

УДК 537.52

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ СКОРОСТНОЙ ФОТОСЪЕМКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОЙ ВАКУУМНОЙ ДУГИ В КОРОТКОМ ПРОМЕЖУТКЕ

© 2022 г. С. Г. Давыдов^а, *, А. Н. Долгов^а, А. А. Козлов^а, Р. Х. Якубов^а

^аВсероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, 127055 Россия

*E-mail: vniia4@vniia.ru

Поступила в редакцию 19.05.2021 г.

После доработки 31.08.2021 г.

Принята к публикации 01.09.2021 г.

Изучался процесс коммутации короткого вакуумного промежутка, инициируемый вспомогательным разрядом по поверхности диэлектрика путем регистрации изображений с помощью электронно-оптической системы. На основе анализа полученных результатов высказано предположение о существенной роли эмиссии излучения и электронов из катодного факела в процессе формирования токового канала в разряде, которое получило экспериментальное подтверждение.

Ключевые слова: коммутатор, вакуумный разрядник, искровой разряд, дуга, фоторегистрация

DOI: 10.56304/S2079562922010122

ВВЕДЕНИЕ

Управляемые сильнотоочные вакуумные коммутаторы находят достаточно широкую область для своего применения в аппаратуре, предназначенной, например, для генерации импульсных потоков проникающего излучения, фоторегистрации быстротекущих процессов [1]. Увеличение ресурса и стабильности функционирования указанных устройств—задача, которую постоянно требуется решать и, соответственно, для ее успешного решения необходимо постоянное углубление наших знаний о процессах в плазме вакуумных разрядов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Исследования проводились на экспериментальном стенде, позволяющем осуществлять натурное моделирование процесса коммутации короткого вакуумного промежутка с помощью вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика. В качестве разрядного устройства использовалась электродная система, фотография которой приведена на рис. 1.

Основные элементы электроразрядной системы — анод; катод; поджигающий электрод и диэлектрическая шайба, разделяющая катод и поджигающий электрод и плотно зажатая между ними. Катод, поджигающий электрод и диэлектрическая шайба—соосные цилиндры одного диаметра (6 мм). Анод — куполообразный диаметром 6 мм, имеет продолжение — токовод, который ввинчивается в

основание диаметром 7 мм, выполненное из латуни. Материал электродов — нержавеющая сталь. Материал шайбы — слюда. Разрядное устройство размещается в вакуумной камере, откачиваемой

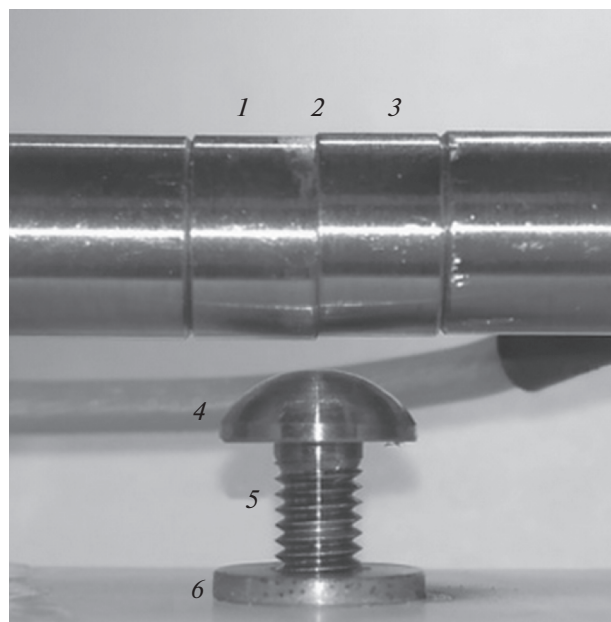


Рис. 1. Фотография электродной системы разрядного устройства: 1 — катод, 2 — диэлектрическая шайба, 3 — поджигающий электрод, 4 — анод, 5 — токовод, 6 — основание анода.

