

**Пространственная структура и динамика импульсного дугового разряда
в вакууме**С. Г. Давыдов, А. Н. Долгов, М. А. Карпов, А. В. Корнеев, Д. В. Никишин,
А. А. Пшеничный, Р. Х. Якубов

Изучался процесс коммутации короткого вакуумного промежутка с помощью вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика путем высокоскоростной регистрации изображений плазмы разряда в оптическом диапазоне спектра. На основе анализа полученных экспериментальных данных высказано предположение о существенной роли излучения катодного пятна и катодного факела ультрафиолетового диапазона в процессе формирования токового канала в разряде.

Ключевые слова: искровой разряд, дуговой разряд, катодное пятно.

Ссылка: Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Карпов М. А., Корнеев А. В., Никишин Д. В., Пшеничный А. А., Якубов Р. Х. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 5. С. 454.

Reference: S. G. Davydov, A. N. Dolgov, M. A. Karpov, A. V. Korneev, D. V. Nikishin, A. A. Pshenichniy, and R. Kh. Yakubov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (5), 454 (2019).

Введение

Интерес к искровому и дуговому разрядам в вакууме вызван их успешным применением в высоковольтной и сильноточной электронике, а именно, в устройствах коммутации и размыкания цепей, приборах распыления материалов для тонкопленочных технологий, ионных источниках. Несмотря на столь широкое использование искровых и дуговых разрядов на практике, нельзя сказать, что существует полное понимание механизма образования

и существования, а также свойств ключевого элемента этих разрядов, каковым является, пожалуй, катодное пятно [1–5]. В частности, предложена и разрабатывается эктонная модель [6, 7], которая принимается многими известными членами научного сообщества, работающими в данном направлении [3–5].

Понимание природы такого физического явления, как катодное пятно, вероятно, позволит с еще бóльшим успехом применять искровые и дуговые разряды для решения разнообразных прикладных задач.

Цель данной работы – проведение цикла исследований в интересах повышения эффективности вакуумных коммутаторов.

Схема эксперимента

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 была использована конструкция, фотография которой приведена на рис. 1. Общая схема эксперимента представлена на рис. 2.

Давыдов Сергей Геннадьевич, с.н.с.
Долгов Александр Николаевич, в.н.с., д.ф.-м.н.
Карпов Максим Александрович, в.н.с., к.т.н.
Корнеев Андрей Владимирович, н.с.
Никишин Дмитрий Викторович, инженер-исследователь I кат.
Якубов Рустам Халимович, начальник научно-исследовательского отдела, к.т.н.
Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова.
Россия, 127055, Москва, ул. Суцёвская, 22.
Тел. 8(499) 400-19-70 доб. 1302.
E-mail: korneev.andrey.555@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 марта 2019 г.

© Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Карпов М. А., Корнеев А. В., Никишин Д. В., Якубов Р. Х., 2019

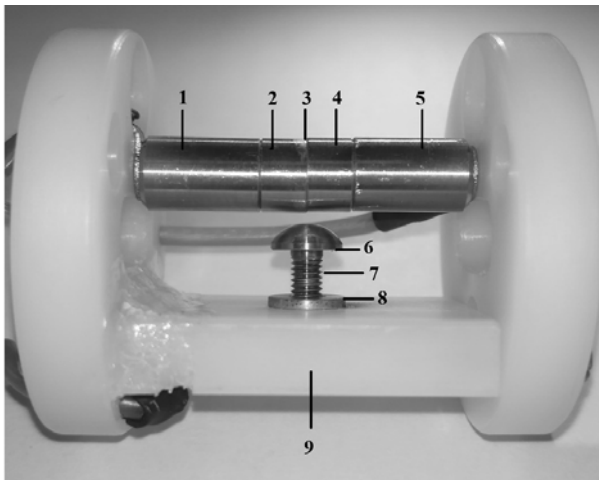


Рис. 1. Фотография вакуумного диода: 1 – токовод катода, 2 – сменяемое навершие катода, 3 – диэлектрическая шайба, 4 – сменяемое навершие поджигающего электрода, 5 – токовод поджигающего электрода, 6 – анод, 7 – токовод анода, 8 – основание анода, 9 – диэлектрический каркас вакуумного диода.

