

УДК 537.523.3

PACS: 52.80.Hc

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-46-52

EDN: GAAOLF



Режим двойных импульсов Тричела при коронном разряде в воздухе

В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт, Н. П. Виноградов

Получены новые данные о тричеловском режиме коронного разряда в воздухе атмосферного давления. При квазистационарном напряжении отрицательной полярности на промежутке остриё (катод из стали) – плоскость реализован импульсно-периодический режим, при котором с малой паузой генерируется два импульса (пика) тока с различной длительностью, задержкой и амплитудой, а также переходный режим с увеличенной длительностью импульсов Тричела. Показано влияние на форму импульсов тока и длительность паузы между ними напряжения и дополнительного конденсатора, включаемого параллельно промежутку.

Ключевые слова: импульсы Тричела, два пика, атмосферный воздух, стримерный коронный разряд.

Введение

Коронный разряд в воздухе и других газах продолжает исследоваться [1–4] и находит широкое практическое применение [5, 6]. Проведение новых исследований обусловлено сложностью физических процессов, которые протекают в неоднородном электрическом поле при микронных и менее размерах области инициирования разряда, см., например, [7–10]. У острия малого размера, с обычно используемыми промежутками игла-плоскость, за счёт высокого электрического поля происходит развитие нестационарных ионизационных процессов, что приводит к образованию лавин и стримеров [1–10]. При этом регистрируются импульсы тока разряда, которые наблюдаются как с остриём отрицательной полярности (им-

пульсы Тричела [11]), так и положительной [9].

Появление первого импульса тока в воздухе, а также его амплитуда и форма, не зависят от полярности электрода с малым радиусом кривизны, однако полярность острия оказывает существенное влияние на дальнейший режим генерации импульсов тока [12]. При нарастании напряжения в промежутке с катодом, имеющим малый радиус кривизны, после генерации первого импульса тока реализуется импульсно – периодически режим импульсов Тричела [1–3, 11, 12], обычно имеющих один максимум. В таком режиме напряжение источника питания, подаваемое через балластное сопротивление на электрод в виде острия, можно увеличивать относительно порогового для появления первого тричеловского импульса в несколько раз. Импульсно-периодический режим их формирования будет сохраняться. Средний ток коронного разряда включает постоянную составляющую и импульсы Тричела, которые формируются как за счёт развития параллельных лавин [4], так и за счёт образования стримеров [13]. Величина постоянной составляющей тока между импульсами Тричела с ростом напряжения плавно увеличивается, что приводит к переходу от коронного разряда к тлеющему [14].

Тарасенко Виктор Федотович, гл.н.с. д.ф.-м.н., профессор.

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Бакшт Евгений Хаимович, с.н.с., к.ф.-м.н.

Виноградов Никита Петрович, аспирант.

Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634050, г. Томск, просп. Академический, 2/3.

Статья поступила в редакцию 28.03.2023

После доработки 9.07.2023

Принята к публикации 17.07.2023

© Тарасенко В. Ф., Бакшт Е. Х., Виноградов Н. П., 2023

С положительным остриём зажигание коронного разряда начинается с одиночного импульса тока, а затем реализуется коронный разряд со стационарным током. При значительном повышении напряжения источника питания снова возникают импульсы тока, которые обусловлены формированием цилиндрических стримеров [12]. Амплитуда этих импульсов, которые нельзя отнести к «тричеловским», растёт с увеличением напряжения и длины стримера. Если цилиндрические стримеры достигают противоположного электрода, то в промежутке за короткое время может сформироваться искровой канал [15].

Интересный режим генерации импульсов Тричела был обнаружен в работе [16]. При использовании катода из спечённого вольфрама регистрировались импульсы тока, состоящие из двух пиков, причём амплитуда первого была существенно больше, чем у второго. Однако этот режим подробно не изучался, а с катодами из других материалов (Cu, C, Al и Ag) не регистрировался. Размеры острия и межэлектродного зазора, а также диапазон рабочих напряжений, при которых формировались двойные импульсы тока, в статье не приведены. Относительно физической природы появления двух импульсов в [16] было предположено, «что начальная фаза импульса Тричела обусловлена объёмными процессами в электродном промежутке, а на завершающей стадии импульса существенную роль играют процессы на поверхности катода».

