

## ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 533.952

**ЭКТОННАЯ МОДЕЛЬ И МЕХАНИЗМЫ ЭРОЗИИ  
В ИМПУЛЬСНОЙ ВАКУУМНОЙ ДУГЕ,  
ИНИЦИИРУЕМОЙ ИСКРОВОМ РАЗРЯДОМ  
ПО ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА**А. Н. Долгов<sup>1</sup>, Н. А. Клячин<sup>2</sup>, А. А. Родионов<sup>3</sup>,  
Я. К. Болотов<sup>3</sup>, А. В. Огинов<sup>3</sup>

*Изучалась картина эрозии элементов разрядного устройства в высоковольтном импульсном дуговом разряде, инициируемом в коротком вакуумном промежутке вспомогательным искровым разрядом по поверхности диэлектрика. Обнаружена зависимость действующих механизмов эрозии от временного профиля протекающего тока.*

**Ключевые слова:** вакуумный промежуток, высоковольтный дуговой разряд, эрозия.

В настоящее время сильноточные электровакуумные приборы широко применяются в различных устройствах, например, в каротажной аппаратуре, аппаратуре для высокоскоростной фотографии, устройствах подсветки быстропротекающих процессов импульсами оптического и рентгеновского излучения [1]. Задача, которую требуется постоянно решать при разработке сильноточных электровакуумных приборов – это увеличение ресурса и стабильности их функционирования. Одно из препятствий на пути её успешного решения – эрозия элементов электроразрядных устройств под действием, в частности, высоких температур, достигаемых в вакуумно-дуговом разряде [2]. Цель настоящей работы – выявить путем натурального моделирования основные механизмы эрозии в импульсной дуге в коротком вакуумном промежутке и рассмотреть возможную роль эктонных процессов.

<sup>1</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова”, 127055 Россия, Москва, Суцёвская ул., 22.

<sup>2</sup> НИЯУ “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

<sup>3</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: Anna.vl.osadchenko@gmail.com.

Высоковольтный вакуумный диод, выполняющий роль коммутатора (рис. 1), представляет собой трехэлектродную систему (анод, катод, вспомогательный электрод и разделительный изолятор – диэлектрическая шайба), элементы которой помещены в вакуумную камеру (вакуум не хуже  $10^{-3}$  Торр). Катод, вспомогательный электрод и разделяющий их изолятор составляют узел инициирования коммутирующего дугового разряда.

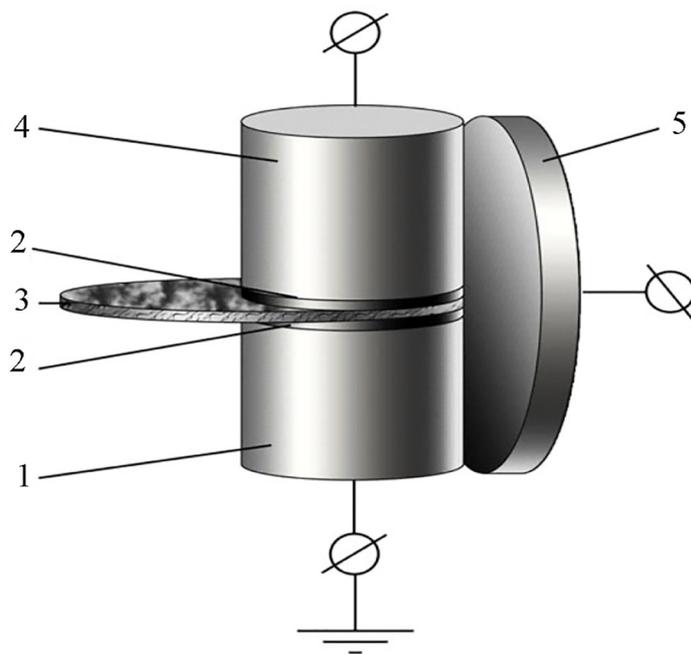


Рис. 1: Схема диода: 1 – катод; 2 – металлические шайбы; 3 – диэлектрическая шайба; 4 – вспомогательный электрод; 5 – анод.

На вспомогательный электрод подается импульс высокого напряжения положительной относительно катода полярности, происходит пробой по поверхности изолятора между катодом, который находится под нулевым потенциалом, и вспомогательным электродом. Далее развивается вспомогательный искровой разряд по боковой цилиндрической поверхности изолятора. Плазма вспомогательного искрового разряда инициирует разряд в коммутируемом промежутке катод-анод, который в свою очередь коммутирует внешнюю цепь, представляющую собой формирующую LC-линию (рис. 2).

