

**Высокоскоростная регистрация изображений вакуумно-дугового разряда
в оптическом диапазоне спектра**

*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 излучающей в оптическом диапазоне спектра плазмы разряда. 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. // Прикладная физика. 2019. № 2. С. 15.

Reference: S. G. Davydov, A. N. Dolgov, M. A. Karpov, A. V. Korneev, D. V. Nikishin, A. A. Pshenichniy, and R. Kh. Yakubov, Prikl. Fiz., No. 2, 15 (2019).

Введение

Несмотря на 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 настоящее время предложена и разрабатывается эктонная модель [6, 7], кото-

рая принимается многими известными членами научного сообщества, работающими в данном направлении [3–5].

Расширение и углубление понимания природы такого физического явления, как катодное пятно, вероятно, позволит с еще большим успехом применять искровые и дуговые разряды для решения разнообразных прикладных задач. Однако это подразумевает продолжение целенаправленных теоретических и экспериментальных исследований данного явления.

Целью данной работы являлось изучение процесса коммутации короткого вакуумного промежутка с помощью вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика путем высокоскоростной регистрации изображений излучающей в оптическом диапазоне спектра плазмы разряда.

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

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 1 кат.
Пшеничный Александр Александрович, инженер 1 кат.
Якубов Рустам Халимович, начальник научно-исследовательского отдела, к.т.н.
ВНИИА им. Н. Л. Духова.
Россия, 127055, Москва, ул. Суцёвская, 22.
Тел. 8 (499) 400-19-70, доб. 1302.
E-mail: vnii4@vnii4.ru

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2018 г.

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

устройства был использован вакуумный диод, фотография которого приведена на рис. 1.

Общая схема эксперимента представлена на рис. 2.

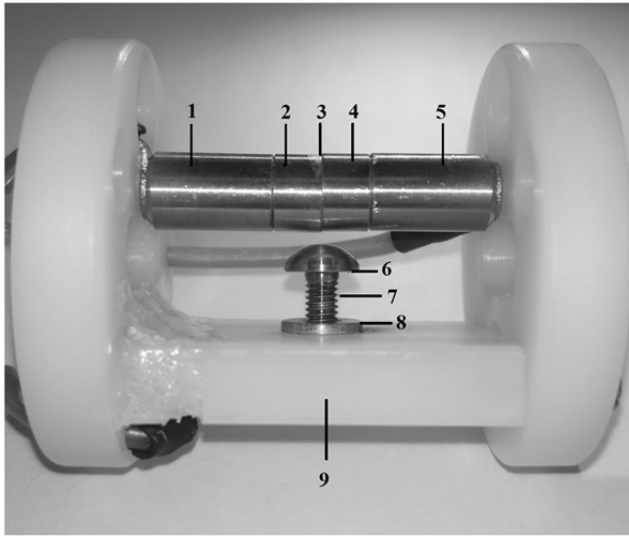


Рис. 1. Фотография вакуумного диода: 1 – токовод катода; 2 – сменяемое наконечие катода; 3 – диэлектрическая шайба; 4 – сменяемое наконечие поджигающего электрода; 5 – токовод поджигающего электрода; 6 – анод; 7 – токовод анода; 8 – основание анода; 9 – диэлектрический каркас вакуумного диода.

