

DOI: 10.18721/JPM.11207

УДК 533.9

АСИММЕТРИЧНЫЙ БАРЬЕРНЫЙ РАЗРЯД В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ РЕЖИМЕ

Д.Г. Коренюгин¹, А.М. Марциновский²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе приведены результаты исследования асимметричного барьерного разряда в воздухе при атмосферном давлении. Разрядная система состояла из полусферического электрода малого радиуса и плоскостного электрода, с диэлектрическим покрытием на обоих элементах. Разряд возбуждался цугом почти синусоидальных затухающих колебаний, который подавался на электроды с заданной частотой. Обнаружено, что в исследованном диапазоне напряжений 7 – 15 кВ всегда реализуется предпочтительная для биологических применений однородная лавинная форма разряда, в отличие от случая проводящей полусферы, когда в идентичных условиях возбуждалась только стримерная форма. Установлено, что положительный и отрицательный (по знаку напряжения первого импульса цуга на малом электроде) разряды существенно различаются по своим характеристикам. Предложено объяснение этого явления, которое мы связываем с различием в накоплении и нейтрализации поверхностных зарядов на пластине и на полусфере.

Ключевые слова: барьерный разряд; цуг импульсов; лавинная и стримерная формы разряда

Ссылка при цитировании: Коренюгин Д.Г., Марциновский А.М. Асимметричный барьерный разряд в пульсирующем режиме // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 2. С. 73 – 83. DOI: 10.18721/JPM.11207

AN ASYMMETRICAL DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE IN THE PULSED MODE

D.G. Korenyugin¹, A.M. Martsinovsky²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;

² The Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

The paper presents the results of an investigation of an asymmetric dielectric barrier discharge (DBD) in the air at atmospheric pressure. The discharge system consisted of a plane electrode and semispherical short-radius one, and the both were coated with dielectric. The discharge was excited by a train of almost sinusoidal damped oscillations which was applied to electrodes with a frequency of 1 kHz. It has been found that the preferable to biological applications homogeneous avalanche form of the DBD is always realized in the investigated voltage range 7 – 15 kV, whereas the streamer form of the discharge is excited under identical conditions in the case

of a conducting semisphere. It was also established that the positive and negative (according to the voltage sign of the first pulse of the train onto the small electrode) discharge differed greatly in their characteristics. An explanation for this difference has been proposed.

Key words: dielectric barrier discharge; pulse train; avalanche; streamer form; discharge mode

Citation: D.G. Korenyugin, A.M. Martsinovsky, An asymmetrical dielectric barrier discharge in the pulsed mode, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 11 (2) (2018) 73 – 83. DOI: 10.18721/JPM.11207

Введение

Барьерный разряд – это газовый разряд, который происходит в зазоре между электродами, где, как минимум, один из электродов имеет диэлектрическое покрытие. Такие разряды традиционно применяются для различных целей, причем, как правило, их разрядные системы имеют плоскопараллельную электродную конфигурацию. При достаточно узком межэлектродном зазоре (миллиметры) распределение электрического поля в области разряда можно считать однородным, так что данный вид барьерного разряда является симметричным, и он хорошо изучен. Однако для некоторых практических целей, связанных в основном с применением плазменных технологий в медицине, активно изучаются более сложные асимметричные барьерные разряды с неоднородным профилем распределения электрического поля. Разрядные системы таких барьерных разрядов обычно представляют собой ячейки, в которых один из электродов плоский, а другой может иметь произвольную форму. Наиболее часто встречаются электродные системы типа шар – плоскость, острие – плоскость.

Основной формой существования асимметричного барьерного разряда в воздухе при атмосферном давлении является его коронная стримерная форма [1, 2]; она и используется для практических целей. Но иногда применение разряда в этой форме нежелательно – в частности, в медицине и биологии, где нужно с помощью разряда за короткое время обработать (стерилизовать) на сравнительно большой площади открытые раны или бактериальные образцы [3 – 5]. Стримерная форма для этого недостаточно однородна, и стримеры в принципе могут повреждать живые ткани. В связи с этим большой интерес представ-

ляет поиск более стабильной однородной лавинной формы разряда. Так, по данным работы [6], оказалось, что при возбуждении асимметричного разряда в воздухе высоковольтными цугами напряжения, его однородная форма возникает в области частот цуга $f \approx 10$ МГц при межэлектродном расстоянии $L \leq 0,4$ см. Но при более низких частотах цуга и больших расстояниях (что существенно облегчает практическое применение) разряд всегда переходил в стримерную форму. Поэтому поиск режимов однородного асимметричного барьерного разряда, удобных для использования на практике, актуален, как и выяснение условий (и причин) существования лавинной и стримерной форм.