Для того чтобы повысить “чувствительность” метода исследования, было принято решение по возможности локализовать инициирующий и дуговой разряд, миниатюризировать разрядное устройство, а также использовать в качестве материалов элементов

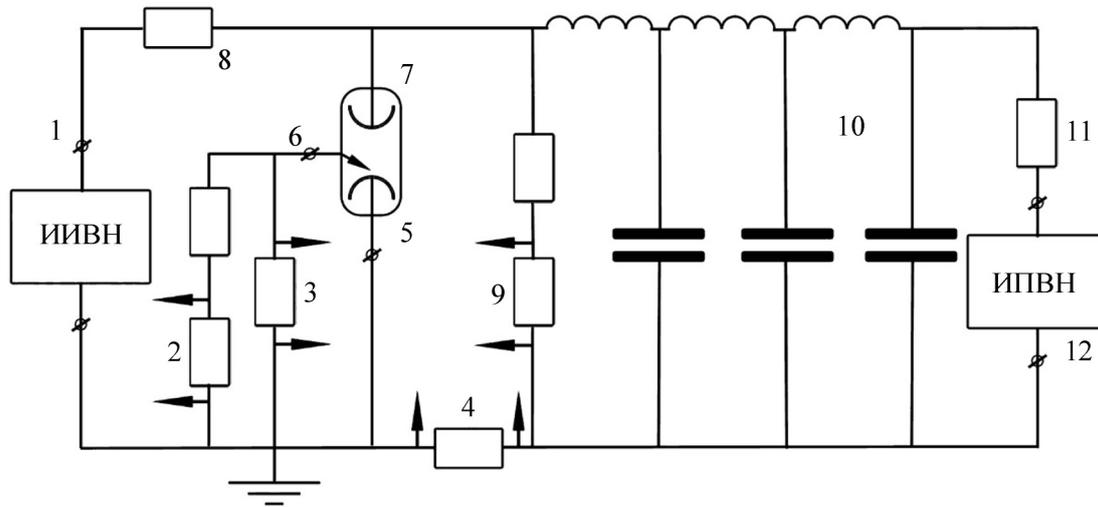


Рис. 2: Электрическая схема эксперимента: 1 – источник импульсов высокого напряжения; 2 и 3 – делители напряжения; 3 и 4 – низкоиндуктивные низкоомные сопротивления для измерения токов; 5 – катод диода; 6 – вспомогательный электрод диода; 7 – анод диода; 8 и 11 – балластные сопротивления; 10 – коммутируемая цепь; 12 – источник постоянного высокого напряжения.

разрядного устройства те, которые могут играть роль своего рода “детекторов” эрозионного воздействия.

Соосные цилиндрические электроды диаметром 5 мм и плоский анод были выполнены из алюминиевого сплава, обладающего относительно высокой эрозионной способностью, например, по сравнению с никелем. Диэлектрическая шайба диаметром 10 мм – из слюды, что позволило помимо прочего уменьшить ее толщину до 0.1 мм и снизить используемое напряжение до нескольких киловольт. Слюда, в отличие, например, от керамики, также обладает достаточно высокой эрозионной способностью. Между диэлектрической шайбой и прилегающими электродами помещались соосные электродам металлические шайбы из никеля толщиной 0.1 мм. Шайбы из никеля обеспечивают, как показывает наш опыт, хорошую повторяемость процесса формирования дугового разряда. Диэлектрическая шайба со смещенной относительно цилиндрических электродов осью плотно зажималась между ними таким образом, что искровой разряд по её боковой поверхности развивался со стороны анода по кратчайшей траектории. Использование указанной конфигурации разрядного промежутка инициирующей искры позволило осуществить локализацию образующихся катодных пятен (точнее, следов эрозионного

воздействия разряда). Данное обстоятельство облегчало наблюдение и анализ картины эрозии. Протяженность промежутка катод-анод составляла  $\sim 1$  мм. Начальное напряжение на аноде составляло до 3 кВ. Энергия  $< 10^{-4}$  Дж, вкладываемая в инициирующий разряд, была пренебрежимо мала по сравнению с энергией, вкладываемой в основной разряд в промежутке анод-катод, и он не оказывал заметного влияния на процесс эрозии разрядного устройства.

В проведенных экспериментах были реализованы два режима коммутирующего разряда – быстрый и медленный (рис. 3), которые характеризовались следующими параметрами: длительность импульса тока  $\tau$ , запасённая в коммутируемой цепи энергия  $E_0$ , амплитуда коммутируемого тока  $I_m$ , протекающий в импульсе тока заряд  $q$ .

