы, что дает возможность проследить за динамикой фактически каждого из микрозарядов в этом ряду.

Целью данной работы является исследование влияния продольного потока воздуха при атмосферном давлении на поведение мик-

роразрядов и их пространственную память в ОБР, формируемом между двумя длинными трубчатыми электродами.

Экспериментальная установка

Для проведения экспериментов с ОБР были изготовлены три газоразрядные ячейки, отличающиеся только величиной межэлектродного расстояния. Конструкция электродов в разрядных ячейках имела рельсовую геометрию и состояла из двух параллельно расположенных кварцевых трубок ($\epsilon = 3,5$) с внешним и внутренним диаметром 7,7 и 5,9 мм и длиной 10 см. Воздушный зазор по кратчайшему расстоянию между поверхностями трубок составлял $h = 3, 4$ и 5 мм. К боковым сторонам трубок были герметически плотно прижаты две прозрачные пластины из кварца для наблюдения за разрядом. Кварцевые трубки были наполнены соленой водой (21,5 г. соли на 0,2 л воды). Внутри трубок вдоль их оси натянута медная проволока диаметром 1,77 мм, одна из которых заземлялась через малоиндуктивный токовый шунт с сопротивлением $R = 51$ Ом, а ко второй проволоке подводилось высокое напряжение от синусоидального генератора PVM 500. С учетом размеров диэлектрических вставок для крепления проволоки, длина разрядной зоны составляла 40 мм.

Частота и амплитуда синусоидального напряжения могли варьироваться в диапазоне 20–30 кГц и 10–15 кВ соответственно.

Все эксперименты были выполнены в потоке воздуха (при комнатной температуре), направленном вдоль трубок. Скорость газового потока внутри ячейки варьировалась вплоть до 30 м/с. Измерение средней по времени скорости потока на оси разрядной системы проводилось на выходе из ячейки в отсутствие разряда трубкой Пито диаметром 0,5 мм, снабженной микроманометром ММН-2400 (5)-1.

Схема на рис. 1, а поясняет синхронизованную работу синусоидального генератора, 4-канального цифрового осциллографа (LeCroy WJ354A, 500 МГц) и высокоскоростной камеры (PhantomVEO 710S), снимающей с частотой 40000 кадров в секунду и временем экспозиции каждого кадра 20 мкс. Съемка микро-разрядов велась в перпендикулярном к ним направлении сквозь прозрачную кварцевую пластину. Вся схема запускалась включением ключа К1, подающего напряжение питания на синусоидальный генератор. Сигнал с генератора задержки запускал в нужный момент высокоскоростную камеру. Напряжение на разряде измерялось высоковольтным делителем Tektronix P6015 (1:1000), сигнал с которого запускал осциллограф. Ток разряда измерялся токовым шунтом.

