

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ И ФОРМИРОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ СКОЛЬЗЯЩИХ ИСКР В ВОЗДУХЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

С. И. Андреев, Е. А. Зобов, А. Н. Сидоров

(Ленинград)

Предлагается метод управления процессом развития скользящей искры вдоль поверхности пленочного диэлектрика путем введения в эту поверхность центров эмиссии из химических соединений с низкой работой выхода электронов. Показана возможность получения с помощью этого метода искрового канала с острыми углами, например Z-образной формы, упорядоченной системы параллельных каналов, а также строго прямолинейного канала на длине до двух метров. Обнаружено, что скорость развития скользящей искры носит неравномерный характер. Средняя скорость сильно зависит от перенапряжения, что связано с сокращением пауз в ее развитии.

Скользящая искра образуется на поверхности диэлектрика при приложении импульсного или высокочастотного напряжения к электродам, расположенным на этой поверхности, если под слоем диэлектрика находится проводник. Такие искры часто возникают в технике высоких напряжений и с точки зрения электрической изоляции являются нежелательным явлением [1—3]. Однако представлялось весьма интересным использовать скользящую искру в качестве средства для инициирования разрядов многократного действия на больших длинах, а также в качестве источников излучения высокой яркости линейной или специальной формы. Кроме того, получение параллельной системы искровых каналов может быть использовано для формирования плазменных поверхностей, что важно, например, при изучении взаимодействия плазмы с диэлектрической поверхностью, находящейся с ней в контакте. В этом случае можно моделировать, в частности, воздействие плазмы на конструкции аппаратов, входящих в атмосферу [4]. Цель данной работы — разработка метода управления развитием скользящих искр и формирование системы параллельных каналов в завершенной (сильноточной) стадии разряда.

Скользящие разряды формировались на плоской поверхности пленочного диэлектрика, покрывавшего металлический лист (инициатор). На поверхности диэлектрика располагались параллельно два линейных электрода длиной 32 см. Расстояние между ними могло изменяться от 12 до 100 см. Один из электродов был соединен с инициатором. В отдельных опытах расстояние между электродами достигало 800 см. В этих опытах инициатор представлял собой металлический цилиндр, обернутый диэлектрической пленкой, электроды были кольцевой формы.

Импульс напряжения получался при разряде конденсатора ($C = 12$ мкФ, $U_0 = 3—20$ кВ) на первичную обмотку кабельного трансформатора, имевшую один виток. Вторичная обмотка имела 10 витков, что позволяло получить максимальную амплитуду напряжения до 210 кВ. Напряжение имело вид затухающей косинусоиды с периодом 12—18 мкс. В качестве диэлектрика, по поверхности которого развивался разряд, использовались пленки из полиэтилена, лавсана, триацетата целлюлозы и др. Толщина пленок варьировалась от 0,16 до 3 мм.

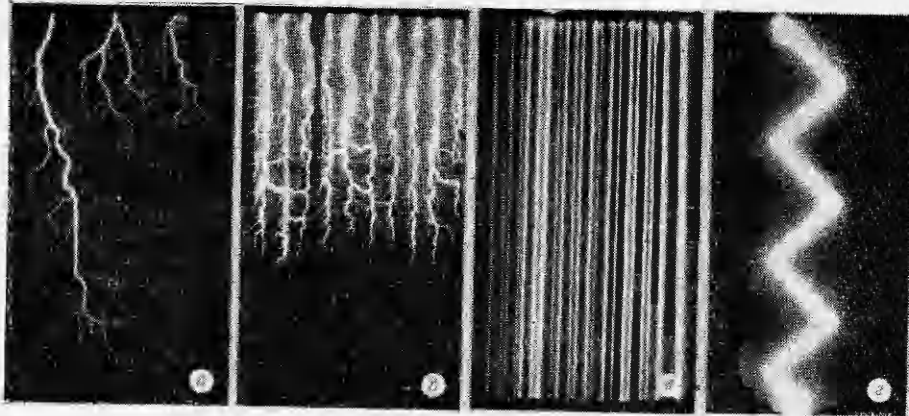
В работе производилась съемка пространственно-временных разверток свечения искровых каналов и их фотографирование, а также осциллографировалось напряжение между электродами.