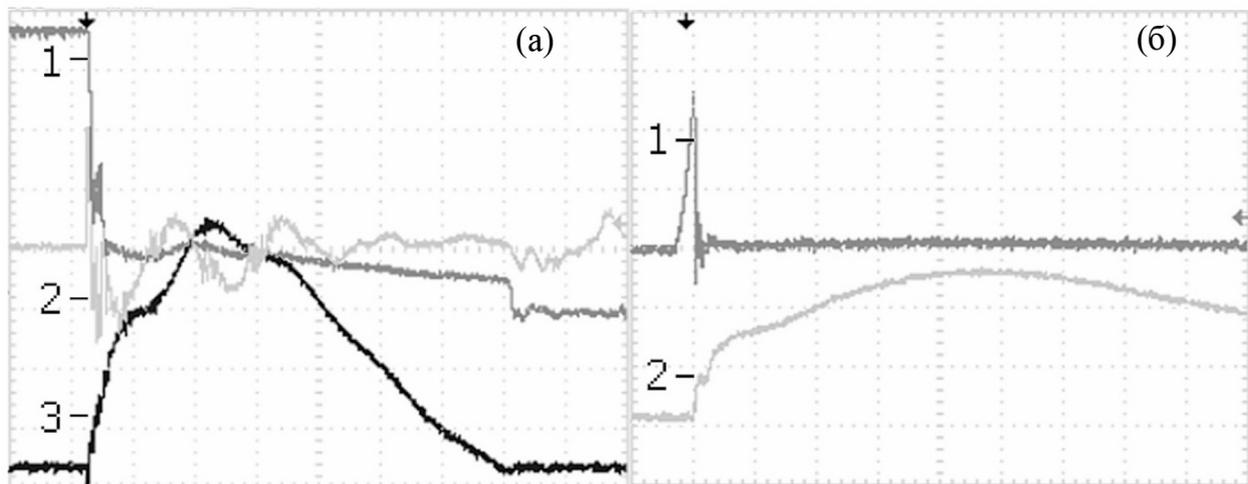


Рис. 3: Осциллограммы. (а) Быстрый режим разряда. Луч № 1 – напряжение на промежутке катод-анод, чувствительность – 500 В/дел. Луч № 2 – ток поджига, чувствительность – 4 А/дел. Луч № 3 – ток разряда в промежутке катод-анод, чувствительность – 1 кА/дел. Развертка 250 нс/дел. (б) Медленный режим разряда. Луч № 1 – напряжение, подаваемое на промежуток поджигающий электрод – катод, чувствительность – 1 кВ/дел. Луч № 2 – ток разряда, протекающий между катодом и анодом, чувствительность – 500 А/дел. Развертка – 1 мкс/дел.

Импульс коммутируемого тока имел временной профиль, близкий к полупериоду синусоиды. Параметры быстрого режима:  $I_m \approx 4.5 \cdot 10^3$  А;  $\tau \approx 10^{-6}$  с ( $\nu = 10^6$  Гц);  $q \approx 3 \cdot 10^{-3}$  Кл;  $E_0 \approx 0.8$  Дж. Параметры медленного режима,  $\langle I \rangle \approx 5 \cdot 10^2$  А;  $\tau \approx 10^{-5}$  с ( $\nu = 10^5$  Гц);  $q \approx 5 \cdot 10^{-3}$  Кл;  $E_0 \approx 1.5$  Дж. Режимы задаются составом коммутируемой цепи и имеют сравнимые по величине значения параметров  $q$  и  $E_0$ . Количество им-

пульсов тока (разрядов), пропускаемых через коммутатор в приведенных режимах для достижения большой степени эрозии – одного порядка величины. Предполагалось, что быстрый режим, позволяющий реализовать наибольший коммутируемый ток, окажется наиболее разрушительным для узла поджига. На рис. 4 представлены характерные изображения узла инициирования коммутирующего разряда, испытавшего некоторое количество импульсных дуговых разрядов в различных режимах. Снимки выполнены с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-7001F. Перед каждой серией разрядов происходила смена изолятора и металлических шайб.

Показано, что катодное пятно коммутирующего разряда первоначально появляется в тройной точке на границе диэлектрик–металл–вакуум на никелевой вставке (рис. 4(а)). Действительно, на указанном изображении в зоне 1 мы наблюдаем следы эрозионного воздействия катодного пятна – выбросы жидкого металла (никеля) от границы диэлектрической шайбы в направлении катода. Никаких признаков заметного выноса вещества с анода или изменения структуры его поверхности не наблюдалось.

