

УДК 537.527.9; 537.53

Формирование стримеров шаровой и цилиндрической формы при коронном разряде в воздухе атмосферного давления

В.Ф. Тарасенко, В.С. Кузнецов, Е.Х. Бакшт, В.А. Панарин,
В.С. Скакун, Э.А. Соснин*

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 28.05.2020 г.

Проведены исследования формирования стримеров шаровой и цилиндрической формы в условиях коронного разряда. Показано, что образование цилиндрических стримеров с острия положительной полярности или с границы плазмы у острия положительной полярности может объяснить ступенчатое продвижение основного отрицательного лидера в молнии и при пробое длинных промежутков.

Ключевые слова: шаровой стример, цилиндрический стример, молния, основной отрицательный лидер, объемный лидер; ball/spherical streamer, cylindrical streamer, lightning, basic/generic negative leader, space/volume leader.

Введение

Исследование молний в атмосфере Земли показало, что движение основного лидера существенно отличается при распространении от отрицательной и положительной областей скопления зарядов [1–3]. Движение отрицательного лидера носит ступенчатый характер, тогда как движение положительного лидера относительно равномерно. Экспериментальное моделирование разряда молнии в лабораторных условиях с мегавольтными уровнями напряжения при метровых и более промежутках дало аналогичные результаты [3–6]. Отрицательный лидер при продвижении к аноду периодически скачкообразно увеличивал свою длину. В результате моделирования и экспериментов было установлено, что быстрое продвижение отрицательного лидера обеспечивается за счет дополнительного пробоя положительным объемным лидером, который стартует на некотором расстоянии от фронта отрицательного лидера. Это расстояние увеличивается с ростом напряжения и в экспериментах составляет от десятков сантиметров до нескольких метров. В природных условиях длина одной ступени молнии достигает сотен метров [3]. Как известно, продвижению отрицательных лидеров способствует стримерная корона, ко-

торая наблюдается на головке основного лидера и состоит из множества стримеров. При этом важно отметить, что для продвижения положительного стримера нужно среднее электрическое поле, приблизительно в 2 раза меньше, чем для отрицательного [7]. Можно предположить, что положительные стримеры предварительно ионизируют воздух между точкой их иницирования и фронтом отрицательного лидера, а затем формируется положительный объемный лидер с высокой проводимостью. В результате наблюдается ступенчатое движение основного отрицательного лидера молнии. Это предположение было проверено в настоящей работе при исследовании коронного разряда в условиях малых напряжений.

Исследование стримеров, стартующих с острия с малым радиусом кривизны, показало, что в процессе формирования коронного разряда стартовое напряжение первых стримеров обычно меньше при отрицательной полярности острия [8, 9]. Причем в резко неоднородном электрическом поле при любой полярности острия форма первых стримеров близка к форме шара [10–12]. Под шаровой и цилиндрической формой стримера мы понимаем изображение его интегрального свечения на фотографиях. При фотографировании коронного разряда с высоким временным разрешением дополнительно можно зафиксировать перемещение фронта стримера (области его свечения) и определить скорость его движения [7]. Шаровая форма первых стримеров была зарегистрирована как при большой скорости нарастания напряжения на промежутке (> 5 кВ/нс) [10, 13, 14], так и при малых скоростях

* Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru); Владимир Сергеевич Кузнецов (Robert_smith_93@mail.ru); Евгений Хаимович Бакшт (VEN@loi.hcei.tsc.ru); Виктор Александрович Панарин (panarin@yandex.ru); Виктор Семенович Скакун (skakun54@bk.ru); Эдуард Анатольевич Соснин (badik@loi.hcei.tsc.ru).

роста напряжения на острие с малым радиусом кривизны ($< 0,2$ кВ/мс) [11, 12]. При высоких скоростях роста напряжения на электроде с малым радиусом кривизны шаровые стримеры наблюдались во многих работах (см., например, [5, 10, 13–15]). Однако некоторые исследователи не относили эти плазменные образования к стримерам [13].

В [5] при инициировании разряда у острия также регистрировались стримеры шаровой формы, которые авторы предложили называть inception cloud – инициирующим облаком. Далее, при сохранении или увеличении напряжения на промежутке, с поверхности стримера шаровой формы стартовало несколько стримеров цилиндрической формы, длина которых увеличивалась.

Особо отметим работу [15], в которой исследовался барьерный разряд в воздухе низкого давления. При диагностике излучения из различных областей промежутка с помощью ФЭУ было зарегистрировано формирование аналога стримера шаровой формы и старт с его поверхности стримера цилиндрической формы. При давлении 1,3 кПа у диэлектрической поверхности, которая покрывала металлический электрод, появлялось облако светящейся плазмы. С границы этого облака стартовал стример цилиндрической формы, скорость расширения фронта которого составила 10^3 см/мкс. Переносимый заряд, плотность электронов и средняя энергия электронов были определены количественно с использованием результатов измерений. Это позволяло детально изучить формирование пробоя с высоким временным разрешением. Стример шаровой формы (по нашей терминологии – шаровой стример) в [15] был назван волной ионизации. Нужно отметить, что первые стримеры, форма области интегрального свечения которых была близка к шаровой, называли широкими (см., например, [16]).