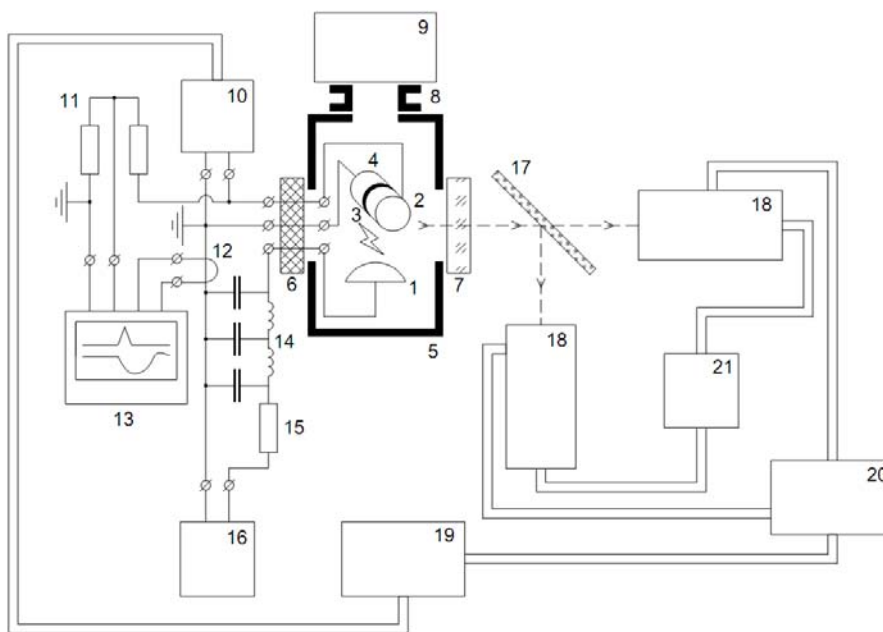


Рис. 2. Общая схема эксперимента: 1 – анод, 2 – поджигающий электрод, 3 – диэлектрическая шайба, 4 – катод, 5 – вакуумная камера, 6 – фланец с изолированными высоковольтными тоководами, 7 – оптическое окно, 8 – вакуумный тракт, 9 – средства откачки и контроля вакуума, 10 – генератор импульсов высокого 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.

Основные элементы электроразрядной системы – анод, катод, поджигающий электрод и диэлектрическая шайба, разделяющая катод и поджигающий электрод и плотно зажатая между ними. Электроды закреплены в диэлектрическом каркасе. Катод, поджигающий электрод и диэлектрическая шайба – соосные цилиндры одного диаметра (6 мм). Катод и поджигающий электрод конструктивно состоят из тоководов и наверший, непосредственно

контактирующих с диэлектрической шайбой. Анод, куполообразная деталь диаметром 6 мм, имеет продолжением токовод, который ввинчивается в основание диаметром 7 мм, выполненное из латуни. Толщина диэлектрической шайбы – 100 мкм. Материал электродов – нержавеющая сталь. Материал шайбы – слюда. Диэлектрический каркас разрядного устройства выполнен из капролона. Разрядное устройство размещается в вакуумной камере,

откачиваемой до давления остаточного газа 10^{-2} Па и снабженной вакуумноплотными выводами-токовыми, позволяющими подключать электроразрядное устройство к внешним цепям, и оптически прозрачным окном для вывода за пределы камеры излучения плазмы разряда.

Вакуумное разрядное устройство выступает в роли коммутатора с переменным сопротивлением для LCR-контура. Катод диода 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 $(1-2) \times 10^9$ В/с. Происходит пробой по поверхности диэлектрической шайбы, и плазма, образованная продуктами эрозии, создает проводящую среду в промежутке катод-анод. Амплитуда тока поджига достигает 10 А. Достижимая сила тока в промежутке катод-анод – до 250–300 А. Продолжительность импульса тока при закорачивании промежутка катод-анод определяется параметрами коммутируемой цепи и составляет 30 мкс. Регистрация напряжения в промежутке катод-поджигающий электрод осуществлялась с помощью низкоиндуктивного омического делителя. Сила тока в том же промежутке катод-поджигающий электрод определялась, исходя из напряжения на низкоиндуктивном сопротивлении номиналом 10 Ом, включенном в цепь поджига. Сила тока в промежутке катод-анод определялась по сигналу с калиброванного пояса Роговского.