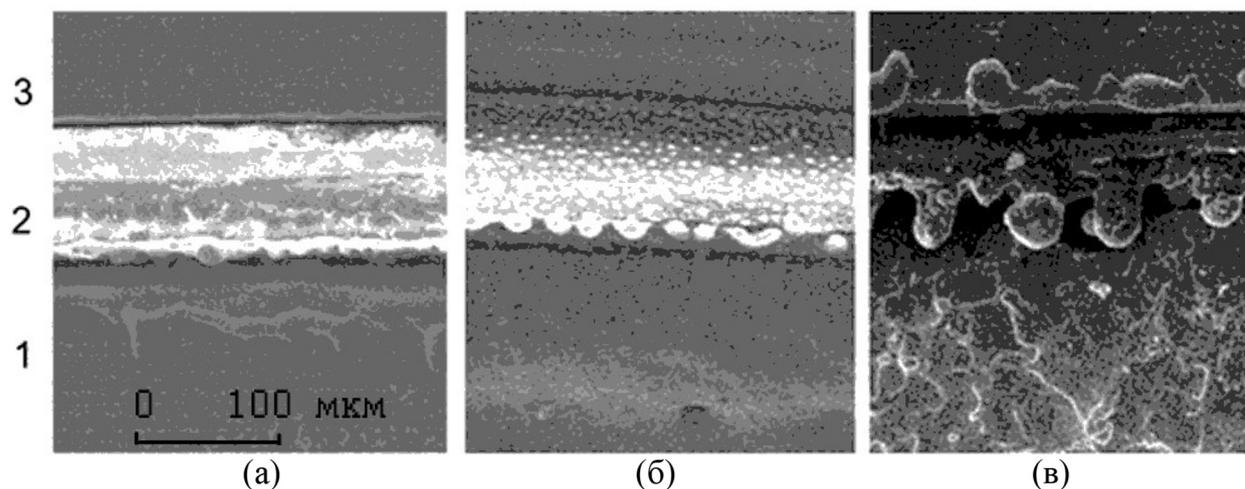


Рис. 4: (а) Узел инициирования коммутирующего разряда: 1 – никелевая шайба со стороны катода; 2 – диэлектрическая шайба; 3 – никелевая шайба со стороны вспомогательного электрода. Медленный режим. Начальная стадия эрозии разрядного устройства (произведено 5 разрядов). (б) Быстрый режим. Достигнута большая степень эрозии (произведено 300 разрядов). (в) Медленный режим. Достигнута большая степень эрозии (произведено 250 разрядов). Увеличение  $\times 100$ .

Предположение о преимущественной зависимости степени эрозии, т. е. степени разрушения узла инициирования от средней (или достигаемой) силы тока дуги не подтвер-

дилось. Более того, было обнаружено, что изменение длительности протекания коммутируемого тока меняет характер эрозии. При том, что быстрый режим не слишком сильно отличается по параметрам  $E_0$  и  $q$  от медленного режима, заметно, что в случае медленного режима эрозия гораздо более значительна, чем в случае быстрого режима. В быстром режиме наблюдаются следы выброса жидкометаллической фазы материала никелевых шайб в узле инициирования в направлении от изолятора, наблюдается пузырение боковой поверхности изолятора, происходит раздувание боковой поверхности изолятора в целом – она становится выпуклой (рис. 4(б)). В медленном режиме значительные разрушения претерпевает изолятор и граничащая с ним никелевая прокладка – образуется увеличивающаяся с ростом числа коммутаций каверна со стороны катода, наблюдается сильная эрозия материала катода, фиксируются кратеры – следы катодных пятен, происходит значительный вынос жидкой фазы материала катода в направлении к поверхности изолятора, наблюдается уменьшение объема и фрагментация изолятора (рис. 4(в)).

Основываясь на представлениях эктонной модели [4] удается объяснить различия в картине эрозии, наблюдаемой для быстрого и медленного режима горения разряда.