Цель настоящего исследования состояла в поиске оптимальных режимов асимметричного барьерного разряда с его однородной формой.

Данная работа продолжает изучение разряда такого типа, начатое в 2008 году для разрядной системы с одним диэлектрическим электродом [2, 7]. В соответствии с указанной целью, была поставлена задача перейти к системе с двумя диэлектрическими электродами и сравнить характеристики и закономерности разряда для двух случаев.

Методика эксперимента

Исследование асимметричного барьерного разряда в воздухе при атмосферном давлении проводилось в разрядной ячейке (рис. 1). Если ранее (см. работы [2, 7]) в такой ячейке в качестве малого электрода над плоскостью использовался металлический или жидкофазный (проводящий) электрод, то теперь на поверхность металлического сферического электрода 2 радиусом $r = 0,3$ см было нанесено непроводящее полимерное покрытие (ацетобутират целлю-

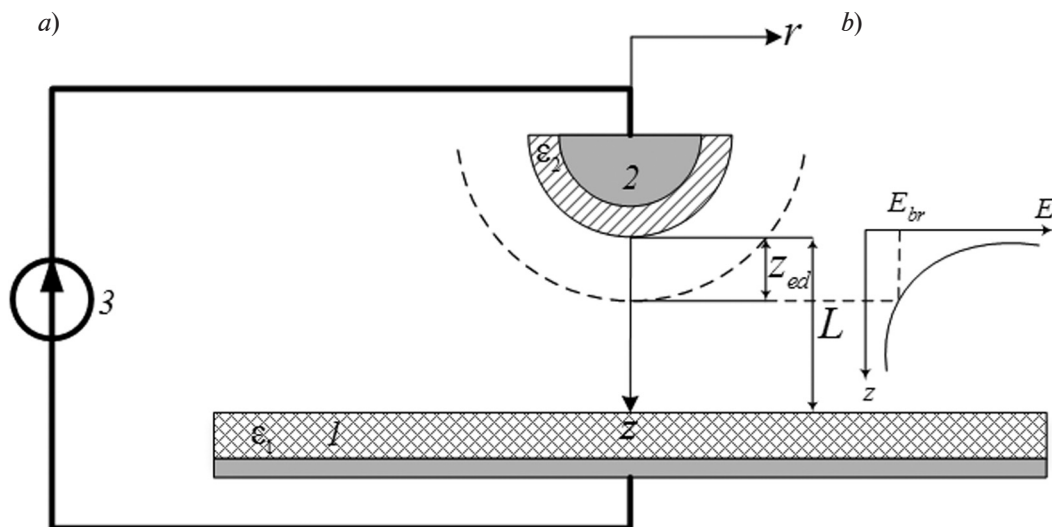


Рис. 1. Схематическое изображение разрядной ячейки (а) и распределения электрического поля в межэлектродном промежутке (b):

1 – плоская стеклянная пластина с проводящим покрытием, 2 – металлический сферический электрод с непроводящим полимерным покрытием, 3 – источник высоковольтных затухающих цугов почти синусоидального разнополярного напряжения; L, z_{ed}, E_{br} – характерные параметры барьерного разряда; z, r – координатная система; E – напряженность электрического поля; ϵ_1, ϵ_2 – диэлектрические проницаемости покрытий электродов

лозы САВ-308) толщиной 0,075 см. Вторым электродом служила стеклянная пластина 1 толщиной 0,25 см с нанесенным на ее нижнюю поверхность полупрозрачным проводящим покрытием. Расстояние от шара до пластины $L = 0,25$ см. Внизу под пластиной размещалась камера, позволявшая получать изображение разряда с торца.

Типичное распределение электрического поля по кратчайшему расстоянию от сфе-

ры до пластины (в межэлектродном промежутке) для напряжений, использовавшихся при исследованиях, приведено на рис. 1, b. Поле, естественно, крайне неоднородное, так что в общем случае напряженность статического пробоя E_{br} (для воздуха $E_{br} \approx 30$ кВ/см [8]) достигается в межэлектродном промежутке на некотором расстоянии z_{ed} от поверхности сферического электрода.