С целью изучения динамики разряда в вакуумном промежутке была осуществлена регистрация изображений плазмы разряда в собственном оптическом излучении при временах экспозиции 5–500 нс. Средством получения изображений являлся электрооптический модуль, который состоял из следующих узлов:

- двух блоков ЭОП, использующих схему стробирования по катоду;
- блока управления каналами регистрации;
- светоделительного зеркала;
- 4-канального генератора задержанных импульсов (DG645) для синхронизации запуска каналов регистрации с поджигающим кон-

туром разрядника;

- модуля сохранения изображений (ноутбук, программное обеспечение).

В свою очередь, каждый блок ЭОП состоял из следующих частей:

- блока генерации стробирующего импульса (ГСИ) по фотокатоду;
- транспортирующего объектива («Юпитер»);
- электронно-оптического преобразователя (ЭОП ЭПМ-102Г), к которому для считывания информации с его экрана через проекционный объектив «ВЕГА» стыковалась цифровая ПЗС-камера SDU-274 с разрешением 1600×1200 пикселей.

Для получения двух разделенных фиксированным временным интервалом кадров, регистрирующих с заданной экспозицией изображения излучающей в оптическом диапазоне плазмы в процессе развития дугового разряда, каналы были размещены относительно наблюдаемого объекта по беспараллаксной схеме со светоделительным зеркалом.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Наблюдаемые разряды можно разделить на два типа. Характерные осциллограммы напряжения в системе поджига и тока в промежутке катод-анод для каждого типа разрядов приведены на рис. 3.

Первый тип связан с развитием дугового разряда в промежутке катод-анод, т. е. токовый дрейф заряженных частиц в проводящей среде – плазме – происходит по кратчайшей траектории между катодом и анодом (см. далее рис. 4, а). Первый тип основного разряда 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 минимальном расстоянии от поверхности анода.

На рис. 4, б, по-видимому, запечатлена дуговая стадия разряда в промежутке катод-анод, если судить по величине силы тока и длительности интервала времени, в течение которого развивается разряд. Наиболее яркий источник излучения, по крайней мере, в оптическом диапазоне спектра – это столб плазмы

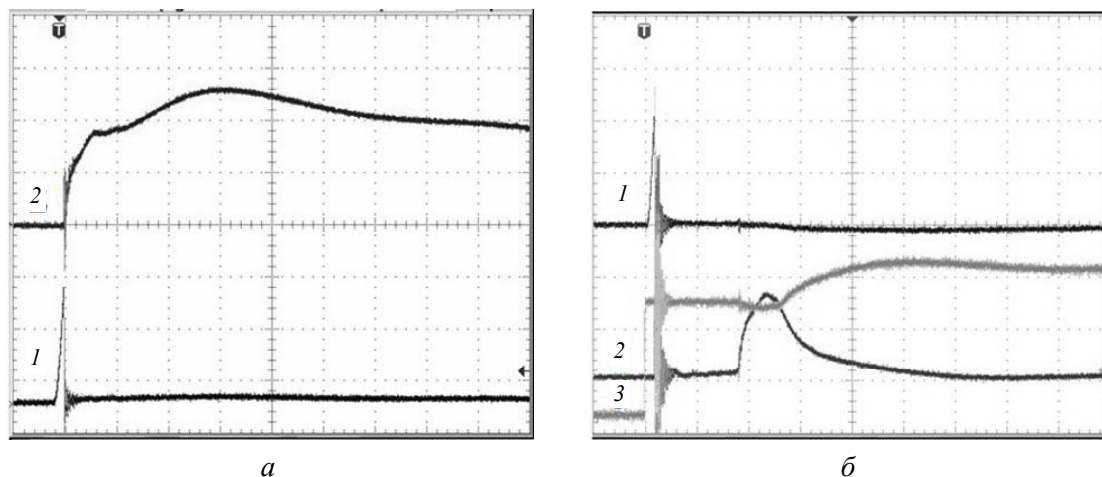


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на промежутке катод-поджигающий электрод (луч № 1) и тока в промежутке катод-анод (луч № 2), (луч № 3 – сигнал с блока управления каналами регистрации). Развертка: 2 мкс/дел. Чувствительность: луч № 1 – 1 кВ/дел, луч № 2 – 100 А/дел, луч № 3 – 2 В/дел. а) разряд первого типа; б) разряд второго типа.