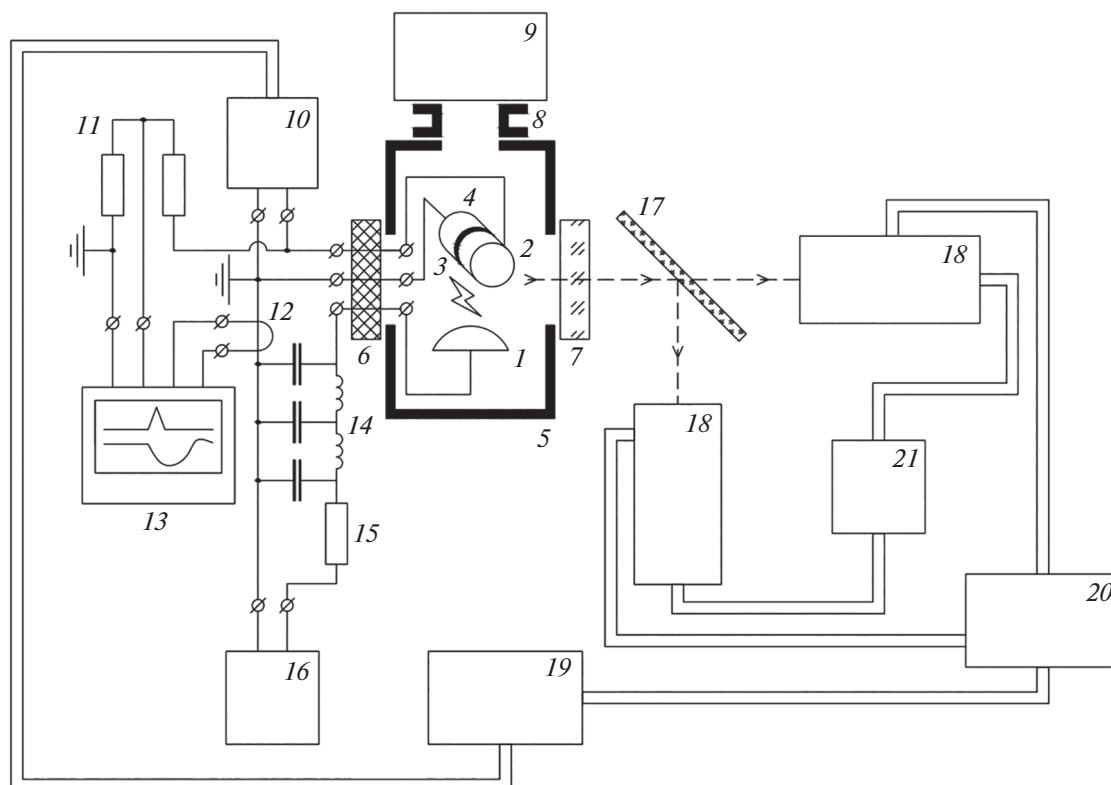


Рис. 2. Общая схема эксперимента: 1 — анод, 2 — поджигающий электрод, 3 — диэлектрическая шайба, 4 — катод, 5 — вакуумная камера, 6 — фланец с изолированными высоковольтными тоководами, 7 — оптическое окно, 8 — вакуумный тракт, 9 — средства откачки и контроля вакуума, 10 — генератор импульсов высокого напряжения, 11 — низкоиндуктивный омический делитель напряжения, 12 — пояс Роговского, 13 — осциллограф, 14 — формирующая линия, 15 — ограничивающее сопротивление, 16 — источник высокого напряжения, 17 — светоделительное зеркало, 18 — блок ЭОП, 19 — блок управления каналами регистрации, 20 — генератор задержанных импульсов, 21 — модуль сохранения изображений.

до давления остаточного газа 10^{-2} Па. Катод разрядного устройства заземлен, анод до начала коммутации находится под положительным потенциалом величиной до 3 кВ. Процесс коммутации стартует при подаче на поджигающий электрод положительного относительно катода импульса напряжения амплитудой до 4 кВ и скоростью нарастания $(1-2) \cdot 10^9$ В/с. Происходит пробой по поверхности диэлектрической шайбы и, согласно устоявшимся представлениям, плазма, образованная продуктами эрозии [2], создает проводящую среду в пространстве, разделяющем катод и анод [3–5]. Достижимая сила тока в промежутке катод–анод в режиме короткого замыкания — до 250–300 А. Продолжительность импульса тока при закорачивании промежутка катод–анод определяется параметрами коммутлируемой цепи и составляет 30 мкс. С целью изучения динамики разряда в вакуумном промежутке была осуществлена регистрация изображений плазмы разряда в собственном оптическом излучении при субнаносекундных временах экспозиции с помощью двухканального электрооптического модуля на

основе ЭОП ЭПМ132Г-00-22А, использующих схему стробирования по катоду (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Наблюдаемые разряды можно разделить на два типа. В случае разряда первого типа осциллограммы тока проявляют полную повторяемость от разряда к разряду и соответствует выше приведенному описанию. Длительность временного интервала, в течении которого после пробоя по поверхности диэлектрика в узле поджига образуется проводящая среда в промежутке катод–анод, судя по осциллограммам напряжения и тока для указанного промежутка, составляет ~ 20 нс. В случае разрядов второго типа устойчиво наблюдается укороченный примерно до 2 мкс на полувывоте импульса тока с затянутым до 6–8 мкс задним фронтом и значительной временной задержкой по отношению к моменту пробоя по поверхности диэлектрика, длительность которой варьируется в пределах от 2 до 10 мкс.