Цель настоящей работы – провести исследования в атмосферном воздухе коронного разряда с отрицательного острия, при котором формируются импульсы Тричела, состоящих из двух пиков.

Установка и методики

Для проведения измерений тричеловских импульсов использовалась установка, схема которой показана на рис. 1.

Отметим, что в большинстве работ для изучения коронного разряда обычно используется схема без учёта конденсаторов C_1 и C_2 , а также без $C_{доп}$. Напряжение на промежуток остриё–плоскость подавалось от источника питания через балластное сопротивление $R = 3$ МОм. Скорость нарастания напряжения

была сравнительно малой (десятки секунд). Характеристики коронного разряда изучались при постоянном напряжении на промежутке. Длина промежутка $d = 20$ мм. Конструктивная ёмкость C_1 между электродами, которую в данных условиях устранить было нельзя, равнялась 3,7 пФ. Ток разряда этой ёмкости шунтом R_3 не измерялся. С помощью $R_3 = 1$ кОм регистрировался ток конденсатора C_2 , образованного с одной стороны остриём и подводом к нему от балластного сопротивления, а с другой стороны плоским электродом и металлической поверхностью экспериментального стенда, которая была соединена с плоским электродом, а также с заземлённым выводом источника питания. Сигнал с шунта подавался на осциллограф по кабелю с волновым сопротивлением 50 Ом. Величина C_2 составляла 5,8 пФ. Кроме того, проводились измерения тока и напряжения при подключении параллельно ёмкости C_2 дополнительного конденсатора $C_{доп} = 7,5$, или 100, или 470 пФ.

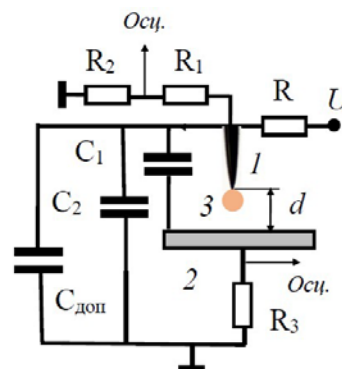


Рис. 1. Схемы экспериментальной установки. 1 – катод (остриё); 2 – анод (плоский); 3 – область свечения коронного разряда; U – напряжение источника; R – балластное сопротивление; R_1, R_2 – сопротивления омического делителя; R_3 – сопротивление шунта; C_1 – конструктивная ёмкость между остриём 1 и плоским электродом 2; C_2 – ёмкость между остриём 1 и заземлённым экспериментальным стендом; $C_{доп}$ – дополнительный конденсатор

Остриё было изготовлено из куска «бисерной» иглы диаметром 0,32 мм с радиусом скругления ≈ 20 мкм, который при проведении экспериментов существенно не изменялся. Материал катода (острия) хромированная углеродистая сталь. «Мягкое» воздействие на катод достигалось применением сравнительно большого балластного сопротивления и работы без перехода в режим тлеющего разряда.

Это позволяло уменьшить эрозию острия за счёт ограничения импульсного и среднего тока через промежутки. Малый радиус кривизны был выбран для моделирования короны, привязанной к одной точке острия. В предварительных экспериментах было установлено, что при $r \geq 100$ мкм у острия могут формироваться у разных его точек несколько филаментов, которые при увеличении напряжения сливаются в один, образуя у острия перетяжку. Отметим, что при повышенных напряжениях несколько филаментов формируется из катодных пятен на острие, см. работу [16].

При увеличении напряжения источника питания ≥ 8 кВ воздух в промежутке продувался вентилятором. Это делалось для уменьшения влияния на коронный разряд, активных частиц, которые нарабатываются в области высоко электрического поля у острия и выносятся в промежутки за счёт электрического ветра [2].

