

УДК 537.52

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД ПО ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ДИЭЛЕКТРИКА. Ч. 1. ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ И СУЩЕСТВОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА

А.Н. Григорьев^{1,2}, А.В. Павленко², А.П. Ильин¹, Е.И. Карнаухов²¹НИИ высоких напряжений при ТПУ

E-mail: alex_nick@mail.ru

²РФЯЦ – Всероссийский НИИ технической физики им. акад. Е.И. Забабахина, г. Снежинск

Указаны особенности, которые обуславливают развитие и существование разряда по поверхности твердых диэлектриков. Перечислены области высоковольтной техники, в которых применяется поверхностный разряд благодаря возможности его получения в многоканальной форме. Во второй части будут представлены экспериментальные результаты по исследованию режимов работы сильноточного коммутатора, работающего на поверхностном разряде.

Интерес к характеру развития и закономерностям существования разряда по поверхности твердых диэлектриков имеет как чисто научный, так и разнообразный практический интерес [1–6]. Практический интерес связан как с решением проблем изоляции (повышения ее электрической прочности пробой по поверхности) и исключения возникновения плазмы разряда на обшивке летательных аппаратов, так и с решением проблемы получения разряда в многоканальной и диффузной форме.

Разряд по поверхности диэлектрика, находящегося в газе, представляет собой пробой газа, протекающий в специфических условиях, обусловленных присутствием диэлектрика, который может оказывать существенное влияние на отдельные стадии процесса пробоя газа. Поэтому при рассмотрении разряда по поверхности необходимо дополнительно к «традиционным» факторам, влияющим на развитие разряда (степень неоднородности электрического поля, форма приложенного напряжения, температура, давление и влажность), принимать во внимание специфические факторы. К таким факторам можно отнести: вид неоднородности электрического поля (преобладание нормальной E_n или тангенциальной E_t составляющей напряженности электрического поля E к поверхности диэлектрика); материал, диэлектрическую проницаемость и толщину подложки, смачиваемость и проводимость ее поверхности. Наличие взаимного влияния между этими факторами приводит к усилению и/или ослаблению их роли на разных этапах развития разряда. Так, главными причинами ухудшения внешней изоляции (уменьшение напряжения перекрытия) являются загрязнения поверхности изоляторов, роль которых особенно заметно проявляется при увлажнении [1]. Кроме того, некоторые авторы [2, 3] выделяют, так называемые, «тройные точки» (электрод-газ-твердый диэлектрик), наличие которых облегчает инициирование разряда. Более того, как утверждает автор [2], даже единственный электрон, появившийся в такой точке, попадая на поверхность диэлектрика, приводит к возникновению плазмы разряда по поверхности. Картина разряда усложняется вторичной электронной эмиссией с диэлектрика и зарядкой его поверхности [2]. Контакт плазмы разряда с поверхностью диэлектрической подложки также усложняет протекающие процессы. В

связи с этим, закономерности поверхностного разряда не могут быть полностью сведены к закономерностям обычного пробоя газа.

В дальнейшем, употребляя термины «разряд по поверхности», «скользящий разряд», мы будем иметь в виду разряд с преобладающей нормальной составляющей электрического поля к поверхности диэлектрика. Схема устройства для осуществления разряда по поверхности представлена на рисунке. Электрод – 5 создает нормальную компоненту E_n электрического поля. В зависимости от области применения поверхностного разряда, электроды – 2 и/или 3 могут отсутствовать.

Общепринятой считается точка зрения, что нормальная составляющая поля должна «прижимать» перемещающиеся под действием электрического поля заряды к поверхности диэлектрика – происходит изменение условий движения зарядов вблизи поверхности диэлектрика [5]. Выделяющееся вследствие перемещения зарядов тепло приводит к дополнительной термической ионизации, облегчая тем самым процесс разряда. Кроме того, нормальная составляющая поля облегчает сам процесс инициирования и развития разряда. Среди вероятных причин, влияющих на снижение пробивного напряжения, можно выделить следующие. По мнению автора [5] большое влияние на процесс поверхностного разряда оказывает концентрирование зарядов на поверхности диэлектрика. Наличие диэлектрика приводит к тому, что имеющийся объемный заряд, сосредоточенный в основном у электрода с малым радиусом кривизны, частично трансформируется в заряд на поверхности диэлектрика. Это является причиной снижения пробивного напряжения [5]. В случае значительного отличия диэлектрических проницаемостей твердого ϵ_1 и газообразного ϵ_2 диэлектриков происходит перераспределение поля обратно пропорционально отношению ϵ_1/ϵ_2 – поле «вытесняется» в газообразный диэлектрик. Таким образом, разряд загорается при более низких напряжениях.

