

В. Н. БАРИНОВ, И. Г. НЕКРАШЕВИЧ, А. В. СМИРНОВ

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОДАХ В ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЯДЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ НАРАСТАНИЯ ТОКА

Импульсный газовый разряд находит широкое применение в различных областях техники, где требуется получение высоких значений энергии, выделяемой в незначительном объеме вещества за короткие промежутки времени (электроннолучевой способ обработки материалов, лазерная техника, газоразрядная светотехника, импульсные плазменные ускорители и т. д.). При этом в зависимости от конкретных задач условия протекания разряда выбираются самыми разнообразными. Этим, видимо, объясняется все возрастающий интерес специалистов к импульсному разряду как объекту исследования и неуклонный рост числа научных работ, посвященных изучению физических процессов, протекающих в условиях существования импульсной газоразрядной плазмы.

В данной работе описаны результаты исследований влияния скорости нарастания тока в импульсе дугового разряда на характер разрушения материала электродов в воздухе при атмосферном давлении и различных межэлектродных промежутках. Ранее подобного рода исследования проведены авторами [1] в условиях вакуума на ограниченном числе материалов.

Для получения необходимой информации нами собрана экспериментальная установка (рис. 1). Источником питания разряда служит $R-L-C$ контур с изменяющимися параметрами, позволяющий получать аперриодические импульсы тока с амплитудой до 15,5 кА, длительностью до 600 мс и скоростью нарастания (спада) тока в импульсе от 10^3 А/с до $2 \cdot 10^7$ А/с.

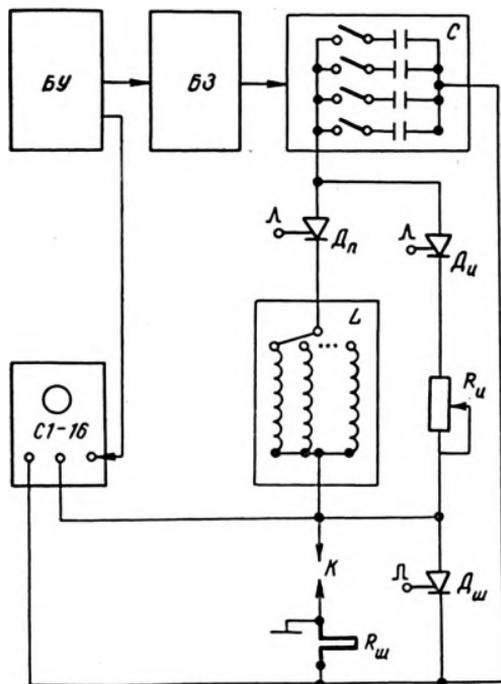


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

Зарядка конденсаторной батареи осуществляется с постоянной скоростью при помощи блока зарядки (БЗ), который также поддерживает на заданном уровне напряжение с точностью 0,1%. Разряд инициируется путем зажигания слаботочной контактной дуги после подачи включающего импульса на тиристор D_{II} в момент, предшествующий началу разведения электродов*. Ток слаботочной дуги величиной 8—10 А поддерживается постоянным на всех режимах гасящим сопротивлением R_{II} . При достижении заданной величины межэлектродного промежутка происходит включение проходного тиристора D_{II} , шунтирую-

* Этот метод инициирования разряда имеет ряд преимуществ по сравнению с широко применяемым искровым способом в том отношении, что, во-первых, отпадает необходимость в использовании дополнительного источника высокого напряжения; во-вторых, разряд, как правило, инициируется в центральной части рабочей поверхности электрода; в-третьих, в плазму разряда не вносится материал поджигающего электрода.

шего цепь слаботочной дуги, что обеспечивает разряд батареи конденсаторов непосредственно через межэлектродный промежуток K и малое безындуктивное сопротивление $R_{ш}$.

Синхронная работа механических и электрических узлов установки, а также задание количества и частоты следования импульсов тока осуществляется автоматически с помощью блока управления (БУ).

Для получения информации о физических процессах, протекающих в межэлектродном промежутке на различных участках разрядного импульса тока, нами применен метод принудительного гашения дуги, заключающийся в шунтировании межэлектродного промежутка через заданные интервалы времени от начала протекания разряда с помощью управляемого тиристорного ключа $D_{ш}$.

