

04:12
©1993

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЗАВЕРШЕННОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ ПРИ $P = 10^5$ Па

П. Н. Дашук

Целью исследований, выполненных в данной работе, было изучение характеристик незавершенного скользящего разряда в начальных лавинно-стримерных стадиях.

Исследования проводились с использованием метода автографов скользящего разряда на высокочувствительной аэрофотопленке, изменений тока и напряжения с наносекундным разрешением, метода емкостных зондов.

Расчеты размеров лавины скользящего разряда в воздухе при $p = 100$ кПа, $U = 1.5-3$ кВ и толщине диэлектрика $d = 0.5$ мм показали, что ее размеры: длина 0.1 мм и диаметр $4 \cdot 10^{-2}$ мм весьма малы и ее регистрация методом автографов на фотопленке затруднительна. После приобретения лавиной критического заряда $N = 10^8-10^9$ она переходит в стадию первичного стримера, который развивается на значительно большую длину $l_s = 1-50$ мм и может быть отчетливо зарегистрирован этим методом.

Параметры скользящего разряда в стримерной и лидерной стадиях были получены при формировании его по поверхности полиэтилена толщиной $0.21-5$ мм при воздействии униполярных импульсов напряжения со скоростью нарастания $dU/dt = 10^{12} \text{Vs}^{-1}$ с фронтом $\tau_f = 20 \cdot 10^{-9} \text{с}$ и длительностью $\tau = 10^{-3} \text{с}$.

Газоразрядная плазма при атмосферном давлении формируется при скользящем разряде с самых начальных его стадий не в виде сплошного диффузного слоя, а в виде вполне четко локализованной нитевидной многоканальной структуры, различной по форме для (+) и (-) полярностей.

Эксперименты проводились при использовании системы электродов край плоскости-плоскость (рис. 1,а), которая обеспечивает условия для наиболее однородного формирования каналов скользящего разряда параллельно друг другу, начиная с самых начальных стадий и кончая завершённым многоканальным разрядом. При этих условиях значительно облегчается анализ и становятся более достоверными параметры разряда (ток, заряд, размеры канала), относящиеся к отдельному структурному образованию разрядной плазмы.

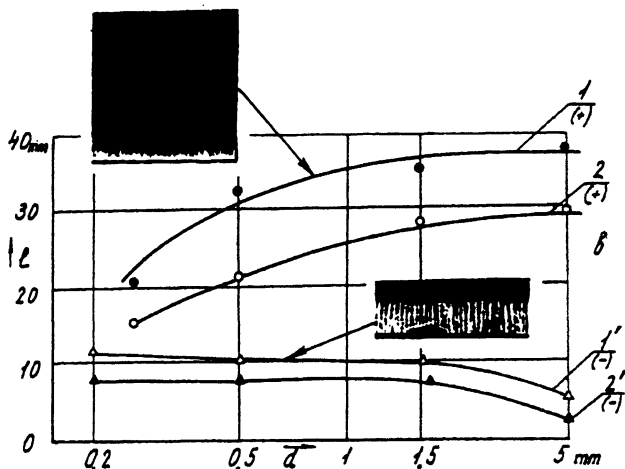
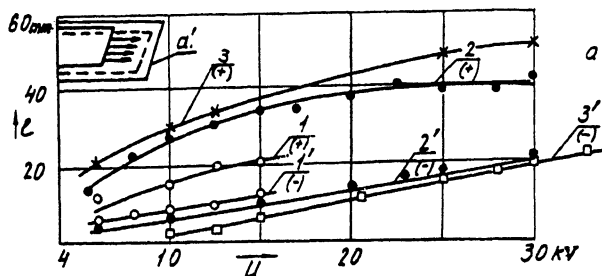


Рис. 1. Зависимости длины разряда.

a — от напряжения U : (1, 1') — $d = 0.25$ мм; (2, 2') — 0.5 мм; (3, 3') — 5.2 мм. *б* — от толщины диэлектрика: (1, 1') — $U = 15$ кВ; (2, 2') — $U = 10$ кВ.