Таблица

Значения параметров высоковольтных воздействий, приложенных к электродам

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение параметра
Длительность цуга	τ_1	мкс	≈ 150
Период следования цугов	T_f	мс	1
Частота осциллирования импульсов в цуге	f	кГц	55
Длительность импульсов: первого последующих	τ_1 τ_k	мкс	4 8 – 9
Напряжение первого импульса	U_1	кВ	7 – 15
Затухание цуга	$U_1 : U_2 : U_3$	–	1,0 : 0,8 : 0,7

К электродам разрядной системы прикладывалась последовательность высоковольтных затухающих цугов почти синусоидального разнополярного напряжения (см. рис. 3) с параметрами, значения которых представлены в таблице. Генератор импульсного напряжения обеспечивал последовательности цугов как со значением $U_1 > 0$, так и $U_1 < 0$ относительно заземленного неплоского электрода.

Напряжение на разрядном промежутке измеряли с помощью калиброванной антенны, подключенной к осциллографу; затем низковольтные значения сигнала антенны переводили в высоковольтные (по градуировочному графику). Кроме того, напряжение можно было устанавливать по шкале регулирующей ручки, обычно с достаточной точностью ($\pm 0,2$ кВ). Измерение же тока разряда производили с использованием безиндуктивного резистивного шунта номиналом в 5 Ом, включенного между сферическим электродом и «землей». Более подробно установка описана в работах [2, 7].

Результаты эксперимента и их обсуждение

В ходе эксперимента было обнаружено, что применение полимерного покрытия на сферическом электроде, исключающего поступление зарядов из разрядного промежутка во внешнюю цепь и дополнительно ограничивающего ток лавин (в связи с необходимостью поддерживать ток смещения и в этом слое диэлектрика), привело к

радикальному изменению формы разряда. Если в опытах, описанных в работах [2, 7], для металлической либо жидкой проводящей полусферы реализовывалась исключительно стримерная форма асимметричного разряда, причем практически во всем диапазоне его исследованных параметров, то на сфере с диэлектрическим покрытием устойчиво наблюдалась его однородная лавинная форма в широком диапазоне напряжений цуга от 7 до 15 кВ для обеих полярностей.

На рис. 2 приведены типичные интегральные изображения форм разряда различной полярности для полусферы с покрытием и для полусферической поверхности капли проводящей жидкости. На рис. 2, *a* представлено изображение, которое было получено для отрицательного барьерного разряда, т. е. случая, когда на сферу прикладывался минус напряжения, а на пластину – плюс.

На рис. 2, *b* показано изображение, полученное для положительного барьерного разряда – когда прикладывалось напряжение обратной полярности. На рис. 2, *c* приведено изображение для эксперимента, описанного в работах [2, 7], для случая отрицательного асимметричного барьерного разряда. Напряжение первого импульса на капле U_1 составляло около 13 кВ. В последнем случае разряд существовал в стримерной форме.

Здесь следует отметить, что полярность коронного разряда (положительная и отри-

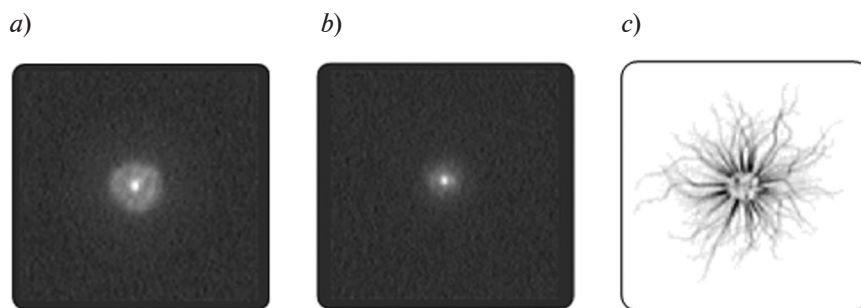


Рис. 2. Сравнение интегральных изображений форм разряда различной полярности для полусферы с покрытием (*a*, *b*) и для полусферической поверхности капли проводящей жидкости (*c*). Приведены данные для отрицательного (*a*, *c*) и положительного (*b*) асимметричных барьерных разрядов.

Характерные геометрические параметры разрядной системы во всех случаях одинаковы



цательная корона) принято определять по знаку напряжения острия (электрода с малой площадью), поскольку процессы возле него являются определяющими и зависят от знака напряжения. То же самое в значительной мере справедливо и для асимметричного барьерного разряда. Поэтому логично следовать тому же принципу, определяя положительный и отрицательный асимметричный барьерный разряды по знаку напряжения на сфере относительно плоского электрода. Для рассматриваемых условий, когда подается напряжение в виде цуга разнополярных импульсов, полагалось, что полярность определяется наиболее интенсивным первым импульсом, на котором чаще всего и развивается лавинный пробой.