Напряжение на разрядном промежутке измерялось с помощью высоковольтного пробника АСА-6039 с полосой пропускания 50 МГц, сопротивления которого показаны на рис. 1 ($R_1 = 900$ МОм, $R_2 = 900$ кОм). Ток разряда шунтом из сопротивлений ТВО. Сигналы с шунта и делителя напряжения подавались на осциллограф MDO 3104 (1 ГГц, частота дискретизации 5 ГС/с) по кабелю. Фотографирование разряда осуществлялось четырёхканальной ICCD камерой HSFC PRO с временным разрешением до 3 нс.

Результаты

Исследования коронного разряда без дополнительного конденсатора при отрицательной полярности острия и постоянном напряжении источника питания, величина которого могла достигать 17 кВ, подтвердили стабильную генерацию обычных однопиковых импульсов Тричела. Они возникали после достижения порогового напряжения ~ 4 кВ, которое зависело от давления и влажности атмосферного воздуха. Тричеловские импульсы имели один максимум, а между ними, при увеличе-

нии напряжения, регистрировалась постоянная составляющая тока коронного разряда. Кроме того, при $U > 4$ кВ был зарегистрирован переходный режим, в котором длительности импульса тока увеличивалась.

Включение дополнительного конденсатора с ёмкостью 100 или 470 пФ позволило зарегистрировать как переходный режим с увеличенной длительностью импульса тока, так и импульсы Тричела с двумя пиками. Примеры традиционного тричеловского режима, переходного и режима с двойными импульсами, полученные при атмосферном давлении воздуха, показаны на рис. 2. Осциллограммы тока регистрировались при постоянном напряжении источника питания U , точность установки которого была не хуже 1%. Напряжение на промежутке, которое измерялось омическим делителем после балластного сопротивления R , также было постоянным и примерно соответствовало напряжению источника питания. Оно существенно не изменялось во время импульсов тока из-за малой энергии (~ 1 мкДж), которая вкладывалась в газ за один импульс Тричела. Соответственно осциллограммы напряжения имели форму прямых линий.

Осциллограммы импульсов тока на рис. 2а и рис. 2б были получены при одинаковом дополнительном конденсаторе 7,5 пФ и одинаковом напряжении источника питания. Однако их форма изменялась от опыта к опыту. На рис. 2а обычный режим и на рис. 2б переходный, при котором было зарегистрировано увеличение паузы между максимумами тока, но при этом увеличилась амплитуда тока в пике и длительность спада импульса. Величина стационарного тока между импульсами на рис. 2а и рис. 2б практически не изменилась. Данные режимы сохранялись в течении длительного времени (десятки секунд). Отметим, что при $C_{\text{доп}} = 7,5$ пФ, а также без него, двухпиковые импульсы тока не регистрировались. Изменения длительности импульса тока коронного разряда можно связать с неконтролируемым изменением напряжения на промежутке в разных опытах.

