

**Особенности коммутации высоковольтного вакуумного диода
плазмой вспомогательной искры**

С. Г. Давыдов, А. Н. Долгов, А. В. Корнеев, А. А. Пшеничный, Р. Х. Якубов

На основе анализа наблюдаемых в эксперименте вольт-амперных характеристик вакуумного диода с инжекцией плазмы поверхностного разряда сделано предположение о том, что первоначально проводящую среду в промежутке «катод-анод» создает ионизация остаточного газа излучением катодного пятна, сформированного на стадии искрового разряда по поверхности диэлектрика. Обнаружены свидетельства справедливости модели аномального ускорения ионов в вакуумном разряде на искровой стадии.

Ключевые слова: вакуумный диод, искровой разряд, дуговой разряд.

Ссылка: Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Корнеев А. В., Пшеничный А. А., Якубов Р. Х. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 1. С. 3.

Reference: S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. V. Korneev, A. A. Pshenichniy, and R. Kh. Yakubov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (1), 3 (2019).

Введение

Интерес к искровому и дуговому разрядам в вакууме вызван, с одной стороны, их успешным применением в высоковольтной и силовой электронике, например, в приборах коммутации и размыкания цепей, в устройствах распыления материалов для тонкопленочных технологий, в ионных источниках [1]. С другой стороны, нельзя утверждать, что к настоящему времени получены исчерпывающие ответы на все вопросы, связанные с природой и свойствами вакуумной искры и дуги.

Цель настоящей работы – изучить некоторые аспекты процесса перехода межэлектродного промежутка «катод-анод» вакуумного диода в проводящее состояние при инжекции в него плазмы вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика. Основным инструментом исследования – снятие зависимостей тока и напряжения как основного разряда в промежутке «катод-анод» вакуумного

диода, так и вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика.

Методика эксперимента

Используемое в проведенных исследованиях электроразрядное устройство представляет собой трехэлектродную коаксиальную отпаянную систему. Основные элементы электроразрядной системы – анод, катод, поджигающий электрод, диэлектрическая шайба, разделяющая катод и поджигающий электрод и плотно зажатая между ними. Разрядное устройство размещается в герметичной диэлектрической вакуумной камере, откачанной до давления 10^{-2} – 10^0 Па, и снабженной вакуумноплотными выводами-токовводами, позволяющими подключать электроразрядное устройство к внешним цепям.

Геометрия разрядного устройства имела два варианта конфигурации (см. рис. 1). В варианте «А» диаметр катода составляет 5 мм, зазор в промежутке «катод-анод» – 1 мм, толщина диэлектрической шайбы – 0,1 и 1 мм. В варианте «Б» внутренний диаметр катода – 5 мм, зазор в промежутке «катод-анод» – 1 мм, толщина диэлектрической шайбы – 0,1 мм. Материал электродов – алюминий, материал диэлектрической шайбы – слюда.

В описываемых экспериментах между диэлектрической шайбой и прилегающими электродами дополнительно и соосно с ними размещались металлические прокладки, каждая толщиной 0,1 мм.

Давыдов Сергей Геннадьевич, с.н.с.
Долгов Александр Николаевич, в.н.с., д.ф.-м.н.
Корнеев Андрей Владимирович, н.с.
Пшеничный Александр Александрович, инженер 1 кат.
Якубов Рустам Халимович, нач. отдела, к.т.н.
Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова (ВНИИА им. Н. Л. Духова).
Россия, 127055, Москва, ул. Сушэвская, 22.
Тел. 8(499) 400-19-70 доб. 1302.
E-mail: korneev.andrey.555@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2018 г.

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

Между диэлектрической шайбой и катодом – одна прокладка коваровая и вторая титановая, между диэлектрической шайбой и поджигающим электродом – единственная коваровая прокладка. Как показали эксперименты, наличие указанных прокладок повышает стабильность срабатывания разрядного устройства [2].

