

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

В. С. КОМЕЛЬКОВ

КАНАЛ ЛИДЕРНОГО РАЗРЯДА

(Представлено академиком Г. М. Кржижановским 30 IV 1947)

1. Создание теории пробоя длинных промежутков (длинная искра, молния) встречает значительные трудности из-за отсутствия экспериментальных данных о важнейших параметрах лидерного канала. Особый интерес для теории представляют плотности токов и продольные градиенты как в канале лидера, так и впереди его—в зоне ионизации.

В оценке этих параметров современные авторы (1^{—3}) расходятся на порядки величин, что коренным образом меняет содержание их гипотез и приводит к противоречивым выводам в отношении механизма разряда. Настоящая работа посвящена измерениям упомянутых выше параметров в лидере длинной искры.

2. Токи и скорость лидерного процесса изучались по методике, описанной ранее (4, 5). Измерение размеров области ионизации и изменений диаметра канала лидера во времени производилось с помощью щели, установленной перпендикулярно траектории искры. Изображение части канала, вырезаемой щелью, проектировалось с помощью кварцевой оптики на высокочувствительную фотопленку. Последняя имела форму круга и приводилась во вращение мотором, число оборотов которого достигало 14 000 об/мин.

3. Фотографические исследования показали, что в лидерном разряде имеются две резко различающиеся области: область ионизации значительных размеров, характеризующаяся относительно слабым, диффузным свечением*, и собственно канал лидера, обладающий небольшими размерами и ярким свечением, которое по интенсивности не отличается от свечения канала искры. Область ионизации положительного лидера состоит из множества узких и длинных стримеров, распространяющихся от головки канала лидера в осевом и в радиальном направлениях. По мере продвижения лидера в глубь

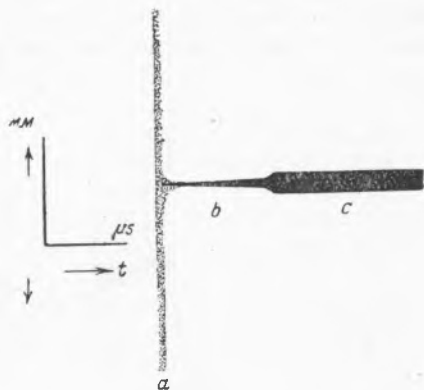


Рис. 1. Развертка канала лидера при торможении $10^4 \div 10^6 \Omega$: *a*—область ионизации; *b*—канал лидера; *c*—канал дуги

* Диффузное свечение можно обнаружить на более ранних photographиях других исследователей (6, 7). Однако оно не привлекло должного внимания и осталось неизученным.

межэлектродного промежутка появляются новые стримеры, в то время как ранее образованные гаснут.

Можно предполагать, что после того, как ионизация в радиальных направлениях прекращается, около канала стримера образуется слой малоподвижного объемного заряда. Аналогичным образом происходит развитие отрицательного лидера. Свечение его зоны ионизации оказывается более тусклым, а размеры зоны меньше.

На рис. 1 показана типичная картина положительного разряда, фотографируемого через щель, расположенную на 5 см ниже высоковольтного игольчатого электрода (электроды острие — плоскость). В первый момент мимо щели проходит область ионизации, из которой постепенно вырисовывается „игла“ лидерного канала. Формирование канала лидера заканчивается одновременно с погасанием свечения в боковом пространстве. Пространственная картина области ионизации напоминает своеобразный „колокол“ или „султан“, состоящий из диффузных стримеров, исходящих из канала лидера. Размеры канала изменяются во времени, увеличиваясь по мере того, как головка лидера приближается к противоположному электроду.