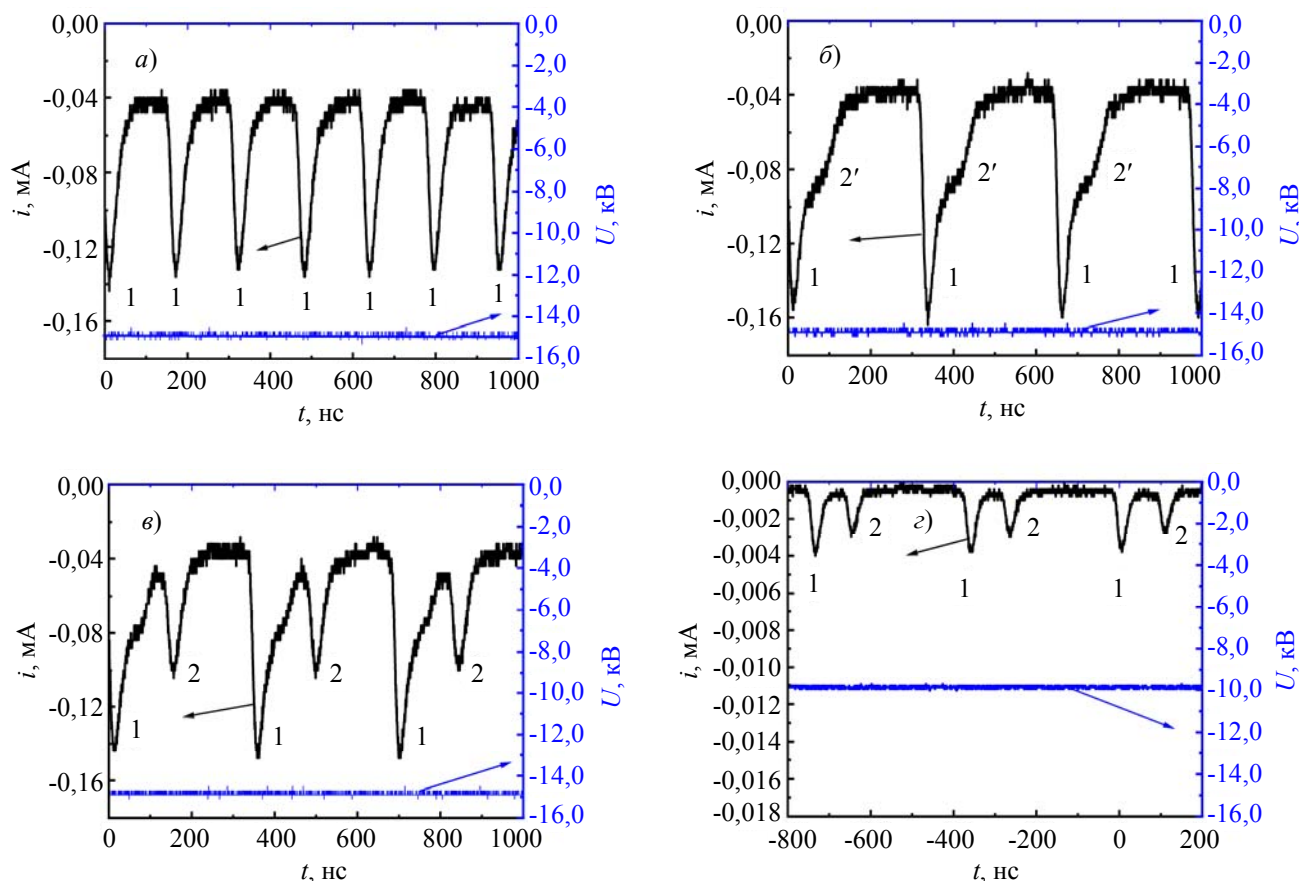


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на промежутке (прямые линии) и импульсов Тричела при напряжении источника питания -15 кВ (а, б, в) и -10 кВ (г). Импульсы тока, имеющие один максимум, показаны на рисунке (а), один максимум в переходном режиме с затянутым спадом на рисунке (б) и имеющие два максимума на рисунках (в, г). Осциллограммы на рисунках (а, б) получены с дополнительным конденсатором $C_{\text{доп}} = 7,5$ пФ, на рисунке (в) с $C_{\text{доп}} = 100$ пФ и на рисунке (г) с $C_{\text{доп}} = 470$ пФ. Величина конструктивной ёмкости промежутка $C_1 = 3,7$ пФ, а $C_2 = 5,8$ пФ

Увеличение ёмкости дополнительного конденсатора $C_{\text{доп}}$, установленного параллельно C_2 , изменило форму импульсов тока, которые начали состоять из двух пиков с разной ($C_{\text{доп}} = 100$ пФ, рис. 2в) и одинаковой ($C_{\text{доп}} = 470$ пФ, рис. 2г) длительностью на полувывоте. Причём, с дополнительным конденсатором большей величины (470 пФ) двухпиковый режим был зарегистрирован при меньшем напряжении источника питания, чем с $C_{\text{доп}} = 100$ пФ. Увеличение $C_{\text{доп}}$ и понижение напряжения привело к уменьшению амплитуды и длительности обоих импульсов, а также величины постоянной составляющей тока коронного разряда в паузе между импульсами. Кроме того, увеличилась длительность паузы между максимумами первого и второго двойных импульсов.