При наблюдении разряда сбоку установлено, что он представляет собой светящийся конус от полусферы до пластины, с углом примерно в 30° для отрицательного разряда и вдвое меньшим — для положительного. При этом в первом случае интенсивное свечение распространялось вплоть до самой поверхности пластины, тогда как во втором свечение заметно ослабевало по направлению к пластине. В этом случае увеличение межэлектродного расстояния приводило к «отрыву» свечения от поверхности пластины.

Наблюдаемая картина разрядов однозначно свидетельствует о том, что для исследуемых условий во всем разрядном промежутке напряженность поля достаточно велика, чтобы не только обеспечивать продвижение лавин, но и их инициирование; соответственно профиль распределения электрического поля, приведенный на рис. 1, *b*, по-видимому, должен спадать к значению E_{br} более плавно.

Следует также отметить, что на самом деле лавинная форма является квазиоднородной или интегрально однородной формой разряда. Действительно, за время экспозиции (≈ 20 мс) при частоте следования цугов в 1 кГц успевает развиваться множество лавин, свечение от которых в сумме и дает однородную картину, регистрируемую детектором. Однако с практической точки зрения разряд даже в такой форме полно-

стью удовлетворяет всем необходимым требованиям (например, при использовании его для быстрой стерилизации).

Наши исследования показали, что, будучи близкими по виду и характеру свечения, разряды разных полярностей оказываются различными по своим условиям формирования.

На рис. 3 представлены электрические характеристики отрицательного асимметричного барьерного разряда (осциллограммы напряжения $U(t)$ и импульсного тока $I(t)$ при различных развертках по времени), типичные для диапазона напряжений U_1 от 7 до 12 кВ. Требуется некоторое пояснение к представленным графикам. Поскольку сферический электрод в использованной схеме был заземлен, осциллограф регистрировал напряжение на пластине относительно этого электрода («земли»). Чтобы показать напряжение на самом сферическом электроде относительно пластины, необходимо было поменять полярность напряжений и токов на осциллограммах.

Итак, как видно из рис. 3, в миллисекундном масштабе ток разряда в установившемся режиме представляет собой последовательность отдельных коротких импульсов разной полярности, которые различаются на порядок по амплитуде. При этом далеко не каждый цуг сопровождается появлением токового импульса.

Осциллограмма с наносекундной разверткой отдельных импульсов (рис. 3, *d*) имеет вид, типичный для лавинной формы разряда [9]. Этот результат, наряду с диапазоном значений максимальных токов импульсов (1 – 40 мА), также типичных для лавин, убедительно показывает, что мы имеем дело именно с лавинной (таунсендовской) формой разряда. Большинство лавин формируется на первых, самых мощных импульсах цуга; при этом чаще всего наблюдается либо пара импульсов тока (сначала отрицательной, затем положительной полярности, см. рис. 3, *b*), либо один импульс соответствующей полярности (рис. 3, *c*).

В отрицательном разряде лавины движутся от сферического электрода к пластине, в область уменьшающегося поля. Но, как уже отмечалось выше, характер разряд-

