

и в то же время для осуществления реакции при высокой температуре. Так получают, например, миллионы тонн карбида кальция CaC_2 из извести и кокса. (При воздействии воды на карбид кальция образуется ацетилен, который используется для автогенной сварки, для синтеза органических соединений, для переработки в цианид кальция CaCN_2 , служащий удобрением, и т. д.) В химической промышленности дугу используют также для осуществления ряда реакций; например, был разработан и применен способ получения окиси азота из воздуха (по уравнению $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}$) с последующим окислением до NO_2 в целях производства азотной кислоты. Имеется способ обработки бензина в газовом разряде для повышения его горючих свойств. В газовой смеси водорода и азота разряд (в особенности тлеющий) приводит к образованию аммиака NH_3 . Тихий разряд применяют для выработки озона из кислорода и т. д.

В электротехнике дуговой разряд используют в приборах, служащих для выпрямления тока, например в ртутных выпрямителях.

§ 49. Искровой разряд. Молния

Электрическая искра имеет вид тонкой, прихотливо изогнутой и ярко светящейся полоски, которая обычно сильно разветвлена (рис. 174). Этот светящийся канал искры никогда, однако, не бывает хоть сколько-нибудь похож на те остроугольные зигзаги, посредством которых принято условно изображать молнию. Полоска искры



Рис. 174. Характерный вид искры.

с огромной быстротой прорезывает разрядный промежуток, гаснет и вновь возникает. Фотографирование искры посредством камеры с быстро движущимся объективом (камеры Бейса) или с быстро движущейся пленкой показывает, что по одному и тому же каналу искры, который иногда деформируется, пробегает несколько разрядов. Для исследования отдельных стадий развития искры применяют фотозатворы, управляемые высокочастотным током и основанные на применении явления Керра (§ 95). Одно из первых исследований строения искры было выполнено проф. Д. А. Рожанским в 1911 г. Д. А. Рожанский производил фотографирование искры, отклоняя искру действием магнитного поля.

Пробой газа, завершающийся искровым разрядом, происходит при определенной напряженности поля, которая должна быть тем больше, чем больше плотность газа и чем меньше его начальная ионизация.

Ниже приведены числовые данные, характеризующие величину искрового промежутка в комнатном воздухе. Напряженность электрического поля близ электродов сильно зависит от кривизны

поверхности электрода, поэтому минимальные напряжения, при которых для данного расстояния между электродами начинается лавинный разряд, неодинаковы для электродов различной формы; между остриями искровой разряд начинается при более низком напряжении, чем между шарами или плоскими электродами.

Величина искрового промежутка в комнатном воздухе

Напряжение (в вольтах)	Промежуток между остриями (в мм)	Промежуток между шарами (в мм)		Промежуток между плоскостями (в мм)
		при диаметре шара 5 см	при диаметре шара 30 см	
20 000	15,5	5,8	6,0	6,0
40 000	45,5	13	13	13,7
100 000	220	45	35,7	36,7
200 000	410	262	75,3	75,3
300 000	600	530	126	144

В комнатном воздухе обычно содержится лишь очень незначительное число ионов, примерно несколько тысяч в кубическом сантиметре (при нормальном электрическом состоянии атмосферы у поверхности земли—в среднем около 700 пар ионов в 1 см^3). Когда

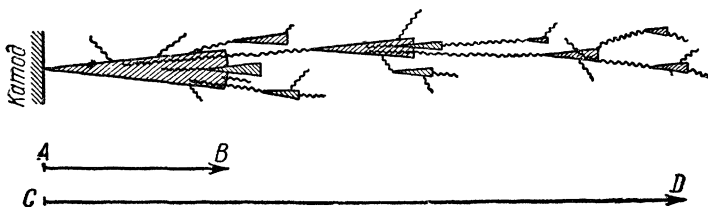


Рис. 175. Схема развития отрицательного стримера

к электродам приложено достаточно высокое напряжение, то начинается рост электронных лавин, но благодаря малому начальному числу ионов требуется время, чтобы начавшийся процесс завершился образованием искры. Если соединить электроды с источником тока высокого напряжения на чрезвычайно короткое время, то развитие электронных лавин не успеет завершиться искровым разрядом. Измерение времени, в течение которого в газе благодаря развитию лавин образуются каналы повышенной электропроводности, показало, что в данном случае большую роль играет ф о т о н н а я и о н и з а ц и я.