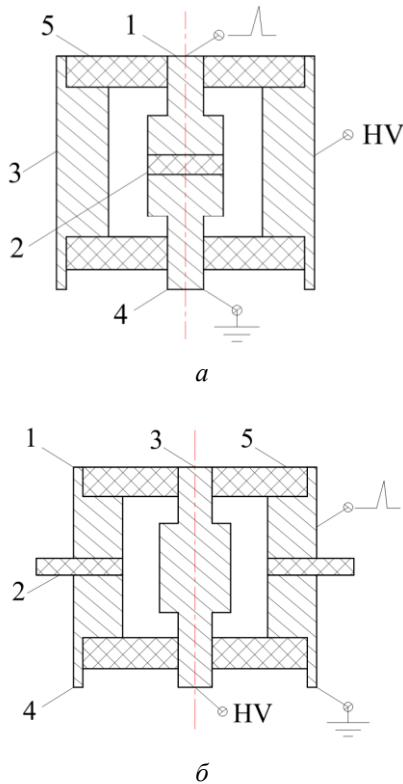


Рис. 1. Схема вакуумного разрядного устройства в двух конфигурациях: а – «А» и б – «Б». Основные элементы в каждой конфигурации: 1 – поджигающий электрод; 2 – диэлектрическая шайба; 3 – анод; 4 – катод; 5 – диэлектрическая вакуумная камера.

Вакуумный диод выступает в роли коммутатора с переменным сопротивлением для LCR-контура, период собственных колебаний которого составляет 6 мкс. 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» (рис. 2). Амплитуда тока в промежутке «катод-анод» – до 100 А.

Если скорость нарастания потенциала на поджигающем электроде оказывалась ниже некоторой оптимальной величины, то разряд в промежутке «катод-анод» с большой вероятностью развивался не сразу, а при повторных пробоях по

поверхности диэлектрика. Таким образом, время задержки между первым пробоем, т. е. стартом процесса коммутации, и началом протекания тока в промежутке «катод-анод» оказывалось довольно значительным, а именно, порядка нескольких микросекунд, и, кроме того, испытывало большой разброс.

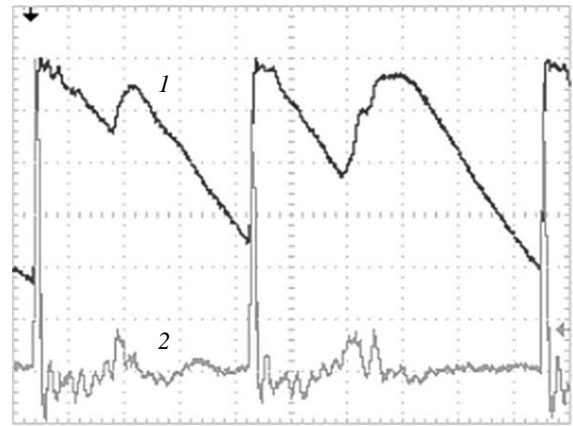


Рис. 2. Осциллограмма пробоя. Развертка – 250 нс/дел. Луч № 1 – напряжение поджига, чувствительность – 500 В/дел. Луч № 2 – ток поджига, чувствительность – 2 А/дел.

В том случае, когда скорость нарастания потенциала оказывалась близкой к оптимальной величине, разряд в промежутке «катод-анод» развивался после первого пробоя по поверхности диэлектрика, и форма импульса тока обладала хорошей повторяемостью. Фактически наблюдался один полупериод собственных колебаний коммутируемого LCR-контура (см. рис. 3). Время задержки между началом протекания тока в промежутке «катод-поджигающий электрод» и началом протекания тока в промежутке «катод-анод» составляло 10–15 нс.

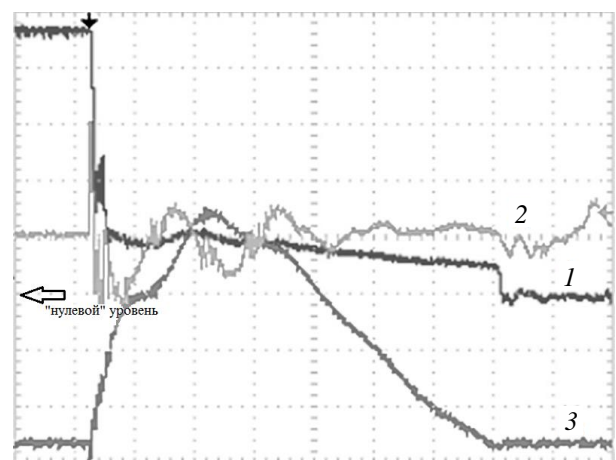


Рис. 3. Осциллограмма пробоя. Развертка 500 нс/дел. Луч № 1 – напряжение на промежутке катод-анод, чувствительность – 500 В/дел. Луч № 2 – ток поджига, чувствительность – 4 А/дел. Луч № 3 – ток разряда в промежутке «катод-анод», чувствительность – 20 А/дел.