При положительной полярности острия развитие стримеров цилиндрической формы с границы светящейся области первичного стримера шаровой формы наблюдалось в [5, 10, 15–17]. Стримеры цилиндрической формы были зарегистрированы с границы плазмы, созданной в результате формирования шаровых стримеров [11, 12], в том числе в условиях коронного разряда. При появлении катодонаправленных стримеров цилиндрической формы в условиях коронного разряда напряженность электрического поля была, как и в [7], значительно меньше, чем для анодонаправленных. Однако подробных исследований стадии перехода от шаровых стримеров к цилиндрическим ранее при коронном разряде не проводилось. Данные таких исследований могут быть использованы не только для понимания процессов в лабораторных разрядах, но и для изучения ступенчатого продвижения отрицательного основного лидера в молниях.

Цель настоящей работы – экспериментальное изучение в воздухе атмосферного давления особенностей появления и продвижения стримеров с острия положительной и отрицательной полярности.

Установка и методики

Исследования проводились при различных полярностях напряжения на электроде с малым радиусом кривизны. Применялась экспериментальная установка, подобная описанной в [11, 12]. Ее схема была традиционной для изучения коронного разряда. В настоящей работе инициирование коронного разряда изучалось как с одиночного острия, так и при установке второго плоского электрода. Использование второго плоского электрода, заземленного через сопротивление 1 кОм, которое служило шунтом, позволило регистрировать как импульсный, так и квазистационарный ток коронного разряда. Кроме того, оно дало возможность увеличить напряженность электрического поля у острия и формировать стримеры цилиндрической формы при более низких напряжениях. В качестве высоковольтного электрода применялись «бисерные» иглы диаметром 0,32, 0,64 и 1,04 мм с радиусом кривизны острия 11 (№ 1), 30 (№ 2) и 100 мкм (№ 3) соответственно. При исследовании разряда между острием и плоским электродом промежутком d мог изменяться от 3 до 30 мм.

Использовались три источника напряжения. С первым стабилизированное напряжение $U = 0,4–5$ кВ могло устанавливаться с точностью не хуже 0,2%. Скорость увеличения напряжения на промежутке «острие – плоскость» при включении источника была не более 0,2 кВ/мс. Второй источник питания с напряжением до 36 кВ также обеспечивал скорость нарастания напряжения не более 0,2 кВ/мс. Третий источник формировал импульсы напряжения квазисинусоидальной формы при частоте повторения от 1 до 50 кГц с амплитудой в первой полуволне до 20 кВ. Амплитуда второй полуволны противоположной полярности составляла $\sim 17\%$ от первой. Для определения минимального напряжения инициирования разряда использовались первый источник с высокой стабильностью напряжения и длинные иглы (55 мм) с малым радиусом кривизны острия.

Свечение плазмы коронного разряда регистрировалось с помощью четырехканальной ICCD камеры HSFC PRO, минимальная длительность одного кадра – 3 нс. Были определены размеры светящейся плазмы и стримера и оценены скорости движения фронта стримера при положительной и отрицательной полярности острия. Кроме того, интегральное свечение коронного разряда фиксировалось цифровым фотоаппаратом Canon PowerShot SX 60 HS в режиме покадровой съемки с временем экспозиции 15 с.

С помощью цифрового осциллографа TDS 3034 (Tektronics, Inc.) и высоковольтного пробника определялся временной ход напряжения. Импульсы тока разряда с токового шунта регистрировались осциллографом при временном разрешении не хуже 5 нс. Это позволяло измерять как импульсную, так и постоянную составляющую тока через промежуток. Эксперименты проводились в воздухе атмосферного давления при температуре ~ 20 °С и влажности не более 60%.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

При проведении исследований были зарегистрированы стримеры как шаровой, так и цилиндрической формы. Появление стримеров при иницировании коронного разряда и напряжении в единицы киловольт легче всего зарегистрировать по импульсам тока разряда с шунта. В этом случае использовался второй плоский электрод, заземленный через шунт. На рис. 1, *a*, *б* приведены осциллограммы напряжения и первые импульсы тока разряда при положительной полярности острия.

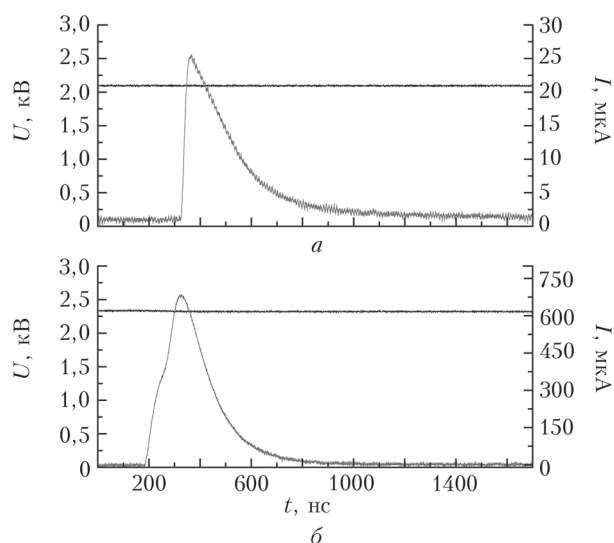


Рис. 1. Осциллограммы напряжения (прямые линии из-за его медленного нарастания) и первые импульсы тока коронного разряда при напряжениях 2,1 (*a*) и 2,3 кВ (*б*); игла № 2; межэлектродный зазор $d = 3$ мм

