

Параметры катодных и анодных пятен в технологических плазменных устройствах (эксперимент)

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
Харьковский университет радиозлектроники (ХНУРЭ)*

Представлены методики и результаты исследования времени жизни и плотности тока, скорости перемещения катодных и анодных пятен на основе расшифровки ЭОП-грамм, полученных с применением лупы времени ЛВ-04.

Ключевые слова: электродное пятно, плотность тока, время жизни, скорость перемещения, ток в пятне, площадь пятна, число пятен.

Введение

Электродное пятно в дуговых технологических источниках является основным генератором рабочего тела для образования покрытий [1], но результаты экспериментального исследования зачастую противоречивы [1–5], поэтому для обеспечения надежных данных по параметрам пятна для расчета массоуноса в пятне необходимо зачастую проводить экспериментальное исследование. Сначала проведем анализ применяемых методов исследования.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые ресурсосберегающие и технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13), «Аэрокосмическая техника и транспорт» и по темам «Создание физико-технических основ повышения качества материала аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники», а также в рамках хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

Состояние вопроса

Для выбора оптимального метода исследования параметров электродных пятен проведем анализ методов исследования и величин параметров электродных пятен.

Выбрав метод исследования, покажем возможность создания установки для исследования параметров электродных пятен и методики обработки результатов эксперимента для получения времени жизни, скорости перемещения, плотности тока, площади пятна, тока в пятне, числа электродных пятен и их изменение во времени.

1. Выбор методики исследования параметров электродных пятен и разработка задания на экспериментальную установку

1.1. Анализ методов исследования величин параметров электродных пятен

1.1.1. Время жизни электродных пятен

Известны такие методы исследования времени жизни катодных и анодных пятен.

1. Метод ЭОП-грамм.

2. Метод с ФР-грамм.

3. Метод сравнения автографов на вращающемся и неподвижном электроде.

4. Фотографирование разряда с затвором Керра.

Результаты исследования времени жизни катодного и анодного пятна показывают, что времена жизни катодного пятна лежат в диапазоне $10^{-8} \dots 10^{-4}$ с, а анодного – $10^{-5} \dots 3 \cdot 10^{-4}$ с.

1.1.2. Скорость перемещения электродных пятен

Для изменения скорости перемещения электродных пятен используют такие методы:

1. СФР-грамм.

2. ЭОП-грамм.

3. Метод сравнения автографов на вращающемся и неподвижном электроде.

4. Фотографирование разряда с затвором Керра.

5. Фотографирование автографа.

Анализ величин скоростей перемещений электродных пятен показал, что для катодных пятен реализуются скорости $1 \dots 250$ м/с, а для анодных – $30 \dots 510$ м/с.

1.1.3. Плотность тока в электродных пятнах

Плотность тока в электродных пятнах измеряется с помощью таких методов:

1. Автографов.

2. ЭОП-грамм.

3. Автографов с учетом тонкой структуры

4. Автографов с учетом тонкой структуры и динамики пятна.

5. Зеркальной развертки.

6. Фотографирование с затвором Керра.

7. Механической развертки.

8. Съем тока с секционированных электродов.

Величины плотностей токов для катодного пятна лежат в диапазоне $10^7 \dots 10^{12}$ А/м², а в анодном – $6 \cdot 10^6 \dots 1,5 \cdot 10^9$.

2.3 Выбор метода исследования

Анализ методов исследования параметров электродных пятен показывает, что наиболее универсальным и точным является метод ЭОП-грамм, а применение «Лупы времени» типа ЛВ-04 дает возможность для рассмотренного диапазона параметров электродных пятен получить достоверные данные по скорости перемещения пятна, времени его жизни, плотности тока в нем, динамике этих параметров, а также тока в пятне, площади пятна и числа пятен.

Экспериментальная установка должна обеспечивать вероятность ее оптической связи с «Лупой времени» ЛВ-04 и позволять натекание газа с расходом $5 \cdot 10^{-7}$ кг/с.