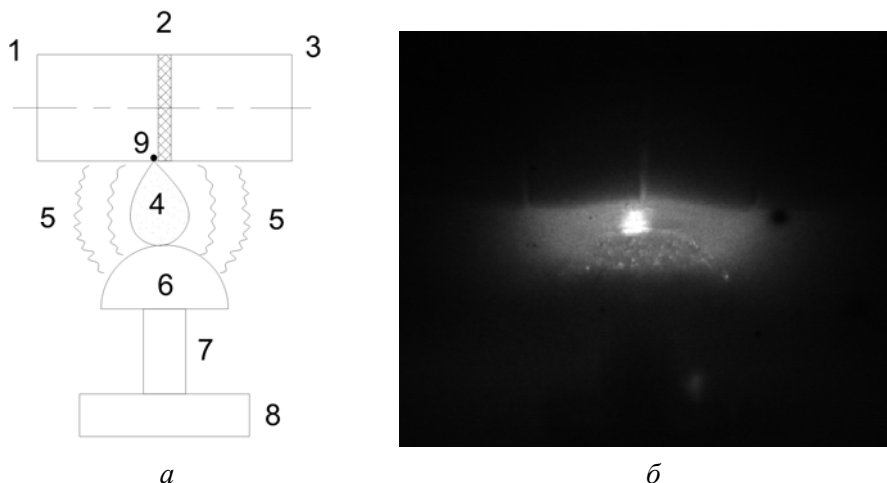


Рис. 4. Наблюдаемый разряд первого типа. а – пространственная структура разряда: 1 – катод, 2 – диэлектрическая шайба, 3 – поджигающий электрод, 4 – катодный факел, 5 – периферийная область разряда, 6 – анод, 7 – токовод, 8 – основание анода, 9 – катодное пятно; б – изображение разряда в оптическом диапазоне спектра, полученное с помощью системы высокоскоростного фотографирования. Экспозиция: начало регистрации изображения – время от начала протекания тока в промежутке катод-анод $t = 1,9$ мкс, продолжительность регистрации изображения – $\Delta t = 0,5$ мкс.

в промежутке катод-анод. Стоит в то же время обратить внимание на то обстоятельство, что катодное пятно, находящееся в основании столба на катоде, является центром диффузно светящейся области разряда, имеющей форму полушария. Именно в пределах пересечения указанной области с поверхностью анода, т. е. за пределами канала дугового разряда, видны многочисленные источники оптического излучения (вероятно, анодные пятна) размером

порядка 0,1 мм и слой пара материала анода, который слегка приподнят над поверхностью анода. Возникает подозрение, что излучение катодного пятна дугового разряда, причем вовсе не оптического, а скорее ультрафиолетового диапазона, вызывает ионизацию разреженной газовой среды на периферии разряда и протекание в ней тока наряду с протеканием тока в основном токовом канале, сильно излучающем. В пользу параллельного существова-

ния двух пространственно разделенных зон разряда, а именно, одной с высокой плотностью вещества и тока, в которой осуществляется дуговой разряд, и другой с низкой плотностью вещества и тока, в которой осуществляется разряд, напоминающий тлеющий, и свидетельствует наличие на фотографии изображения облака пара материала анода и присутствие на верхней границе пара анодных пятен.

Как известно, тлеющий разряд подвержен действию ионизационно-перегревной неустойчивости, которая приводит к контракции токового канала [8, 9]. Проявлением контракции во внешней области разряда становится появление на поверхности анода и на границе пара вещества анода локализованных анодных пятен.