Рис. 3. Изображение разряда 1-го типа на начальной стадии, полученное с помощью электронно-оптической системы фоторегистрации. Экспозиция — 100 нс.

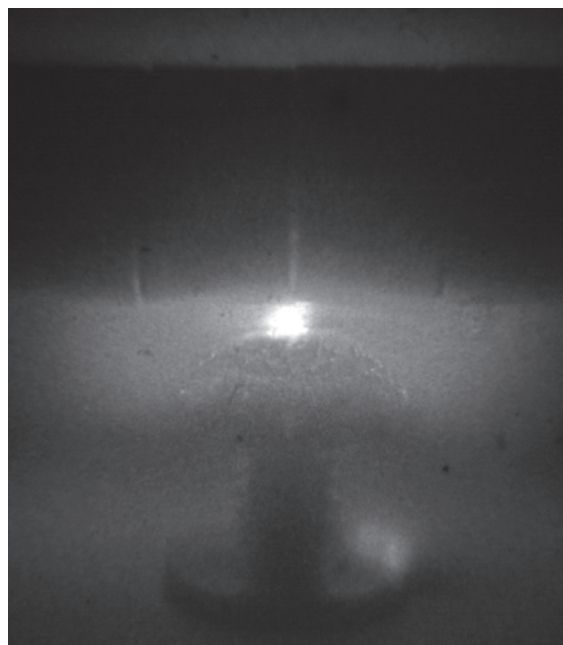


Рис. 4. Изображение разряда 1-го типа на стадии дуги, полученное с помощью электронно-оптической системы фоторегистрации. Экспозиция — 100 нс.

Разряд 1-го типа реализуется в том случае, когда вспомогательный искровой разряд по поверхности диэлектрика, который инициирует разряд между катодом и анодом, возникает на участке системы поджига, расположенном на расстоянии от поверхности анода, близком к минимальному. В указанной ситуации на начальной стадии разряда может не наблюдаться выделяющийся канал протекания тока между катодом и анодом. В тоже время на поверхности анода наблюдаются анодные пятна. Можно предположить, что в пространстве между катодом и анодом протекает объемный разряд, обусловленный ионизацией остаточного газа излучением и быстрыми электронами, эмитируемыми из плазмы катодного факела, и по своим свойствам близкий к тлеющему. На дуговой стадии разряда вокруг основного контрагированного канала протекания тока, выделяющегося высокой яркостью свечения, наблюдается область значительно менее яркого диффузного свечения, отличающаяся, по-видимому, пониженной плотностью проводящей среды. Тот факт, что в области диффузного свечения протекает ток, подтверждается наблюдением анодных пятен на той части поверхности анода, которая попадает в пределы указанной области (рис. 3–5).

Основной разряд 2-го типа реализуется в том случае, когда вспомогательный искровой разряд возникает на участке поджигающей системы, находящемся на расстоянии от поверхности анода, близком к максимальному. Поверхность анода, находящаяся на расстоянии 1 мм от поверхности

катода, в указанной ситуации в развитии разряда между катодом и анодом видимого участия не принимает. На начальной стадии разряда наблюдаются многочисленные анодные пятна на основании анода (рис. 6).

Кроме того, на дуговой стадии разряда на снимках отчетливо видно присутствие диффузного све-

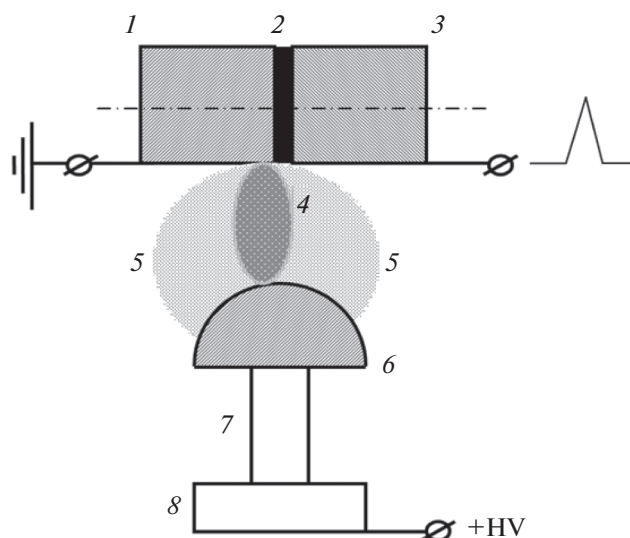


Рис. 5. Схема пространственной структуры разряда 1-го типа: 1 — катод, 2 — диэлектрическая шайба в узле поджига, 3 — поджигающий электрод, 4 — катодный факел, 5 — зона диффузного свечения, 6 — анод, 7 — токовод, 8 — основание анода.