На рис. 175 представлена схема, поясняющая, почему рост электропроводящего канала, или, как говорят, распространение *стри-*

мера, происходит быстрое, чем продвижение электронной лавины. На этом рисунке лавины условно показаны в виде заштрихованных конусов, а волнистыми линиями изображены пути фотонов. Нужно представить себе, что внутри каждого конуса, изображающего развивающуюся лавину, газ ионизируется ударами электронов; новоотщепленные электроны, разгоняемые полем, ионизируют встречаемые ими частицы газа, и таким образом лавинно нарастает число электронов, движущихся к аноду, и число положительных ионов, дрейфующих к катоду. Левые концы волнистых линий показывают атомы, которые были «возбуждены» ударом электрона и вслед за тем испустили фотон. Двигаясь со скоростью 300 000 км/сек, фотоны обгоняют лавину и в каком-то месте, которое изображено концом волнистой линии, ионизируют частицу газа. Отщепленный здесь электрон, устремляясь к аноду, порождает новую лавину далеко впереди первой лавины. Таким образом, пока первая лавина вырастает, скажем, на величину малой стрелки *AB*, показанной на рис. 175, намечающийся канал повышенной электропроводности газа, т. е. стример, распространяется на величину большой стрелки *CD*, показанной на том же рисунке. В следующей стадии отдельные лавины в отрицательном стримере, нагоняя друг друга, сливаются, образуя целостный канал ионизированного газа (на рисунке первая лавина уже нагнала вторую, а четвертая нагнала пятую).

Физико-математические условия, при соблюдении которых может происходить развитие стримеров, были теоретически изучены Миком и Лебом (1940 г.). Как уже было пояснено выше, *отрицательный стример* представляет собой, в сущности, *ускоренное действием фотоионизации продвижение электронных лавин и их слияние в общий электропроводящий канал*.

Совершенно иное строение и существенно иные свойства имеет положительный стример. Общей чертой его с отрицательным стримером является только фотоионизация, которая в обоих случаях играет главенствующую роль.

Положительный стример представляет собой канал газоразрядной плазмы, стремительно вырастающий от анода к катоду. На рис. 176 схематически пояснено, как происходит развитие такого канала. Возникновению положительного стримера предшествует пробег электронных лавин по газоразрядному промежутку. Они оставляют на своем пути большое число новообразованных положительных ионов, концентрация которых особенно велика там, где лавины получили свое наибольшее развитие, т. е. около анода (рис. 176, наверху слева). Если концентрация положительных ионов здесь достигает *определенной величины* (близкой к 10^{12} ионам в 1 см^3), то, во-первых, обнаруживается интенсивная фотоионизация, во-вторых, электроны, освобожденные частицами газа, поглотившими фотоны, притягиваются положительным пространственным зарядом в головную часть положительного стримера, и, в-третьих, вследствие фотоионизации концентрация положительных ионов на пути стримера к катоду возрастает. На рис. 176 пути фотонов показаны волнистыми линиями; фотоны выбрасываются в разные стороны из области положительного пространственного заряда (короткие стрелки указывают направление движения отщепленных электронов); видно, что многие электроны вовлекаются в область наибольшей концентрации положительных ионов—в головную часть положительного стримера. Насыщение электронами пространства, заполненного положительными зарядами, превращает эту область в газоразрядную плазму.