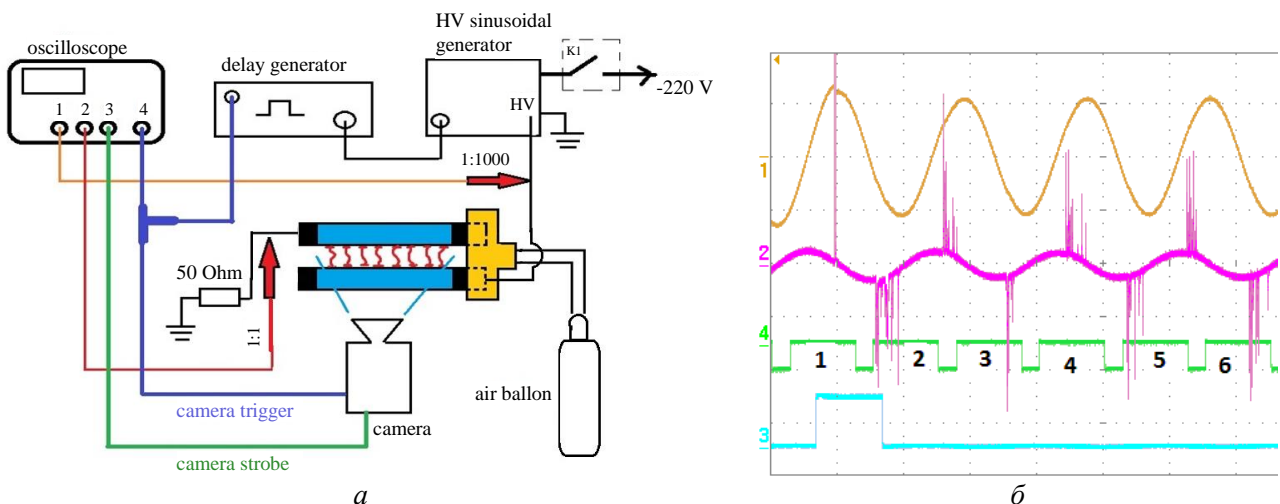


Рис. 1. Экспериментальная установка и её режим работы: а – функциональная схема оборудования по созданию и исследованию барьерного разряда в потоке воздуха; б – типичный набор синхронизованных осциллограмм напряжения (1 канал) и тока (2 канал) барьерного разряда, прямоугольного импульса генератора задержки, запускающего быструю камеру (3 канал), и импульсов камеры, показывающих место кадров на временной оси, время экспозиции кадра и интервал между кадрами (4 канал). Масштабы: 1 канал – 10 кВ/дел; 2 канал – 39,2 мА/дел; $[t] = 20$ мкс/дел. Скорость потока вдоль оси ячейки $V = 3$ м/с.

На рис. 1, б показана типичная осциллограмма напряжения (1 канал) и тока (2 канал) объемного барьерного разряда, а также прямоугольный импульс генератора задержки, запускающий камеру (3 канал), и синхронизованные с током и напряжением импульсы камеры, показывающие моменты съема кадров, время экспозиции кадров и интервал между кадрами (4 канал).

Результаты экспериментов

Каждый микроарзряд соответствует локальному пробое межэлектродного промежутка и сопровождается своим токовым импульсом. Сложение этих импульсов формирует осциллограмму полного тока ОБР. В каждом полупериоде микроарзряды появляются стохастически, что приводит к непостоянству амплитуды и количества импульсов тока от полупериода к полупериоду (см. рис. 1, б). Съёмка ОБР быстрой камерой показала, что в отсутствие потока токовые каналы микроарзрядов представляют собой

тонкие и прямые шнуры, которые перпендикулярны электродам и сохраняют свое местоположение в течение примерно 100 периодов приложенного напряжения. Каждый канал опирается на тонкие приэлектродные слои, простирающиеся вдоль электродов практически симметрично влево и вправо от канала на расстояние не более 0,5 мм.

Ситуация меняется при включении потока. В этом случае токовые каналы сносятся потоком и большинство (но не все!) становятся слегка изогнутыми в направлении потока (см. рис. 2 и рис. 3), а у некоторых каналов наблюдается как бы разрыв посередине. С ростом скорости потока отмечается увеличение светового диаметра токового канала и длины приэлектродных областей, что в среднем приводит к увеличению расстояния между соседними микроарзрядами. Кроме того, чем больше скорость, тем чаще наблюдается, что некоторые каналы микроарзрядов как бы исчезают на некоторое время, но затем вновь появляются ниже по потоку.