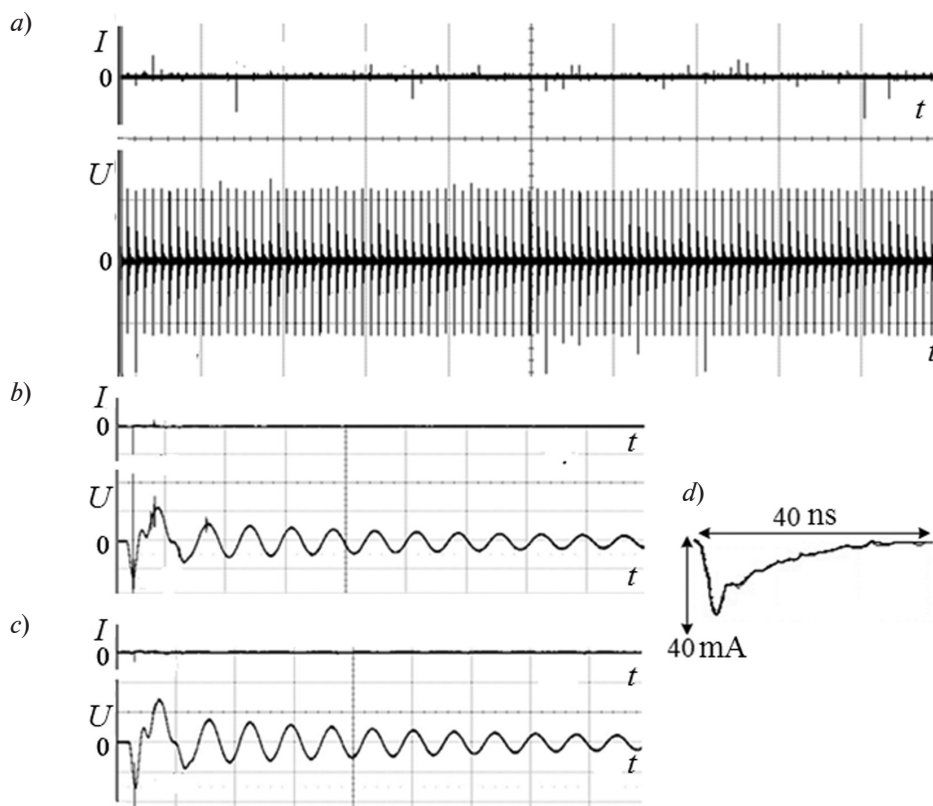


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения, действующего на малом сферическом электроде отрицательного асимметричного барьерного разряда, при различных развертках во времени $\Delta t/n$. Зарегистрированы для последовательности цугов (a), а также для одиночного цуга: с парой импульсов (b) и с одним импульсом (c) тока; приведена также форма одиночного импульса тока разряда ($U_1 \approx 11,8$ кВ) (d); $\Delta t/n = 10$ мс/дел. (a), 10 мкс/дел. (b, c)

ного свечения показывает, что в рассматриваемых условиях практически все они достигают диэлектрической поверхности электрода, высаживая на ней отрицательный электронный заряд. Этот заряд создает электрическое поле, обратное внешнему, что препятствует формированию новых лавин даже в том случае, когда пробой происходит раньше того момента, когда высоковольтный импульс достигнет максимума, и напряжение после этого пробоя продолжает возрастать (рис. 3, c). Возрастание продолжается, так как для исследованного диапазона амплитуд импульсов перенапряжения невелики.

При переходе же к положительному импульсу, электрическое поле поверхностного заряда складывается с внешним полем, и таким образом результирующая напряжен-

ность в зазоре достигает пробивного значения. Это приводит к положительному пробую сразу после отрицательного практически в каждом случае (см. рис. 3, b). На рис. 3, a видно, что для всех относительно больших отрицательных импульсов тока наблюдается и положительный импульс, хотя и существенно меньший. Лишь в очень редких случаях положительный пробой сразу за отрицательным отсутствует (см. рис. 3, c). Это обусловлено, скорее всего, статистическим характером инициирования лавин свободными электронами.

Как видно из осциллограмм на рис. 3, b, развитие лавины приводит к выбросу сигнала на осциллограмме напряжения. Малая длительность выбросов указывает на то, что они действительно обусловлены лавинами, а не представляют случайную электромаг-



нитную наводку. Выброс может иметь как тот же знак, что импульс тока, так и противоположный. При этом не наблюдалось корреляции между амплитудой импульса тока и величиной выброса, а в некоторых случаях выбросы наблюдались и при отсутствии импульсов тока (например, на втором положительном полупериоде осциллограммы, см. рис. 3, *b*). В этом плане такие выбросы можно рассматривать как индикаторы лавин малой интенсивности. Лавинные наводки и обуславливают, по-видимому, небольшую флуктуацию амплитуды напряжения первого импульса цуга, наблюдаемую на осциллограмме рис. 3, *a*.

На рис. 4 приведены электрические характеристики положительного асимметричного барьерного разряда, примерно такого же, как отрицательного (см. рис. 3), но с превышением внешнего напряжения на

0,5 кВ. На рис. 4 видно, что при возбуждении разряда положительными импульсами ток разряда представляет собой последовательность практически только положительных импульсов, аналогичных по своим параметрам токовым импульсам при отрицательном разряде. Крайне редко (один раз на десяток осциллограмм) можно было «поймать» в миллисекундном диапазоне импульс отрицательной полярности только на втором, отрицательном, импульсе цуга (рис. 4, *c*). При этом, как видно из осциллограммы рис. 4, *a*, импульсы тока существуют только для некоторых высоковольтных цугов последовательности, хотя выбросы напряжения (без импульса тока) могут наблюдаться и на последующих отрицательных полупериодах (см. рис. 4). Обращает на себя внимание и наличие очень больших выбросов на осциллограмме на-