В наших исследованиях был использован начальный участок импульса тока, характеризующийся постоянной (в пределах 10%) скоростью его нарастания. При этом количество электричества q , протекающего через разрядный промежуток, безотносительно к амплитуде и длительности импульса тока, оставалось постоянным и равным 5 Кл. Объектом исследования служили электроды диаметром 30 мм, изготовленные из металлов, отличающихся друг от друга своими теплофизическими и ионизационными характеристиками (молибден, медь, алюминий и цинк). В процессе эксперимента весовым методом с точностью 0,1 мг оценивалась величина эрозии Δm катода и анода в расчете на один импульс

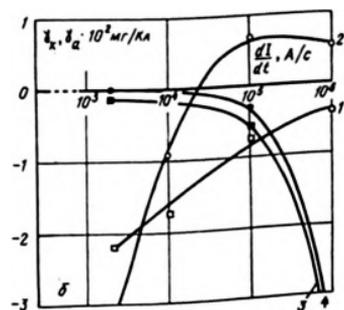
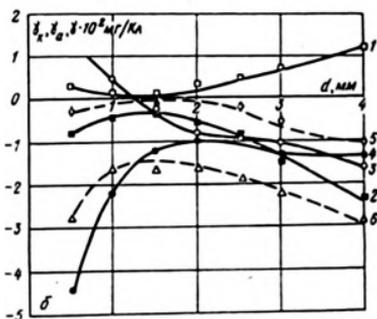
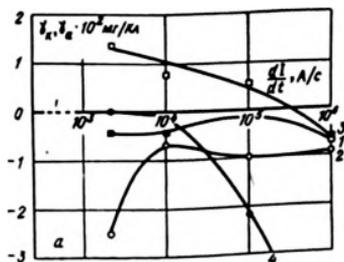
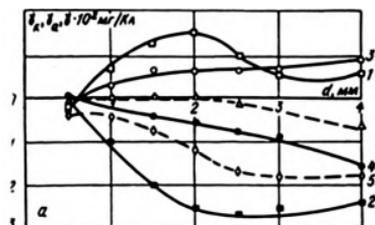


Рис. 2. Зависимость коэффициента электропереноса молибденовых электродов отрицательной γ_k (1, 3) и положительной γ_a (2, 4) полярности, а также $\gamma = \gamma_k + \gamma_a$ (5, 6) от величины d межэлектродного промежутка при различных скоростях нарастания

Рис. 3. Зависимость коэффициента электропереноса электродов отрицательной γ_k (1, 3) и положительной γ_a (2, 4) полярности от скорости нарастания тока $\frac{di}{dt}$ в импульсе при $d = 2$ мм:

тока $\frac{di}{dt}$ в импульсе;

$$a - \frac{di}{dt} = 3 \cdot 10^3 \text{ A/c (1, 2, 5); } \frac{di}{dt} = 1.2 \cdot 10^4 \text{ A/c (3, 4, 6); } b - \frac{di}{dt} = 1.2 \times 10^3 \text{ A/c (1, 2, 5); } \frac{di}{dt} = 1.2 \cdot 10^4 \text{ A/c (3, 4, 6)}$$

а — для молибденовых (1, 2) и медных (3, 4) электродов; б — для цинковых (1, 2) и алюминиевых (3, 4) электродов

тока, а затем для каждого конкретного случая из соотношения $\gamma = \Delta m/q$ определялись значения коэффициентов электропереноса материала электродов.

Одновременно с этим при помощи осциллографов С1-16 и С1-54 фиксировались напряжение на электродах и ток в разрядной цепи. Для получения информации о характере взаимодействия плазменных потоков в зоне разряда скоростным фоторегистратором СКС-1 со скоростью 1000 кадр/с производилось фотографирование канала импульсной дуги.

Как показали предварительные эксперименты, разрушение электродов за время протекания слаботоочного иницирующего разряда составляет 0,1—2% от общей величины их эрозии при прохождении полного сильноточного импульса тока.

На рис. 2 представлены зависимости коэффициентов электропереноса γ молибденовых электродов от величины межэлектродного промежутка d при различных скоростях нарастания тока dI/dt в импульсе; на рис. 3 — зависимости γ электродов, изготовленных из меди, молибдена, алюминия и цинка, от величины dI/dt при фиксированных расстояниях d между электродами.

Для интерпретации полученных данных воспользуемся общепринятыми представлениями о гидродинамическом характере взаимодействия плазменных потоков, истекающих при протекании разряда с поверхности обоих электродов. Эти представления в основном сводятся к следующему.

1. Возникновение высокоскоростных плазменных потоков с поверхности электродов является результатом термического воздействия на них электродных пятен дугового разряда [2, 3].

