

### Литература

1. Сливков И.Н. // Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986.- 256 с.
2. Месяц Г.А. // Эктонны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. – М.: Наука, 2000, -424 с.
3. Ананьин О.Б., Афанасьев Ю.В., Крохин О.Н. // Лазерная плазма. Физика и применение: Монография. М.: МИФИ, 2003.-400 с.
4. Cremers D.A., Radziemski L.J. // Handbook of Laser Induced Breakdown Spectroscopy, Wiley, New York, 2006.

## Особенности формирования проводящей среды в вакууме плазменным факелом

*С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов, А.В. Корнеев, А.А.Пишеничный, Р.Х. Якубов*  
*Москва, ВНИИА им. Н.Л. ДУХОВА, ул. Суцёвская, д.22. E-mail: vniia4@vniia.ru*

*Представлены результаты изучения динамики процесса коммутации тока в коротком вакуумном промежутке, инициируемого вспомогательным разрядом по поверхности диэлектрика, путем высокоскоростной фоторегистрации плазмы разряда в оптическом диапазоне при субнаносекундных временах экспозиции. Выдвинуто предположение о существенной роли излучения катодного пятна и катодного факела при формировании токового канала в основном разряде.*

*Medium formation with plasma flame in vacuum. S. G. Davydov, A.N. Dolgov, A.V.Korneev, A.A.Pshenichnyi, R.Kh.Yakubov. The results of high-speed photography of the process of switching a short vacuum gap by an auxiliary discharge plasma over the surface of a dielectric are presented. It is supposed that the cathode spot and cathode flare radiation play an important role in the formation of the current channel in the main discharge.*

В настоящее время управляемые малогабаритные вакуумные коммутаторы применяются в каротажной аппаратуре, устройствах подсветки быстропотекающих процессов импульсами оптического и рентгеновского излучения, а также в ряде других областей, где определяющими требованиями являются отсутствие накальных цепей, миниатюрность, широкий диапазон коммутируемых токов [1]. Цель представляемой работы – изучить процесс коммутации тока в коротком межэлектродном промежутке высоковольтного вакуумного диода плазмой катодного факела.

Анод – куполообразный или плоский, диаметром 6 мм, имеет продолжением токовод, который ввинчивается в основание диаметром 7 мм, выполненное из латуни. Расстояние между катодом и анодом составляет 1 мм. Толщина диэлектрической шайбы: 0,1 – 1 мм. Материал электродов – нержавеющая сталь. Материал шайбы – слюда, керамика. Диэлектрический каркас разрядного устройства выполнен из капролона (рис.1). Разрядное устройство размещается в вакуумной камере, откачиваемой до давления остаточного газа  $10^{-2} - 10^{-3}$  Па и снабженной вакуумноплотными выводами-тоководами, позволяющими подключать электроразрядное устройство к внешним цепям, и оптически прозрачным окном для вывода за пределы камеры излучения плазмы разряда видимого диапазона.

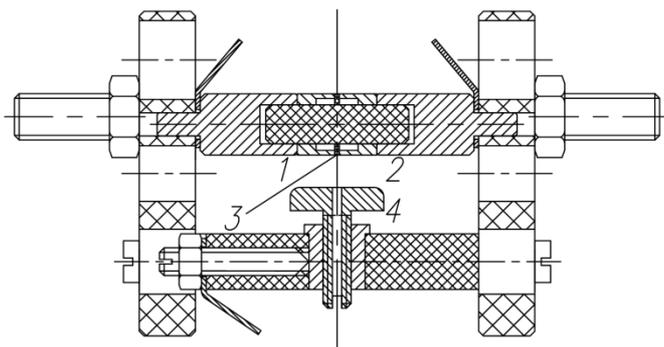


Рис.1. Конструкции макета высоковольтного вакуумного коммутатора: 1 - катод, 2 - поджигающий электрод, 3 - диэлектрическая шайба, 4 - анод.

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

Катод диода заземлен, анод до начала коммутации находится под положительным потенциалом величиной до 3 кВ. Процесс коммутации промежутка катод-анод 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 в системе поджига – до 10 А, продолжительность импульса тока поджига – 30 нс. Длительность основного разряда в режиме короткого замыкания – 30 мкс.