В работе [7] исследовалось влияние эмитирующей способности контакта «электрод-диэлектрик» на электрическую прочность коммутатора. Для этого проводилось размещение в микрозазоре контакта «электрод-диэлектрик» тонких (0,3 мм) пленок

саженнаполненного полиэтилена с разным объемным сопротивлением $\rho_v = 10, 3 \cdot 10^4, 10^7, 10^{14}$ Ом·см. Испытания выявили очень слабое влияние на электрическую прочность коммутатора эмитирующей способности контакта «электрод-диэлектрик». Этот факт, а также выраженный эффект полярности указывают на определяющую роль в предразрядных ионизационных процессах условий зарядки поверхности диэлектрика и формирования приповерхностного объемного заряда.

Проведенные расчеты электрического поля [8] выявили эффект влияния электрода-подложки на напряженность электрического поля вблизи высоковольтного электрода. Наличие электрода-подложки приводит не только к появлению существенной компоненты E_y , но и к увеличению E_x и уменьшению скорости ее спада вблизи высоковольтного электрода. В случае формирования скользящего разряда при давлении порядка атмосферного это приводит к увеличению более чем на порядок области непрерывного ускорения электронов ($E \geq 10^5$ В/см), а разряд в этой области принимает диффузную или многоканальную форму. Это, в том числе, объясняется тем, что при ленточных (протяженных) катоде и аноде на катоде имеется много эффективных тройных точек [2]. Из этих точек при скорости роста напряжения $dU_n/dt \geq 10^{12}$ В/с (где U_n – приложенное или инициирующее напряжение) инициируются множественные поверхностные разряды.

Таким образом, поверхностный разряд, благодаря наличию нормальной составляющей поля и тройных точек, в большинстве случаев принимает многоканальную форму, что широко используется в различных областях техники [4, 6]. Необходимым условием многоканальности разряда является высокая скорость изменения приложенного U_0 или инициирующего напряжения. Для получения максимально плотной системы искровых каналов, в случае импульсного приложенного напряжения U_0 , необходимо использовать определенную величину перенапряжения U_0/U_{np} (U_{np} – пробивное импульсное напряжение) [9]. На эту величину влияют в основном два фактора: длина разрядного промежутка l и удельная распределенная емкость диэлектрической подложки.

Резкая неоднородность поля E с преобладающей нормальной составляющей, величина которой не зависит от длины разрядного промежутка, и наличие распределенной емкости диэлектрической подложки, заряженной в процессе развития разряда, обусла-

вливают специфический вид пробивных характеристик скользящего разряда, не следующих закону Пашена [5, 10]. Нарушение закона Пашена означает, что при поверхностном разряде имеют место процессы, которые не укладываются в рамки законов подобия газового разряда. Одним из таких процессов [5] является повышение температуры вследствие выделения тепла при протекании поверхностных и объемных токов в диэлектрике (что имеет особое значение при высоких частотах). Этот процесс приводит к изменению плотности и температуры газа.

Одинаковая зависимость напряжения от величины разрядного промежутка в случаях искрового и скользящего разрядов имеет место лишь при величине разрядного промежутка 1...2 см. Для скользящего разряда при увеличении межэлектродного зазора или давления газа выше некоторой величины, зависящей от состава газа, толщины и диэлектрической постоянной изолятора, пробивное напряжение U_{np} меняется слабо. Для разрядных промежутков 0,5...2 м при толщинах подложки 0,5...2 мм и $\epsilon_1 = 1,7...3,6$ давление газа (аргон, неон, гелий), начиная с 26,66 кПа, не оказывает никакого влияния на U_{np} . Для воздуха аналогичная зависимость наблюдается в случае, если длина разрядного промежутка меньше критической величины $l < 0,79$ м [11].