Как видно из осциллограмм, отличие двухпиковых режимов от традиционного, обычно наблюдаемого в подобных условиях,

состоит в формировании импульсов тока с двумя близко расположенными пиками. При увеличении и уменьшении напряжения, а также без дополнительного конденсатора, режим двойных импульсов не регистрировался. По сравнению с двухпиковым режимом с вольфрамового острия, который описан в работе [16], в данных условиях при увеличении и уменьшении напряжения на промежутке наблюдался однопиковый или переходный режим.

Таким образом, нами были зарегистрированы импульсы тока традиционной формы (а), импульсов тока с затянутым спадом (б) и импульсы тока с двумя максимумами (пиками) (в, г). Появление второго пика наблюдалось при увеличении ёмкости дополнительного конденсатора $C_{\text{доп}}$. С увеличением и уменьшением напряжения источника питания, как мы уже отметили, двухпиковый режим импульсов тока переходил в традиционный режим тричеловского коронного разряда.

Свечение плазмы в промежутке исследовалось с помощью ICCD камеры. В режиме накопления были зарегистрированы области светящейся плазмы у острия, которые имели форму шара. Диаметр этой области зависел от длительности экспозиции. При длительности экспозиции одного кадра 3 мкс видно слабое свечение у кончика острия с регистрируемым диаметром светящейся области $\approx 0,8$ мм. Увеличение экспозиции до 500 мкс приводило к увеличению регистрируемого диаметра светящейся плазмы, которая имела сферическую форму, до 2,5 мм. Подобная картина свечения плазмы наблюдалась как в режиме двойных импульсов, так и в традиционном режиме генерации импульсов Тричела. Получить изображение за один импульс тока и данные о динамике формирования плазмы, как и в работе [15], нам не удалось. Причина – малые энерговклады, которые составляли за один импульс тока ≈ 1 мкДж и менее. Однако эти эксперименты подтверждают известные экспериментальные данные о формировании у острия при относительно малых напряжениях плазменных образований сферической формы, см. работы [4, 7, 15].

Обсуждение

Данные исследования были проведены в условиях развития одиночной (элементарной) короны, которая возникает у острий с малым радиусом кривизны (в данных экспериментах ≈ 20 мкм). Расчёт величины электрического поля для подобного острия показывает, что в отсутствие плазмы его величина у острия уже при напряжении 2 кВ превышает 0,4 МВ/см [12]. При таком острие свечение плазмы коронного разряда имеет сферическую форму. Данную форму свечения плазмы можно объяснить формированием у острия сферических стримеров [17–19]. Малый радиус кривизны острия обеспечивает достижение приведённой напряжённости электрического поля, достаточной для быстрого перехода от лавинного разряда к стримерному. При импульсных источниках питания сферические стримеры были зарегистрированы во многих работах как при отрицательной, так и при положительной полярности острия [17, 18]. В данных условиях свечение плазмы у острия также имело сферическую форму. Причём сферическая

форма свечения плазмы регистрировалась при различных режимах протекания тока разряда. Переход от режима с одним пиком тока к режиму импульсов с двойными пиками не влиял на форму свечения коронного разряда, что предполагает одинаковый механизм их появления. Мы предполагаем, что второй пик также формируется в данных условиях согласно стримерного механизма.

Появление двухпиковой структуры импульсов Тричела в данных экспериментах можно объяснить влиянием дополнительного конденсатора на протекание тока через промежутки. Конденсатор подсоединялся к промежутку с малой индуктивностью и дополнительно подзаряжал конструктивную ёмкость. Это приводило к увеличению амплитуды импульса тока и затягиванию спада импульса, рис. 2б. Дальнейшее увеличение ёмкости дополнительного конденсатора инициировало появление импульсов тока с двумя пиками, которые появлялись, как мы предполагаем, также за счёт процессов в газе. Конкретно, за счёт формирования второго сферического стримера. Механизм генерации второго импульса за счёт процессов на поверхности катода, предложенный в работе [16], также может иметь место при значительном увеличении напряжения на промежутке и эрозии катода. В данных экспериментах при межэлектродном зазоре 20 мм напряжение не превышало 17 кВ без использования дополнительного конденсатора и 15 кВ с дополнительным конденсатором.