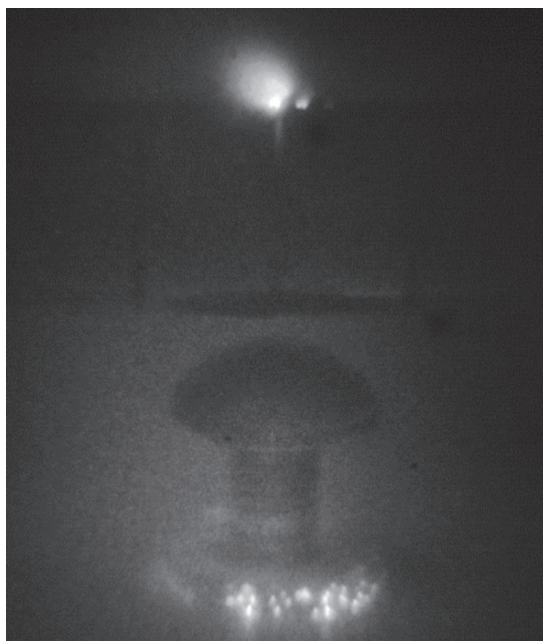


Рис. 6. Изображение разряда 2-го типа на стадии искры, полученное с помощью электронно-оптической системы фоторегистрации. Экспозиция — 100 нс.

чения в окружающем катод и анод пространстве, на фоне которого выделяется направленная к основанию анода излучающая полоса (рис. 7, 8).

Это обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что линии тока, идущие от катодного пятна и плазмы катодного факела, пересекают поверхность основания анода, а их протяженность составляет ~1 см. Причиной протекания тока столь причудливым образом может являться, по-видимому, опять-таки ионизация остаточного газа излучением и быстрыми электронами, эмитируемыми из плазмы катодного факела, создающая условия для развития разряда, напоминающего тлеющий.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Оценим начальную силу тока, который может протекать в разреженном газе, т.е. в вакууме, в нашей электродной системе.

В случае разряда 1-го типа при напряжении $U = 3$ кВ и расстоянии между электродами, т.е. катодом и анодом, $\delta = 1$ мм закон “трех вторых” $j_{3/2} = 2.33 \cdot 10^{-6} U^{3/2} / \delta^2$ [6] даст плотность тока равной примерно $4 \cdot 10^5$ А/м². Если принять площадь поперечного сечения канала тока $\sim 10^{-4}$ м² (т.е. порядка площади поверхности анода), то достигаемая сила тока составит 40 А. Необходимым условием развития самоподдерживающегося дугового разряда является условие, накладываемое на силу тока в разряде, а именно, превышение некоторой величины, называемой пороговым то-

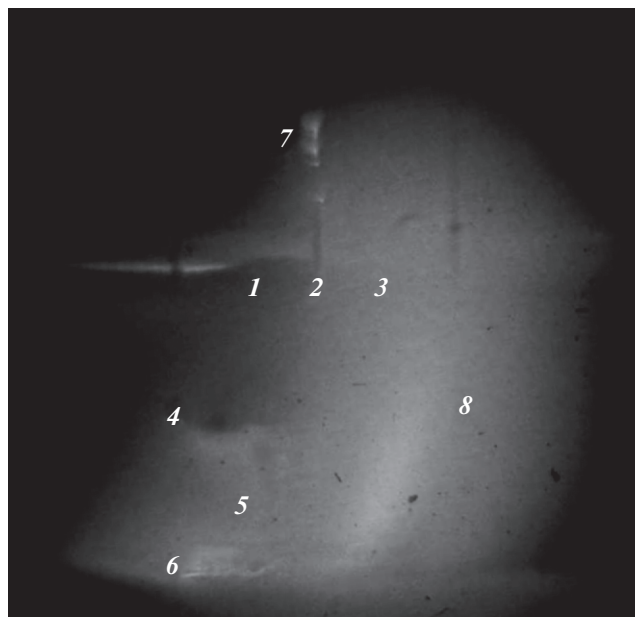


Рис. 7. Изображение разряда 2-го типа на стадии дуги, полученное с помощью электронно-оптической системы фоторегистрации: 1 — катод, 2 — диэлектрическая шайба в узле поджига, 3 — поджигающий электрод, 4 — анод, 5 — токовод, 6 — основание анода, 7 — катодный факел, 8 — зона диффузного свечения. Экспозиция — 100 нс.