Известно [5, 6], что наличие небольших неоднородностей в разрядном промежутке оказывает заметное влияние на его пробой. Это явилось исходной предпосылкой при разработке метода управления развитием скользящей искры. При проведении исследований оказалось, что определяющим фактором является не столько локальное искажение электрического поля в точке расположения неоднородности (использовался, например, металлический порошок), сколько работа выхода электронов из материала этой неоднородности. (Стабильное управление имеет место при положительной полярности первого полупериода напряжения на промежутке.) В качестве материала для создания таких неоднородностей использовались мелкодисперсные порошки из графита, алюминиевой пудры, BaSO_4 , BaO_2 , ZnO , Cu_2O , TiO_2 и др. Наилучшие результаты были получены с соединениями бария, имеющими самую низкую работу выхода (1–2 эВ) [7]. (Работа выхода металлов W, Mo, Fe, Co, Cu и др. равна примерно 4,5 эВ). Стабильность и многократность действия обеспечивались технологией нанесения этих порошков на диэлектрические пленки. В результате удалось достичь многократности действия, определяемой в основном электрической прочностью самой пленки. (Вопросы технологии приготовления и нанесения управляющих покрытий будут рассмотрены в отдельной работе.) Покрытию можно было придавать вид полос требуемой формы. Ширина полос варьировалась от 1 до 20 мм.

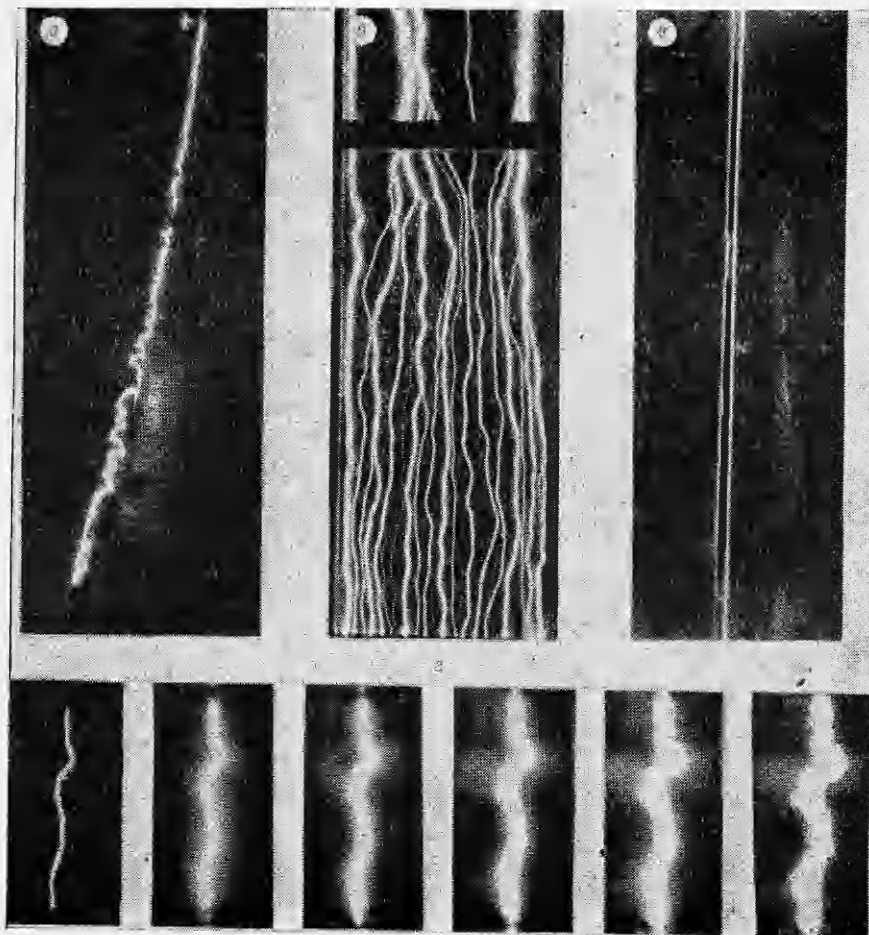
Рассмотрим некоторые результаты экспериментов. Действие предлагаемого метода управления развитием скользящей искры показано на фиг. 1, где *a* — искра без управления; *b* — с управлением (незавершенная стадия); *в* и *г* — с управлением (завершенная стадия).