Основной разряд второго типа реализуется в том случае, когда вспомогательный искровой разряд возникает на участке поджигающей системы, находящемся на расстоянии от поверхности анода, близком к максимальному значению. Поверхность анода, находящаяся на расстоянии 1 мм от поверхности катода, в указанной ситуации в развитии разряда между катодом и анодом видимого участия не при-

нимает, линии тока пересекают поверхность основания анода. Длина траектории, по которой происходит токовый дрейф заряженных частиц в этом случае, возрастает более чем на порядок величины (рис. 5, а). На рис. 5, б, по-видимому, запечатлена искровая стадия разряда в промежутке катод-анод, если судить по величине силы тока и длительности интервала времени, в течение которого развивается разряд. Во всяком случае, это касается той части разряда, которую мы визуальным образом можем наблюдать вблизи поверхности катода и поджигающего электрода. На поверхности катода на границе с диэлектрической шайбой наблюдается катодное пятно и катодный факел, т. е. поток плазмы, эмитируемой из области катодного пятна. На поверхности поджигающего электрода на границе с диэлектрической шайбой наблюдается анодное пятно. Кроме того, наблюдаются многочисленные анодные пятна на основании анода. Можно различить присутствие диффузного свечения в пространстве, окружающем катод и анод. В то же время визуальных признаков разряда непосредственно в промежутке катод-анод не наблюдается.

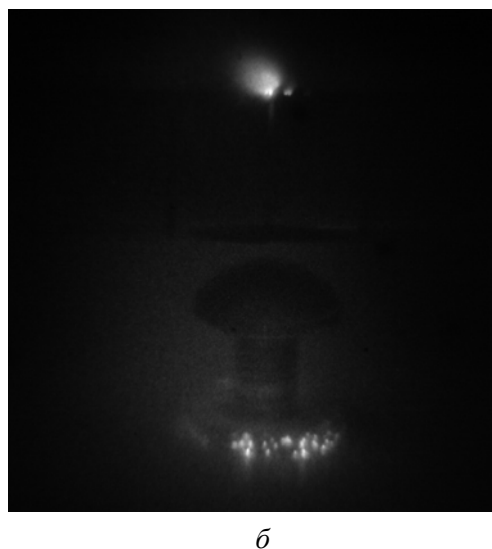
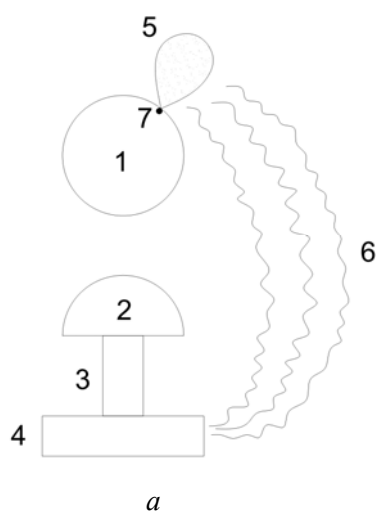


Рис. 5. Наблюдаемый разряд второго типа. а – пространственная структура разряда второго типа: 1 – катод, 2 – анод, 3 – токовод, 4 – основание анода, 5 – катодный факел, 6 – периферийная область разряда, 7 – катодное пятно; б – изображение разряда в оптическом диапазоне спектра, полученное с помощью системы высокоскоростного фотографирования. Экспозиция: начало регистрации изображения – время от начала протекания тока в промежутке катод-анод $t = 300$ нс, продолжительность регистрации изображения – $\Delta t = 100$ нс.

Разряд второго типа по визуальным признакам, несмотря на достигаемую в разряде силу тока и продолжительность,

представляется нетипичным и на стадии, которую можно было бы, вероятно, назвать стадией дугового разряда (см. рис. 6). Наблюда-

ется катодное пятно и катодный факел, часто наблюдается анодное пятно на поверхности поджигающего электрода. В пространстве, окружающем электродную систему, наблюдается диффузное свечение, на фоне которого выделяется направленная к основанию анода излучающая полоса. В то же время разряд в промежутке катод-анод не наблюдается, светящиеся анодные пятна у основания анода отсутствуют.

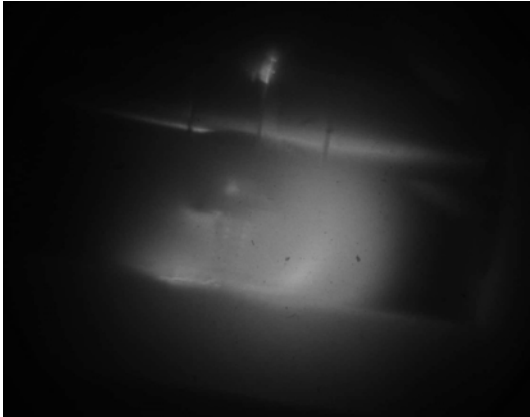


Рис. 6. Изображение разряда в оптическом диапазоне спектра, полученное с помощью системы высокоскоростного фотографирования. Экспозиция: начало регистрации изображения – время от начала протекания тока в промежутке катод-анод $t = 1,9$ мкс, продолжительность регистрации изображения – $\Delta t = 100$ нс.