ком. Для химических элементов, входящих в состав используемого материала электродов, величина порогового тока находится в пределах от 1.5 до 6 А [4]. Таким образом при вовлечении в процесс формирования первоначального разряда значительной части поверхности анода возможен переход разряда в дуговую фазу. Пороговая сила тока, судя по регистрируемой скорости нарастания силы тока в промежутке катод—анод, будет достигнута за время ≤ 10 нс, т.е. до момента затухания инициирующего искрового разряда по поверхности диэлектрика длительностью ~ 30 нс. Катодное пятно, возникающее при инициирующем искровом пробое по поверхности диэлектрика, обеспечивает потоком излучения и быстрых электронов ионизацию остаточного газа и формирование объемного разряда, по-видимому, близкого по своим свойствам к тлеющему. Физический механизм перехода разряда в дальнейшем в самоподдерживающийся дуговой — это ионизационно—перегревная неустойчивость объемного разряда, ведущая к контракции или шнурованию разряда [7, 8]. Распространение в межэлектродном промежутке плазмы катодного факела не способно обеспечить на начальном этапе развития разряда столь быстрое нарастание силы тока, как было указано выше. Действительно, при определяющей роли тепловой скорости, которая составляет порядка 10^3 м/с, время замыкания межэлектродного промежутка плазмой ка-

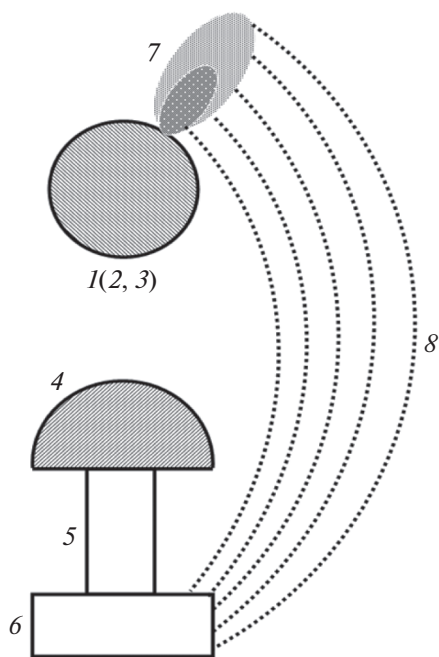


Рис. 8. Схема пространственной структуры разряда 2-го типа: 1 — катод, 2 — диэлектрическая шайба, 3 — поджигающий электрод, 4 — анод, 5 — токовод, 6 — основание анода, 7 — катодный факел, 8 — зона диффузного свечения.

тодного факела составит $\sim 10^{-6}$ с. Механизм амбиполярной диффузии, обеспечивающий скорость распространения плазмы $\sim 10^4$ м/с [4], способен дать время замыкания $\sim 10^{-7}$ с.

В случае разряда 2-го типа при расстоянии между электродами, отмеренным вдоль линий тока $\delta = 1$ см закон “трех вторых” даст плотность тока равную примерно $3 \cdot 10^3$ А/м². Если принять площадь поперечного сечения канала тока $\sim 10^{-4}$ м², т.е. принять ее примерно равной площади основания анода, то полная сила тока может составлять ~ 0.3 А. Таким образом можно прийти к выводу, что протекание тока в среде остаточного газа, не рождающей в достаточном количестве носителей тока, в случае разряда 2-го типа не способно обеспечить переход разряда в дуговую фазу. Вероятно, на начальной стадии разряда 2-го типа он носит характер, близкий к тлеющему. Развитие ионизационно-перегревной неустойчивости ведет к контракции разряда, следствие чего в виде локализованных анодных пятен мы наблюдаем на рис. 6. При этом в прикатодной области разряд носит характер искрового. Затем вследствие возрастания концентрации носителей заряда благодаря поступлению вещества из катодного факела разряд приобретает характер дугового, а режим работы анода переходит в диффузный. Заполнение охваченного разрядом пространства плазмой, поступающей из катодного факела, приводит к достаточно резкому увеличению проводимости