Эксперименты проводились в условиях сравнительно низкого среднего электрического поля, которое зависело от напряжения на промежутке и межэлектродного зазора. Однако за счет малого радиуса кривизны острия электрическое поле при напряжении 2 кВ у его кончика с иглой № 1 достигало ~ 500 кВ/см.

При включении источника питания напряжение на промежутке плавно увеличивалось со скоростью $\sim 0,1$ кВ/мс до иницирования коронного разряда. Разные амплитуды напряжения на рис. 1 при иницировании коронного разряда обусловлены случайным временем появления первых электронов у острия положительной полярности в условиях эксперимента. Далее из этих электронов развивались лавины, переходящие в стримеры.

В результате напряжение при появлении первого стримера и время от включения источника питания до его формирования изменялись. Все это проявлялось и при медленном нарастании напряжения на промежутке. Однако импульсы тока из-за изменения напряжения на промежутке и времени до регистрации тока стримера при малых межэлектродных зазорах могли различаться на порядок

величины по амплитуде. На рис. 1, *a* амплитуда тока составила 24 мкА, длительность импульса на полувысоте — ~ 180 нс, а длительность его фронта — ~ 40 нс. Такой импульс тока соответствует формированию стримера шаровой формы.

При увеличении напряжения на 200 В, а также времени достижения этого напряжения на промежутке на ~ 2 мс амплитуда тока разряда увеличилась до 680 мкА, длительность импульса на полувысоте — до ~ 200 нс, длительность фронта — до ~ 140 нс (рис. 1, *б*). Изменение формы импульса тока и существенное увеличение его амплитуды свидетельствуют о начале формирования цилиндрического стримера. Кроме того, формирование цилиндрического стримера подтверждает появление ступеньки на фронте импульса тока разряда.

Существенная разница в амплитуде тока разряда объясняется различием в форме стримера. В первом случае формировался только шаровой стример, фронт которого остановился на малом расстоянии от острия. Во втором — шаровой стример начал трансформироваться в цилиндрический. Расстояние между фронтом стримера и плоским электродом при этом уменьшилось, а ток с шунта и длительность импульса увеличились. Как было установлено ранее [18, 19], ток при движении фронта стримера (волны ионизации) можно зарегистрировать по динамическому емкостному току, который обусловлен зарядкой сжимающегося конденсатора, образованного фронтом стримера и плоским электродом. В условиях коронного разряда эти токи при низких напряжениях сравнительно малы и составляют от десятков до сотен микроампер (рис. 1). При длительности фронта импульса менее 1 нс и амплитуде напряжения в сотни киловольт динамический емкостной ток может превышать 1 кА [18].

С острием отрицательной полярности форма импульсов тока с шунта была подобна показанной на рис. 1, *a*, однако фронт импульса был более пологим. Стримеры шаровой формы с острия отрицательной полярности возникали при меньших напряжениях, чем с положительной. Однако стримеры цилиндрической формы с острия отрицательной полярности начинали формироваться при существенно более высоких напряжениях.

Свечение плазмы у острия в условиях иницирования коронного разряда очень слабое, и его можно зарегистрировать фотоаппаратом только при последовательном иницировании большого числа стримеров и/или при увеличении напряжения на острие и зажигании квазистационарной короны. При больших длительностях кадра фотоаппарата было установлено, что соотношение интенсивностей излучения плазмы у острия изменяется в зависимости от полярности напряжения на нем. Обычно интегральная интенсивность излучения за одну секунду и более была больше с острия отрицательной полярности.

Использование ICCD камеры в условиях медленного увеличения напряжения на острие не позволило регистрировать свечение первых стримеров даже при максимальной ее чувствительности. Поэтому был применен импульсный источник питания.

За счет сокращения фронта импульса на уровне 0,1–0,9 до 350 нс напряжение при инициировании коронного разряда удалось существенно повысить. Это привело к увеличению тока стримера и интенсивности его свечения. Осциллограммы импульсов напряжения различной полярности приведены на рис. 2.