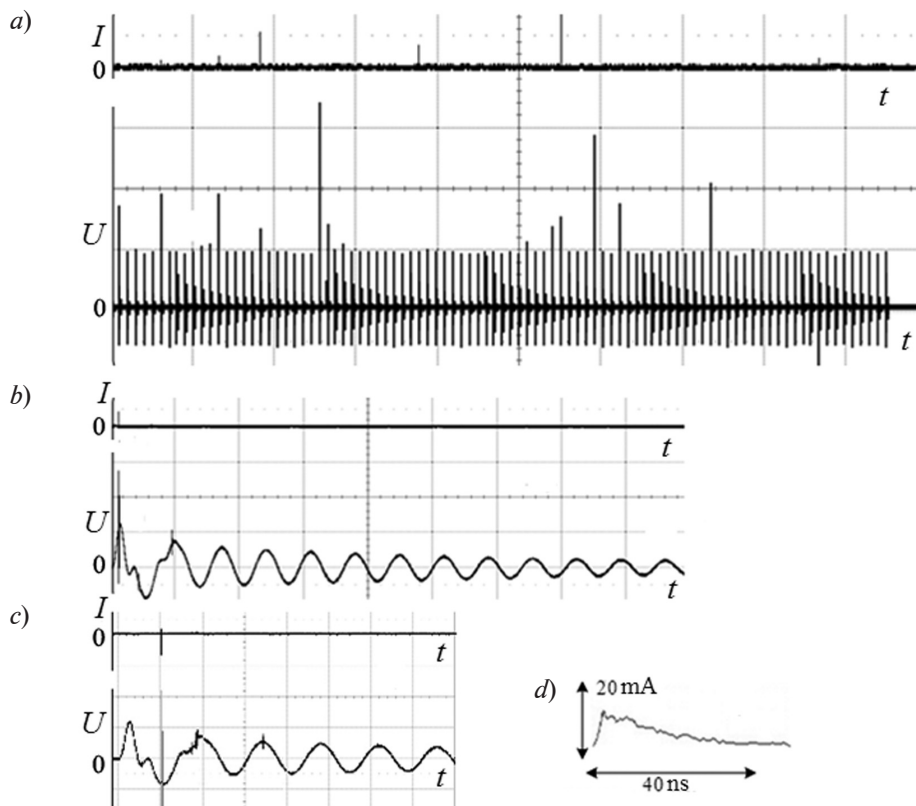


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения при развитии положительного асимметричного барьерного разряда при различных развертках во времени $\Delta t/n$. Зарегистрированы для последовательности цугов (*a*) и для одиночного цуга (*b*, *c*); приведена также форма одиночного импульса тока разряда ($U_1 \approx 13,2$ кВ) (*d*); $\Delta t/n = 10$ мс/дел. (*a*), 10 мкс/дел. (*b*), 5 мкс/дел. (*c*)

пряжения вообще без выбросов тока, что не наблюдалось на отрицательном разряде.

Таким образом, имеется существенная разница между отрицательными и положительными асимметричными барьерными разрядами. При этом следует подчеркнуть, что пробой в одном и том же направлении, наблюдающиеся для положительного разряда, вообще говоря, противоречат самому принципу барьерного разряда. Дело в том, что прохождение тока при наличии диэлектрических слоев на электродах происходит, в конечном счете, благодаря накоплению зарядов на этих слоях, и в непрерывном режиме работы обязательно требуется фаза обратного тока для нейтрализации этих зарядов и накопления зарядов противоположного знака [8, 10].

Можно было бы предположить, что такая разница связана с различием процессов релаксации поверхностных и объемных зарядов в том и другом случае, но даже грубые оценки показывают, что эти процессы должны быть близки. Действительно, при развитии положительного барьерного разряда, «положительная» лавина, которая образовалась от первого импульса цуга, двигаясь от плоского электрода к сферическому, и вынося на сферу свой отрицательный электронный заряд, должна оставлять в межэлектродном промежутке такой же распределенный положительный заряд ионов («ионный чехол» лавины).

В течение оставшейся части периода первого импульса (≈ 2 мкс, см. рис. 4, *b*) положительные ионы перемещаются полем в противоположную от сферы сторону. Считая (для грубой оценки) среднюю по времени и пространству напряженность поля у поверхности равной около 20 кВ/см, при подвижности положительных ионов $1,25 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ [11], получим значение дрейфовой скорости приблизительно $2,5 \cdot 10^4 \text{ см/с}$ и достаточно большое ($\approx 0,05$ мкс) удаление головной части чехла (где концентрация ионов максимальна) от поверхности сферы. Соответственно самый «хвост» ионного чехла попадает на поверхность плоского электрода, если лавина инициирована недалеко от него, и заряжает его положительно. Однако

(см. рис. 4, *b*) длительность второго, отрицательного, импульса (амплитуда которого почти такая же, как у положительного) в два раза больше, так что при обратном движении ионов к поверхности сферы за время этого импульса соответствующее удаление должно быть существенно большим, равным около 0,2 см. Так что уже к этому моменту основная часть положительного объемного заряда ионов должна попасть на поверхность сферы и нейтрализовать часть «высадившегося» там электронного заряда.