канала тока. Судя по длительности времени задержки механизм амбиполярной диффузии плазмы в данных обстоятельствах не является определяющим, а скорость диффузии вещества катодного факела определяется скоростью теплового движения ионов. Вероятно, все дело в следующем. С одной стороны, первичный поток вещества из катодного пятна, в плазме которого может реализоваться разделение зарядов, ведущее к явлению амбиполярной диффузии, в рассматриваемой области пространства имеет сравнимую с остаточным газом концентрацию частиц. С другой стороны, ионизованный остаточный газ является плазмой, и это обстоятельство препятствует явлению амбиполярной диффузии, т.к. переводит его в процесс развития колебаний типа ленгмюровских. Остается механизм диффузии за счет теплового движения ионов. Действительно, если размер центра взрывной эмиссии принять ~ 1 мкм, концентрацию частиц в нем $\sim 10^{22}$ см⁻³, учесть, что концентрация убывает обратно пропорционально квадрату расстояния [4], то на расстоянии ~ 1 см получим концентрацию частиц $\sim 10^{14}$ см⁻³, что соответствует концентрации нейтральных частиц остаточного газа. Если же принять степень ионизации $\sim 1\%$, что представляется достаточно реалистичным, то при температуре свободных электронов порядка нескольких электронвольт получим величину радиуса Дебая на уровне ~ 0.1 – 0.01 мм.

Наблюдаемое характерное время затухания на заднем фронте импульса тока в разряде 2-го типа составляет от нескольких до десятка микросекунд. Самым эффективным механизмом объемной рекомбинации в слабоионизованных газах и парах металлов является диссоциативная рекомбинация [4]. В отсутствие поля (или при слабом поле, например, при переходе через ноль тока), концентрация заряженных частиц в плазме уменьшается с течением времени по закону $n_e = 1/(1 + \beta n_{e0} t)$, где n_{e0} и n_e — концентрация электронов в плазме начальная и в момент времени t , $\beta \approx 10^{-13}$ м³/с — коэффициент диссоциативной рекомбинации [4]. Характерное время распада плазмы оценивается как $\tau \approx 1/\beta n_{e0}$. Если принять начальную концентрацию заряженных частиц за пределами катодного факела с учетом диффузии частиц из него в окружающее пространство равной порядка 10^{12} см⁻³, как это было сделано ранее, то получим в качестве оценки характерного времени распада плазмы в разряде 2-го типа величину $\sim 10^{-5}$ с, которая вполне согласуется с результатами наблюдений.

Начальную для процесса рекомбинации концентрацию заряженных частиц в плазменном факеле в случае разряда 1-го типа оценим используя формулу Юттнера (Jüttner) для вакуумной дуги $n_{e0} \approx \gamma I_{\text{arc}} / r^2$, где $\gamma \approx 10^{13}$ А⁻¹ м⁻¹ — константа, I_{arc} —

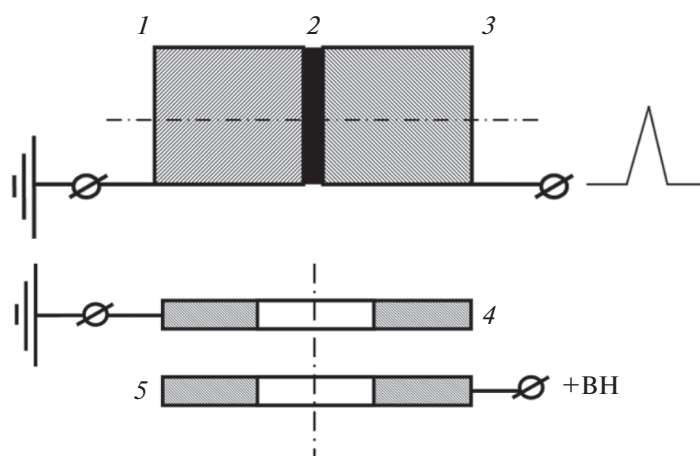


Рис. 9. Схема разрядного устройства с двойным катодом: 1 – катод № 1, 2 – диэлектрическая шайба, 3 – поджигающий электрод, 4 – катод № 2, 5 – анод. Промежуток между катодом №2 и анодом составлял 1 мм и располагался на расстоянии 2.5 мм от узла поджига. Полученные изображения (рис. 10, 11) и осциллограммы тока свидетельствуют о быстром зажигании разряда в промежутке катод № 2–анод, не обусловленном распространением плазмы катодного факела из узла поджига в окружающее пространство.