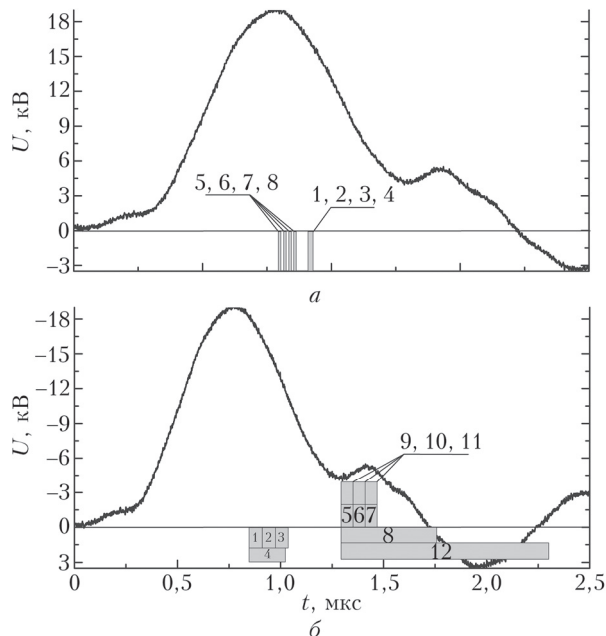


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения положительной (а) и отрицательной (б) полярностей от импульсного источника. Прямоугольниками показаны моменты времени включения отдельных кадров ICCD камеры, обозначенных цифрами. Изображения свечения плазмы на этих кадрах см. на рис. 3 и 5

Осциллограммы напряжения и фотографии излучения регистрировались при использовании одиночного острья в импульсно-периодическом режиме работы источника напряжения. Все заземленные металлические предметы были удалены на десятки сантиметров и более от острья. Применение импульсно-периодического режима стабилизировало время инициирования коронного разряда в каждом импульсе напряжения и позволило в установившемся режиме синхронизировать время инициирования коронного разряда с запуском ICCD камеры. Амплитуда первого полупериода импульса напряжения подбиралась для инициирования коронного разряда в его максимуме. Для сохранения радиуса кривизны кончика электрода во время длительной работы использовалось одиночное острие. Установка второго электрода при больших напряжениях приводила к частому переходу коронного разряда в искровой. Кончик острья мог оплавляться при искровом пробое, что увеличивало напряжение инициации коронного разряда.

Время запуска отдельных кадров ICCD камеры и их длительность регулировались. Это позволяло фотографировать промежутки до появления плазмы у острья, а также во время второго полупериода импульса напряжения. При положительной полярности первого импульса генератора удалось зарегистрировать свечение плазмы при минимальной длительности одного кадра 3 нс (рис. 3, кадры 1–4).

Из анализа кадров 1–4 следует, что при положительной полярности острья переход от шарового стримера к цилиндрическому происходит за короткое время и с помощью камеры его зафиксировать не удастся. Однако на кадрах 1–4 и 5–8 хорошо видно движение фронта цилиндрического

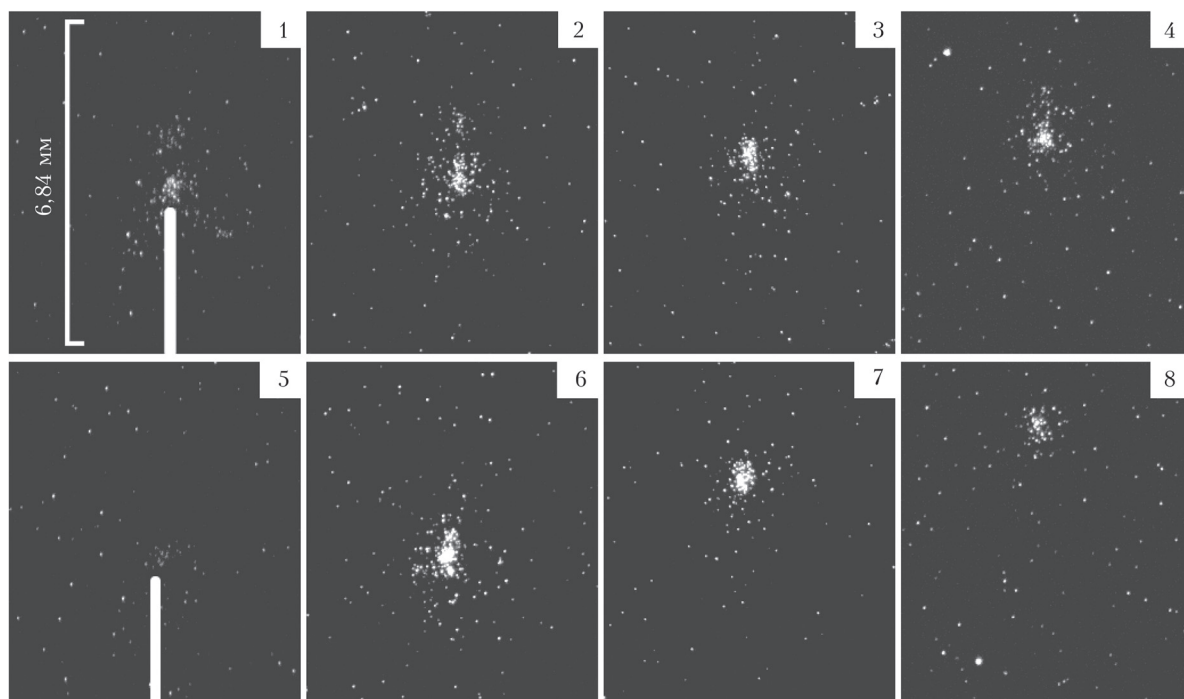


Рис. 3. Коронный разряд у одиночного острья положительной полярности, которое показано только на первом кадре каждой из серий. Длительность кадров 1–4 составляет 3 нс (получены с интервалом 5 нс), а кадров 5–8 – 10 нс (получены с интервалом 10 нс); максимальное напряжение импульсного источника $U_m = 18$ кВ