При коммутации тока в промежутке катод-анод на осциллограмме (рис.2) вначале наблюдается сигнал «правильной» полярности, т.е. соответствующий протеканию тока в направлении приложенного электрического поля, отвечающий приходу на анод пучка электронов. Затем через  $\sim 20-25$  нс после начала разряда появляется сигнал «неправильной» полярности, который может отвечать ионам материала катода с энергиями  $\sim 10^2$  эВ, если исходить из того, что выше приведенное время – это время пролета ионов в межэлектродном промежутке. Далее следует менее акцентированный всплеск тока в «правильном» направлении, максимум которого приходится на момент времени 200-250 нс после начала протекания тока, с последующим относительно медленным возрастанием силы тока в разряде. Мы считаем, что его появление обусловлено замыканием межэлектродного промежутка плазмой катодного факела и значительным увеличением проводимости токонесущей среды. Следует отметить, что в течение первых 60 нс после старта регистрируемого тока, т.е. на стадии первых двух сигналов, происходят сильные колебания напряжения на межэлектродном промежутке. Данное обстоятельство - свидетельство развития в межэлектродном пространстве сильной электронной неустойчивости в виде сильных колебаний напряжения, обусловленных изменениями омического сопротивления проводящей среды и связанных, вероятно, с раскачкой плазменных колебаний. Совокупность представленных экспериментальных данных хорошо вписывается в картину явлений, предсказанных в рамках модели Баренгольца, Месяца, Перельштейна [2].

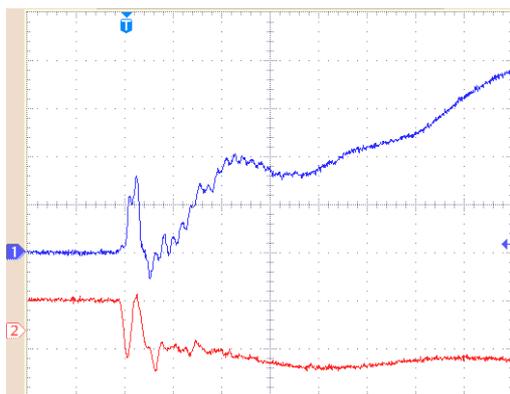


Рис.2. Осциллограмма. Развертка – 100 нс/дел. Луч №1 – ток в промежутке катод-анод, чувствительность – 20 А/дел. Луч №2 – напряжение на промежутке катод-анод (сигнал инвертирован), чувствительность – 2 кВ/дел.

С целью изучения динамики разряда в вакуумном промежутке была осуществлена в оптическом диапазоне фоторегистрация изображений плазмы разряда при временах экспозиции 5-100 нс. Средством получения изображений являлся ЭОП с использованием схемы стробирования по катоду.

Анализ полученных изображений позволяет разделить наблюдаемые разряды на два типа. Первый тип – оптимальный режим – 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 (рис.3,4). 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. Наиболее яркий источник излучения – это столб плазмы в промежутке катод-анод. Стоит 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 приподнят над поверхностью анода. В связи с этим мы предполагаем, что излучение катодного пятна дугового разряда в ультрафиолетовом диапазоне вызывает ионизацию разреженной газовой среды на периферии разряда и появление в ней тока, параллельного току в основном токовом канале, сильно излучающем в ультрафиолетовом диапазоне. Анодные пятна могут свидетельствовать о том, что на периферии разряд носит характер типа тлеющего.



Рис.3. Фотография вакуумного разряда 1-го типа, начальная стадия.

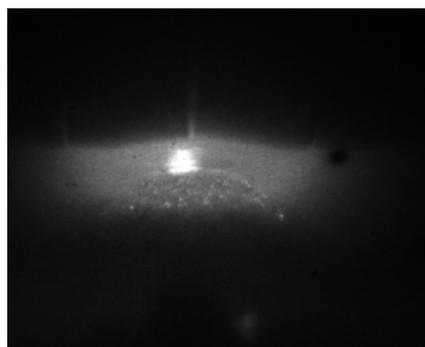


Рис.4. Фотография вакуумного разряда 1-го типа, дуговая стадия,  $I_{max} = 260$  А.

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. Поверхность анода, находящаяся на расстоянии 1 мм от поверхности катода, в указанной ситуации в развитии разряда между катодом и анодом видимого участия не принимает. Длина траектории, по которой происходит токовый дрейф заряженных частиц в этом случае, возрастает более чем на порядок величины (рис.5,6). 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.



Рис.5. Фотография вакуумного разряда 2-го типа, начальная стадия.

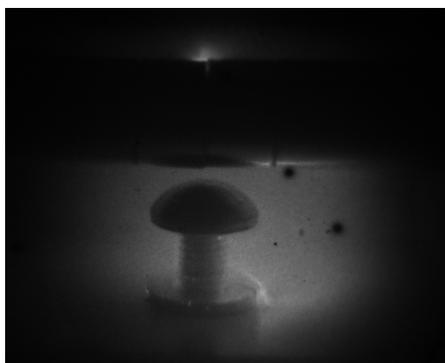


Рис.6. Фотография вакуумного разряда 2-го типа, дуговая стадия,  $I_{max} = 175$  А.

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. Однако периферийная область с низкой плотностью вещества по-прежнему формируется под воздействием ультрафиолетового излучения, испущенного из области с высокой плотностью вещества – катодного пятна и плазменного факела.

В разряде первого типа время задержки основного разряда не превышает 100 нс, не наблюдается искажений формы импульса тока. В разрядах второго типа устойчиво наблюдается укороченный примерно до 2 мкс на полувысоте импульс тока с временной задержкой, длительность которой варьируется в пределах от 2 до 10 мкс, и затянутым до 6-8 мкс задним фронтом.