Главное отличие режимов – длительность импульса тока, следовательно, толщина скин-слоя  $\delta_c = (\rho/\mu_0\mu\nu)^{1/2}$ , где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника,  $\mu$  – его магнитная проницаемость,  $\nu$  – частота тока. Для никеля  $\mu \approx 300$  при  $\nu = 10^5 - 10^6$  Гц [3]. Оценки показывают, что при  $\nu = 10^5$  Гц  $\delta_c(\text{Ni}) \approx 50$  мкм,  $\delta_c(\text{Al}) \approx 500$  мкм; при  $\nu = 10^6$  Гц  $\delta_c(\text{Ni}) \approx 15$  мкм,  $\delta_c(\text{Al}) \approx 150$  мкм; а при  $\nu = (2 - 5) \cdot 10^7$  Гц ( $\tau = (2 - 5) \cdot 10^{-8}$  с – время существования центра взрывной эмиссии электронов (ЦВЭЭ) [4, 5])  $\delta_c(\text{Ni}) \approx 2 - 3$  мкм – что довольно близко к размеру ЦВЭЭ ( $\sim 1$  мкм),  $\delta_c(\text{Al}) \approx 36$  мкм. Таким образом быстрый режим с тонким скин-слоем в отличие от медленного режима способен обеспечить необходимую концентрацию тока в имеющихся на поверхности катода неоднородностях для образования ЦВЭЭ. В пользу данного вывода свидетельствует и тот факт, что с уменьшением толщины пленочного катода уменьшается пороговый ток дуги [6]. Среднее расстояние между неоднородностями составляет согласно имеющимся данным  $\sim 10$  мкм [5]. В медленном режиме перемещение катодного пятна, т. е. возникновение новых ЦВЭЭ связывают с расплескиванием жидкого металла на расстояние порядка размера ЦВЭЭ [5]. Можно предположить, что в быстром режиме действует иной механизм – образующаяся в ЦВЭЭ плазма, распространяющаяся со скоростью  $\sim 2 \cdot 10^4$  м/с, определяемой амбиполярной диффузией плазмы в вакуум [4], почти мгновенно достигает соседних неоднородностей, где происходит превращение тлеющего разряда, горя-

щего у поверхности катода, в искровой за счет контракции токового канала за время  $\sim(2 - 5) \cdot 10^{-8}$  с. В результате скорость распространения ЦВЭЭ по поверхности катода может достигать по нашим оценкам 200–400 м/с (ЦВЭЭ движется скачками, кратеры не образуются) в быстром режиме и  $\sim 50 - 100$  м/с (кратеры образуются) в медленном режиме.

Пузырение и изгибание поверхности слюды, наблюдаемое в быстром режиме, мы связываем с давлением молекулярного водорода, образующегося в результате диссоциативного отрыва атомов водорода от адсорбированных между кристаллическими слоями молекул воды (или попадающих туда при распаде кристалла и выделении кристаллической воды) благодаря эффекту низкоэнергетического фотокатализа и их последующей рекомбинации [7].

В медленном режиме включается дополнительный механизм эрозии – откольные явления, возникающие под действием теплового удара [8] в области катодного пятна. Откольные явления наблюдаются только на границе диэлектрика и никелевой шайбы, что можно объяснить следующим образом. Все возникшие в начале каждого разряда ЦВЭЭ могут поместиться внутри каверны, имеющейся изначально между диэлектриком и никелевой шайбой (начальная глубина порядка 5 мкм), на плоской поверхности никелевой шайбы. Результаты данного обстоятельства, по-видимому, и наблюдаются в экспериментах (рис. 4(а)). Кроме того, оно может усиливать термическое воздействие на поверхность никеля и слюды в каверне и затруднять выход ЦВЭЭ на цилиндрическую поверхность никелевой шайбы. Наконец благодаря задержке катодного пятна в каверне над ней успевает сформироваться облако пара из продуктов эрозии, которое экранирует слюду от излучения разряда в дальнейшем.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Г. А. Месяц, *Импульсная энергетика и электроника* (М., Наука, 2004).
- [2] В. И. Асюнин, С. А. Бушин, С. Г. Давыдов и др., *Успехи прикладной физики* **3(6)**, 542 (2015).
- [3] А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др., *Физические величины: Справочник*. Под ред. И. С. Григорьева, Е. С. Мелихова (М., Энергоатомиздат, 1991) .
- [4] Г. А. Месяц, *Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга* (М., Наука, 2000).

- [5] Г. А. Месяц, *Взрывная электронная эмиссия* (М., изд-во физико-математической литературы, 2011).
- [6] И. Г. Кесаев, *Катодные процессы электрической дуги* (М., Наука 1968).
- [7] Р. Б. Тагиров, Б. Г. Явишев, С. А. Машкевич, Е. А. Несмелов, *ЖТФ* **61**(9), 60 (1991).
- [8] А. М. Молитвин, *Прикладная механика и техника* **44**(1), 163 (2003).

Поступила в редакцию 19 апреля 2024 г.

После доработки 18 июня 2024 г.

Принята к публикации 19 июня 2024 г.