Различают заверченный и незаверченный скользящие разряды. Если в процессе разряда плазменный канал не замыкает промежутки, образованные электродами 1 – 2 и 1 – 5 (рис.), то такая форма скользящего разряда называется незаверченной. Незаверченный скользящий разряд возникает при напряжении, недостаточном для пробоя разрядного промежутка. Отсутствие сильноточной фазы обуславливает высокую однородность плазменного листа, созданного незаверченным скользящим разрядом на поверхности диэлектрической пластинки. Ток незаверщенного скользящего разряда ограничивается распределенной емкостью диэлектрической подложки и равен:

$$I = U \cdot dC/dt + C \cdot dU/dt, \quad (*)$$

где U – напряжение между плазмой разряда и электродом; C – емкость промежутка, который образован плазмой разряда и электродом.

Напряжение U является функцией приложенного напряжения U_0 и координатой на поверхности диэлектрика. В то же время потенциал инициирующего электрода практически без изменения переносится в головную часть канала разряда [12]: можно рассматривать этот потенциал как приложенное к элект-

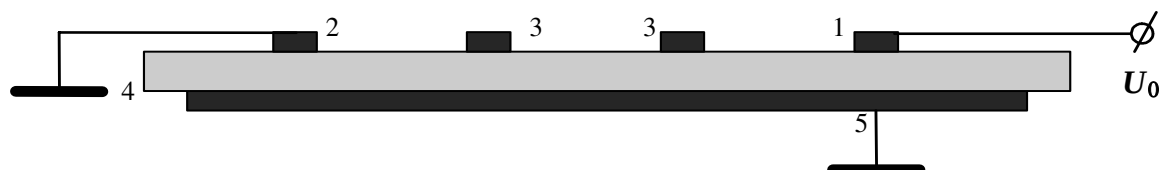


Рисунок. Схема устройства для осуществления поверхностного разряда: 1) высоковольтный электрод; 2) заземленный электрод; 3) инициирующие электроды; 4) диэлектрик; 5) заземленный электрод

тромам напряжение. Величина S пропорциональна длине канала разряда и поэтому во время развития разряда является функцией времени. Из-за высокой скорости развития скользящего разряда ($10^6 \dots 10^8$ см/с [2, 9]) первое слагаемое в выражении для тока (*) может быть значительным, обеспечивая быстрое нарастание тока. При этом скорость движения плазмы по диэлектрику растет с ростом dU_n/dt [2] и величины U_0 [2, 9], т.е. как первое, так и второе слагаемые в (*) зависят от скорости изменения и амплитуды приложенного (иницирующего) напряжения. После заполнения поверхности диэлектрика плазмой ток незавершенного скользящего разряда определяется только вторым слагаемым (ток смещения).

Ток смещения после образования канала продолжает греть плазму, и ее температура достигает, но не превышает $(2 \dots 3) \cdot 10^3$ К [14, 15]. В случае приложенного постоянного напряжения или напряжения, изменяющегося с малой скоростью (по сравнению с величиной dC/dt), разряд гаснет. Если при этом напряженность поля превышает критическую величину, то разряд вновь загорается. Такой разряд (по поверхности диэлектрика с большой величиной диэлектрической проницаемости ϵ_1), несмотря на малый по сравнению с объемным разрядом энерговыход, является простым и экономичным источником интенсивного ионизирующего излучения [2, 4], что обуславливает его применение для накачки лазеров, в качестве импульсных источников ультрафиолетового излучения, для запуска разрядников с высокой временной стабильностью [13]. Также этот вид разряда является эффективным генератором озона [6]. На синтез озона расходуется только 20 % энергии электрического разряда, а остальная энергия выделяется в виде тепла и светового излучения. Исследования [6] показали, что импульсы микроразрядов по своим характеристикам (длительность – 20...40 нс; амплитуда тока – 0,2...0,5 А; переносимый заряд – 0,9 нКл) практически совпадают с импульсами микроразрядов в барьерном разряде. Близки и спектральные характеристики этих разрядов.