В случае разряда первого типа при напряжении  $U=3$  кВ и расстоянием между катодом и анодом  $\delta=1$  мм, из закона «трех вторых» [3]:

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

получим плотность тока  $\sim 3 \cdot 10^5$  А/м<sup>2</sup>. Если принять площадь поперечного сечения канала тока порядка площади поверхности анода, то достигаемая сила тока составит  $\sim 30$  А. Для 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  $\leq 10$  нс, т.е. до момента затухания инициирующего искрового разряда по поверхности диэлектрика. Распространение в межэлектродном промежутке плазмы катодного факела не способно обеспечить столь быстрое нарастание силы тока на начальном этапе развития разряда. Действительно, при определяющей роли тепловой скорости, которая составляет порядка  $10^3$  м/с, время замыкания межэлектродного промежутка плазмой катодного 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, т.е. также не способен обеспечить на начальном этапе развития разряда быстрое нарастание силы тока. Полученные изображения разряда свидетельствуют о том, что излучение катодного пятна и катодного факела способно путем ионизации остаточного газа быстро создать проводящую среду в промежутке катод-анод и тем самым создать условия для вовлечения в разряд значительной поверхности анода. Катодное пятно возникает при инициирующем искровом пробое по поверхности диэлектрика. Физический механизм перехода центральной части разряда в дальнейшем в самоподдерживающийся дуговой – это, по-видимому, ионизационно-перегревная неустойчивость тлеющего разряда, ведущая к контракции или шнурованию разряда [5]. Аналогичный механизм отвечает за появление анодных пятен на периферии разряда.

В случае разряда второго типа при  $\delta=1$  см (расстояние между электродами, взятое вдоль линий тока), протекание тока в среде остаточного газа, не рождающей в достаточном количестве носителей тока, не способно обеспечить переход разряда в дуговую фазу. Вероятно, на начальной стадии разряда второго типа на периферии он носит характер тлеющего. При этом в прикатодной области разряд носит характер искрового. Заполнение охваченного разрядом пространства плазмой, поступающей из катодного факела, приводит к достаточно резкому увеличению проводимости канала тока и разряд приобретает характер дугового. 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, наличие окружающей среды в виде плазмы, пусть и разреженной, препятствует пространственному разделению зарядов на переднем фронте распространяющегося потока более плотной плазмы и реализации механизма амбиполярной диффузии.

Наблюдаемое характерное время затухания на заднем фронте импульса тока в разряде второго типа составляет от нескольких до десятка микросекунд. Численные оценки скорости распада плазмы остаточного газа, принимающие за основной наиболее эффективный механизм объемной рекомбинации в слабоионизованных газах и парах металлов, которым является диссоциативная рекомбинация [5], дают результаты, вполне согласующиеся с результатами наблюдений.

Действительно, в отсутствие поля (или при слабом поле, например, при переходе через ноль тока), концентрация заряженных частиц в плазме уменьшается с течением времени по закону:

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

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 [5]. Характерное время распада плазмы оценивается как:

$$\tau \approx 1 / \beta \cdot n_{e0}. \quad (3)$$

Если принять начальную концентрацию заряженных частиц за пределами катодного факела с учетом диффузии частиц из него в окружающее пространство равной порядка  $10^{18} \text{ м}^{-3}$ , то получим в качестве оценки характерного времени распада плазмы в разряде второго типа величину  $\sim 10^{-5} \text{ с}$ , в то время как для разряда первого типа данная величина составляет  $\sim 10^{-7} \text{ с}$ .

Таким образом, изучение динамики процесса коммутации тока в коротком вакуумном промежутке, инициируемого вспомогательным разрядом по поверхности диэлектрика, путем фоторегистрации изображений плазмы разряда в собственном оптическом излучении при временах экспозиции в субнаносекундном диапазоне дало следующие результаты.

1) Зафиксировано развитие разрядов двух типов.

2) Первый 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.

3) Второй 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 второго 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.

4) На основании анализа полученных экспериментальных данных высказано предположение о существенной роли излучения катодного пятна и катодного факела в процессе формирования токового канала в разряде при давлении остаточного газа не менее  $10^{-2} \text{ Па}$ .

#### Литература

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004, -704 с.
2. Баренгольц С.А., Месяц Г.А., Перельштейн Е.А. Феноменологическая модель неустойчивой стадии вакуумной искры // ЖТФ. 2009. Т.79. № 10. С.45-52.
3. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках / С.К.Жданов, В.А.Курнаев, М.К. Романовский, И.В. Цветков; под ред. В.А. Курнаева. М: МИФИ, 2007, -368 с.
4. Месяц Г.Ф. // Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. – М.: Наука, 2000, - 424 с.
5. Райзер Ю.П. // Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.-536 с.