2.4 Экспериментальная установка для исследования динамики параметров электродных пятен: плотности тока, времени жизни, скорости перемещения, тока в пятне, площади пятна и числа пятен

Проведенный анализ методов исследования параметров электродных пятен (см. рис. 2) показал, что только универсальный метод ЭОП-грамм позволяет с помощью применения «Лупы времени» типа ЛВ-04 получить на базе одного метода плотность тока, время жизни, скорость перемещения пятна, ток в пятне, площадь пятна и число пятен для различных моментов времени.

Экспериментальная установка (рис. 1) имела в составе вакуумную камеру 1, плазменное устройство с блоком питания 2, измеритель тока 3, измеритель напряжения 4, двухлучевой осциллограф с памятью 5 и «Лупу времени» ЛВ-04 6.

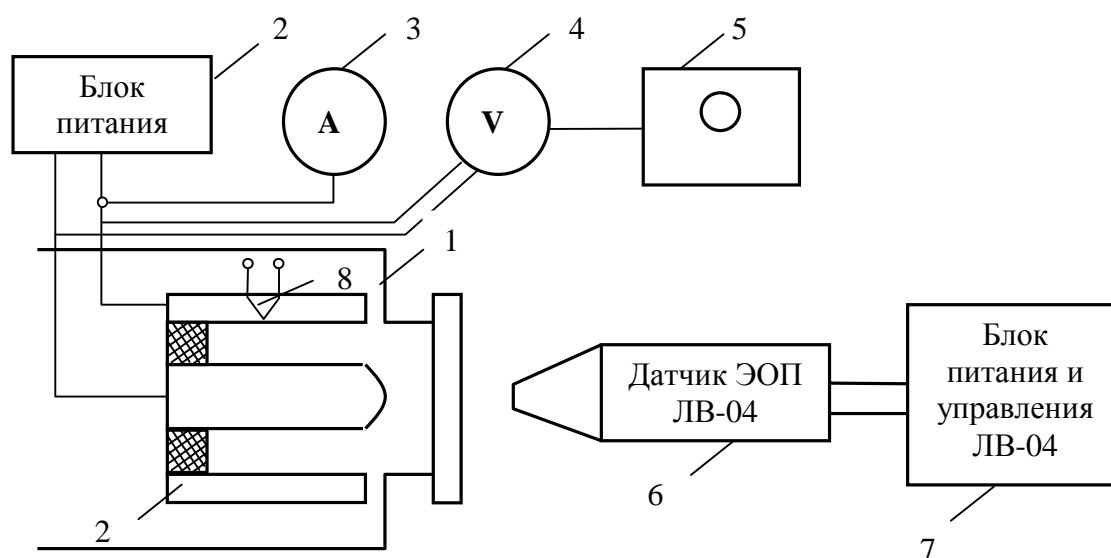


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования параметров электродных пятен методом ЭОП-грамм: 1 – вакуумная камера; 2 – разрядное устройство с блоком питания; 3 – измеритель тока; 4 – измеритель напряжения; 5 – двухлучевой осциллограф; 6 – датчик ЛВ-04; 7 – блок управления и управление ЛВ-04; 8 – термопара

Экспериментальная установка позволяла работать при вакууме не хуже 10^{-5} торр с расходом $5 \cdot 10^{-7}$ кг/с.

При этом может контролироваться температура электродов вольфрамовыми термопарами.

Вакуумная камера снабжена автоматизированным натекателем газа, аналогичным применяемым на установке «Булат 6».

2.5. «Лупа времени» ЛВ-04

Прибор «Лупа времени» типа ЛВ-04 предназначена для оптических исследований и сверхскоростной фотографии слабосветящихся объектов при быстротекающих процессах, т.е. при исследовании физических процессов,

сопровождающихся излучением и поглощением света.

Влажность воздуха в помещении, где установлен прибор, не должна превышать 60%, температура должна поддерживаться в диапазоне +10...+30°C. Контейнер с юстировочным устройством должен быть защищен от местных перегревов, воздействия магнитных полей, превышающих 10 эрстед, а также механических вибраций.

2.6. Эксплуатационные возможности прибора

«Лупа времени» допускает работу в двух режимах с использованием электронно-оптического преобразователя (ЭОП).