Если скорость нарастания потенциала на поджигающем электроде оказывалась выше оптимальной, то форма импульса тока в коммутируемой цепи сильно искажалась дополнительными пробоями по поверхности диэлектрика.

Измерения напряжения в промежутке «катод-поджигающий электрод» и «катод-анод» осуществлялись с помощью низкоиндуктивных омических и емкостных делителей. Сила тока в том же промежутке определялась исходя из напряжения на низкоиндуктивном сопротивлении номиналом 10–20 Ом, включенном в цепь поджига. Сила тока в промежутке «катод-анод» определялась по сигналу с калиброванного пояса Роговского или по напряжению на низкоиндуктивном сопротивлении номиналом 1–3 Ом, включенном в коммутируемую цепь. Номинал используемых для измерений тока сопротивлений был существенно меньше омического и волнового сопротивлений контуров, в которые они были включены.

Результаты экспериментов

При срабатывании системы поджига наблюдается подскок положительного потенциала анода на 40–80 В (см. рис. 4).



Рис. 4. Осциллограмма пробоя. Развертка 10 нс/дел. Луч № 1 – напряжение на промежутке катод-анод, чувствительность – 200 В/дел. Луч № 2 – ток поджига, чувствительность – 2 А/дел.

Спад напряжения между катодом и анодом в процессе коммутации диода, как правило, сопровождается сильными колебаниями напряжения, что видно на рис. 5.

При переходе разряда в промежутке «катод-анод», по-видимому, в дуговую стадию наблюдается относительно высокий уровень напряжения в промежутке «катод-анод» по сравнению со стационарной дугой (см. рис. 3). Например, при начальном потенциале анода 1 кВ напряжение на проме-

жутке «катод-анод» после завершения процесса коммутации составляет около 200 В. А при начальном потенциале анода 3 кВ напряжение в промежутке «катод-анод» на дуговой стадии составляет 500 В.

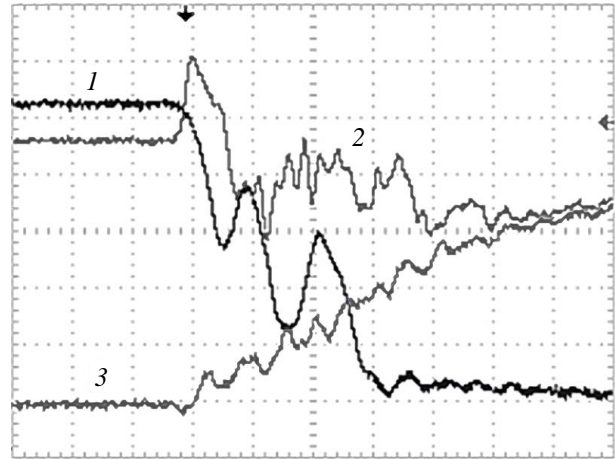


Рис. 5. Осциллограмма пробоя. Развертка 50 нс/дел. Луч № 1 – напряжение на промежутке катод-анод, чувствительность – 500 В/дел. Луч № 2 – ток поджига, чувствительность – 4 А/дел. Луч № 3 – ток разряда в промежутке «катод-анод», чувствительность – 20 А/дел.

В экспериментах не обнаружено влияние коаксиального магнитного поля с индукцией до 0,15 Тл на процесс коммутации промежутка «катод-анод». Магнитное поле не оказывало заметного влияния на скорость спада напряжения в промежутке «катод-анод», т. е. на скорость роста проводимости межэлектродной среды.

На переднем фронте импульса тока, возникающего в промежутке «катод-анод» в результате перехода межэлектродной среды в проводящее состояние, в течение первых 20–60 нс регистрируются одиночные и парные всплески тока, соответствующие протеканию тока как в «правильном» (положительная полярность всплеска), т. е. соответствующему приложенному к промежутку «катод-анод» электрическому полю, так и в «неправильном» (отрицательная полярность) направлении (см. рис. 6). Всплеск на переднем фронте импульса тока, соответствующий протеканию тока в «правильном» направлении, если он регистрируется в самом начале импульса тока, отстает от начала протекания тока поджига примерно на 10 нс. Если же в начале импульса тока на осциллограмме регистрируется всплеск «неправильной» полярности, то он возникает практически одновременно с началом протекания тока поджига. Амплитуда всплеска «правильной» полярности может кратно превысить амплитуду основного импульса тока, что демонстрирует рис. 7.