стримера при длительности отдельных кадров 3 и 10 нс соответственно. Из длительности одного кадра, размеров и положения светящейся области, а также задержки между отдельными кадрами можно оценить среднюю скорость движения фронта стримера. Для условий на кадрах 1–4 при частоте следования импульсов от третьего источника 24 кГц она составила ~ 5 см/мкс, тогда как скорость фронта стримера, полученная из снимков 5–8 при частоте следования импульсов третьего источника 55 кГц, составила ~ 8 см/мкс. Излучение на кадре 5 не регистрировалось, а появлялось на кадре 6 на удалении от острия. Это связано с уменьшением задержки до запуска ICCD камеры. Точно определить среднюю скорость фронта шарового стримера было сложно даже с помощью камеры, по приблизительной оценке, она была не менее 15 см/мкс. Эти скорости движения фронта катодонаправленных стримеров не противоречат известным данным [7].

Как следует из измерений характеристик излучения с помощью ICCD камеры, в условиях применения третьего источника питания интенсивность первых стримеров при положительной полярности острия с импульсным источником напряжения больше, чем при отрицательной. Это можно объяснить большей скоростью фронта шарового стримера и более быстрым переходом к цилиндрическому стримеру, следовательно, — увеличением динамического емкостного тока при импульсах с положительным острием. С одним острием сжимающийся конденсатор, определяющий динамический емкостной ток, был образован фронтом стримера и удаленными проводящими предметами, имеющими потенциал земли. При увеличении длительности кадра до нескольких сотен наносекунд свечение фронта стримера на различных расстояниях от иглы сливалось, и стример имел форму струи (цилиндра).

Интегральные изображения свечения цилиндрических катодонаправленных стримеров и плазмы

у положительного острия в квазистационарном режиме приведены на рис. 4.

Мы использовали промежуток «острие — плоскость», на котором напряжение поднималось с малой скоростью. Стримеры цилиндрической формы в этих условиях формировались с частотой не более 10 кГц. Один из них виден на кадрах 1 и 4. Он ветвится начиная с середины промежутка и касается плоского электрода. Также регистрировались положительные стримеры, которые не ветвились. На кадрах 2 и 3 — квазистационарный режим коронного разряда, во время которого интенсивное свечение плазмы наблюдается только у острия. Ток разряда при этом существенно не меняется. Фотографии цилиндрических стримеров с одиночного острия положительной полярности и в промежутках «острие — плоскость» приведены также в [12, 20–22].

Динамика формирования плазмы на острие электрода отрицательной полярности показана на рис. 5, кадры 1–4.

Как и на рис. 3, условия инициирования коронного разряда примерно соответствовали максимальному напряжению на промежутке. На кадре 1 из-за специально подобранной задержки запуска ICCD камеры свечение плазмы отсутствует. На кадре 2 появилась область свечения плазмы диаметром $\sim 0,6$ мм. На кадре 3 размеры области свечения плазмы и интенсивность ее излучения практически не изменялись. Кадр 4 регистрировался одновременно с кадром 1 и представляет собой интегральный промежуток времени кадров 1, 2, и 3 (последние 10 нс кадра 3 в интегральном снимке не учитываются).

Из размера изображений на кадре 2 можно оценить минимальную скорость расширения плазменной области. Если предполагать, что светящаяся область возникла у острия за время не более 50 нс, получим, что скорость расширения плазменной области — не менее 1,8 см/мкс. Она соответствует