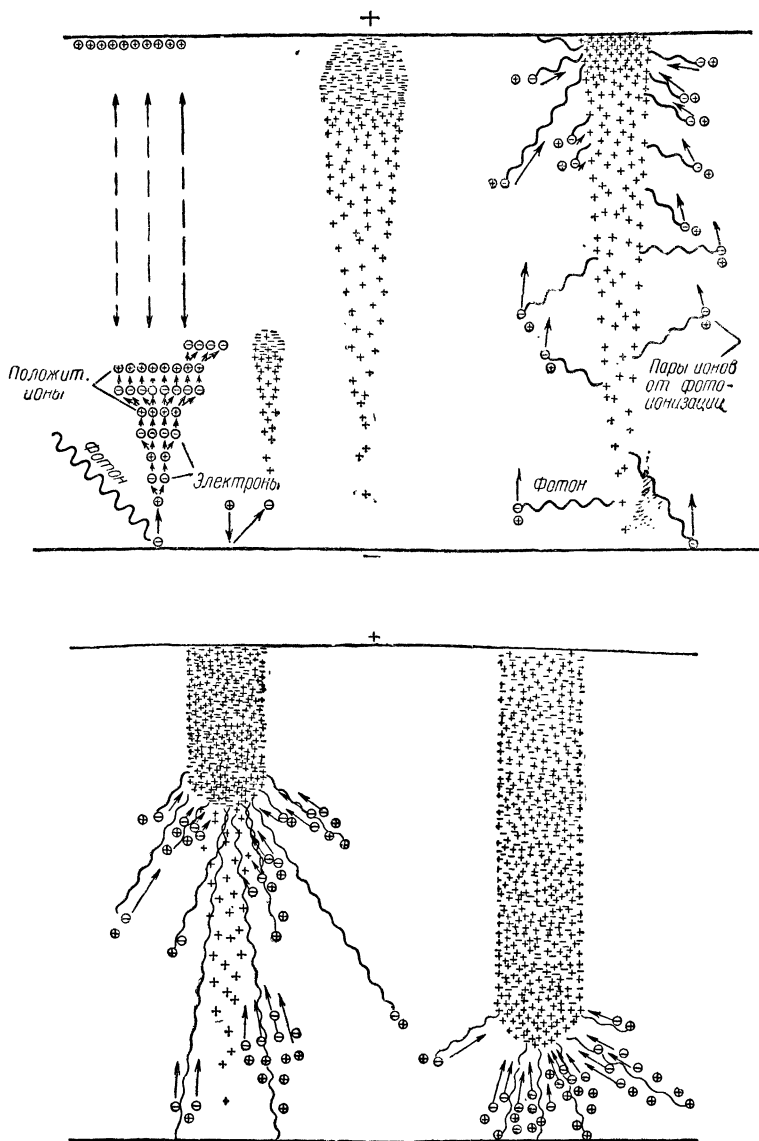


Рис. 176. Схема возникновения и развития положительного стримера.

Так формируется в газе канал, обладающий высокой электропроводностью. Формирование этого канала с газоразрядной плазмой и является развитием положительного стримера (рис. 176). Если на пути прорастания этого канала в направлении к катоду в головной части стримера имеется достаточная концентрация положительных ионов, то стример продвигается с громадной скоростью. В противном случае он обрывается.

Поясненные выше схемы развития стримеров дают только приблизительное представление о подготовительной стадии искрового разряда. Действительная картина развития стримера более сложна, так как образующиеся пространственные заряды резко искажают электрическое поле, вызвавшее возникновение стримера.

В длинных газоразрядных промежутках неравномерности поля и недостаточная фотоионизация по направлению кратчайшего расстояния от головной части стримера к электроду приводят к искривлениям канала и возникновению многочисленных ответвлений.

Развитие положительных стримеров начинается у положительного электрода в местах наибольшей напряженности поля: около острых выступов, острых кромок и других неровностей поверхности анода. Поэтому при разряде между острием и диском часто наблюдаются искры, соединяющие положительное острие с центром отрицательного диска, и искры, соединяющие кромки положительно заряженного диска с отрицательным острием (рис. 177); в первом случае пробой происходит при меньшем напряжении.

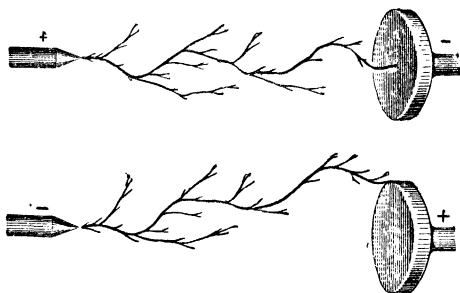


Рис. 177. Характерный вид искрового разряда между острием и диском при большом разрядном промежутке.



Рис. 178. Фотография искры на движущейся пленке.

Деформации поля зарядами, образующимися в стримере, и сочетание сложных процессов, происходящих в стримере, приводят к тому, что искровой разряд часто развивается толчками. При этом

новый стример пробегает путь, проложенный предыдущим угасшим стримером. На рис. 178 представлена фотография единичного искрового разряда на быстро движущейся фотопленке. Здесь видно толчкообразное развитие искры и видно, что отрицательный и положительный стримеры растут навстречу друг другу. Когда головки стримеров встречаются, образуется проводящий канал, по которому и происходит разряд.