При положительной полярности импульса напряжения разряды выглядят как сложные “древовидные” образования с острыми головками. Длина разрядов l зависит от амплитуды напряжения U и толщины диэлектрика d . При увеличении напряжения кривая $l(U)$ нарастает сначала приблизительно линейно, а затем доходит до насыщения (рис. 1, *a*).

При отрицательной полярности напряжения разряды представляют собой образования с размытыми головками строго одинаковой длины, как правило не имеющие разветвлений (кроме самых кончиков). Длина отрицательных разрядов увеличивается с увеличением напряжения по линейному закону без видимого насыщения кривой $l(U)$ (рис. 1, *a*).

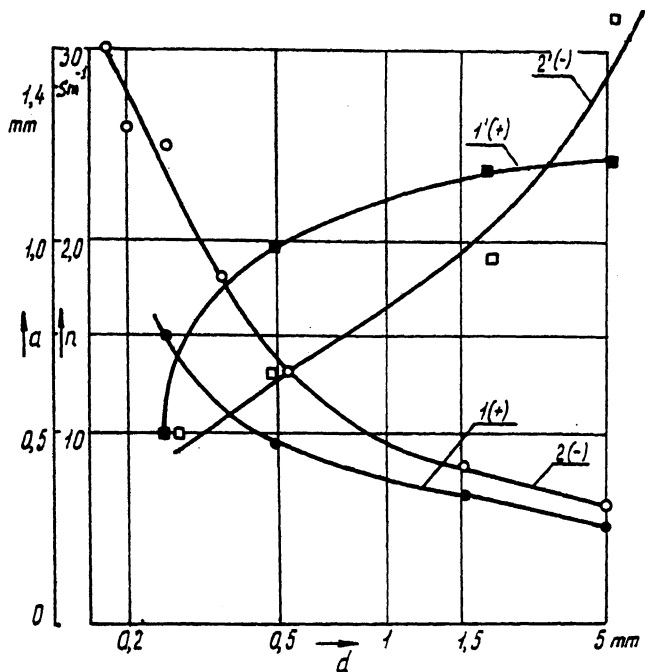


Рис. 2. Зависимости числа разрядов на 1 см периметра электрода n (см⁻¹) и максимальной ширины a канала разряда от толщины d диэлектрика $U = 15$ кВ, (1,2) — n ; (1', 2') — a .

Зависимость длины стримера скользящего разряда от толщины диэлектрика при отрицательной полярности соответствует традиционному представлению о том, что с ростом толщины диэлектрика и заданном напряжении уменьшается напряженность на краю электрода (по крайней мере ее нормальная к поверхности диэлектрика составляющая) и, соответственно, уменьшается длина разряда (кривые 1,2 на рис. 1,в).

Однако при положительной полярности характер зависимости $l(U)$ меняется и длина стримера с увеличением толщины диэлектрика не уменьшается, а напротив, растет, и весьма существенно (вдвое при увеличении d от 0.25 до 5 мм, см. кривые 1,2 на рис. 1,в).

Этот экспериментальный факт требует своего объяснения, к тому же известно, что в лидерной стадии характеристика $l(d)$ для скользящего разряда имеет падающий характер для обеих полярностей напряжения. Следует также отметить, что при равных толщинах и напряжениях длина отрицательных стримеров в 2–10 раз меньше, чем положительных.

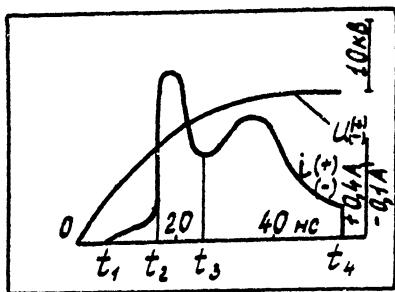


Рис. 3. Осциллограммы воздействующего напряжения U и тока i в одном канале разряда.

Измерения изменения ширины стримера по мере удаления от электрода показали, что при $d = 0.5$ мм и $U = + (10-20)$ кВ она уменьшается приблизительно линейно по мере удаления от электрода. При отрицательной полярности и той же толщине диэлектрика ширина стримера остается практически неизменной 0.55–0.7 мм при изменении напряжения в широком диапазоне: от 10 кВ до -30 кВ.

