

5. Прудников А. П., Брычков Ю. А., Маричев О. И. Интегралы и ряды. — М.: Наука, 1981.
6. Zablocki C. J. Electrical transient observed during underground nuclear explosions // J. Geophys. Res.— 1966.— V. 71, N 14.

Поступила 17/VII 1986 г.

УДК 537.521 + 533.09

О СТРОЕНИИ КАНАЛА РАЗРЯДА ПРИ ПРОБОЕ В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ

М. Ф. Борисов, М. Ф. Данилов, Е. А. Зобов,
И. Г. Литвинова, А. Н. Сидоров

(Ленинград)

Электрический пробой в газе длинных разрядных промежутков имеет ряд качественных отличий по сравнению с пробоем коротких промежутков [1—3]. Прежде всего такой пробой происходит в условиях резко неоднородного поля, когда существенную роль играет пространственный заряд. При этом общая картина явления сильно усложняется. Пробой приобретает прерывистый или так называемый ступенчатый характер [1—3], наблюдаются продольная неоднородность свечения, ветвление канала разряда и т. д.

Подробные исследования искрового канала [4—7] относятся главным образом к завершённой фазе пробоя и описывают разряды в промежутках длиной до 10 см. В большинстве работ, посвященных исследованию незавершённой стадии [1—3, 8—11], рассматриваются механизмы развития лавин, лавиностримерных и стримерно-лидерных переходов, относительно мало затрагивая вопросы, связанные с влиянием этих процессов на развитие разряда после замыкания промежутка сквозным током проводимости.

Цель данной работы — исследование строения и динамики развития длинной искры в условиях, когда существенными становятся процессы в незавершённой стадии пробоя, определяемые электрическими параметрами отдельных участков канала разряда. Известное сходство последней со скользящим разрядом, отмеченное в [1], обосновало выбор скользящей искры (СИ) в качестве объекта исследования.

Искра длиной $l = 0,4—1$ м развивалась в воздухе на поверхности тонкопленочного диэлектрика, уложенного на металлическую трубу диаметром 80 мм. Диэлектрик представлял собой несколько десятков слоев тонкой лавсановой пленки общей толщиной $\Delta = 0,25—1$ мм с удельной поверхностной емкостью $C_{уд} = 3—12$ пФ/см². На поверхностный электрод подавался импульс напряжения либо с кабельного трансформатора [12] в виде затухающей косинусоиды амплитудой до 100 кВ с крутизной фронта $\sim 10^{11}$ В/с, периодом $T \simeq 10$ мкс и логарифмическим декрементом затухания 0,3, либо от генератора Маркса с ударной емкостью 0,03—0,1 мкФ. Погонный энерговыход в незавершённый разряд составлял 50—100 мДж/см при токе 0,5 кА, в завершённый — 1—2 Дж/см при токе до 2,5 кА. При необходимости фиксации канала разряда на поверхность диэлектрика наносилась линия управления [13].

Свечение в разных участках спектра и теневое изображение канала в торец, в плане и в профиль регистрировались камерами СФР-2М и ВФУ-1 в режимах скоростной киносъемки и хронографии. Применение метода управления разрядом и использование высококачественной светосильной оптики позволили улучшить пространственное разрешение и получить ряд неизвестных ранее деталей строения канала СИ.

При киносъемке незавершённой стадии была зарегистрирована четкая структура канала разряда, пространственный период которой 1—2 см. Размер светящихся участков со временем растет, становятся заметными связывающие их нити (рис. 1), но полного выравнивания свечения не происходит.

Продольная неоднородность свечения канала, зафиксированная в режиме хронографии [14], появляется на самых ранних стадиях разряда и имеет вид светящихся участков длиной 1—2 см, разделенных темными зонами с размером 1—3 мм. Это хорошо видно на хронограммах типа рис. 2. Описанная модуляция свечения в обоих случаях имеет, по-видимо-

му, одну природу и является следствием стримерно-лидерных процессов пробоя.

Сопоставление хронограмм с фотографиями общего вида разряда показывает, что положение конца ступени лидера совпадает с сильной боковой ветвью, а длительность свечения ступени $\sim 10^{-7}$ с — с длительностью свечения этой ветви. Свечение типа ступенчатого лидера было искусственно воспроизведено как присоединением сосредоточенных емкостей по 1,5 нФ между заземленной металлической подложкой и каналом разряда, так и при нанесении управления для инициирования боковых ветвей. Таким образом, боковая ветвь с системой мелких ветвей и стримеров является для канала как бы присоединенным конденсатором. Мгновенная вспышка свечения по всей длине ступени вызвана током его заряда. При этом слабые ветви могут оставаться невидимыми.