Аналогичная, но еще более сложная картина обнаруживается при развитии *молнии*. Начальной стадией является развитие *пилотирующего стримера молнии*, свечение которого почти неуловимо. Обычно пилотирующий стример распространяется от отрицательно заряженного облака. По еще узкому каналу повышенной ионизации, образованному пилотирующим стримером молнии,

устремляются со скоростью порядка тысяч километров в секунду мощные электронные лавины, создающие довольно яркое свечение. Электропроводность канала при этом чрезвычайно возрастает и сечение канала расширяется. Эту стадию называют развитием *лидера молнии*. При малой начальной ионизации воздуха развитие лидера происходит скачкообразно — с остановками на десятки миллисекунд через каждые 5—10 м его распространения (такие лидеры называют «ступенчатыми» в отличие от так называемых «стрельчатых», которые распространяются с непрерывной стремительностью).

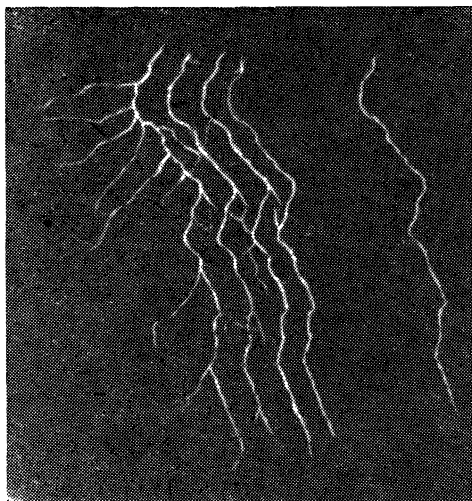


Рис. 179. Фотография молнии на движущейся пленке. Здесь паузы между первыми ударами 0,03 сек.; последняя пауза в четыре раза длиннее.

При приближении лидера к земле в земле индуцируются заряды противоположного знака, и от высоких зданий, молниеотводов, деревьев вырастает *встречный лидер*. В момент его слияния с лидером, опускающимся от облака, т. е. когда разрядный промежуток между облаком и землей оказывается замкнутым электропроводящим каналом, по этому каналу пробегает *главный разряд молнии* со скоростью порядка десятков тысяч километров в секунду. Если канал имел разветвления (а так обычно и бывает), то главный разряд распространяется по всем ответвлениям. Диаметр основного канала

молнии обычно имеет величину 10—20 см и наиболее яркое свечение в нижней части. В канале создается повышенное давление, которое после удара молнии вызывает разрыв канала, что и порождает явление грома. Заряд, переносимый молнией, обычно составляет несколько кулонов и часто несколько десятков кулонов. Мгновенное значение величины тока молнии часто составляет десятки, а иногда и сотни тысяч амперов.

Молниевой разряд уносит заряды обычно только из некоторой части облака. К этому месту устремляются заряды из других частей облака. Поэтому чаще всего вслед за первым ударом молнии через

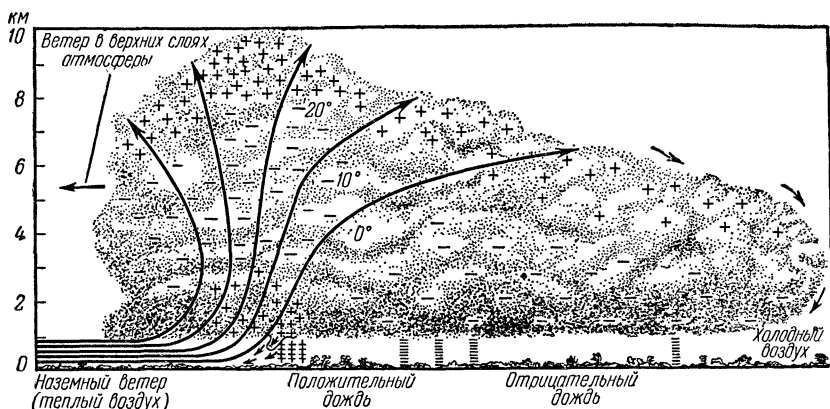


Рис. 180. Схема грозового (кучево-дождевого) облака.