В режиме кадровой съемки изображение с 16 кадрами в одной серии или четыре серии по 4 кадра, отдельные кадры следуют через промежутки времени 10, 300, 1500 мкс, при этом длительности экспозиции отдельных кадров 5 ...100 мкс и изменяются плавно, не превышая длительности кадра. Временная задержка между отдельными сериями кадров – 0; 50...500 мкс, при этом длительности экспозиции равны длительности развертки. Задержка между отдельными развертками 0; 50...500 мкс.

Достижимое временное разрешение в этом режиме – $1 \cdot 10^{-7}$ с.

Разрешающая способность установки 18 линий на мм для ЭОПа УМИ 92.

Частота повторений изображения 0,125; 0,5; 1,25; 5; 12,5 Гц.

Запуск прибора осуществляется импульсом любой полярности, амплитудой не менее 50 В и длительностью не менее 0,5...1 мкс.

Прибор обеспечивает регулируемую задержку срабатывания относительно начала запускающего импульса от 0 до 3,2 мкс ступенями через 0,2 мкс и от 3 до 10 мкс – плавно.

Регистрация изображения с экрана ЭОПа производится фотокамерой.

Фокусировка изображения на «JG» осуществляется сменными объективами P02-2M, МИР-1, ТАИР-3.

На рис. 3 показана фотография «Лупы времени» ЛВ-04, которая состоит из четырех основных частей – электронно-оптического преобразователя с юстировочным устройством и пультом на тележке, двух радиотехнических стоек и тележки для стабилизаторов напряжения типа СН 0,75.

В стойке № 1 размещены:

1. Генераторы прямоугольных импульсов (9 шт.).
2. Генератор внутреннего запуска.
3. Блок управления.
4. Генератор импульсов — 15 кВ.
5. Блок трансформаторов.
6. Блок питания низковольтный.

В стойке № 2 размещены:

1. Стабилизаторы тока линз (3 шт.).
2. Стабилизатор ускоряющего напряжения – 15 кВ.
3. Стабилизатор ускоряющего напряжения – 20 кВ.
4. Блоки питания высоковольтные (2 шт.).

Прибор комплектуется двумя контейнерами, основными узлами которого являются: фотоприставка, блок изоляторов, фокусирующая система с элементами перемещения, корпус с механизмом перемещения входного объектива. Фокусирующая система и корпус имеют систему водяного охлаждения. Изоляция

ЭОПа рассчитана на 45 кВ.

Магнитная фокусирующая система служит для формирования изображения после прохождения электростатической линзы (усиливающей яркость), рассекающей поток электронов.

Юстировочное устройство обеспечивает перемещение контейнера в продольном направлении на 100 мм, в поперечном направлении на 500 мм, и в вертикальном направлении на 50 мм, также обеспечивается поворот контейнера вокруг его продольной оси на 120°.

2.7 Принцип работы прибора ЛВ-04

На рис. 2 изображена блок-схема прибора. С помощью фотообъектива на фотокатод (ФК) проектируется оптическое изображение исследуемого объекта.