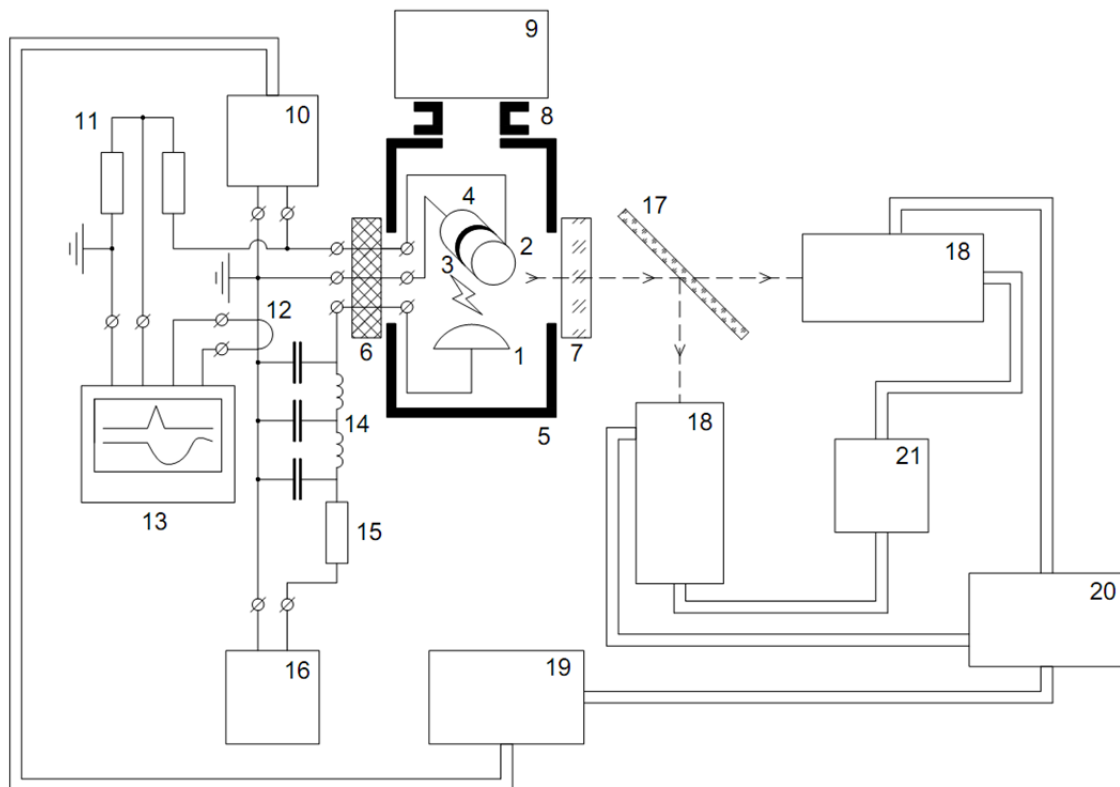


Рис. 2. Общая схема эксперимента: 1 – анод; 2 – поджигающий электрод; 3 – диэлектрическая шайба; 4 – катод; 5 – вакуумная камера; 6 – фланец с изолированными высоковольтными тоководами; 7 – оптическое окно; 8 – вакуумный тракт; 9 – средства откачки и контроля вакуума; 10 – генератор импульсов высокого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

Разрядное устройство размещается в вакуумной камере, откачиваемой до давления остаточного газа 10^{-2} Па и снабженной вакуумноплотными выводами-тоководами, а также оптически прозрачным окном. 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.

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 ЭПМ-102Г, использующих схему стробирования по катоду.

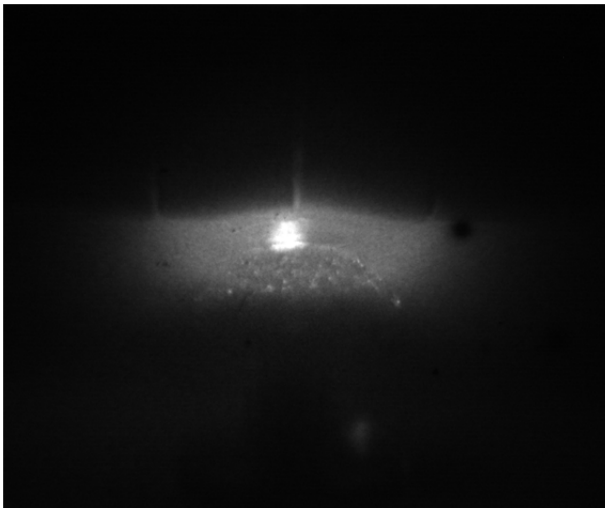
Результаты экспериментов и их обсуждение

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. 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. 3, а, 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 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 ультрафиолетового диапазона, вызывает ионизацию разреженной газовой среды на периферии разряда и, соответственно, протекание в ней тока наряду с протеканием тока в основном токовом канале. Это говорит в пользу параллельного существования двух пространственно разделенных зон разряда: 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. Об этом свидетельствуют