Второй тип разряда также является, по-видимому, неким смешанным, пространственно неоднородным по своему характеру, как и разряд первого типа. У поверхности катода в плазме катодного факела, вероятно, параметры разряда соответствуют параметрам разряда, последовательно проходящего искровую и дуговую стадии разряда в вакууме. А вот в области диффузного свечения характер разряда является совсем иным. Веществу материала катода потребуется время порядка 1–10 мкс для того, чтобы распространиться от области катодного пятна до основания анода. Верхняя граница указанного временного интервала соответствует распространению паров материала катода с тепловой скоростью порядка 10^3 м/с, нижняя – распространению плазмы катодного факела в результате амбиполярной диффузии со скоростью порядка 10^4 м/с. Таким образом, разряд, фиксируемый на снимках по его свечению на периферии электрод-

ной системы, начинает протекать в среде разреженного остаточного газа. Стоит отметить, что вакуумные условия, создаваемые в диоде, таковы, что при заданном начальном напряжении на промежутке катод-анод, составляющем 3 кВ, никаких признаков зажигания самостоятельного тлеющего разряда не имеется.

Второй тип разряда отличается от первого тем, что, во-первых, существующие в нем две токопроводящие области включены в электрическую цепь последовательно. Во-вторых, контракция токовых каналов в области с низкой плотностью вещества фиксируется только на начальной, по-видимому, искровой стадии разряда. В дальнейшем существование отдельных анодных пятен (на основании анода), как следов контракции токовых каналов, не наблюдается. Однако периферийная, в основном, область с низкой плотностью вещества по-прежнему формируется опять-таки под воздействием излучения, испущенного из области с высокой плотностью вещества (катодного пятна и плазменного факела), прилегающей к катоду и по-прежнему проявляет схожесть с тлеющим разрядом, а именно, способом формирования токового канала. Известно, что если расстояние между катодом и анодом меньше, чем нужно, чтобы на нем поместилось темное катодное пространство и начало тлеющего свечения, но вместе с тем в окружающем пространстве можно найти более длинный путь от катода к аноду, то тлеющий разряд выбирает этот более длинный путь для формирования канала тока [10].

Численные оценки

Оценим начальную силу тока, который может протекать в разреженном газе, т. е. в вакууме, в нашей электродной системе. В случае разряда первого типа при напряжении $U = 3$ кВ и расстоянии между электродами, т. е. катодом и анодом, $\delta = 1$ мм, известный закон «трех вторых» [11]

$$j_{3/2} = 2,33 \times 10^{-6} \times U^{3/2} / \delta^2 \quad (1)$$

даст плотность тока, равной примерно 3×10^5 А/м². Если принять площадь поперечного сечения канала тока $\sim 10^{-6}$ м² (диаметр токового канала ~ 1 мм), то достигаемая сила тока составит $\sim 0,3$ А. При площади поперечного

сечения канала тока $\sim 10^{-4} \text{ м}^2$ (диаметр $\sim 1 \text{ см}$) имеем общий ток 30 А. Как мы видели, излучение катодного пятна ультрафиолетового диапазона способно в наших условиях, т. е. при давлении остаточного газа 10^{-2} Па , вызывать ионизацию остаточного газа и создавать условия для протекания разряда, напоминающего тлеющий. Дуговой разряд, в отличие от тлеющего, как известно, характеризуется высокой плотностью тока $\geq 10^5 - 10^7 \text{ А/м}^2$ [11]. Необходимым условием развития самоподдерживающегося дугового разряда является условие, накладываемое на силу тока в разряде, а именно, превышение некоторой величины, называемой пороговым током. Для химических элементов, входящих в состав используемого материала электродов, величина порогового тока находится в пределах от 1,5 до 6 А [6]. 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 (см. рис. 3), будет достигнута за время $\leq 10 \text{ нс}$, т. е. до момента затухания иницирующего искрового разряда по поверхности диэлектрика длительностью $\sim 30 \text{ нс}$.