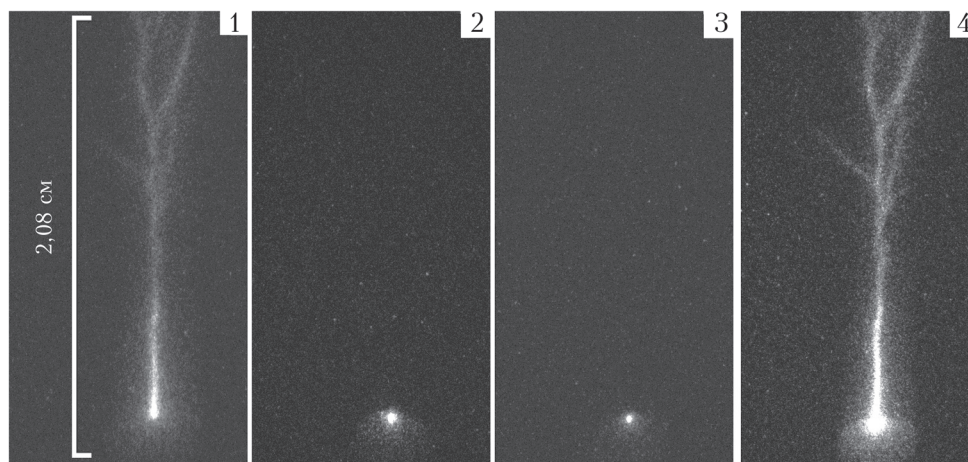


Рис. 4. Коронного разряд в промежутке «острие положительной полярности — плоскость». Выдержка для кадров 1–3 — 50 мкс, 4 — 150 мкс. Задержка от начала съемки для кадров 1 и 4 — 0 мкс, 2 — 50 мкс; 3 — 100 мкс. Второй источник постоянного напряжения; $U_m = 17,3$ кВ; $d = 2,1$ см; игла № 1

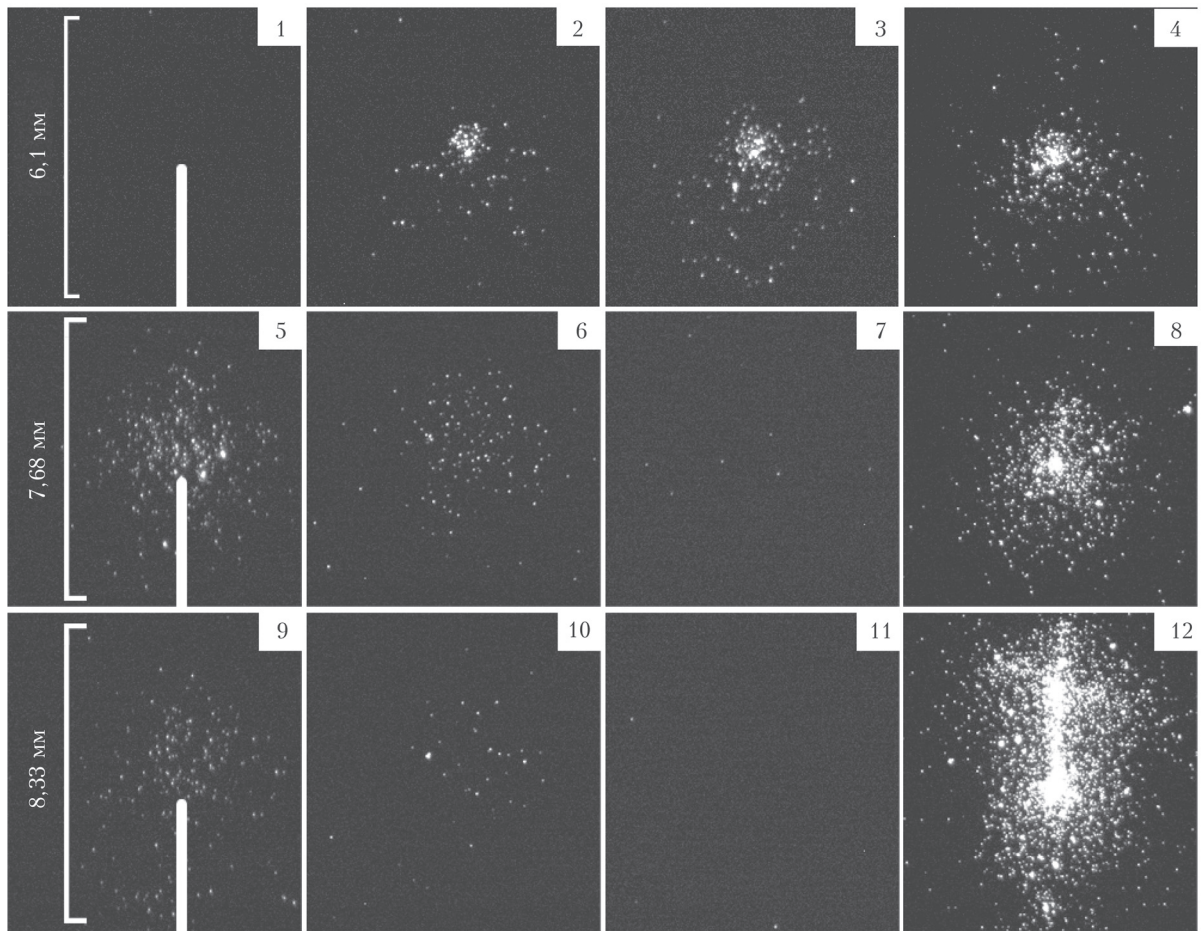


Рис. 5. Коронный разряд у одиночного острия отрицательной полярности, которое показано только на первом кадре каждой из серий. Длительность кадров 1–3, 5–7, 9–11 – 50 нс; 4 – 140 нс; 8 – 500 нс; 12 – 1 мкс. Задержка от начала съемки для кадров 1, 4, 5, 8, 9, 12 – 0 нс; 2, 5, 9 – 50 нс; 3, 7, 11 – 100 нс. Задержка включения ICCD камеры увеличена на 450 нс для кадров 5–12 по сравнению с кадрами 1–4. Импульсный источник высокого напряжения; $U_m = 19,2$ кВ

средней скорости движения фронта шарового анодо-направленного стримера. Расширение светящейся области после кадра 2 замедляется, и ее размер на кадрах 3 и 4 существенно не изменяется (рис. 5). Это можно объяснить уменьшением электрического поля при удалении фронта стримера от острия, а также уменьшением напряжения от импульсного источника (см. рис. 2, б).