2. Процесс истечения плазменных потоков с поверхности электродов подчиняется законам гидродинамики [3—5].

3. Скорость (энергия) плазменной струи при горении разряда в плотных средах уменьшается с увеличением расстояния от поверхности электрода до рассматриваемого сечения, а также при удалении от оси разряда [6].

4. При небольших межэлектродных промежутках плазменная струя может дополнительно оказывать разрушающее действие на противозлектрод за счет кинетической энергии нейтральных частиц и ионов, движущихся со скоростями $V \sim 10^5—10^6$ см/с [7—9].

5. Количество и направление перенесенного в процессе горения дуги материала с одного электрода на другой, а также доля вещества, удаленного при этом за пределы межэлектродного промежутка (суммарная эрозия катода и анода), во многом определяются интенсивностью взаимодействующих друг с другом встречных плазменных потоков.

Анализ экспериментальных данных, представленных на рис. 2, показал, что длительность τ и амплитуда I_{\max} разрядного импульса, определяющие в конечном счете величину скорости нарастания тока dI/dt в импульсе, существенно влияют на ход эрозионных кривых молибденовых электродов. В частности, при больших длительностях τ импульса ($dI/dt = 3 \cdot 10^3$ А/с), когда время взаимодействия плазменных потоков, истекающих с катода и анода, относительно велико, наблюдается интенсивный выброс материала электродов за пределы межэлектродного промежутка. С увеличением скорости нарастания тока (уменьшением τ) доля продуктов эрозии, удаленных из области разряда (см. рис. 2, кривые 5 и 6) уменьшается, что особенно характерно для малых межэлектродных расстояний ($d < 2—3$ мм). Однако при переходе к импульсам тока с максимальной амплитудой ($I_{\max} = 3,4$ кА и $dI/dt = 1,2 \cdot 10^6$ А/с) при незначительных расстояниях d наблюдается заметное увеличение суммарной эрозии обоих электродов. Удаление продуктов эрозии из зоны разряда происходит в этом случае, по-видимому, не столько за счет взаимодействия «свободно» истекающих плазменных струй, сколько в результате резкого повышения давления паров и концентрации эродированных частиц в области интенсивного испарения [3, 10]. С увеличением расстоя-

ния d между электродами до 2 мм и более эффективность действия указанного фактора ослабевает.

В этом случае удаление продуктов эрозии за пределы разрядного промежутка, безотносительно к амплитуде и длительности импульса тока, происходит в результате увеличения числа частиц плазмы, имеющих значительную скорость разлета в радиальном направлении после их взаимодействия друг с другом и с поверхностью электродов.

Следует отметить, что на всех режимах горения дуги наряду с описанными явлениями, процесс испарения молибденовых электродов сопровождается также направленным переносом материала, как правило, с анода на катод. В отдельных случаях (для импульсов тока с большой амплитудой) наблюдается интенсивное разрушение обоих электродов.

Из анализа экспериментальных данных, представленных на рис. 3, видно, что при прочих равных условиях (давлении и химическом составе окружающей среды, межэлектродном расстоянии), величина и характер разрушения исследованных электродов сильно зависят от скорости нарастания тока в импульсном разряде. Причем указанные зависимости для электродов, выполненных из различных материалов, существенно отличаются друг от друга. Из сопоставления данных по электрической эрозии материалов, металлографических исследований электроэрозионных следов, получаемых на их поверхности, а также СКС-грамм канала дуги выяснилось, что при длительном воздействии электрического разряда на цинковые электроды, характеризующиеся низкой температурой плавления и относительно малой теплопроводностью, происходит сильное оплавление их рабочей поверхности с последующим удалением продуктов эрозии с обоих электродов преимущественно в жидкой фазе. С увеличением значений dI/dt в импульсе и с одновременным уменьшением длительности разряда разрушение электродов из цинка приобретает поверхностный характер, причем имеет место направленный перенос материала с катода на анод.

При горении разряда на алюминиевых электродах на их поверхности образуется толстая непроводящая пленка окисла, затрудняющая свободное перемещение электродных пятен дуги. В связи с этим воздействие разряда на электроды носит в основном локальный характер, что является причиной глубокого проплавления их поверхности в области протекания тока и выброса материала обоих электродов за пределы разрядного промежутка в виде крупных капель. При этом роль указанного фактора возрастает с увеличением амплитуды импульса тока.