Полученные изображения разряда свидетельствуют о том, что излучение катодного пятна и катодного факела ультрафиолетового диапазона способно путем ионизации остаточного газа создать проводящую среду в промежутке катод-анод и тем самым создать условия для вовлечения в разряд значительной поверхности анода. Катодное пятно возникает при иницирующем искровом пробое по поверхности диэлектрика. В дальнейшем, физический механизм перехода разряда в самоподдерживающийся дуговой – это ионизационно-перегревная неустойчивость тлеющего разряда, ведущая к контракции или шнурованию разряда [11]. Распространение в межэлектродном промежутке плазмы катодного факела не способно обеспечить на начальном этапе развития разряда столь быстрое нарастание силы тока, как указано выше. Действительно, при определяющей роли тепловой скорости, которая составляет порядка 10^3 м/с , время замыкания межэлектродного промежутка плазмой катодного факела соста-

вит $\sim 10^{-6} \text{ с}$. Механизм амбиполярной диффузии [6] способен обеспечить время замыкания $\sim 10^{-7} \text{ с}$.

Можно предположить, что в разряде второго типа вначале в среде ионизованного остаточного газа на периферии промежутка катод-анод развивается разряд типа тлеющего, в котором наблюдается явление контракции токового канала. 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. Кроме того, обращает на себя внимание затянутый задний фронт импульса тока, что связано с относительно медленной объемной рекомбинацией в редкой плазме за пределами катодного факела. Наблюдаемое характерное время затухания на заднем фронте импульса тока составляет порядка нескольких микросекунд. Самым эффективным механизмом объемной рекомбинации в слабоионизованных газах и парах металлов является диссоциативная рекомбинация [8]. В отсутствие поля (или при слабом поле, например, при переходе через ноль тока) концентрация заряженных частиц в плазме уменьшается с течением времени по закону

$$n_e = 1/(1 + \beta n_{e0} t), \quad (2)$$

где n_{e0} и n_e – концентрация электронов в плазме начальная и в момент времени t , $\beta \approx 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ – коэффициент диссоциативной рекомбинации [8]. 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^{18} м^{-3} , то получим в качестве оценки характерного времени распада плазмы в разряде второго типа величину 10^{-5} с ,

которая вполне согласуется с результатами наблюдений.

Начальную для процесса рекомбинации концентрацию заряженных частиц в плазменном факеле в случае разряда первого типа оценим, используя формулу Юттнера (Jüttner) для вакуумной дуги

$$n_{eo} \approx \gamma I_{arc} / r^2, \quad (3)$$

где $\gamma \approx 10^{13} \text{ A}^{-1} \text{ m}^{-1}$ – константа, I_{arc} – ток дуги, r – расстояние до катодного пятна [12]. Приняв $I_{arc} \approx 10^1\text{--}10^2 \text{ A}$ (на спаде тока), $r \approx 10^{-3} \text{ м}$ (равным расстоянию между катодом и анодом), получим в качестве оценки характерного времени распада плазмы в разряде первого типа величину порядка $10^{-8}\text{--}10^{-7} \text{ с}$, которая, по крайней мере, не противоречит результатам наблюдений для разряда первого типа.

Заключение

В работе изучалась динамика процесса коммутации короткого вакуумного промежутка с помощью вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика. С указанной целью была осуществлена регистрация изображений плазмы разряда в собственном оптическом излучении при временах экспозиции в субнаносекундном диапазоне.

Средством получения изображений являлся двухканальный электрооптический модуль. Каждый канал содержал блок генерации стробирующего импульса по фотокатоду ЭОП, транспортирующий объектив, электронно-оптический преобразователь, к которому для считывания информации с его экрана через проекционный объектив стыковалась цифровая ПЗС-камера.

Наблюдаемые разряды можно разделить на два типа. Первый тип связан с развитием дугового разряда в промежутке катод-анод, т. е. токовый дрейф заряженных частиц в проводящей среде – плазме – происходит по

кратчайшей траектории между катодом и анодом. Параллельно каналу дугового разряда наблюдается канал диффузного разряда. Второй тип разряда характеризуется образованием катодного пятна (пятен) на катоде, выбросом в окружающее пространство плазменного факела, продолжением которого является дугообразная диффузная область разряда, замыкающаяся на основание анода, но при этом визуальных признаков развития разряда по наиболее короткой траектории в промежутке катод-анод не наблюдается.