При фотографировании свечения плазмы в последующие моменты времени видно, что диаметр светящейся области продолжал увеличиваться. Интенсивность свечения плазмы при этом уменьшается и перестает регистрироваться на кадрах 7, 11. Динамика свечения плазмы показана на кадрах 5–7 и 9–11 рис. 5 благодаря задержке включения ICCD камеры на 450 нс по сравнению со съемкой на кадрах 1–4. Положение отдельных кадров приведено на рис. 2, б.

Влияние положительной полуволны напряжения иллюстрируют кадры 8 и 12 (рис. 5). На кадре 8, длительность которого была увеличена с 140 до 500 нс, у острия появляется яркое пятно. Напряжение на острие за счет увеличения длительности кадра 8 и задержки включения ICCD камеры на 450 нс

начинает менять полярность. Так как длительность кадра 12 составляет 1 мкс, мы уже наблюдаем интегральное свечение цилиндрического катодонаправленного стримера, а не движение его фронта, как на рис. 3. Видно, что длина цилиндрического стримера составила ~ 5 мм, скорость его продвижения была не менее 1 см/мкс. Хотя амплитуда напряжения положительной полуволны была существенно меньше, чем отрицательной, и не превышала 3,2 кВ, положительный цилиндрический стример стабильно формировался в импульсно-периодическом режиме.

Таким образом, в наших экспериментах были зарегистрированы стримеры как шаровой формы, так и цилиндрической. Причем стримеры цилиндрической формы стартовали с границы плазмы у положительного острия при существенно более низких напряжениях, чем у отрицательного. Так, на рис. 5 во время первой отрицательной полуволны при напряжении до 19,2 кВ цилиндрические стримеры не формировались, а смена полярности напряжения во время второй полуволны привела к появлению цилиндрического катодонаправленного стримера при напряжении менее 3,2 кВ.

Заключение

В настоящей работе в условиях коронного разряда было зарегистрировано формирование стримеров как сферической, так и цилиндрической формы. Сферические стримеры инициируют коронный разряд, причем при меньших напряжениях с отрицательным острием. Цилиндрические стримеры стартуют с острия положительной полярности или границы облака плазмы у острия при более низких напряжениях (в наших условиях при импульсном источнике питания – в 6 раз), чем с отрицательной. Их длина на порядок и более превышает размер стримеров шаровой формы. За счет стримеров цилиндрической формы переход от коронного разряда к искровому в промежутках «острие–плоскость» наступает при существенно более низких напряжениях с острия положительной полярности или с предварительно созданной плазмы у острия положительной полярности, чем с острия отрицательной полярности. Такая динамика развития разряда объясняет причину скачкообразного движения молнии с отрицательным основным лидером. На удалении от основного лидера с границы плазменных образований периодически стартуют катодонаправленные стримеры, которые приводят к формированию объемных лидеров и быстрому продвижению основного лидера. Мы считаем, что в образовании плазмы на расстоянии от головки основного лидера с концентрацией электронов, достаточной для старта цилиндрического стримера, участвуют убегающие электроны. В воздухе атмосферного давления убегающие электроны и рентгеновское излучение были зарегистрированы во многих работах (см., например, [6, 10, 16, 17, 19–21, 23] и ссылки в них).

Авторы благодарят Д.В. Белоplotова за проведение расчетов электрического поля у электродов с малым радиусом кривизны.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН по теме № 13.1.4.

1. Schonland B.F.J., Hodges D.B., Collens H. Progressive Lightning. V. A Comparison of photographic and electrical studies of the discharge process // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1938. V. 166, N 924. P. 56–75.
2. Clarence N.D., Malan D.J. Preliminary discharge processes in lightning flashes to ground // Q. J. Roy. Meteorol. Soc. 1957. V. 83, N 356. P. 161–172.
3. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 308 с.
4. Kochkin P.O., van Deursen A.P., Ebert U. Experimental study of the spatio-temporal development of meter-scale negative discharge in air // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. V. 47, N 14. P. 145203.
5. Teunissen J., Ebert U. 3D PIC-MCC simulations of discharge inception around a sharp anode in nitrogen/oxygen mixtures // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. V. 25, N 4. P. 044005.
6. Dwyer J.R., Rassoul H.K., Al-Dayeh M., Caraway L., Chrest A., Wright B., Kozak E., Jerauld J., Uman M., Rakov V., Jordan D.M., Rambo K. X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32, N 1. P. L01803.
7. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Интеллект, 2009. 691 с.