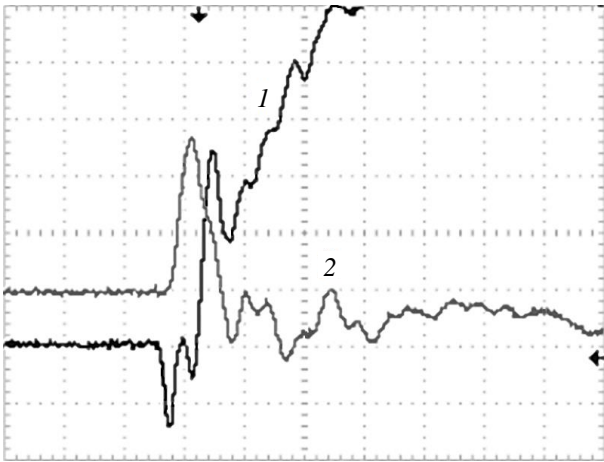


Рис. 6. Осциллограмма пробоя. Развертка 25 нс/дел. Луч № 1 – ток в промежутке «катод-анод», чувствительность – 10 А/дел. Луч № 2 – ток поджига, чувствительность – 2 А/дел.

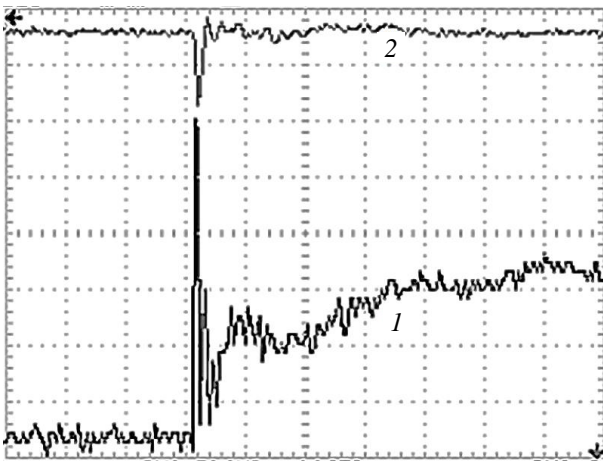


Рис. 7. Осциллограмма пробоя. Развертка 250 нс/дел. Луч № 1 – ток в промежутке «катод-анод», чувствительность – 10 А/дел. Луч № 2 – ток поджига, чувствительность – 5 А/дел.

Обсуждение результатов

Попытаемся дать объяснение наблюдаемым явлениям.

Всплеск «неправильной» полярности на осциллограмме тока в промежутке «катод-анод», наблюдаемый синхронно с импульсом тока поджига, имеет, пожалуй, наименее ясную природу. Если это не электромагнитная наводка, то его вероятный механизм – фотоэффект. Регистрируемый ток поджига, судя по силе тока, – явно результат развития искрового разряда. В центрах взрывной электронной эмиссии, образующих катодное пятно в процессе поджигающего разряда по поверхности диэлектрика, достигается плотность потока энергии на поверхности катода порядка 10^9 Дж/см² [3], и они, точнее, испускаемые ими плазменные факелы, должны являться яркими источниками ультрафиолетового излучения [4, 5].

Ультрафиолетовое излучение, в свою очередь, способно эффективно и практически без временной задержки выбивать фотоэлектроны с поверхности, в нашем случае, анода. В пространстве между анодом и поджигающим электродом в момент пробоя по поверхности диэлектрика имеется область, в которой электрическое поле не только не препятствует, а напротив, способствует эмиссии фотоэлектронов с поверхности анода. Выход и удаление фотоэлектронов от анода вызывает наблюдаемый подскок положительного потенциала анода, который регистрируется как импульс «неправильной» полярности на осциллограмме тока. С падением потенциала поджигающего электрода в процессе развития разряда по поверхности диэлектрика ситуация кардинально меняется: фотоэлектроны не могут в дальнейшем удаляться от анода.