Условия разряда: длина разрядного промежутка 50 см, ширина 32 см, толщина диэлектрика для фиг. 1, *a* — *в* $\Delta = 0,45$ мм (лавсан толщиной 0,36 мм покрыт триацетатной пленкой 0,07 мм), для фиг. 1, *г* $\Delta = 0,65$ мм (лавсан толщиной 0,45 мм покрыт электрокартоном толщиной 0,2 мм). Амплитуда напряжения 44 кВ (фиг. 1, *a*, *b*), 126 кВ (фиг. 1, *в*) и 75 кВ (фиг. 1, *г*). Управляющие полосы состоят из полистирольного лака с наполнителем из мелкодисперсных порошков BaO_2 95 и графита 5%. На фиг. 1, *в* между управляющими полосами нанесены стабилизирующие полосы с наполнителем из порошка Cu_2O . Сравнивая данные фиг. 1, *a* и *b*, видим, что развитие скользящих искр с управлением стабилизировалось не только в пространстве, но и во времени (параллельные искры имеют более ровный фронт). Фиг. 1, *г* иллюстрирует возможность получения правильной системы каналов уже завершенных разрядов. Густую сеть этих каналов удалось получить, чередуя на поверхности диэлектрика полосы с использованием соединений с низкой (BaO_2) и высокой (Cu_2O) работой выхода, что препятствует «перескоку» соседних каналов.

Фиг. 1, *г* иллюстрирует возможность получения канала завершенного разряда заданной формы. Ранее делались попытки получить определенную форму канала, придавая ту же форму инициатору [8]. Однако получить канал с острыми четкими углами удалось, по-видимому, впервые. На фиг. 2 приведены фотографии скользящей искры большой длины, где *a* — канал скользящей искры на длине 8 м без управления на трубе диаметром 40 мм, обернутой полиэтиленовой пленкой толщиной $\Delta = 2$ мм, напряжение 180 кВ; *b* — система скользящих искр без управления при длине промежутка 100 см на плоскости, покрытой диэлектриком с $\epsilon = 3,4$ и $\Delta = 0,44$ мм (видимая поперечная полоса — тень от элемента конструкции); *в* — два параллельных канала длиной 2,2 м с управлением, полученные на трубе диаметром 40 мм, обернутой диэлектриком $\Delta = 0,9$ мм, напряжение 85 кВ; *г* — временное развитие нестабильности, поя-