Далее, положительный и отрицательный импульсы цуга одинаковы по времени, и оставшееся небольшое ионное облако будет совершать затухающие колебания, расплываясь за счет диффузии, в первую очередь в радиальном направлении. Для взятого выше значения подвижности ионов при температуре $T = 300 \text{ К}$ коэффициент диффузии $D = 0,032 \text{ см}^2/\text{с}$, и характерное время расплывания (за которое размер облака увеличивается в $\sqrt{2}$ раз) при начальном радиусе облака 50 мкм составит $t \approx 200$ мкс, т. е. порядка длительности цуга. Затем размеры расплывания будут расти как \sqrt{t} , и масштаб $\approx 0,1$ см будет достигнут за время $t \approx 20$ мс. Вполне вероятно, что в этом процессе диффузионного расплывания исходной положительной лавины на сферический электрод добавится еще небольшое количество ионов, нейтрализующих отрицательный поверхностный заряд.

Таким образом, заряд одиночной лавины на электродах и в межэлектродном промежутке за период между цугами в основном нейтрализуется, но (и это принципиально) не весь. Так что следующие лавины той же полярности будут его увеличивать. Пока возросший после очередной лавины заряд не увеличит поле отрицательного импульса так, что произойдет пробой с «отрицательной» лавиной (она движется к пластине и выносит на нее отрицательный заряд электронов), с токовым импульсом отрицательной полярности (см. рис. 4, *c*), который нейтрализует накопленные заряды. Тот факт, что такие пробои в исследованных условиях наблюдались крайне редко, позволяет заключить, что, благодаря удачному сочетанию амплитуды



и формы импульсов цуга (короткий первый импульс), нейтрализация зарядов происходит достаточно эффективно сама по себе.

В принципе ненамного более сложная картина наблюдается и для отрицательного барьерного разряда, когда отрицательная лавина, сформированная на первом отрицательном импульсе цуга, двигается к пластине и переносит на нее свой электронный заряд, а ее «ионный чехол» перемещается к сферическому электроду. В этом случае, как отмечалось выше, обычно на середине второго, положительного, импульса (когда поле поверхностного заряда еще велико) формируется «положительная» лавина,двигающаяся к сферическому электроду. После того, как она передаст электроду свой электронный заряд, ее ионный чехол будет за время второй половины положительного импульса (≈ 4 мкс) двигаться под действием поля к пластине вместе с остатками «чехла» первой лавины, а затем, в течение третьего импульса (≈ 8 мкс), — снова к сферическому электроду. В результате движения второго чехла, за период третьего импульса основное количество его ионов должно достичь сферического электрода и нейтрализовать основную часть отрицательного заряда второй лавины.

Более сложная картина должна наблюдаться в тех режимах отрицательного барьерного разряда, когда лавины, двигаясь к плоскому электроду, не доходят до него из-за прекращения ионизации в слабом поле в этой части разрядного промежутка. В таком случае ток лавины поддерживается дрейфовым движением к пластине уже образовавшихся электронов. Но так как вероятность прилипания электронов в воздухе при атмосферном давлении к кислороду и азоту велика (частота прилипания составляет $2 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ [8, 12]), они быстро превращаются в отрицательные ионы. Наличие объ-

емного заряда медленных отрицательных ионов, вообще говоря, значительно усложняет картину релаксации заряда, причем во всех случаях, когда они образуются.

Но поскольку для исследованных режимов асимметричного барьерного разряда характерно примыкание свечения от лавин к поверхности плоского электрода как в положительном, так и в отрицательном асимметричных барьерных разрядах, эффективности нейтрализации зарядов не должны сильно различаться. Более вероятно, что причина наблюдаемого различия связана с их асимметрией. В отрицательном разряде электронный заряд высаживается на пластине, где поле приложенного импульса напряжения минимально, и создаваемое зарядом дополнительное поле, складывающееся с полем второго, отрицательного, импульса, оказывается решающим фактором для лавинного пробоя на этом импульсе. И, наоборот, в положительном разряде лавина несет электронный заряд на сферический электрод, где напряженность поля приложенного импульса максимальна и добавка от поверхностного заряда мало влияет на формирование лавин.