ток дуги, r – расстояние до катодного пятна [9].

Приняв $I_{arc} \approx 10$ А (на спаде тока), $r \approx 10^{-3}$ м (равным расстоянию между катодом и анодом) получим в качестве оценки характерного времени распада плазмы в разряде первого типа величину 10^{-8} с, которая по крайней мере не противоречит результатам наблюдений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РОЛИ ЭМИССИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Как было указано выше, во-первых, распространение в межэлектродном промежутке плазмы катодного факела не способно обеспечить на начальном этапе развития разряда наблюдаемую скорость нарастания силы тока в промежутке катод–анод для разряда 1-го типа, но может быть следствием ионизации остаточного газа потоком излучения и быстрых электронов из плазмы катодного факела. Во-вторых, развитие дугового разряда 2-го типа также подразумевает эффективную ионизацию остаточного газа потоком излучения и быстрых электронов, испускаемых из плазмы катодного факела. Была проведена проверка данной гипотезы. С этой целью использовалась модификация разрядного устройства с двойным катодом (рис. 9).

Промежуток между катодом № 2 и анодом составлял 1 мм и располагался на расстоянии 2.5 мм от узла поджига. Полученные изображения (рис. 10, 11) и осциллограммы тока свидетельствуют о быстром зажигании разряда в промежутке катод № 2–анод, не обусловленном распространением плазмы катодного факела из узла поджига в окружающее пространство.

При отрицательной полярности потенциала анода оказалось, что разряд в промежутке катод № 2–анод не загорается несмотря на наличие инициирующего искрового разряда в узле поджига (рис. 11). Данное обстоятельство обусловлено тем, что основную роль в ионизации остаточного газа играет поток быстрых электронов с энергией ≥ 100 эВ, испускаемых из плазмы искрового разряда по поверхности диэлектрика.

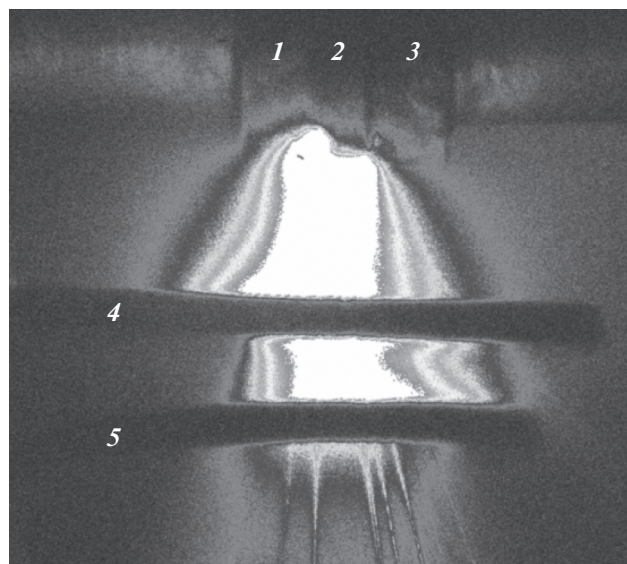


Рис. 10. Изображение разряда в системе с двойным катодом, полученное с помощью видеокамеры, при положительной полярности потенциала анода (+200 В): 1 – катод № 1, 2 – диэлектрическая шайба, 3 – поджигающий электрод, 4 – катод № 2, 5 – анод. Экспозиция – 60 мкс.

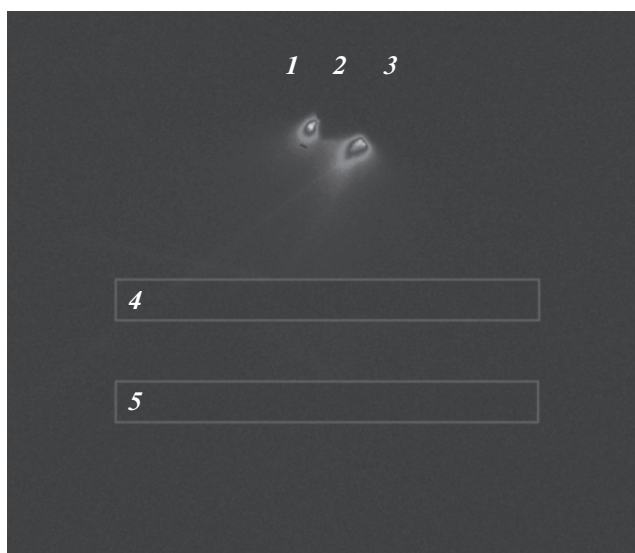


Рис. 11. Изображение разряда в системе с двойным катодом, полученное с помощью видеокамеры, при отрицательной полярности потенциала анода (-200 В): 1 – катод № 1, 2 – диэлектрическая шайба, 3 – поджигающий электрод, 4 – катод № 2, 5 – анод. Экспозиция – 60 мкс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом изучение динамики процесса коммутации короткого вакуумного промежутка, инициируемого вспомогательным разрядом по поверхности диэлектрика, путем регистрации изображений плазмы разряда в собственном оптическом излучении при временах экспозиции в субнаносекундном диапазоне дало следующие результаты.