Процесс формирования завершенного скользящего разряда можно разделить на два этапа [16]. На первом этапе предионизации, при подаче импульса напряжения на инициирующий электрод, возникают большие градиенты потенциала электрического поля вокруг инициирующего электрода вследствие наличия межэлектродной емкости. Это вызывает в приповерхностном слое диэлектрической пластины ударную ионизацию газа, в результате действия которой по поверхности диэлектрика распространяется слабосветящийся предразряд, который обеспечивает проводимость в разрядном поверхностном промежутке. Скорость распространения этого предразряда зависит от начального напряжения на разрядном промежутке, диэлектрической проницаемости диэлектрика и геометрии электродов [17] и составляет $(1,4 \dots 4) \cdot 10^6$ м/с. На втором этапе за разрядом предионизации следует

сильноточный разряд, который определяет энерговыход в пограничный слой газа. Время запаздывания сильноточного разряда зависит от скорости распространения поверхностного разряда. Первый процесс определяется нормальной составляющей электрического поля E_y на электроде и в газовом зазоре между электродами, второй – тангенциальной составляющей электрического поля E_x на поверхности диэлектрика. Предионизация развивается под действием нормальной составляющей электрического поля E_y .

В результате замыкания межэлектродного промежутка имеет место сильноточная стадия. Возможность получения многоканальной формы разряда позволяет широко использовать его в различных электрофизических установках в качестве сильноточного малоиндуктивного коммутатора [3, 10, 18–21]. Поверхностные разрядники работают как в режиме самозапуска (рис., электроды – 3 отсутствуют), т.е. при импульсном приложенном напряжении U_0 , так и в режиме пуска от внешнего импульса, подаваемого на инициирующие электроды – 3. Такие разрядники коммутируют токи в несколько мегаампер при напряжениях до 100 кВ, с временем задержки срабатывания $t_s \approx 10^{-8} \dots 10^{-7}$ с, при стабильности $\Delta t_s \leq 10^{-9} \dots 10^{-8}$ с. Они могут работать в импульсно-периодическом режиме при частотах следования импульсов до $10^2 \dots 10^3$ Гц, при токах 10 кА и напряжении до 30 кВ, при скорости прокачки газа $\geq 10^3$ см/с [2].

Заключение

Таким образом, природа особенностей скользящего разряда связана с рядом факторов, вызванных наличием двух различных диэлектрических сред (газ и твердый диэлектрик) и, как следствие, возможностью создания нормальной составляющей электрического поля при развитии разряда в тангенциальном направлении. В результате имеется возможность создания достаточно однородных плазменных поверхностей больших размеров в незавершенной и завершенной формах разряда, в том числе при высоких давлениях газа.

Незавершенный скользящий разряд в большинстве случаев имеет многоканальную форму, близкую к диффузной, что и определяет многие области его применения: для накачки лазеров, в качестве источников импульсного ультрафиолетового излучения, как эффективный генератор озона. Необходимым условием возникновения многоканального разряда является высокая скорость изменения приложенного или инициирующего напряжения.