Ф и г. 1

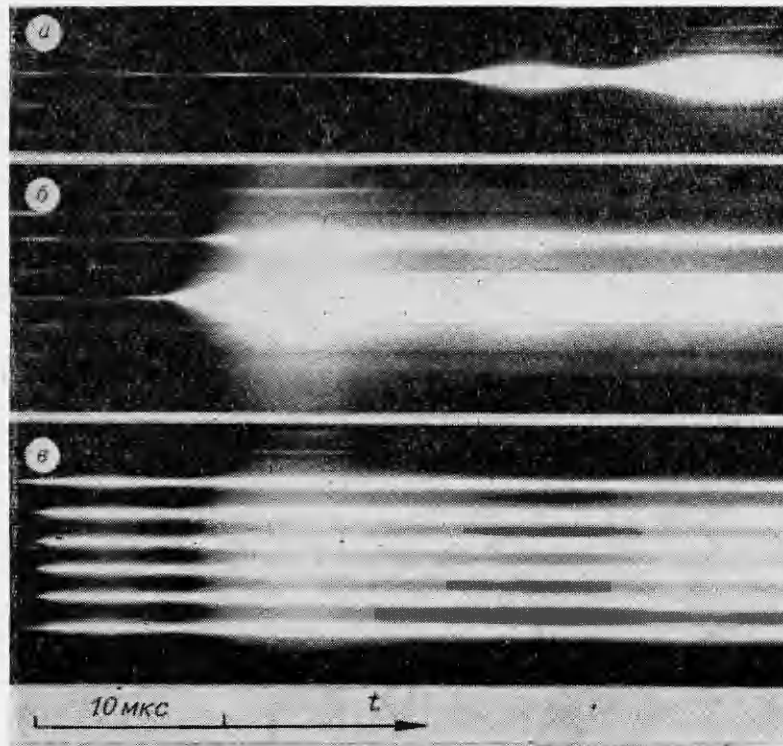


Ф и г. 2

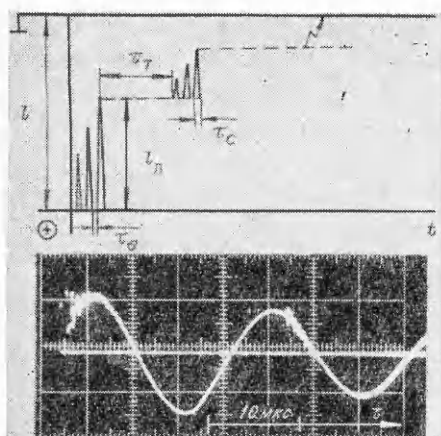
вившейся при иницировании разряда. Условия: $l = 50$ см, $\Delta = 0,35$ мм, $\varepsilon = 3,4$. После иницирования по искровому каналу происходил разряд конденсаторной батареи $U_0 = 30$ кВ; $W_0 = 40$ кДж. Время между кадрами 8 мкс. Видно, что при отсутствии управляющей полосы скользящая искра (фиг. 2, а, б) неровная по длине промежутка. Ровный однородный канал (или, как показано на фиг. 2, в, два таких канала) удается получить при использовании предлагаемого метода. Если к электродам подключить конденсаторную батарею с большим запасом энергии, то неровности канала не пропадают, а имеют тенденцию к развитию. Это приводит к возникновению неустойчивости (фиг. 2, г). Возможность иницирования однородного по длине канала существенно снижает вероятность появления неустойчивостей [9].

Рассмотрение результатов исследований скорости развития скользящих искр представляет интерес как с точки зрения одновременного «прорастания» системы параллельных каналов, так и с точки зрения времени формирования пробоя. Дело в том, что на длинах в несколько метров разряд может не завершиться за время первого полупериода, имеющего вид затухающей косинусоиды напряжения. Тогда возникает пауза в его развитии (фиг. 3, где а — $U = 60$ кВ; б — $U = 72$ кВ; в — $U = 90$ кВ, $l = 50$ см, $\Delta = 0,42$ мм, $\varepsilon = 3,4$). В дальнейшем искра может продолжать свое развитие и осуществить пробой промежутка, но возможно и отсутствие пробоя. Это зависит от длительности периода и скорости затухания колебаний напряжения.

Анализ временных разверток, снятых при расположении щели скоростного фоторегистратора (СФР) вдоль направления развития искры



Ф и г. 3



Ф и г. 4

со временем, необходимым для разогрева канала лидера и связанного с этим перераспределением потенциала по его длине. Как показали пространственно-временные развертки процесса поступательного развития канала, эта пауза не связана со втеканием боковых ветвей в лидерный канал, что является отличительной чертой скользящей искры. Величина v_l (скорость движения лидера между паузами τ_B) в наших условиях оказалась лежащей в пределах от $3 \cdot 10^8$ до $8 \cdot 10^8$ см/с. Как показали измерения, скорость нагрева v_p канала скользящей искры после замыкания лидером разрядного промежутка* на порядок выше: $v_p = (1-5)10^9$ см/с.

Наибольшую длительность имеют паузы τ_T . Было найдено, что пробой может произойти за несколько полупериодов, в течение которых последующие амплитуды уменьшаются по сравнению с первой не более чем в два раза. При этом первая амплитуда соответствует напряжению пробоя. С ростом напряжения U длительность пауз τ_T резко сокращается. Эти паузы оказывают наибольшее влияние на одновременность развития параллельных искр и формирование системы параллельных каналов, что иллюстрирует фиг. 3. При минимальном пробойном напряжении имеется несколько пауз и образуется только один завершённый канал разряда (фиг. 3, а). Повышение напряжения не только сокращает число этих пауз, но и приводит к росту числа одновременно завершённых каналов. Реализовать плотную систему параллельных каналов с управлением (фиг. 3, в) удастся только при пробое, имевшем место на первом полупериоде напряжения.

Пауза τ_B имеет длительность десятые доли микросекунды. Их количество K при направлении, близком к пробойному составляет 5—8 независимо от длины промежутка при $l \geq 20$ см.

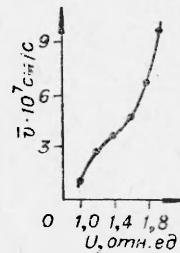
С ростом напряжения сверхпробойного количество пауз K быстро сокращается до нуля. При этом пробой разрядного промежутка осуществляется лидером, движущимся от одного электрода до другого практически без остановки.

* Нагрев происходит неравномерно по длине промежутка, благодаря чему фото-развертка фиксирует движение области повышенной яркости со скоростью v_p .

(это направление удалось стабилизировать, благодаря описанному выше методу управления), показал, что время от момента возникновения искрового канала до момента пробоя промежутка не соответствует мгновенной скорости движения скользящей искры. Оно складывается в общем случае из четырех составляющих.