4. Увеличение диаметра канала в заторможенных разрядах происходит „синхронно“ с нарастанием тока в лидере. На рис. 2 и 3 показана осциллограмма тока и развертка канала разряда при торможении $10^4 \Omega$. У слабозаторможенных разрядов нарастание тока происходит более быстро, чем увеличение размеров канала, что в известной ме-

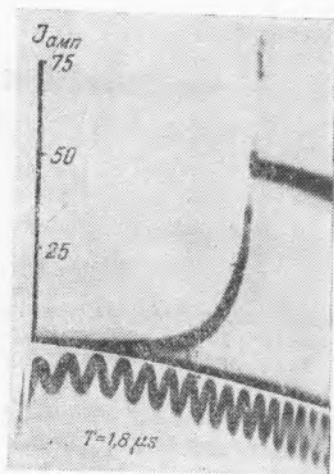


Рис. 2. Осциллограмма тока. Электроды острие — плоскость. Промежуток 80 см. Высоковольтный электрод — острие

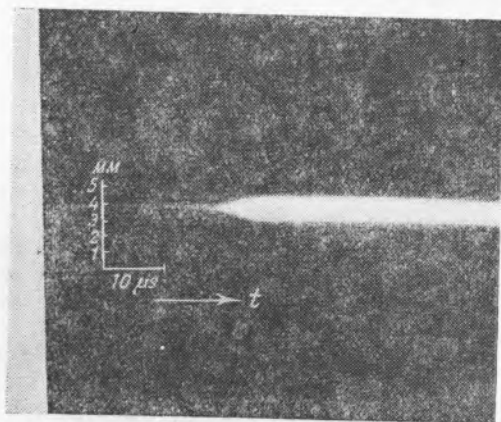


Рис. 3. Развертка канала лидера. Условия эксперимента те же, что для рис. 2. Съемка производилась через диафрагмированный объектив, поэтому область ионизации неразличима

ре напоминает расширение канала мощной искры⁽⁸⁾. Размеры области ионизации и канала лидера отличаются на порядки величин. Средний радиус зоны ионизации при всех сопротивлениях торможения, которыми мы пользовались в эксперименте ($R_T = 10^3 \div 10^7 \Omega$), колеблется в пределах $13,6 \div 19,0$ см, в то время как радиус канала лидера не превосходил 0,2 см. Это обстоятельство имеет важное значение для механизма развития лидера и показывает ошибочность предположений некоторых исследователей^(1, 9), отождествлявших размеры зоны ионизации и канала лидера, основываясь на принципе одноцепочечного движения электронных лавин.

5. В тех случаях, когда расширение канала лидера и нарастание тока происходит „синхронно“, что имеет место не только в заторможенных искрах, но, вероятно, и в лидере молнии, прорастание которого длится тысячи микросекунд, плотность тока в канале мало меняется, практически оставаясь на одном уровне. При торможении $10^4 \Omega$ плотность тока в канале колебалась в пределах $13 \div 24 \text{ А/мм}^2$. Она оказалась того же порядка, что и плотность тока в канале дуги, зажигающейся после окончания лидерной стадии и стадии главного разряда. Для всех торможений плотность тока в дуговой стадии не превышала 37 А/мм^2 и не падала ниже 14 А/мм^2 .

6. Средний продольный градиент и проводимость канала лидера измерялись следующим методом: к высоковольтному электроду подключалась небольшая емкость (25 см), не искажающая разрядного процесса. В момент касания лидером противоположного электрода эта емкость разряжалась, создавая толчок тока, величина которого измерялась с помощью осциллографа. Параметры схемы подбирались таким образом, чтобы ток лидера, разрядный ток емкости и дуговой ток, протекающий в цепи после разряда емкости, были близки друг к другу. При этих условиях деформация лидерного канала при разряде емкости была наименьшей, и замена в расчетах лидерного столба некоторым средним сопротивлением не могла привести к значительным ошибкам. Потенциал емкости в момент разряда измерялся по осциллографическим записям. Помимо непосредственных записей величина потенциала емкости определялась по произведению количества электричества, протекающего в период разряда емкости, на величину этой емкости.

Эксперимент и подсчеты показали, что сопротивление единицы длины канала лидера положительного заторможенного разряда равно $11,8 \Omega/\text{см}$, а продольный градиент в канале, в конце лидерной фазы, равен $55,5 \text{ В/см}$. Таким образом, основные параметры лидерного канала оказались теми же, что и для дуги.

Количество носителей в единице объема плазмы и температура канала лидера, подсчитанные по общепринятым формулам для дуги, дали величины $1,13 \cdot 10^{17} \text{ В/см}^3$ и 4400° К соответственно.