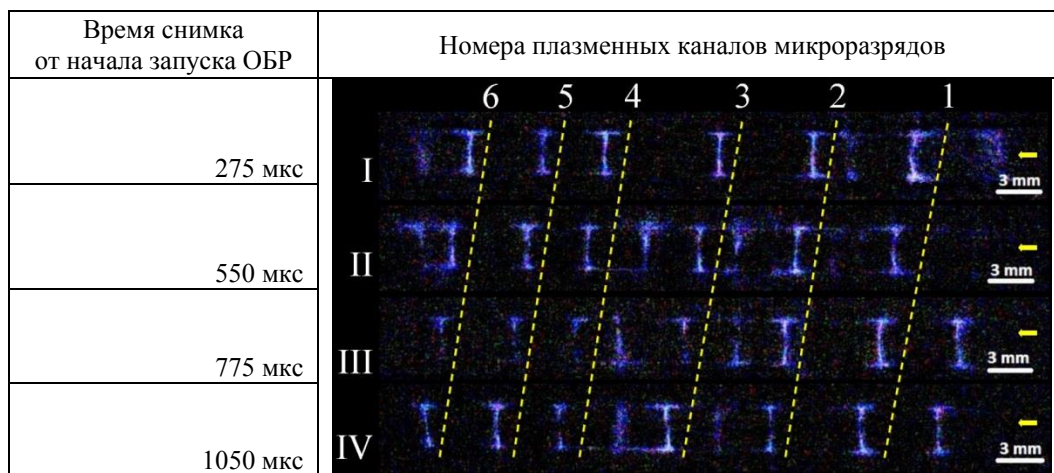


Рис. 2. Развертка во времени поведения микроарзрядов, показывающая их движение вдоль потока и стохастический характер возникновения токовых каналов. Показано четыре изображения, снятых из средней части рельсовых электродов с экспозицией 25 мкс. Поток направлен справа налево. Пунктирные линии показывают положение выделенного токового канала на разных снимках. Средняя скорость потока $V \approx 5$ м/с, $h = 3$ мм.

Таблица 1

Скорость V движения вдоль потока плазменных каналов выбранных микроарзрядов (МР), рассчитанная по смещению их изображений на снимках I–IV (рис. 2), а также их средняя скорость $\langle V \rangle$ за все время съемки

Скорость канала МР	Номера плазменных каналов микроарзрядов					
	1	2	3	4	5	6
$V(I \rightarrow II)$, м/с	4,9	4,5	5,2	4,4	4,2	4,8
$V(II \rightarrow III)$, м/с	4,9	3,8	5,0	4,0	3,7	3,3
$V(III \rightarrow IV)$, м/с	4,8	3,4	4,6	3,8	4,6	4,3
$\langle V \rangle$, м/с	$4,9 \pm 0,1$	$3,9 \pm 0,6$	$4,9 \pm 0,3$	$4,1 \pm 0,3$	$4,2 \pm 0,5$	$4,1 \pm 0,7$