сотые доли секунды по тому же, но иногда несколько деформированному или иначе разветвленному каналу происходят *повторные удары молнии* (два, три и больше); каждому из них предшествует лидер, восстанавливающий электропроводность канала. Рис. 179 воспроизводит картину пяти ударов молнии по одному каналу, снятых на движущуюся пленку. В некоторых случаях сильный ветер так смещает канал молнии, что даже при фотографировании обычным аппаратом можно различить отдельные удары разрядов.

На рис. 180 показана схема наиболее часто встречающегося распределения зарядов в грозовом облаке. На переднем крае облака и по нижней части его обычно распределены отрицательные заряды. Здесь же имеется область положительных зарядов; положительно заряжена также вся верхняя часть облака. Направление ветра (на рисунке оно указано стрелками), уносящего облако, обычно противоположно наземному ветру. Вначале сильный дождь уносит из облака положительный заряд, позже идет умеренный отрицательно заряженный дождь.

В отсутствие грозы электрическое поле в атмосфере направлено сверху вниз, так как *земля заряжена отрицательно, а положительный заряд рассеян в атмосфере.*

Когда отсутствуют возмущающие влияния, создаваемые, в частности, грозовыми облаками, напряженность электрического поля в атмосфере уменьшается с высотой. У земли напряженность электрического поля имеет порядок 100—150 в/м. На высоте 6 км она равна 10 в/м, а на высоте 9 км примерно 5 в/м. Напряженность поля на высоте 20 км в 100 раз меньше, чем у земли.

Это быстрое уменьшение напряженности электрического поля с высотой показывает, что в сравнении с однородным полем электрическое поле в атмосфере весьма усложнено зарядами, распределенными в атмосферном воздухе.

При грозах напряженность поля в атмосфере может в 100 и 1000 раз превышать нормальную.

Под грозовым облаком направление поля чаще всего *меняется на обратное*, от земли к отрицательно заряженному нижнему краю облака, а напряженность поля вблизи земли перед молниевым разрядом может достигать 200—300 тысяч вольт на метр. Разность потенциалов между облаком и землей перед ударом молнии часто составляет сотни миллионов, а иногда и миллиарды вольт. Большинство ударов

молний происходит от отрицательно заряженных облаков. Молнии нередко имеют в длину несколько километров. Часто молниевые разряды происходят между отдельными тучами. Наблюдалась гроза, при которой насчитывалось 4—7 тысяч ударов молний за час. На земном шаре в среднем за сутки происходит около 44 тысяч гроз (единовременно в среднем около 1800 гроз) и ежеминутно происходит несколько тысяч ударов молний.

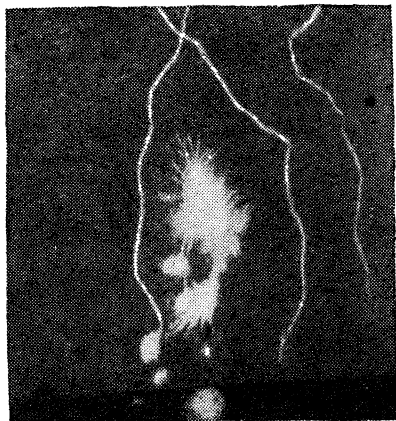


Рис. 181. Фотография шаровой молнии

шаров диаметром около 10—20 см, а иногда и нескольких метров. Шаровые молнии передвигаются плавно, с небольшой скоростью и в некоторых случаях скачкообразно. Отмечены случаи, когда шаровые молнии, касаясь земли или каких-либо предметов, взрывались и причиняли сильные разрушения.

Многочисленные попытки лабораторного воспроизведения такого типа разряда не дали удовлетворительных результатов, несмотря на то, что некоторым исследователям (Плантэ в 1883 г., Н. А. Гезехусу в 1900 г., Кэвуду и др.) уда-

валось получать разряды шарового типа. На рис. 182 пояснен опыт Плантэ. Если, применяя высоковольтный источник постоянного напряжения, анод погрузить в электролит и поднести к поверхности электролита катод, то зажигается дуговой разряд. Но когда в электролит погружен катод и к поверхности электролита подносится анод, дуга не может образоваться, так как исключается возможность накала и термоэлектронной эмиссии из катода. Плантэ обнаружил, что в этом случае при соблюдении определенных условий между анодом и поверхностью электролита образуется светящийся и быстро вращающийся шарик, который через некоторое время проскальзывает по поверхности электролита к катоду.