Все эти характеристики свидетельствуют о том, что канал лидера представляет собой плазму высокой проводимости; головка и канал лидера, следовательно, имеют потенциал, практически не отличающийся от потенциала высоковольтного электрода.

7. Стримеры первыми достигают противоположного электрода, однако разряда емкости, о котором говорилось выше, в момент касания не возникало. При малых торможениях наблюдались случаи, когда отрицательные стримеры достигали противоположного электрода, не переходя в заверченный разряд. В момент касания стримером противоположного электрода весь потенциал падает на канал стримера (продольным градиентом в канале лидера можно пренебречь), который трансформируется в дальнейшем в канал лидера. Процесс трансформации при торможениях от $5 \cdot 10^4 \Omega$ и выше протекает достаточно медленно, чтобы позволить определить по осциллограммам момент касания и соответствующее ему напряжение на электродах U .

По отношению U к длине стримера возможно определить средние градиенты E_c в канале стримера, дающие (условно) характеристику области ионизации. При наличии объемного заряда в области ионизации, что, вероятно, имеет место, продольные градиенты будут меняться от точки к точке. Согласно измерениям, при торможении $R_T = 1,07 \cdot 10^5 \Omega$ длина стримера положительной полярности достигала 19 см. Потенциал высоковольтного электрода в момент касания равнялся 108 кВ ; следовательно, средний градиент не превышал 6 кВ/см . Аналогичные подсчеты для $R_T = 10^4 \Omega$ дали $E_c = 8 \text{ кВ/см}$.

Таким образом, можно предполагать, что область ионизации в отличие от лидерного канала характеризуется высокими продольными полями в каналах стримеров. Весь лидерный процесс представляет своеобразное сочетание и сосуществование дугового и стримерного разрядов, в некоторых чертах совпадающее со схемой Брюса.

8. Для теории лидера и главного разряда большой интерес представляет вопрос о местонахождении заряда, внедряемого лидером в пространство. Большинство авторов склонно было относить его к лидерному каналу. Наши измерения показали, что за период лидерной стадии в промежутке внедряется от $250 \cdot 10^{-6}$ до $50 \cdot 10^{-6}$ кулонов электричества. При этом на единицу длины межэлектродного промежутка приходится соответственно $2,8 \cdot 10^{-6}$ и $5,5 \cdot 10^{-8}$ кулонов. Если определить (по формуле Гаусса) градиент на поверхности канала лидера, полагая, что заряд сосредоточен в нем, то мы получим невероятные цифры $2,5 \cdot 10^7$ и $2 \cdot 10^6$ В/см.

В связи с описанными результатами эксперимента естественно предположить, что заряд расположен в пределах зоны ионизации. При этом градиент у границ области ионизации в $1,5 \div 3,0$ раза превосходит цифру 30 кВ/см, что следует считать приемлемым, учитывая сделанные допущения.

В целом результаты исследования позволяют критически пересмотреть существующие схемы и гипотезы механизма лидерного процесса и дают материал для разработки новых представлений о структуре лидера.

Автор считает своим долгом выразить благодарность А. М. Лифшиц за участие в экспериментах и И. С. Стекольникову за внимание к настоящей работе.

Энергетический институт
им. Г. М. Кржижановского
Академии Наук СССР

Поступило
30 IV 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ L. B. Loeb and I. Meek, J. Appl. Physics, **11**, 438 (1940). ² S. Szpor, Bull. Schweiz. El. Verein, **33**, No. 1 (1942). ³ G. E. Bruce, Proc. Roy. Soc., **183**, No. 993, p. 228 (1944). ⁴ И. С. Стекольников и А. П. Беляков, ЖЭТФ, **8**, в. 4 (1938). ⁵ В. С. Комельков, ДАН, **47**, No. 4 (1945). ⁶ I. Slepian and I. I. Torok, El. J., No. 3 (1929). ⁷ T. E. Allibone and I. M. Meek, Proc. Roy. Soc., A, **160**, 297 (1938). ⁸ I. W. Flowers, Phys. Rev., No. 64, No. 7-8, 225 (1943). ⁹ B. F. Schomland, Proc. Roy. Soc., A, **164**, 132 (1938).