Заключение

В результате проведённых исследований коронного разряда в воздухе атмосферного давления с острийным катодом из хромированной углеродистой стали, в импульсно-периодическом режиме зарегистрировано формирование импульсов Тричела, состоящих из двух пиков, а также импульсов тока с увеличенной длительностью на полувысоте. Показано, что двухпиковый режим реализуется при определённом напряжении на промежутке, которое уменьшается при увеличении ёмкости дополнительного конденсатора. Установлено, что с уменьшением напряжения источника питания двухпиковый режим

трансформируется в режим одиночных импульсов тока или в переходный, при котором длительность тричеловских импульсов на полувысоте возрастает. Увеличение напряжения также инициирует переход от двухпикового к однопиковому режиму.

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда за счет гранта № 22-29-00137.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mizeraczyk J., Berendt A., Akishev Y. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. Vol. 51. № 15. P. 155204.
2. Стишков Ю. К., Самусенко А. В., Ашихмин И. А. / Успехи физических наук. 2018. Т. 188. № 12. С. 1331.
3. Fabris L. V. M., Silva J. C. C. D. / Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. 2022. Vol. 21. P. 481.
4. Тарасенко В. Ф., Бакиит Е. Х., Виноградов Н. П., Козырев А. В., Коковин А. О., Кожевников В. Ю. / Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 115. Вып. 11. С. 710.
5. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – Долгопрудный: Интеллект, 2009.
6. Филатов И. Е., Сурков Ю. С., Кузнецов Д. Л. / Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48. Вып. 13. С. 25.
7. Афанасьев С. Б., Лавренюк Д. С., Петрушенко И. Н., Стишков Ю. К. / ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 7. С. 30.
8. Li Z., Zhang B., He J. / IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2014. Vol. 21. № 1. P. 201.
9. Wu S., Cheng W., Huang G., Wu F., Liu C., Liu X., Zhang C., Lu X. / Physics of Plasmas. 2018. Vol. 25. № 12. P. 123507.
10. Černák M., Hoder T., Bonaventura Z. / Plasma Sour. Sci. Technol. 2020. Vol. 29. P. 013001.
11. Trichel G. W. / Phys. Rev. 1938. Vol. 54. P. 1078.
12. Tarasenko V., Baksht E., Kuznetsov V., Panarin V., Skakun V., Sosnin E., Beloplotov D. / J. Atmospheric Science Research. 2020. Vol. 3. Is. 4. P. 28.
13. Козырев А. В., Коковин А. О., Кожевников В. Ю., Тарасенко В. Ф. / Известия вузов. Физика. 2022. Т. 65. № 10. С. 138.
14. Козырев А. В., Коковин А. О., Кожевников В. Ю., Тарасенко В. Ф., Бакиит Е. Х., Виноградов Н. П. / ЖЭТФ. 2023. Т. 163. Вып. 2. С. 284.
15. Zhang Y., Qin Y., Zhao G., Ouyang J. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. № 24. P. 245206.
16. Петров А. А., Амиров П. Х., Коростылев Е. В., Самойлов И. С. / Труды Московского физико-технического института. 2013. Т. 5. № 1-17. С. 72.
17. Тарасенко В. Ф., Бакиит Е. Х., Соснин Э. А., Бураченко А. Г., Панарин В. А., Скакун В. С. / Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 5. С. 447.
18. Tardiveau P., Moreau N., Bentaleb S., Postel C., Pasquiers S. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. № 17. P. 175202.
19. Тарасенко В. Ф., Кузнецов В. С., Панарин В. А., Скакун В. С., Соснин Э. А., Бакиит Е. Х. / Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 110. Вып. 1. С. 72.

PACS: 52.80.Hc

Trichel double pulse mode during corona discharge in air

V. F. Tarasenko, E. Kh. Baksht and N. P. Vinogradov

Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk, 634055, Russia
E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Received 28.03.2023; revised 9.07.2023; accepted 17.07.2023

New data on the Trichel regime of a corona discharge in atmospheric pressure air have been obtained. With a quasi-stationary voltage of negative polarity at the gap between the tip (steel cathode) and the plane, a repetitively pulsed mode is implemented, in which two current pulses (peaks) with a small pause are generated with different duration, delay and amplitude, as well as a transient mode with an increased duration of Trichel pulses. The effect on the shape of the current pulses and the duration of the pause between them is shown by the voltage and an additional capacitor connected in parallel with the gap.