Одна из многочисленных гипотез, предложенных для объяснения шаровой молнии (гипотеза Мейснера), трактует этот тип разряда как завихрение

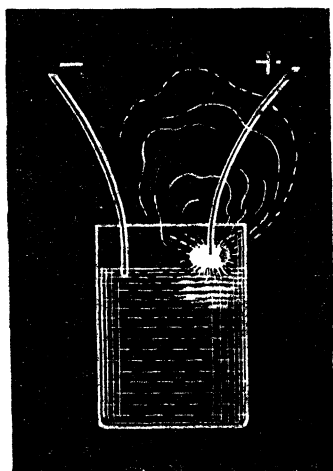


Рис. 182. Схема опыта Плантэ.

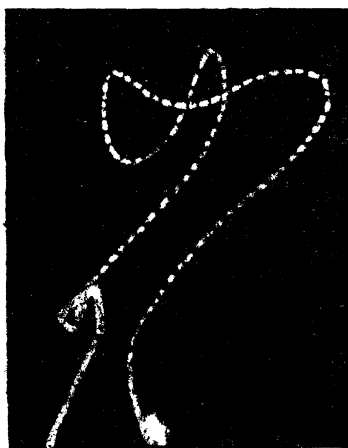


Рис. 183. Фотография четочной молнии.

газоразрядной плазмы, происходящее в изгибе линейной молнии. По другой гипотезе (Матиаса) предполагается, что в шаровой молнии химически аккумулируется энергия разряда, причем образуются неустойчивые, способные разлагаться со взрывом высшие соединения азота с кислородом.

Иногда молния оказывается состоящей из нескольких десятков небольших светящихся шаров (диаметром меньше 10 см), удаленных один от другого на расстояние менее метра. Этот вид разряда называют *четочной молнией* (рис. 183). Приемлемой, достаточно обоснованной теории шаровых и четочных молний еще не имеется.

Если при использовании высокого постоянного напряжения между электродами поставлена пластина из твердого диэлектрика (стекла, эбонита и т. п.) и пластина эта имеет такую толщину, что искра ее не пробивает, а ширину не слишком большую, то наблюдается *скользящий искровой разряд*, который проходит по поверхности пластины и обигает ее. Для исследования этого разряда его создают на фотографической пластинке и потом проявляют ее (рис. 184). Получаемые таким путем изображения разряда называют *фигурами Лихтенберга*. Их радиус пропорционален напряжению разрядного импульса. Этим пользуются (применяя особые приборы для фотографирования скользящего разряда — клидонографы) при массовом, статистическом исследовании молний,

В СССР ведется систематическое изучение молний и методов грозозащиты. Ведущая роль в этой области принадлежит высоковольтной лаборатории Энергетического института Академии наук СССР.

Когда напряжение недостаточно велико для пробоя газоразрядного промежутка, на электродах наблюдается особый тип разряда—*корона*.

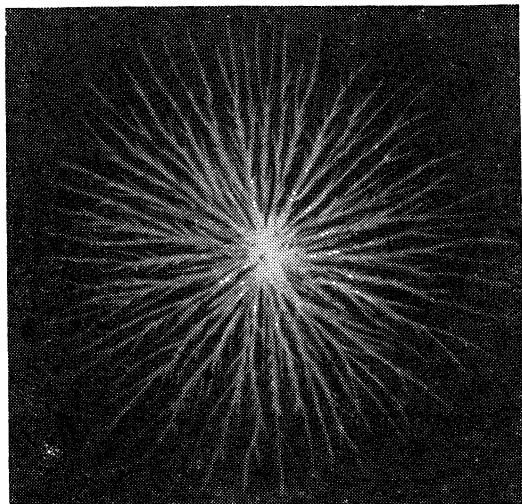


Рис. 184. Скользящий разряд от положительного электрода.

Коронный разряд на высоковольтных сетях вызывает утечки электроэнергии.

Исследование короны показало, что на положительном электроде коронный разряд при относительно невысоких напряжениях состоит из ряда электронно-лавиновых импульсов, длящихся каждый десятитысячные доли секунды. При более высоком напряжении прерывистость явлений менее сказывается и основную роль играют стримеры, обрывающиеся там, где напряженность поля слишком мала для их распространения. Строение и характер свечения коронного разряда на отрицательном электроде в некоторой мере сходны с околокатодной зоной тлеющего разряда.