8. Афанасьев С.Б., Лавренко Д.С., Петрушенко И.Н., Стишков Ю.К. Некоторые особенности коронного разряда в воздухе // Журн. техн. физ. 2008. Т. 78, № 7. С. 30–34.
9. Акишев Ю.С., Анонин Г.И., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Панькин М.В., Петряков А.В., Трушкин Н.И. О чередовании нестационарных режимов газового разряда в промежутке острие–плоскость с потоком воздуха при атмосферном давлении // Физика плазмы. 2008. Т. 34, № 4. С. 347–360.
10. Белоplotов Д.В., Тарасенко В.Ф., Сорокин Д.А., Ломаев М.И. Формирование стримеров шаровой формы при субнаносекундном пробое газов высокого давления в неоднородном электрическом поле // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106, № 10. С. 627–632.
11. Тарасенко В.Ф., Кузнецов В.С., Панарин В.А., Скакун В.С., Соснин Э.А., Бакшт Е.Х. Роль стримеров в формировании коронного разряда при резко неоднородном электрическом поле // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 110, № 1. С. 72–77.
12. Кузнецов В.С., Тарасенко В.Ф., Панарин В.А., Скакун В.С., Соснин Э.А., Бакшт Е.Х. Начальная стадия формирования диффузных струй при импульсном разряде в неоднородном электрическом поле // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 5. С. 414–418; Kuznetsov V.S., Tarasenko V.F., Panarin V.A., Skakun V.S., Sosnin E.A., Baksht E.Kh. The initial stage of diffuse jet formation in a pulsed discharge with a non-uniform electric field in air // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 5. P. 607–611.
13. Pai D.Z., Lacoste D.A., Laux C.O. Transitions between corona, glow, and spark regimes of nanosecond repetitively pulsed discharges in air at atmospheric pressure // J. Appl. Phys. 2010. V. 107, N 9. P. 093303.
14. Tardiveau P., Moreau N., Bentaleb S., Postel C., Pasquiers S. Diffuse mode and diffuse-to-filamentary transition in a high pressure nanosecond scale corona discharge under high voltage // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42, N 17. P. 175202.
15. Hoder T., Bonaventura Z., Prukner V., Gordillo-Vázquez F.J., Šimek M. Emerging and expanding streamer head in low-pressure air // Plasma Sources Sci. Technol. 2020. V. 29, N 3. P. 03LT01.
16. Tarasenko V.F., Naidis G.V., Beloplotov D.V., Kostyrya I.D., Babaeva N.Y. Formation of wide streamers during a subnanosecond discharge in atmospheric-pressure air // Plasma Phys. Rep. 2018. V. 44, N 8. P. 746–753.
17. Kochkin P., Kuhn C., Ebert U., van Deursen L. Analyzing x-ray emissions from meter-scale negative discharges in ambient air // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. 25. N. 4. P. 044002.
18. Shao Tao, Tarasenko V.F., Zhang Cheng., Burachenko A.G., Rybka D.V., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Baksht E., Yan Ping. Application of dynamic displacement current for diagnostics of subnanosecond breakdowns in an inhomogeneous electric field // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84, N 5. P. 053506.
19. Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Sorokin D.A., Tarasenko V.F. Displacement current during the formation of positive streamers in atmospheric pressure air with a highly inhomogeneous electric field // Phys. Plasmas. 2018. V. 25, N 8. P. 083511.
20. Рыбка Д.В., Андроников И.В., Евтушенко Г.С., Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Тригуб М.В., Шутько Ю.В. Коронный разряд в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения длительностью 10 нс // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 85–

- 90; *Rybka D.V., Andronikov I.V., Evtushenko G.S., Kozyrev A.V., Kozhevnikov V.Yu., Kostyrya I.D., Tarasenko V.F., Trigub M.V., Shut'ko Yu.V.* Corona discharge in atmospheric pressure air under a modulated voltage pulse of 10 ms // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 5. P. 449–454.
21. *Shao Tao, Tarasenko V.F., Zhang Cheng, Rybka D.V., Kostyrya I.D., Kozyrev A.V., Kozhevnikov V.Y.* Runaway electrons and X-rays from a corona discharge in atmospheric pressure air // *New J. Phys.* 2011. V. 13, N 11. 20 p.
22. *Wenzheng L.I.U., Zheng Q., Mingchao H.U., Luxiang Z.H.A.O., Zhiyi L.I.* Study of generation characteristics of glow-type atmospheric-pressure plasma jet based on DC discharge in air // *Plasma Sci. Technol.* 2019. V. 21, N 12. P. 125404.
23. *Tarasenko V.* Runaway electrons in diffuse gas discharges // *Plasma Sources Sci. Techn.* 2020. V. 29, N 3. P. 034001.

V.F. Tarasenko, V.S. Kuznetsov, E.Kh. Baksht, V.A. Panarin, V.S. Skakun, E.A. Sosnin. **Formation of ball and cylindrical streamers during corona discharge in air at atmospheric pressure.**

The conditions for the formation of ball and cylindrical streamers in a corona discharge were studied. It is shown that formation of cylindrical streamers from a positive tip or from a plasma at a positive tip can explain the stepwise progression of the main negative leader in lightning and during the breakdown of long gaps.