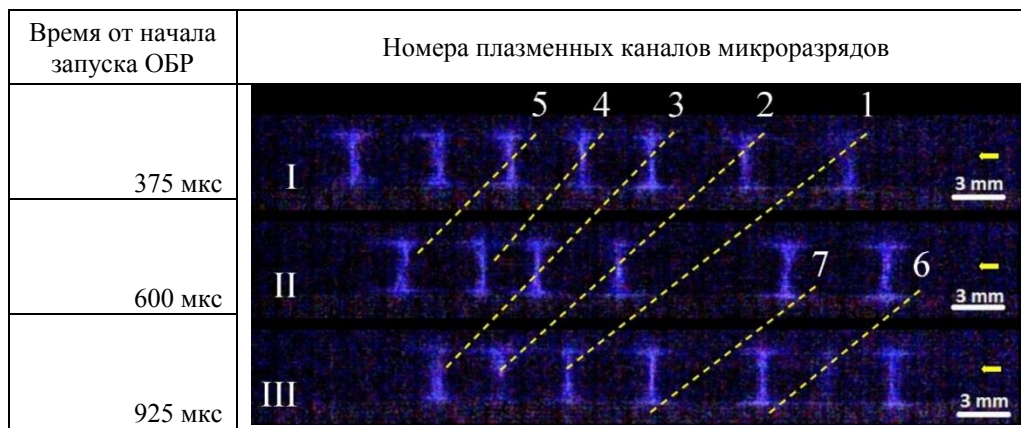


Рис. 3. Развертка во времени поведения микроразрядов в межэлектродном промежутке, показывающая их движение вдоль потока и стохастический характер возникновения токовых каналов. Показано три изображения, снятых из средней части рельсовых электродов с экспозицией 25 мкс. Поток направлен справа налево. Пунктирные линии показывают положение выделенного токового канала на разных снимках. Средняя скорость потока $V \approx 30$ м/с. Межэлектродное расстояние $h = 3$ мм. Заземленный электрод сверху каждого кадра.

Таблица 2

Скорость V движения вдоль потока плазменных каналов выбранных микроразрядов (МР), рассчитанная по смещению их изображений на снимках I–III (рис. 3)

Скорость канала МР	Номера плазменных каналов микроразрядов						
	1	2	3	4	5	6	7
$V(I \rightarrow II)$, м/с		32,2	29,6	26,6	27,2		
$V(II \rightarrow III)$, м/с		33,4				22,8	24,7
$V(I \rightarrow III)$, м/с	30,0						

Отмеченные особенности микроразрядов в потоке хорошо видны на рис. 2 и рис. 3, на которых приведены изображения микроразрядов, снятые в разные моменты времени в средней части рельсовой электродной системы при межэлектродном расстоянии $h = 3$ мм и при средних скоростях потока $V = 5$ и 30 м/с. Заземленный электрод находится вверху каждого кадра.

Используя фотографии на рис. 2 и рис. 3, были рассчитаны скорости переноса плазменных каналов в воздушном потоке в разные интервалы времени длительностью примерно по 250 мкс каждый и отстоящие на разное время от начала возбуждения барьерного разряда. Полученные результаты для скоростей потока $V = 5$ и 30 м/с представлены в табл. 1 и 2. Как видно, скорости плазменных каналов неодинаковы и заметно флуктуируют в большую и меньшую сторону относительно средней скорости потока, причем, чем больше скорость потока, тем больше величина флуктуаций. С ростом межэлектродного зазора h увеличивается среднее расстояние между соседними

микроразрядами, а также усиливается стохастичность в поведении микроразрядов, сопровождаемая увеличением числа исчезающих и вновь возникающих ниже по потоку каналов микроразрядов. Средняя мощность барьерного разряда слабо зависит от скорости, но слегка падает с ростом h .

Обсуждение результатов

Обсуждение результатов проводится на основе вполне разумного предположения, что при атмосферном давлении плазменные каналы микроразрядов являются «вмороженными» в нейтральный газ и потому переносятся вместе с ним. Справедливость данного предположения усиливается также тем обстоятельством, что перенос плазмы производится в направлении поперек электрического поля разряда. Другими словами, в объеме разряда, где практически отсутствует продольная компонента электрического поля, которая могла бы повлиять на перенос заряженных частиц вдоль потока, движение плазмы полностью

коррелирует с движением газового потока. Другой факт, который принимается во внимание, это отсутствие переноса поверхностных зарядов газовым потоком, т. е. поверхностные заряды считаются фиксированными в месте своего отложения на поверхности барьеров.

Для качественного объяснения полученных результатов необходимо также учесть, что газовый поток внутри разрядной ячейки переходит в турбулентный режим при меньших числах Рейнольдса по сравнению с потоком в гладкой трубе, в которой критическое число $Re \approx 2300$. Этому способствуют две причины. Первая – поперечное сечение разрядной ячейки имеет сложную форму, конфигурация которой создает сильное торможение потока в зонах состыковки диэлектрических трубок с боковыми пластинами, что способствует интенсивному вихреобразованию в потоке. Вторая – как показано в [10], микрозаряды импульсно и локально выделяют энергию в газовом потоке, что создает сильные газодинамические возмущения и способствует турбулизации потока. Таким образом, во всех исследованных режимах газовый поток в барьерном разряде является турбулентным и вихревым. Размер вихрей и частота их вращения определяются геометрией ячейки и скоростью потока соответственно. В условиях наших экспериментов характерная частота вихрей находится в килогерцовом диапазоне.