Заключение

Полученные результаты по исследованию асимметричного барьерных разрядов, наряду с установлением ряда их важных закономерностей, указывают на возможность реализации их стабильной однородной (лавинной) формы, обладающей существенными преимуществами при практическом использовании. Скорее всего, реализация лавинной формы во многом связана с удачной формой питающего разряд напряжения, обеспечивающей эффективную взаимную компенсацию объемных и поверхностных зарядов, особенно для положительного разряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chang J-S. Corona discharge processes // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1991. Vol. 19. No. 6. Pp. 1152–1166.
2. Коренюгин Д.Г., Никандров Д.С. Влияние электропроводности жидкофазного электрода на характеристики барьерно-поверхностного

- разряда // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2008. № 2 (55). С. 107–110.
3. Babaeva N.U., Kushner M.J. Intercellular electric fields produced by dielectric barrier discharge treatment of skin // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009.

Vol. 43. No. 18. Pp. 185–206.

4. **Fridman G., Friedman G., Gutsol A., Shekhter A.B., Vasilets V.N., Fridman A.** Applied plasma medicine // Plasma Process. Polym. 2008. Vol. 5. No. 6. Pp. 503–533.

5. **Kuchenbecker M., Bibinov N., Kaemling A., Wandke D., Awakowicz P., Viol W.** Characterization of DBD plasma source for biomedical applications // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. No. 4. P. 045213.

6. **Ayan H., Fridman G., Gutsol A., Vasilets V.** Nanosecond-pulsed uniform DBD // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2008. Vol. 36. No. 2. Pp. 504–508.

7. **Коренюгин Д.Г.** Динамические характеристики барьерного разряда с жидкофазным

электродом // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2008. № 4 (62). С. 116–119.

8. **Райзер Ю.П.** Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.

9. **Ретер Г.** Электронные лавины и пробой в газах. М.: Мир, 1968. 390 с.

10. **Никандров Д.С., Цендин Л.Д.** Низкочастотный барьерный разряд в таунсендовском режиме // ЖТФ. 2005. Т. 75. № 10. С. 29–38.

11. **МакДаниель Е.В., Мэзон Е.А.** Подвижность и диффузия в газах. М.: Мир, 1976. 422 с.

12. **Месси Г.** Отрицательные ионы. М.: Мир, 1979. 592 с.

Статья поступила в редакцию 12.01.2018, принята к публикации 16.02.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОРЕНЮГИН Дмитрий Геннадиевич – старший преподаватель кафедры физической электроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
polarisd@mail.ru

МАРЦИНОВСКИЙ Артемий Маркович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
amartsinovsky@gmail.com

REFERENCES

[1] **J-S. Chang**, Corona discharge processes, IEEE Trans. on Plasma Sci. 19 (6) (1991) 1152–1166.

[2] **D.G. Korenyugin, D.S. Nikandrov**, Influence of liquid electrode conductivity on dielectric barrier discharge characteristics, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems. No. 2(55) (2008) 107–110.

[3] **N.U. Babaeva, M.J. Kushner**, Intercellular electric fields produced by dielectric barrier discharge treatment of skin, J. Phys. D: Appl. Phys. 43 (18) (2009) 185–206.

[4] **G. Fridman, G. Friedman, A. Gutsol, et al.**, Applied plasma medicine, Plasma Process. Polym. 5 (6) (2008) 503–533.

[5] **M. Kuchenbecker, N. Bibinov, A. Kaemling, et al.**, Characterization of DBD plasma source for biomedical applications, J. Phys. D: Appl. Phys. 42 (4) (2009) 045213.

[6] **H. Ayan, G. Fridman, A. Gutsol, V. Vasilets**, Nanosecond-pulsed uniform DBD, IEEE Trans. on

Plasma Sci. 36 (2) (2008) 504–508.

[7] **D.G. Korenyugin**, Dynamic characteristics of dielectric barrier discharge with liquid (nonmetallic) electrode, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems. No. 4 (62) (2008) 116–119.

[8] **Yu.P. Raizer**, Gas discharge physics, Springer-Verlag, Berlin, 1991.

[9] **H. Raether**, Electron avalanches and breakdown in gases, Butterworths, Washington, 1964.

[10] **D.S. Nikandrov, L.D. Tsendin**, Low frequency dielectric-barrier discharge in the Townsend mode, Technical Physics. 50 (10) (2005) 1284–1294.

[11] **E.W. McDaniel, E.A. Mason**, The mobility and diffusion of ions in gases, Wiley, New York, 1973.

[12] **H. Massey**, Negative ions, Cambridge U.P., Cambridge, 1976.

Received 12.01.2018, accepted 16.02.2018.

THE AUTHORS

KORENYUGIN Dmitriy G.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
polarisdk@mail.ru

MARTSINOVSKY Artemiy M.

The Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences
26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation
amartsinovsky@gmail.com