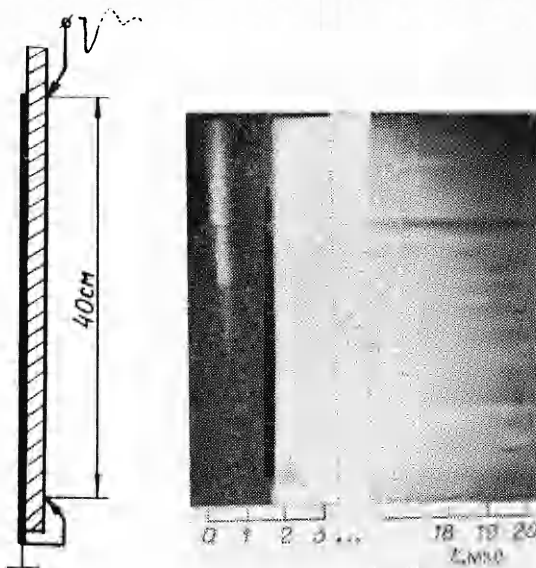
Тенеграмма на рис. 3 наглядно иллюстрирует процесс развития канала СИ при переходе от незавершенной к сильноточной или завершенной стадии, которая наступает через 2—5 мкс после подачи импульса напряжения. Тонкий (диаметром менее 0,1 мм) канал, возникающий на поверхности диэлектрика, разогреваясь каждым полупериодом тока, расширяется толчками, образуя полуцилиндрические плазменные слои. Начальная скорость расширения канала 1—2 км/с. Затем расширение замедляется, от поверхности канала отходят ударные волны, имеющие скорость 350—500 м/с. Токи перезаряда распределенной емкости диэлектрика вызывают более слабые волны, отходящие непосредственно от поверхности. На тенеграммах разряда [15] и рис. 3 видна неоднородная структура канала, состоящая из нескольких коаксиальных полуцилиндрических слоев.

Регистрация свечения с торца канала в режимах кино съемки и хронографии выявила, что энергия в канале выделяется неравномерно. К моменту времени $t \approx 30$ мкс (рис. 4) отчетливо виден осевой канал на поверхности диэлектрика и внешний слой $e. r \approx \approx 4$ мм.

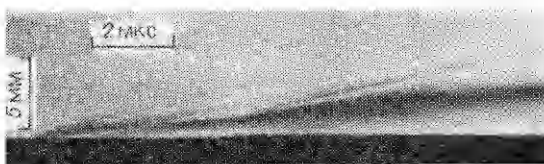
Продольная неоднородность свечения канала, возникающая в начальной фазе пробоя (см. рис. 2), появляется и в завершенной стадии, когда амплитуда тока уменьшается от 2,5 до 1 кА, и сохраняется до окончания разряда. В некоторых случаях наб-



Р и с. 1



Р и с. 2



Р и с. 3

людаются участки с длительностью свечения, почти на порядок большей, чем у остальной части канала. Съемка с применением светофильтров для ослабления излучения разряда не выявила сколько-нибудь заметной неоднородности свечения вблизи максимума сквозного тока.

Тенеграммы (рис. 5), снятые с интервалом 22 мкс, показывают, что расширение канала сопровождается развитием неустойчивости. На поверхности первоначально гладкого канала появляются волнообразные возмущения. Вначале они локализируются около центров, связанных с образованием боковых ветвей, затем развиваются на всей видимой поверхности полуцилиндрического слоя. При этом амплитуда и пространственный период этих возмущений составляют ~ 1 мм. С течением времени они усиливаются.

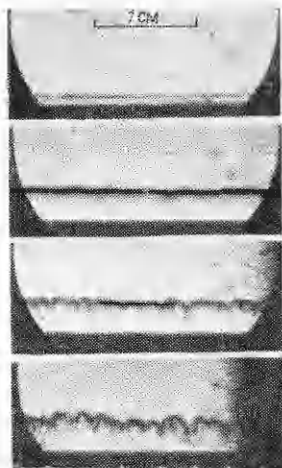
Скоростная съемка свечения СИ при наблюдении в плане (рис. 6) выявила следующие детали его развития. В сильноточной стадии граница свечения канала приобретает волнообразные очертания. В дальнейшем возмущения продолжают развиваться, приобретая вид перетяжек, изгибов, винтов, и затем приводят к разрывам в свечении канала, чем и объясняется неоднородность свечения, зарегистрированная на фоторазвертках завершающей фазы разряда.

Таким образом, особенности строения канала в аксиальном и радиальном направлениях позволяют говорить о наличии продольной и поперечной структур с несколькими пространственными и временными масштабами. При этом необходимо различать строение канала на стадиях, определяемых изменениями характера тока разряда: незавершенная стадия, когда отсутствует сквозной ток проводимости от высоковольтного электрода к заземленному; сильноточная стадия при протекании сквозного тока; завершающая стадия, когда уменьшившийся сквозной ток не может поддержать температуру канала.