С учетом вышесказанного можно утверждать, что эксперименты с барьерным разрядом в потоке газа ясно свидетельствуют об определяющей роли плазмы токового канала микрозаряда в формировании его пространственной памяти. Другими словами, место возникновения микрозаряда в следующем полупериоде синусоидального напряжения определяется не локализацией поверхностного заряда, отложенного на барьерах в предыдущем полупериоде, но местом, в которое газовый поток переносит плазму предыдущего токового канала. Турбулентность потока и наличие в нем вихрей существенно влияют на взаимное расположение микрозарядов вдоль электродов и возможность их возникновения в конкретном полупериоде. Действительно, если плазменный канал подхвачен вихрем, элемент которого в данный момент движется в направлении потока, то скорость плазменного канала будет превышать среднюю скорость

газового потока. В противоположном случае скорость канала будет меньше скорости потока. Если вихрь выносит плазменный канал вбок из зоны с максимальным электрическим полем, то очередного пробоя, т. е. микрозаряда, в межэлектродном промежутке не будет до тех пор, пока вращение вихря не вернет вновь плазменный канал в зону с максимальным электрическим полем. Представленное объяснение согласуется с данными эксперимента.

Заключение

Экспериментально исследована динамика микрозарядов в объемном барьерном разряде (ОБР) в рельсовой геометрии электродов, вдоль которых продувался поток воздуха при атмосферном давлении. Цель экспериментов состояла в выяснении роли объемной плазмы и поверхностных зарядов в эффекте «памяти» микрозарядов.

На основании анализа изображений микрозарядов, полученных с использованием высокоскоростной съемки разряда, установлено, что перенос плазмы токовых каналов микрозарядов газовым потоком является определяющим в локализации возникновения микрозаряда в каждом полупериоде приложенного напряжения. Важную роль играет турбулентность потока и наличие в нем вихрей, которые определяют как скорость переноса плазменных каналов, так и возможность возникновения микрозарядов в конкретном полупериоде.

В целом, работа показывает необходимость учета газодинамической структуры потока при анализе барьерного разряда в проточных системах. В то же время она показывает практическую возможность газодинамического управления параметрами ОБР.

*Работа выполнена при поддержке
Министерства образования и науки
Республики Казахстан
(грант ИРН AP05134280) и Российского
Фонда Фундаментальных Исследований
(грант № 19-52-53003).*

ЛИТЕРАТУРА

1. Kogelschatz U. // Plasma Chem. Plasma Processing. 2003. Vol. 23. No. 1. P. 1.

2. Schoenbach K. H., Becker K. // Eur. Phys. J. D. 2016. Vol. 70. P. 29.
3. Akishev Yu., Aponin G., Balakirev A., Grushin M., Karalnik V., Petryakov A., Trushkin N. // Eur. Phys. J. D. 2011. Vol. 61. P. 421.
4. Akishev Yu., Aponin G., Balakirev A., Grushin M., Karalnik V., Petryakov A., Trushkin N. // Plasma Sources Sci. Technol. 2011. Vol. 20. P. 024005.
5. Jingfeng T., Liqiu W., Yuxin H., Jian S., Daren Y., Chaohai Z. // Plasma Science and Technology. 2016. Vol. 18. P. 273.
6. Haicheng Q., Wei G., Zihui F., Yidi L., Chunsheng R. // Plasma Science and Technology. 2016. Vol. 18. P. 520.
7. Fan Z., Qi H., Liu Y., Yan H., Ren Ch. // Physics of Plasmas. 2016. Vol. 23. P. 123520.
8. Fan Z., Yan H., Wang Y., Liu Y., Guo H., Ren Ch. // Physics of Plasmas. 2018. Vol. 25. P. 053517.
9. Fan Z., Yan H., Liu Y., Guo H., Wang Y., Ren Ch. // Physics of Plasmas. 2018. Vol. 25. P. 053519.
10. Акишев Ю. С., Зайцев М. Ю., Копьев В. А., Петряков А. В., Трушкин Н. И. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 14.