Ультрафиолетовое излучение, источником которого является плазма, образующаяся в центрах взрывной электронной эмиссии на стадии поджигающего разряда, должна ионизовать остаточный газ в объеме диода. Энергию этого излучения, исходя из оценки энергии, выделяющейся в разряде по поверхности диэлектрика, с использованием осциллограмм напряжения и тока поджига можно принять равной $\sim 10^{-4}$ Дж. При энергии квантов ~ 10 эВ получаем количество испускаемых в поджиге квантов на уровне $N \sim 10^{14}$. Сечение фотоионизации молекул азота и кислорода, составляющих подавляющую часть остаточного газа, $\sigma_f \approx 10^{-17}$ см² [6, 7]. Сильное ионизирующее воздействие с вероятностью, близкой к единице, следует ожидать при плотности потока фотонов [8]

$$N_f \sim 1/\sigma_f \sim 10^{17} \text{ см}^{-2}. \quad (1)$$

Имеющуюся плотность потока фотонов оценим как

$$N/(2\pi\Delta R^2) \sim 10^{15} \text{ см}^{-2}, \quad (2)$$

где $\Delta R = 1$ мм – расстояние между катодом и анодом. Таким образом, можно ожидать примерно однопроцентную степень ионизации остаточного газа в промежутке «катод-анод» под действием излучения катодного пятна на стадии развития поджигающего разряда. В пользу именно этого механизма формирования проводящей среды в промежутке «катод-анод» на начальной стадии развития основного разряда в вакуумном диоде свидетельствует задержка длительностью ~ 10 нс процесса формирования разряда в промежутке «катод-анод» относительно тока поджига [9].

Токовая скорость электронов при концентрации носителей заряда $n \sim 10^{18}$ м⁻³, т. е. при давле-

нии остаточного газа на уровне 1 Па, может составить уже при токе 1 А величину порядка

$$v_{ed} \approx I / (2\pi R \Delta R n) \approx 3 \times 10^5 \text{ м/с}, \quad (3)$$

где $R = 2,5 \text{ мм}$ – радиус катода. Полученная оценка явно будет превышать среднюю тепловую скорость ионов, а, следовательно, и ионно-звуковую скорость в плазме. То, что данная проводящая среда является плазмой, доказывает соответствующая оценка радиуса Дебая

$$r_D \approx (\epsilon_0 k T / e^2 n)^{1/2} \approx 10^{-4} \text{ м} = 0,1 \text{ мм} \ll \Delta R, \quad (4)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная (в системе СИ), k – постоянная Больцмана, T – электронная температура, e – заряд электрона. Тепловая скорость ионов при температуре 5 эВ, равной максимальной регистрируемой для электронов, составит $v_i \approx 4 \times 10^3 \text{ м/с} \ll v_{ed}$. Следствием данного обстоятельства станет раскочка колебаний электронной компоненты в плазме, аномальный рост сопротивления проводящей среды, формирование пучков убегающих электронов и амбиполярная диффузия плазмы в промежутке «катод-анод» [10–12]. Достаточна большая индуктивность разрядного контура приводит к тому, что даже в отсутствие значительных колебаний разрядного тока происходят весьма значительные колебания напряжения в промежутке «катод-анод», вызванные колебаниями сопротивления плазмы разряда. Указанные процессы прекращаются после замыкания межэлектродного промежутка плотной плазмой, инжектируемой из катодного пятна. Скорость распространения плазмы в результате амбиполярной диффузии составляет $\sim 10^4 \text{ м/с}$ [13]. Следовательно, время, необходимое для создания хорошо проводящей среды и перехода к дуговой стадии, составит $\sim 10^{-7} \text{ с}$. Можно предположить, что следствием конечной скорости затухания колебаний, возникших на стадии, предшествующей дуговой, является повышенное напряжение импульсной дуги, наблюдаемое в экспериментах и являющееся следствием аномального сопротивления плазмы. Свидетельство тому, например, постепенный спад напряжения на дуге, наблюдаемый на рис. 3.

Авторы работ [14, 15] методами математического моделирования показали, что ускорение ионов на искровой стадии вакуумного разряда может происходить при наличии в межэлектродном промежутке плазменного облака. Развитие в этой плазме сильной электронной неустойчивости при прохождении катодного электронного пучка приведет к росту ее потенциала до значений, превышающих приложенную разность потенциалов.