Измерения линейной плотности стримеров, т.е. их количества на единицу периметра электрода (1 см), показали, что частота разрядов не зависит от напряжения. С ростом амплитуды приложенного напряжения увеличивается лишь длина стримера как при (+), так и при (-), а число точек на электроде, с которых стартуют лавины, а затем развиваются стримеры, остается неизменным. n определяется главным образом толщиной диэлектрика. Как видно из рис. 2, при малых толщинах ($d < 0.5$ мм) весьма быстро растет с уменьшением, при $d > 0.5$ мм плотность числа разрядов n зависит от d значительно слабее, особенно на положительной полярности. Плотность разрядов n на отрицательной полярности всегда больше, чем на положительной, особенно при отрицательной полярности.

Как показал анализ автографов, при всех значениях толщины диэлектрика на обеих полярностях стримеры развиваются рядом, параллельно, и заполняют всю поверхность диэлектрика вблизи края плоского электрода. Поэтому, как это видно из зависимостей 1, 1', 2, 2' на рис. 2, уменьшение ширины стримеров всегда связано с ростом их числа.

Зависимости $i(t)$ для скользящего разряда в лавинно-стримерной стадии весьма похожи, но при одинаковых значениях d и U во время протекания тока стримера сохраняется соотношение

$$i(t)_+ \simeq 4i(t)_-$$

Как видно из осциллограмм $U(t)$ и $i(t)$ на рис. 3, ток в канале разряда при росте напряжения до значения U_s на

участке $t_1 - t_2$ увеличивается медленно. Рост заряда в канале способствует экспоненциальному закону, а разряд в период $t_1 - t_2$ развивается в виде лавин. При $t > t_2$ разряд переходит в стримерную стадию, происходит резкий бросок тока и за 2-3 нс он достигает амплитудного значения; стример толчком, со скоростью $(10^6 - 10^7) \text{ мс}^{-1}$ прорастает на длину l_s и останавливается, а ток в канале начинает падать. Если напряжение продолжает подниматься, то в момент времени t_3 происходит новый подъем тока, накопление заряда в стримере до критической величины и старт с его головки нового первичного стримера, т.е. переход разряда в лидерную стадию.

Величина U_s -напряжения начала стримерной стадии для заданной формы импульса и толщины диэлектрика остается постоянной. Наиболее достоверно величина U_s определяется методом автографов, а также путем экстраполяции к нулевому значению характеристик $Q_s = f(U)$ и $I_s = f(U)$. Оба эти метода дали значение: $U_{s+} = 2-3 \text{ кВ}$ и $U_{s-} = 3-4.5 \text{ кВ}$ при толщине диэлектрика $d = 0.5 \text{ мм}$.

Анализ полученных результатов показывает, что длина отрицательных стримеров уменьшается с увеличением толщины диэлектрика линейно относительно lnd , это согласуется с данными, полученными в [1] и не соответствует формулам Теплера. Зависимость $l = f(U, d)$ для отрицательных стримеров может быть описана следующей эмпирической формулой: $l = -4 + 0.85U - lnd$ где l [см], U [кВ], $3 \leq U \leq 30$; $0.1 \leq d \leq 10$.

Плотность стримеров (n) не зависит от амплитуды напряжения и определяется только толщиной диэлектрика d . С увеличением d и n при обеих полярностях уменьшается, но всегда $n_- \simeq 1.2-2n_+$. Для отрицательной полярности можно записать $n_- = 12d^{-0.5}$, где n — число стримеров на 1 см периметра, d — толщина диэлектрика в мм.

По полученным в работе экспериментальным данным при $d = 0.5 \text{ мм}$ заряд в стримере скользящего разряда перед переходом его в лидерную стадию составляет $q_{s+} = 18nKl$, $q_{s-} = 6nKl$, продольные градиенты — $E_{\tau+} = 3-6 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$, $E_{\tau-} = 12-14 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$, а концентрация зарядов — $n_{e+} = 0.5-1.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $n_{e-} = 0.4-1.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Список литературы

- [1] *Takagi K., Kinoshita K., Jinnouchi K.* // Bull. Electrotech. Lab. 1972. V. 36. N 4. P. 297-309.

Санкт-Петербургский
государственный технический
университет

Поступило в Редакцию
17 августа 1993 г.