Как видно, удельный износ медных и молибденовых электродов, характеризующихся высокими значениями таких теплофизических констант, как теплопроводность и температура плавления, относительно невелик. Однако и в этом случае с ростом значений dI/dt импульса тока наблюдается увеличение суммарной величины эрозии обоих электродов. Причем, если для меди данное обстоятельство связано с усилением эффекта разрушения электрода положительной полярности, то для молибденовых электродов характерен постепенный переход от режима с направленным переносом плазмообразующего вещества с анода на катод к режиму с интенсивным испарением обоих электродов.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно заключить, что величина коэффициента электропереноса исследованных электродов в значительной степени зависит от теплофизических свойств материала, скорости нарастания тока в импульсе и величины межэлектродного промежутка. Характер их разрушения (перенос материала с одного электрода на другой, выброс продуктов эрозии за пределы межэлектродного промежутка) определяется процессом образования взаимодействующих друг с другом и с поверхностью электродов плазменных потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. R a k h o v s k y V. I.— In: Proc. of 5-th Intern. Symposium on Electrical Discharges and Insulation in Vacuum.— Poznan, 1972, p. 215.

2. Месяц Г. А., Ротштейн В. П., Фурсей Г. Н., Карцев Г. К.— ЖТФ, 1970, т. 40, с. 1551.

3. Любимов Г. А.— В сб.: Экспериментальные исследования плазматронов.— Новосибирск, 1977, с. 207.

4. Maesker H.— Ztschr. f. Phys., 1955, В. 141, S. 198.

5. Ecker G.— Ergebnisse exakt. Naturwiss., 1961, В. 33, S. 1.

6. Wienecke R.— Ztschr. f. Phys., 1955, В. 143, S. 128.

7. Мандельштам С. Л., Райский С. М.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1949, т. 13, с. 549.

8. Зянгерман А. С., Каплан Д. А.— ЖТФ, 1958, т. 28, с. 387.

9. Морозов В. А., Киселевский Л. И.— ИФЖ, 1967, т. 13, с. 644.

10. Bauer A.— Ztsch. f. Phys., 1954, В. 138, S. 35.

Поступила в редакцию
07.06.79.

НИИ ФФП

УДК 53.05/08

Н. М. АБРАМЧУК, М. К. ЕФИМЧИК, С. С. ШУШКЕВИЧ

ФРОНТАЛЬНЫЙ УЧЕБНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ ДЛЯ ФИЗИКОВ (специальность 2016)

Преимущества фронтального учебного практикума, т. е. цикла лабораторных работ, в котором все обучаемые параллельно выполняют одни и те же (или эквивалентные по содержанию) задания, общезвестны. Однако существует мнение, что затраты на оборудование при этом значительно возрастают, к тому же фронтальный метод усложняет постановку новых лабораторных работ, изменение содержания уже написанных работ и т. д.

Описываемый практикум лишен этих предполагаемых недостатков, а затраты на оборудование мало отличаются от затрат на оборудование учебной лаборатории соответствующего уровня с последовательным выполнением работ.

При разработке фронтального практикума сделана попытка решить следующие задачи.

1. Свести к минимуму затраты времени на вспомогательные операции типа соединений, подключений и т. п.

2. Обеспечить условия для выполнения всей работы непосредственно в лаборатории от подготовки к ней до оформления результатов в виде отчета. В значительной мере это облегчается тем, что вопросы теории, относящиеся к работе, рассматриваются, как правило, на лекции, непосредственно предшествующей лабораторным занятиям.

3. Дифференцировать задания в зависимости от индивидуальной подготовки и от степени усвоения лекционного материала, а также с целью исключения заимствования итоговых результатов друг у друга.

4. Добиться строгой синхронности изучения вопросов на лекциях и в лаборатории. Под этим подразумевается не только предварительное рассмотрение теоретических положений на лекциях, но и использование (в отдельных случаях) лабораторных занятий в качестве введения к определенной теме с целью повышения интереса к этой теме и к поиску ответа в лекционном курсе на возникшие вопросы. Таким образом построено, в частности, изучение вопроса о синхронном детектировании в физическом эксперименте для выделения сигналов из шума. Сначала в лаборатории прodelывается работа по изучению свойств синхронного детектора, а затем на лекциях поясняются вопросы применения таких устройств в экспериментальной физике.

5. Предусмотреть возможность использования типового оборудования лабораторных мест для выполнения учебно-исследовательской работы студентов (УИРС) по индивидуальным заданиям с минимальными затратами времени на подготовку эксперимента.