Следует ожидать, что появление аномально ускоренных ионов в межэлектродной плазме будет сопровождаться всплеском тока в диоде. Наши наблюдения, возможно, подтверждают указанные результаты математического моделирования. На рис. 8 мы можем увидеть на осциллограмме тока в промежутке «катод-анод» вначале сигнал «правильной» полярности, отвечающий приходу на анод пучка электронов, распространяющегося в плазме ионизованного ультрафиолетовым излучением остаточного газа. Даже при энергии всего 5 эВ им понадобится менее 1 нс, чтобы преодолеть расстояние между катодом и анодом. Затем через ~ 20 – 55 нс (длительность интервала зависит от момента, принимаемого за начало отсчета: начало разряда или максимум потока электронов) появляется «пичок» «неправильной» полярности, который вполне может отвечать ионам материала коваровой прокладки с энергиями 10^2 – 10^3 эВ , если исходить из того, что вышеприведенное время – это время пролета ионов в межэлектродном промежутке. Далее, действительно, как и предсказывают результаты модельных расчетов, наблюдается некоторый всплеск тока в разряде. Удаётся наблюдать подобные всплески, амплитуда которых кратно превышает амплитуду основного импульса тока в разряде.

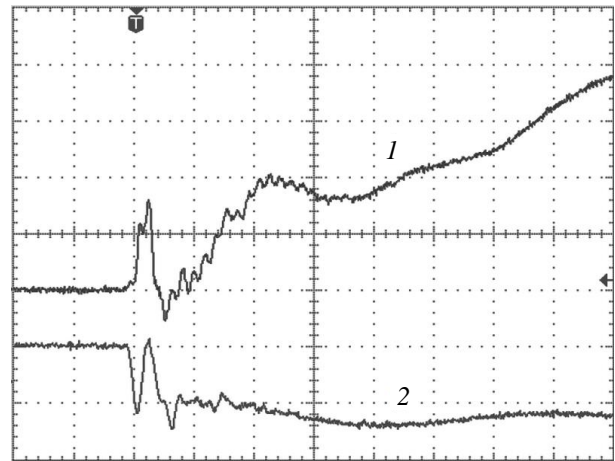


Рис. 8. Осциллограмма пробоя. Развертка 100 нс/дел. Луч № 1 – ток в промежутке «катод-анод», чувствительность – 20 А/дел. Луч № 2 – ток поджига, чувствительность – 2 кВ/дел.

Впрочем, нельзя отвергать и вероятность того, что проявляет себя механизм ускорения ионов, опережающий указанный авторами [15] механизм по времени. А именно, ответственными за появление ионов высоких энергий на искровой стадии вакуумного разряда могут оказаться электроны, опережающие передний фронт плазменного факела, распространяющегося из катодного пятна к аноду. Т. е. механизм ускорения ионов – разделе-

ние зарядов в процессе амбиполярной диффузии заряженных частиц в окружающее пространство. В этом случае всплеск тока в разряде может быть следствием, например, резкого падения сопротивления промежутка «катод-анод» в момент замыкания промежутка плазменным факелом.

Заключение

На основе анализа наблюдаемых в эксперименте вольт-амперных характеристик вакуумного диода с инъекцией плазмы поверхностного разряда сделано предположение о том, что первоначально проводящую среду в промежутке «катод-анод» создает ионизация остаточного газа излучением катодного пятна, сформированного на стадии искрового разряда по поверхности диэлектрика.

Спад напряжения между катодом и анодом в процессе коммутации диода, как правило, сопровождается сильными колебаниями напряжения.

На переднем фронте импульса тока, возникающего в промежутке «катод-анод» в результате перехода межэлектродной среды в проводящее состояние, в течении первых 20–60 нс регистрируются одиночные и парные всплески тока, соответствующие протеканию тока как в «правильном», т. е. соответствующему приложенному к промежутку «катод-анод» электрическому полю, так и в «неправильном» направлении.

При переходе разряда в промежутке «катод-анод» в дуговую стадию наблюдается высокий уровень напряжения в промежутке «катод-анод» по сравнению со стационарной дугой, т. е. с превышением, по крайней мере, на порядок.

На осциллограммах тока в промежутке «катод-анод» наблюдается приход на анод на начальной стадии разряда вначале, по-видимому, потока