На основе анализа полученных экспериментальных данных высказано предположение о существенной роли излучения катодного пятна и катодного факела ультрафиолетового диапазона в процессе формирования токового канала в разряде.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Птицын В. Э.* // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 55. № 6. С. 32.
2. *Зельцер И. А., Карabanов А. С., Моос Е. Н.* // Физика твердого тела. 2005. Т. 47. № 11. С. 1921.
3. *Anders S., Anders A., Brown I.* // Rev. Sci. Instrum. 1994. Vol. 64. No. 4. P. 1253.
4. *Иванов В. А., Сахаров А. С., Коньжеев М. Е.* // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 1. № 6. С. 697.
5. *Jüttner B.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. Vol. 34. P. R103.
6. *Месяц Г. Ф.* Эктон в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. – М.: Наука, 2000.
7. *Месяц Г. А.* Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004.
8. *Райзер Ю. П.* Физика газового разряда. – М.: Наука, 1992.
9. *Велихов Е. П., Ковалев А. С., Рахманов А. Т.* Физические явления в газоразрядной плазме. – М.: Наука, 1987.
10. *Капцов Н. А.* Электроника. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы. 1954.
11. *Жданов С. К., Курнаев В. А., Романовский М. К. и др.* Основы физических процессов в плазме и плазменных установках. – М.: МИФИ, 2007.
12. *Anders A.* / Physics of Arc Plasma Devices. Breakdown Physics Workshop at CERN, May 6–7, 2010.

Spatial structure and dynamics of a pulsed arc discharge in vacuum

*S. G. Davydov, A. N. Dolgov, M. A. Karpov, A. V. Korneev, D. V. Nikishin,
A. A. Pshenichniy, and R. Kh. Yakubov*

N. L. Dukhov All-Russian Research Institute of Automatics (VNIIA)
22 Sushevskaya st., Moscow, 127055, Russia
E-mail: korneev.andrey.555@mail.ru

Received March 20, 2019

The process of switching a short vacuum gap with an auxiliary discharge over the surface of a dielectric was studied by high-speed recording of images of a discharge plasma radiating in the optical range of the spectrum. On the basis of an analysis of the experimental data, it was suggested that the cathode spot and cathode flame radiation play an important role in the formation of current channel in the discharge.

Keywords: spark discharge, arc discharge, cathode spot.

REFERENCES

1. V. E. Ptitsin, JEPT Lett. **55** (6), 32 (1992).
2. I. A. Zel'tser, A. S. Karabanov, and E. N. Moos, Phys. Solid State **47**, 1921 (2005).
3. S. Anders, A. Anders, and I. Brown, Rev. Sci. Instrum. **64**, 1253 (1994).
4. V. A. Ivanov, A. S. Sakharov, and M. E. Konyzhev Usp. Prikl. Fiz. **1** (6), 697 (2014).
5. B. Jüttner, J. Phys. D: Appl. Phys. **34**, R103 (2001).
6. G. A. Mesyats, *Ectons in Vacuum Discharge* (Nauka, Moscow, 2000) [in Russian].
7. G. A. Mesyats, *Pulse Energetics and Electronics* (Nauka, Moscow, 2004) [in Russian].
8. Yu. P. Raizer, *Physics of Gas Discharge* (Nauka, Moscow, 1992) [in Russian].
9. E. P. Velichov, A. S. Kovalev, A. T. Rachimov, *Physical Phenomena in Gas-Discharge Plasma* (Nauka, Moscow, 1987) [in Russian].
10. N. A. Kaptsov, *Electronics* (GITTL, Moscow, 1954) [in Russian].
11. S. K. Zhdanov, V. A. Kurnaev, M. K. Romanovsky, et al., *Foundation of Physical Processes in Plasma* (MIFI, Moscow, 2007) [in Russian].
12. A. Anders, *Physics of Arc Plasma Devices. Breakdown Physics* (Workshop at CERN, **32**, 2010).