Для получения управляемого многоканального завершенного разряда необходимо применение инициирующих электродов с подачей на них напряжения с крутым фронтом ($dU_n/dt \geq 10^{12}$ В/с). Многоканальность разряда позволяет использовать его в управляемых сильноточных малоиндуктивных коммутаторах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника высоких напряжений / И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, Н.И. Гумерова и др.; под ред. Г.С. Кучинского. — СПб.: Энергоатомиздат, 2003. — 608 с.
2. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. — М.: Наука, 2004. — 704 с.
3. Krile J.T., Neuber A.A. e.a. DC flashover of a dielectric Surface in atmospheric conditions // IEEE Trans. Plasma Sci. — 2004. — V. 32. — № 5. — P. 1828–1834.
4. Кузьмин Г.П., Минаев И.М., Рухадзе А.А. Обтекание вязким потоком газа плазменного листа, образованного скользящим разрядом // Прикладная физика. — 2004. — № 6. — С. 96–104.
5. Сканиви Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). — М.: ГИФМЛ, 1958. — 910 с.
6. Разработка технологии глубокой очистки загрязненных вод и газовых выбросов на основе новых высокоэффективных генераторов озона: Отчет по НИР/МЭИ. Руководитель И.П. Верещагин. — ГР 99855281. — УДК 662.98.018.78.001.573(047). — М., 1992. — 34 с.
7. Дашук П.Н., Челноков Л.Л. О возможности сокращения длины скользящего разрядника // Высоковольтные искровые и взрывные коммутаторы: Тез. докл. совместного заседания секций научных советов АН СССР «Научные основы электрофизики и электроэнергетики» и «Проблемы мощной импульсной энергетики». — Томск: Красное знамя, 1986. — С. 26–27.
8. Дашук П.Н., Чистов Е.К. Некоторые особенности распределения электрического поля в системах формирования скользящего разряда // Журнал технической физики. — 1979. — Т. 49. — № 6. — С. 1241–1244.
9. Андреев С.И., Зобов Е.А., Сидоров А.Н. Метод управления развитием и формированием системы параллельных каналов скользящих искр в воздухе при атмосферном давлении // Прикл. мех. и техн. физика. — 1976. — № 3. — С. 12–17.
10. Дашук П.Н., Челноков Л.Л., Ярышева М.А. Характеристики скользящего разряда по поверхности твердых диэлектриков применительно к высоковольтным коммутаторам // Электронная техника. — 1975. — № 6. — С. 9–11.
11. Андреев С.И., Зобов Е.А., Сидоров А.Н., Костоусов В.Д. Исследование длинной скользящей искры // Прикл. мех. и техн. физика. — 1980. — № 1. — С. 111–115.
12. Берцев В.В., Дашук П.Н., Лысаковский Г.Г. Вольткулоновские характеристики скользящего разряда // Известия вузов. Сер. Энергетика. — 1963. — № 6. — С. 24–26.
13. Лава Л., Паркер Ш., Рей Ч., Шварц Д.М. Импульсная система для искровых камер // Приборы для научных исследований. — 1964. — № 11. — С. 184–189.
14. Дашук П.Н., Сергеев Е.П. Спектроскопические исследования характеристик скользящего разряда в стримерной и искровой стадиях // Всес. семинар по физике газовых лазеров. — Новосибирск, 1975. — С. 154.
15. Дашук П.Н., Зинченко А.К., Меркулова Т.Г., Сергеев Е.П. Об измерениях газовой температуры и концентрации электронов в канале незавершенной стадии скользящего разряда // Журнал технической физики. — 1978. — Т. 48. — № 8. — С. 1613–1616.
16. Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Месяц Г.А., Юрике Я.Я. Развитие поверхностного разряда по диэлектрику с большой диэлектрической проницаемостью в газе в наносекундном диапазоне // Прикл. мех. и техн. физика. — 1973. — № 1. — С. 48–55.
17. Красюк И.К., Липатов Н.И., Пашинин П.П. Формирование импульса УФ-излучения в плазме поверхностного разряда фронтом ударной электромагнитной волны // Квантовая электроника. — 1976. — Т. 3. — № 11. — С. 2384–2391.
18. Афанасьев В.Н., Галицкий М.В. и др. Электровзрывной генератор ударных волн // Труды V Забалахинских научных чтений. — Снежинск, 1999. — С. 127–128.
19. Дашук П.Н. Коммутация импульсных токов разрядниками со скользящим разрядом // Высоковольтные искровые и взрывные коммутаторы: Тез. докл. совместного заседания секций научных советов АН СССР «Научные основы электрофизики и электроэнергетики» и «Проблемы мощной импульсной энергетики». — Томск: Красное знамя, 1986. — С. 5–8.
20. Григорьев А.В., Дашук П.Н. и др. Малоиндуктивный мегаамперный коммутатор тока на скользящем разряде // Приборы и техника эксперимента. — 1976. — № 4. — С. 151–154.
21. Reinovsky R.E., Goforth J.H. e.a. Surface-discharge switches for high-performance closing applications // IEEE Trans. Plasma Sci. — 2004. — V. 32. — № 5. — P. 1765–1777.