электронов, затем потока высокоэнергетических ионов с аномально высокими энергиями до 10^2 – 10^3 эВ, затем наблюдается всплеск тока в разряде. Последнее обстоятельство может подтверждать справедливость модели аномального ускорения ионов в вакуумном разряде на искровой стадии, предложенной авторами работы [15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004.
2. Асюнин В. И., Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Козловская Т. И., Пишеничный А. А., Якубов Р. Х. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 6. С. 605.
3. Mesyats G. A., Bochkarev M. B., Petrov A. A., Barenholts S. A. // Applied Physics Letters. 2014. Vol. 104. № 18. P. 4101.
4. Воробьев В. С. // УФН. 1993. Т. 123. № 12. С. 51.
5. Ананьин О. Б., Афанасьев Ю. В., Крохин О. Н. Лазерная плазма. Физика и применение: Монография. – М.: МИФИ, 2003.
6. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. Акад. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976.
7. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. Физические величины: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
8. Арифов Т. У., Аскарьян Г. А., Тарасова Н. М. // Письма в ЖЭТФ. 1968. Т. 8. Вып. 2. С. 128.
9. Аскарьян Г. А., Королев М. Г., Корчагина Е. Г., Якушкин К. Л. // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60. Вып. 1. С. 11.
10. Михайловский А. Б. Теория плазменных неустойчивостей. Т. 1. Неустойчивости однородной плазмы. – М.: Атомиздат, 1975.
11. Михайловский А. Б. Теория плазменных неустойчивостей. Т. 2. Неустойчивости неоднородной плазмы. – М.: Атомиздат, 1977.
12. Имшенник В. С., Боброва Н. А. Динамика столкновительной плазмы. – М.: Энергоатомиздат, 1997.
13. Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. – М.: Наука, 2000.
14. Месяц Г. А., Баренгольц С. А. // УФН. 2002. Т. 172. № 10. С. 1113.
15. Шмелев Д. Л., Месяц Г. А., Баренгольц С. А. // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 33. № 10. С. 19.

PACS: 52.80.-s, 52.80.Vp

Features of high-voltage vacuum diode switching plasma auxiliary spark

S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. V. Korneev, 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 December 19, 2018

The analysis of experimental current-voltage characteristics for vacuum diode including plasma injection from surface spark discharge has been performed. In term of its results, it has been suggested that the initial conductive medium in a cathode-anode gap is produced by residual gas ionization

from cathode spot emission formed during spark discharge phase. The evidence of abnormal ion acceleration in vacuum spark discharge has been obtained.

Keywords: vacuum diode, spark discharge, arc discharge.

REFERENCES

1. G. A. Mesyats, *Pulse Energetics and Electronics* (Nauka, Moscow, 2004) [in Russian].
2. V. I. Asiunin, S. G. Davydov, A. N. Dolgov, T. I. Kozlovskaya, A. A. Pshenichniy, and R. Kh. Yakubov, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (6), 605 (2014).
3. G. A. Mesyats, M. B. Bochkarev, A. A. Petrov, and S. A. Barenholts, *Appl. Phys. Lett.* **104** (18), 4101 (2014).
4. V. S. Vorobiev, *Phys. Usp.* **123** (12), 51 (1993).
5. O. B. Ananyin, Yu. V. Afanasyev, and O. N. Krokhin, *Laser Plasma. Physics and Applications: Monography*, (MEPhI, Moscow, 1991) [in Russian].
6. I. K. Kikoin, *Tables of physical values. Handbook* (Atomizdat, Moscow, 1976) [in Russian].
7. A. P. Babichev, N. A. Babushkina, and A. M. Bratkovskiy, *Physical values: Handbook* (Energoatomizdat, Moscow, 1991).
8. T. U. Arifov, G. A. Askaryan, and N. M. Tarasova, *Tech. Phys. Lett.* **8** (2), 128 (1968).
9. G. A. Askaryan, M. G. Korolev, E. G. Korchagina, and K. L. Yakushkin, *Tech. Phys. Lett.* **60** (1), 11 (1994).
10. A. B. Mikhaylovskiy, *Plasma instability theory, Vol. 2 Instability of regular plasma*, (Atomizdat, Moscow, 1975) [in Russian].
11. A. B. Mikhaylovskiy, *Plasma instability theory, Vol. 2 Instability of irregular plasma*, (Atomizdat, Moscow, 1977) [in Russian].
12. V. S. Imshennik and N. A. Bobrova, *Collisional plasma dynamics* (Energoatomizdat, Moscow, 1997) [in Russian].
13. G. A. Mesyats, *Ectons in Vacuum Discharge* (Nauka, Moscow, 2000) [in Russian].
14. G. A. Mesyats and S. A. Barenholts, *Phys. Usp.* **172** (10), 1113 (2002).
15. D. L. Shmelev, G. A. Mesyats, and S. A. Barenholts, *Tech. Phys. Lett.* **33** (10), 19 (2007).