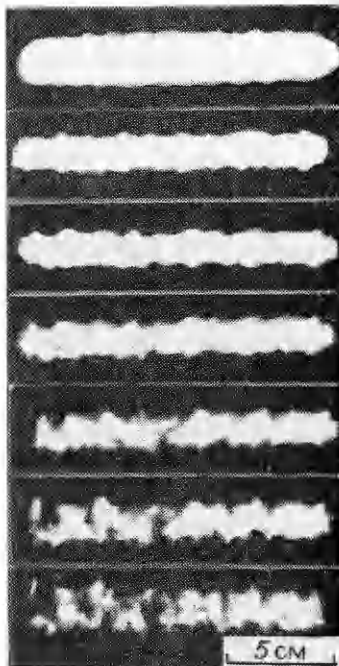
В незавершенной стадии ток проводимости в сформировавшейся части канала замыкается током смещения через диэлектрик. В длинных разрядных промежутках это сопровождается интенсивным ветвлением канала. Основные структурные элементы на этой стадии — стримерная зона, представляющая собой пучок слабосветящихся, рав-



Р и с. 4



Р и с. 5



Р и с. 6

ноярких стримерных каналов, и участок, где можно надежно выделить более яркий лидерный канал [1, 2].

Для рассматриваемой длины разрядного промежутка $l = 1$ м и толщины диэлектрика $\Delta = 0,25$ мм на долю этих участков приходится 90 % падения напряжения и ~ 20 % вкладываемой энергии. Яркость канала и его диаметр возрастают от стримерной зоны к высоковольтному электроду и при достаточно большой длине разряда становятся сравнимыми с параметрами сильноточной (искровой) стадии пробоя.

Из [12] можно предположить, что искровой участок канала имеет длину $l_n = l - 1,8 \cdot C_{уд}^{-0,5}$, м, если $C_{уд}$ в пФ/см², и может быть охарактеризован средним значением напряженности электрического поля $E \sim \sim 10^2$ В/см. При толщине диэлектрика $\Delta = 0,25$ мм и $C_{уд} = 11$ пФ/см² искровой участок наблюдается при $l > 0,5$ м.

В завершенной стадии пространственное распределение тока, вкладываемой энергии, яркость свечения и диаметр канала практически не изменяются по его длине.

Полученные результаты исследования дополняют данные о радиальном строении канала искры, представленные в [2, 4, 5]. Отличия длинной искры от короткой проявляются при возрастании роли емкостного тока, соизмеримого со сквозным током проводимости. Они обусловлены большими размерами зоны возмущения, развивающейся вокруг центрального канала длинной искры, и заметной долей энергии, вкладываемой в промежутки в незавершенной стадии. Это обстоятельство, а также то, что возмущения поверхности сильноточного канала наиболее сильны вблизи центров их зарождения, т. е. в местах ветвления и изгибов канала, на границах ступеней лидера и звеньях четочной структуры, объясняют привязку ярких долгосвещающих участков канала к структуре свечения, наблюдаемой в незавершенной фазе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стекольников И. С. Природа длинной искры. — М.: Изд-во АН СССР, 1960.
2. Мик Дж., Крэге Дж. Электрический пробой в газах. — М.: ИЛ, 1960.
3. Юман М. Молния. — М.: Мир, 1960.
4. Маршак И. С. Импульсные источники света. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963.
5. Фольрат К. Искровые источники света и высокочастотная искровая кинематография // Физика быстротекающих процессов. — М.: Мир, 1974.
6. Дробкина С. И. К теории развития канала искрового разряда // ЖЭТФ. — 1951. — Т. 21, вып. 4.
7. Брагинский С. И. К теории развития канала искры // ЖЭТФ. — 1958. — Т. 34, вып. 6.
8. Ретер Г. Электронные лавины и пробой в газах. — М.: Мир, 1968.
9. Лозанский Э. Д., Фирсов О. Б. Теория искры. — М.: Атомиздат, 1975.
10. Дашук П. Н., Дементьев В. А., Ярышева М. Д. Электрооптические исследования развития скользящего разряда и формирования обратного лидера // Письма в ЖТФ. — 1983. — Т. 9, вып. 2.
11. Базелян Э. М., Горюнов А. Ю. О механизме развития стримеров в резконеоднородном электрическом поле // Электричество. — 1986. — № 11.
12. Андреев С. И., Зобов Е. А., Сидоров А. П. Исследование скользящей искры в воздухе // ПМТФ. — 1978. — № 3.
13. Андреев С. И., Зобов Е. А., Сидоров А. П. Метод управления развитием и формированием системы параллельных каналов скользящих искр в воздухе при атмосферном давлении // ПМТФ. — 1976. — № 3.
14. Борисов М. Ф., Данилов М. Ф., Зобов Е. А. и др. Особенности пространственной временной структуры излучения канала скользящей искры // Тезисы докл. III Всесоюз. конф. по физике газового разряда. — Киев, 1986. — Ч. 1.
15. Зобов Е. А., Сидоров А. П., Литвинова И. Г. Исследования скользящей искры теневым методом // ПМТФ. — 1986. — № 1.

Поступила 30/VII 1987 г.