Keywords: Trichel pulses, two peaks, atmospheric air, streamer corona discharge.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-46-52

REFERENCES

1. Mizeraczyk J., Berendt A. and Akishev Y., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** (15), 155204 (2018). doi: 10.1088/1361-6463/aab4c0
2. Stishkov Y. K., Samusenko A. V. and Ashikhmin I. A., *Physics-Uspexhi* **61**, 1213 (2018). doi: 10.3367/UFNe.2018.06.038358
3. Fabris L. V. M. and Silva J. C. C. D., *J. of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications* **21**, 481 (2022). doi: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-10742022v21i4263644>
4. Tarasenko V. F., Baksht E. Kh., Vinogradov N. P., Kozyrev A. V., Kokovin A. O. and Kozhevnikov V. Yu., *JETP Letters* **115** (11), 667 (2022). doi: 10.1134/S0021364022600689
5. Raizer Yu. P., *Gas Discharge Physics*, Dolgoprudny, Intellekt, 2009 [in Russian].
6. Filatov I. E., Surkov Y. S. and Kuznetsov D. L., *Technical Physics Letters* **48** (7), 25 (2022). doi: 10.21883/TPL.2022.07.54032.19210
7. Afanas'ev S. B., Lavrenyuk D. S., Petrushenko I. N. and Stishkov Y. K., *Technical Physics* **53**, 848 (2008). doi: 10.1134/S1063784208070062
8. Li Z., Zhang B. and He J., *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* **21** (1), 201 (2014). doi: 10.1109/TDEI.2013.004125
9. Wu S., Cheng W., Huang G., Wu F., Liu C., Liu X., Zhang C. and Lu X., *Physics of Plasmas* **25** (12), 123507 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5042669>
10. Černák M., Hoder T. and Bonaventura Z., *Plasma Sour. Sci. Technol.* **29**, 013001 (2020). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab5051>
11. Trichel G. W., *Phys. Rev.* **54**, 1078 (1938).
12. Tarasenko V., Baksht E., Kuznetsov V., Panarin V., Skakun V., Sosnin E. and Beloplotov D., *J. Atmospheric Science Research* **3** (4), 28 (2020). doi: <https://doi.org/10.30564/jasr.v3i4.2342>
13. Kozyrev A. V., Kokovin A. O., Kozhevnikov V. Y. and Tarasenko V. F., *Russian Physics Journal* **65** (10), 1758 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11182-023-02827-1>
14. Kozyrev A. V., Kokovin A. O., Kozhevnikov V. Y., Tarasenko V. F., Baksht E. K. and Vinogradov N. P., *JETP*, **163** (2), 284 (2023) [In Russian]. doi: 10.31857/S004445102302013X
15. Zhang Y., Qin Y., Zhao G. and Ouyang J., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** (24), 245206 (2016). doi:10.1088/0022-3727/49/24/245206
16. Petrov A. A., Amirov R. Kh., Korostylev E. V. and Samoilov I. S., A study of cathode erosion in a negative corona discharge. *Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology* **5** (1-17), 72 (2013) [in Russian].
17. Tarasenko V. F., Baksht E. K., Sosnin E. A., Burachenko A. G., Panarin V. A. and Skakun V. S., *Plasma Physics Reports* **44**, 520 (2018). doi: 10.1134/S1063780X18050100
18. Tardiveau P., Moreau N., Bentaleb S., Postel C. and Pasquiers S., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** (17), 175202 (2009). doi:10.1088/0022-3727/42/17/175202
19. Tarasenko V. F., Kuznetsov V. S., Panarin V. A., Skakun V. S., Sosnin E. A. and Baksht E. K., *JETP Letters* **110** (1), 85 (2019). doi: 10.1134/S0021364019130137