PACS: 52.80.–s

The “memory” effect of microdischarges of a barrier discharge in airflow

E. A. Usenov¹, Yu. S. Akishev^{2,3}, A. V. Petryakov², T. S. Ramazanov⁴,
M. T. Gabdullin^{1,5}, A. Ashirbek⁶, and A. K. Akil'dinova¹

¹ Al-Farabi Kazakh National University
71 al-Farabi Ave., Almaty, 050040, Kazakhstan

² SRC RF TRINITI
12 Pushkovykh st., Moscow, Troitsk, 108840, Russia
E-mail: akishev@triniti.ru

³ NRNU MEPhI
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia

⁴ National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan
28 Shevchenko st., Almaty, 050010, Kazakhstan

⁵ Kazakh British Technical University
59 Toleby st., Almaty, 050010, Kazakhstan
E-mail: gabdullin@physics.kz

⁶ International IT University
34/1 Manas st., Almaty, 050040, Kazakhstan

Received August 5, 2019

The experimental results on the dynamics of microdischarges of the volume barrier discharge in rail electrode geometry along which the atmospheric pressure airflow was blown are presented. The aim of this work is the clarification of a role of volume plasma and surface charges in the “memory” effect of microdischarges. On the basis of the analysis of the microdischarges images taken with the use of the high-speed camera, it is established that transportation of plasma channels by a gas flow defines the localization of emergence of every microdischarge in each subsequent half-cycle of the sinusoidal voltage. An important role plays the turbulence of airflow and existence in it of whirlwinds which determine both the speed of plasma channels transportation and the possibility for the appearance of microdischarges in a concrete half-cycle. Results show a possibility to control the parameters of a barrier discharge by gas dynamics.

Keywords: barrier discharge, turbulent flow, memory of microdischarge.

REFERENCES

1. U. Kogelschatz, Plasma Chem. Plasma Processing **23** (1), 1 (2003).
2. K. H. Schoenbach and K. Becker, Eur. Phys. J. D **70**, 29 (2016).
3. Yu. Akishev, G. Aponin, A. Balakirev, M. Grushin, V. Karalnik, A. Petryakov and N. Trushkin, Eur. Phys. J. D, **61**, 421 (2011).
4. Yu. Akishev, G. Aponin, A. Balakirev, M. Grushin, V. Karalnik, A. Petryakov, N. Trushkin, Plasma Sources Sci. Technol. **20**, 024005 (2011).
5. T. Jingfeng, W. Liqiu, H. Yuxin, S. Jian, Y. Daren, and Z. Chaohai, Plasma Science and Technology **18**, 273 (2016).
6. Q. Haicheng, G. Wei, F. Zhihui, L. Yidi, and R. Chunsheng, Plasma Science and Technology **18**, 520 (2016).
7. Z. Fan, H. Qi, Y. Liu, H. Yan, and Ch. Ren, Physics of Plasmas **23**, 123520 (2016).
8. Z. Fan, H. Yan, Y. Wang, Y. Liu, H. Guo, and Ch. Ren, Physics of Plasmas **25**, 053517 (2018).
9. Z. Fan, H. Yan, Y. Liu, H. Guo, Y. Wang, and Ch. Ren, Physics of Plasmas **25**, 053519 (2018).
10. Yu. Akishev, M. Zaitsev, V. Kopiev, A. Petryakov, and N. Trushkin, Prikl. Fiz., No. 6, 14 (2018).