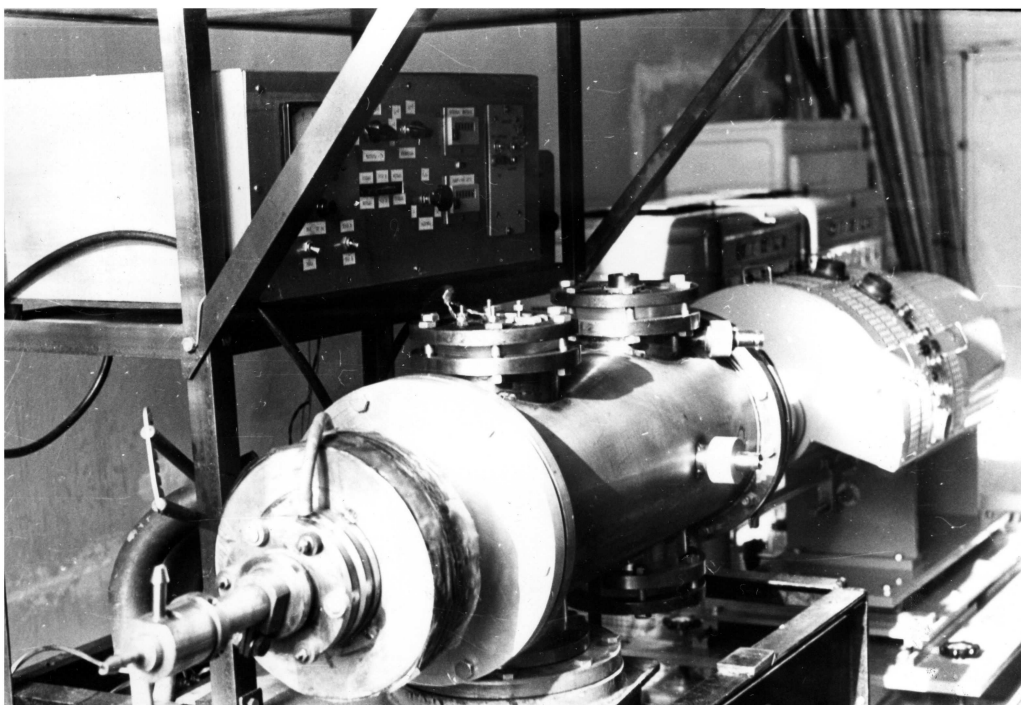


Рис. 3. Фото «Лупы времени» ЛВ-04 с установкой

Под действием света фотокатод эмитирует электроны, которые ускоряются приложенным к камере ЭОПа ускоряющим направлением и фокусируются на люминисцентный экран с помощью электростатической линзы. Таким образом, на люминисцентном экране возникает оптическое изображение, имеющее яркость, большую, чем яркость изображения на фотокатод. Яркость свечения люминисцентного экрана пропорциональна приложенному ускоряющемуся напряжению.

Полученное изображение попадает на фотокатод следующей камеры ЭОП, где происходит аналогичный процесс. Наличие нескольких камер в ЭОП позволяет получить на его выходном экране изображение с необходимой яркостью.

Перемещение магнитных линз изменяет в некоторых пределах масштаб изображения ЭОПа.