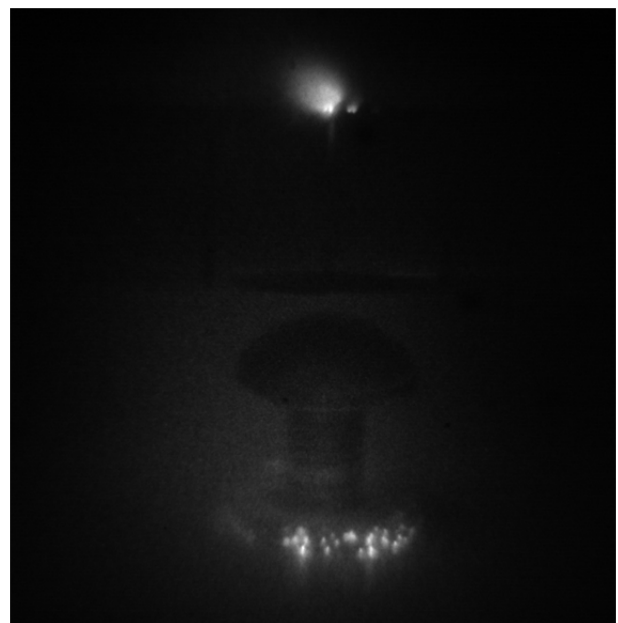
наличие на фотографии изображения облака пара материала анода и присутствие на верхней границе пара анодных пятен. Как известно, тлеющий разряд подвержен действию ионизационно-перегревной неустойчивости, которая приводит к контракции токового канала [8, 9]. Проявлением контракции во внешней области разряда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

Основной разряд второго типа реализуется в том случае, когда вспомогательный ис-

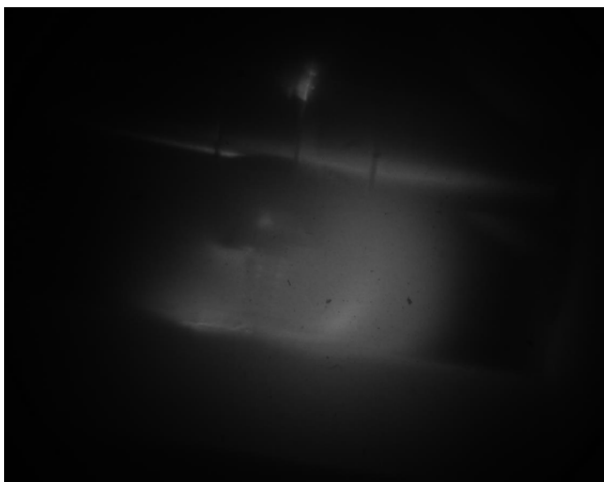
кровой разряд возникает на участке поджигающей системы, находящемся на расстоянии от поверхности анода, близком к максимальному. Поверхность анода, находящаяся на расстоянии 1 мм от поверхности катода, в указанной ситуации в развитии разряда между катодом и анодом видимого участия не принимает, линии тока пересекают поверхность основания анода. Длина траектории, по которой происходит токовый дрейф заряженных частиц в этом случае, возрастает более чем на порядок величины.



а



б



в

На рис. 3, 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

Рис. 3. Изображение разряда в оптическом диапазоне спектра, полученное с помощью системы высокоскоростного фотографирования. а – 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. б – Экспозиция: начало регистрации изображения – время от начала протекания тока в промежутке катод-анод $t = 300$ нс, продолжительность регистрации изображения – $\Delta t = 100$ нс. в – Экспозиция: начало регистрации изображения – время от начала протекания тока в промежутке катод-анод $t = 1,9$ мкс, продолжительность регистрации изображения – $\Delta t = 100$ нс.

мы визуально 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, а также 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.

Разряд второго типа по визуальным наблюдаемым признакам, несмотря на достигаемую в разряде силу тока и продолжительность, представляется нетипичным и на стадии, которую можно было бы, вероятно, назвать стадией дугового разряда (рис. 3, в). Наблюдается 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.

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 сним-

ках по его свечению на периферии электродной 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 именно этот более длинный путь для формирования канала тока [10].

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.

Наблюдаемые разряды можно разделить на два типа. Первый тип связан с развитием дугового разряда в промежутке «катод-ано», т. е. токовый дрейф заряженных частиц в про-

водящей 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. // ПЖЭТФ. 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., Кonyзhev 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. Эктоны 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., Рахимов А. Т. Физические явления в газоразрядной плазме. – М.: Наука, 1987.
10. Капцов Н. А. Электроника. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954.

PACS: 52.80.-s

High-speed recording of vacuum arc discharge images optical range

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

All-Russian Research Institute of Automatics
22 Sushchevskaya str., Moscow, 127055, Russia

Received November 19, 2018

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, and A. T. Rachimov, *Physical Phenomena in Gas-Discharge Plasma* (Nauka, Moscow, 1987) [in Russian].
10. N. A. Kaptsov, *Electronics* (GITTL, Moscow, 1954) [in Russian].