Зафиксировано развитие разрядов двух типов. 1-ый тип характеризуется развитием дугового разряда в промежутке катод–анод в результате замыкания промежутка плазмой катодного факела, т.е. токовый дрейф заряженных частиц в проводящей среде происходит по кратчайшей траектории между катодом и анодом. 2-ой тип разряда характеризуется образованием катодного пятна на катоде, выбросом в окружающее пространство, но не в направлении анода, плазменного факела, продолжением которого является дугообразная диффузная область разряда, замыкающаяся на основание анода, и при этом визуальных признаков развития разряда по наиболее короткой траектории в промежутке катод–анод не наблюдается. Вероятно, на начальной стадии разряда 2-го типа он носит характер тлеющего и развитие ионизационно-перегревной неустойчивости ведет к контракции разряда и формированию локализованных анодных пятен. Благодаря поступлению вещества из катодного факела разряд приобретает характер дугового, а режим работы анода переходит в диффузный. Механизм амбиполярной диффузии плазмы в данных обстоятельствах не является определяющим, а скорость диффузии вещества катодного факела определяется скоростью теплового движения ионов.

На основе анализа полученных данных было сформулировано и получено экспериментальное подтверждение предположение о существенной роли эмиссии излучения и быстрых электронов из катодного факела в процессе формирования токового канала в импульсном дуговом разряде при давлении остаточного газа не менее 10^{-2} Па.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Mesyats G.A. Pulsed Power and Electronics. 2004. Moscow: Nauka (in Russian).
2. Asyunin V.I., Davydov S.G., Dolgov A.N., Korneev A.V., Pshenichnyi A.A., Yakubov R.K. // *Elektrichestvo*. 2018 (7). P. 31–36 (in Russian).
3. Brish A.A., Dmitriev A.B., Kosmarsky L.N., Sachkov Y.N., Sbitnev E.L., Tsitsiashvili S.S., Eig A.S. // *Instrum. Exp. Tech.* 1958 (5). P. 53.
4. Mesyats G.A. Cathode Phenomena in a Vacuum Discharge: The Breakdown, the Spark, and the Arc. 2000. Moscow: Nauka (in Russian).
5. Alferov D.F. Doctoral (Tech. Sci.) Dissertation. 2010. Russ. Fed. Nucl. Center Zababakhin All-Russ. Res. Inst. Tech. Phys (in Russian).
6. Tsvetkov I.V. Fundamentals of Physical Processes in Plasma and Plasma Installations. Ed. by Kurnaev V.A. 2007. Moscow: MEPhI (in Russian).
7. Raizer Y.P. Gas Discharge Physics. 1992. Moscow: Nauka (in Russian).
8. Velikhov E.P., Kovalev A.S., Rakhmanov A.T. Physical Phenomena in Gas–Discharge Plasma. 1987. Moscow: Nauka (in Russian).
9. Anders A. Physics of Arc Plasma Devices. Proc. Breakdown Physics Workshop. CERN, Switzerland, May 6–7, 2010.

Application of The High—Speed Photography Technique to Study a Pulsed Vacuum Arc Plasma in a Short Gap

S. G. Davydov¹, *, A. N. Dolgov¹, A. A. Kozlov¹, and R. Kh. Yakubov¹

¹*Dukhov All-Russian Research Institute of Automation, Moscow, 127055 Russia*

**e-mail: vniia4@vniia.ru*

Received May 19, 2021; revised August 31, 2021; accepted September 1, 2021

Abstract—We studied the process of switching a short vacuum gap, initiated by an auxiliary discharge along the surface of the dielectric by registration images using an electro—optical system. Based on the analysis of the results obtained, it was suggested that the emission of radiation and electrons from the cathode torch plays a significant role in the formation of the current channel in the discharge, which has been experimentally confirmed.

Keywords: vacuum switch, vacuum breaker, spark discharge, arc, photo registration