Пауза τ_T характеризует задержку в поступательном развитии скользящей искры между полупериодами напряжения (фиг. 3, 4, на фиг. 4 стрелка показывает момент пробоя). Время τ_B характеризует длительность пауз между толчками лидерного процесса развития скользящей искры. По-видимому, эта пауза связана

На фиг. 5 приведена зависимость средней скорости \bar{v} развития скользящей искры от перенапряжения (длина разряда 2,5 м. Пробойное напряжение $U_{\text{пр}} = 80$ кВ (принято за единицу измерения); $\Delta = 0,9$ мм; $\epsilon = 3,4$). Эта скорость определялась отношением $l/\tau_{\text{ф}}$, где l — длина разрядного промежутка; $\tau_{\text{ф}}$ — время формирования пробоя, $\tau_{\text{ф}} = (\tau_{\text{T}} + \tau_{\text{в}}K)n + \tau_{\text{с}} + \tau_{\text{р}}$, где n — число полупериодов колебаний напряжения до момента пробоя; $\tau_{\text{с}}$ — время, определяемое отношением $l/v_{\text{л}}$; $\tau_{\text{р}}$ — время разогрева канала искры после замыкания лидером промежутка $\tau_{\text{р}} = l/v_{\text{р}}$. С ростом напряжения n и K стремятся к 1. Значения τ_{T} и $\tau_{\text{в}}$ стремятся к нулю, $\tau_{\text{ф}}$ в этом случае будет равно сумме $\tau_{\text{с}} + \tau_{\text{р}}$, а средняя скорость стремится к скоростям порядка $(3-5)10^8$ см/с, т. е. приближается к величине скорости движения лидера $v_{\text{л}}$. Сумма $\tau_{\text{р}} + \tau_{\text{с}}$ определяет величину статистического разброса времени замыкания разрядного промежутка отдельными параллельно развивающимися каналами. Она слабо зависит от перенапряжения.



Фиг. 5

Из анализа совокупности экспериментальных данных следует, что для получения максимально плотно системы искровых каналов на диэлектрической поверхности необходимо использовать определенную величину перенапряжения $U_{\text{м}}/U_{\text{пр}}$. На эту величину влияют в основном два фактора: длина разрядного промежутка l и удельная емкость диэлектрика на инициатор $c = 0,88\epsilon/d$, пФ/см²; d , мм (ϵ в относительных единицах). Минимальное значение $U_{\text{м}}/U_{\text{пр}} \approx 1,2-1,3$ имеет место при $l \geq l_{\text{к}} = 1,8c^{-0,5}$, м. При этом можно получить систему искровых каналов с шагом 1,5–2 см.

Если $l \leq l_{\text{к}}$, то величина $U_{\text{м}}/U_{\text{пр}}$ возрастает таким образом, что

$$(1) \quad U_{\text{м}} = 1,3U_{\text{к}}; \quad U_{\text{к}} = 130c^{-0,5}, \text{ кВ.}$$

При $l \leq l_{\text{к}}$ пробойное напряжение $U_{\text{пр}} \leq U_{\text{к}}$. При уменьшении l величины $U_{\text{к}}$ и $U_{\text{м}}$ остаются неизменными, а величина $U_{\text{м}}/U_{\text{пр}}$ растет в соответствии с уменьшением $U_{\text{пр}}$ при уменьшении l . Соотношение (1) подтверждается по крайней мере в исследованной области $c \geq 0,5$.

В заключение авторы выражают благодарность И. М. Белоусовой за внимание к данной работе.

Поступила 5 V 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Дашук П. Н., Зайнец С. Л., Комельков В. С., Кучинский Г. С., Николаевская И. И., Шкуропат П. И., Шнейерсон Г. А. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. М., Атомиздат, 1970.
2. Taschenbuch Elektrotechnik, B. 2, E. Philippow, VEB, Technik, Berlin, 1965.
3. Сиротинский Л. И. Техника высоких напряжений. Ч. II. М., ГЭИ, 1953.
4. Эккерт Э., Пфайдер Э. Теплообмен в плазме.— В кн.: Успехи теплопередачи. М., «Мир», 1970.
5. Сливков И. И. Электроизоляция и разряд в вакууме. М., Атомиздат, 1972.
6. Месяц Г. А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М., «Сов. радио», 1974.
7. Фоменко В. С. Эмиссионные свойства материалов. Киев, «Наукова думка», 1970.
8. Tawil E. P. New developments in «guided» air sparks.— In: Proc. of the 3 Intern. Congress on High-Speed Photography. London, 1957, p. 9–13.
9. Александров А. Ф., Рухадзе А. А. Сильноточные электроразрядные источники света.— Усп. физ. наук, 1974, т. 112, вып. 2, с. 193–230.