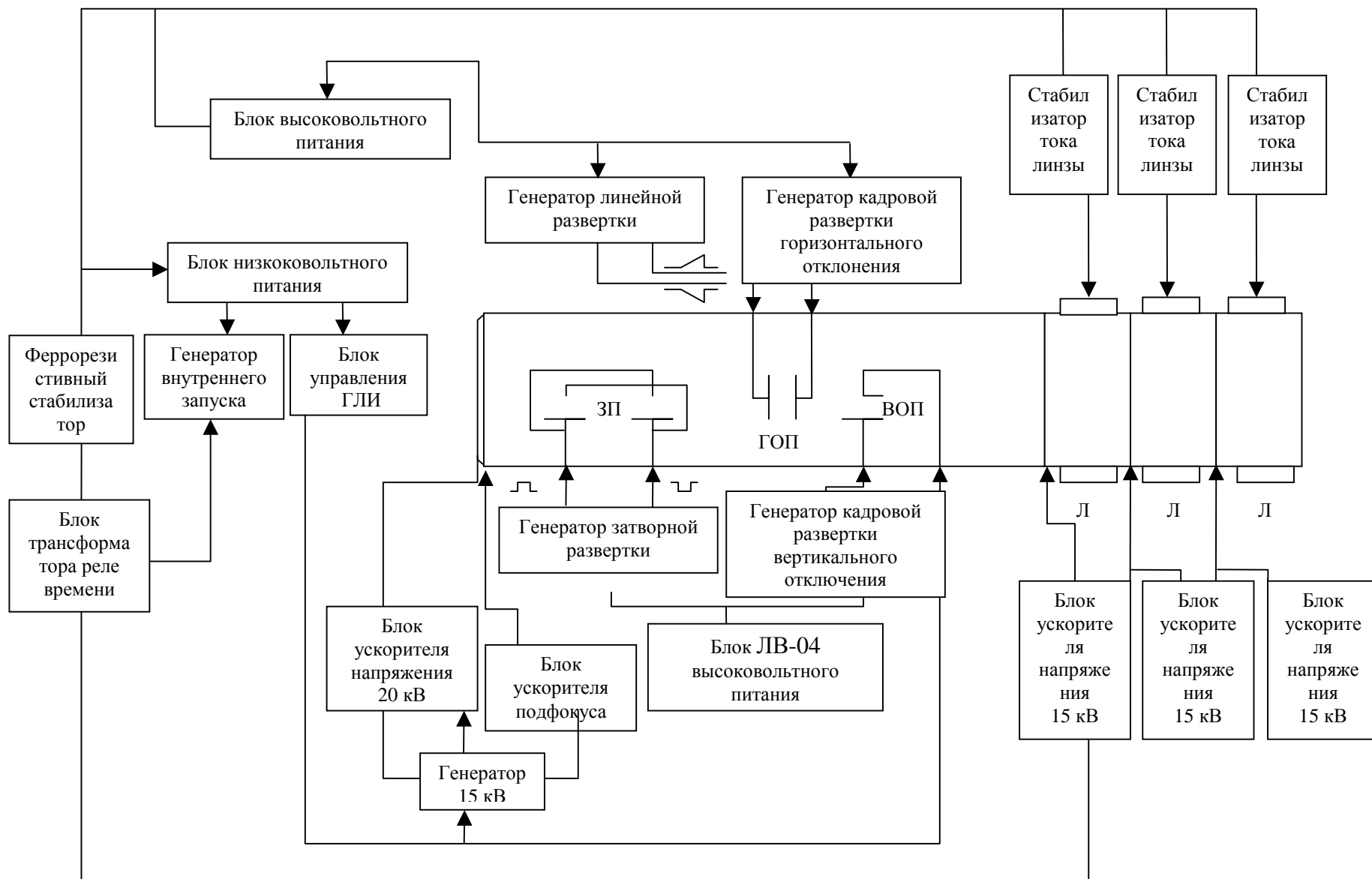


Рис. 2 Блок-схема ЛВ-04

Временное соотношения в приборе, определяющие длительности управляющих импульсов, формируется блоком управления. В режиме кадровой съемки на горизонтально отклоняющие пластины ЭОПа подаются четыре ступенчатых импульса, на вертикально отклоняющие пластины в это время подается один ступенчатый импульс с длительностью ступени, равной длительности одного импульса горизонтального отклонения.

На затворные пластины (ЗП) при этом подаются импульсы с длительностью, не превышающей длительности импульса горизонтально отклоняющей ступени в серии. Эти импульсы открывают на время своей длительности доступ в камеры усиления электронам, вылетающим с входного фотокатода, т.е. определяют время экспозиции прибора. При нулевой задержке между четырьмя горизонтально отклоняющими импульсами прибор обеспечивает режим работы с 16 кадрами в одной серии. Задавая задержку между этими импульсами, получают режим работы в четыре серии по четыре кадра.

При работе прибора в режиме фоторегистратора на горизонтально отклоняющие пластины вместо ступенчатых импульсов подаются четыре пилообразных импульса с длительностью каждого, равной длительности ступенчатого импульса. На затворные пластины при этом подаются импульсы, по длительности равные длительности одного пилообразного импульса.

Вертикально отклоняющие пластины управляются аналогично кадровому режиму. Таким образом, на экране ЭОПа обеспечивается развертка изображения в четыре строки.

Управление входной камерой ЭОПа производится высоковольтным отрицательным импульсом, прикладываемым ко входному фотокатоду в течение действия импульсов кадровой и линейной разверток.

Ускоряющее напряжение на камеры ЭОПа с последовательностью включаемых блоков ускоряющего напряжения – 15 кВ.

Регулировка токов электромагнитных линз ЭОПа осуществляется с помощью блоков стабилизаторов тока линз.

3. Результаты экспериментального опробывания установки для исследования динамики электродных пятен и методика их обработки

Эксперимент проводился с помощью «Лупы времени» типа ЛВ-04 и использовался метод ЭОП-граммы. На рис. 4-6 показаны ЭОП-граммы (а) и осциллограммы (б), напряжения и тока в разряде.

ЭОП-граммы позволяют получить зависимость площади катода и площади анода S_A , занятые разрядом в зависимости от времени, т.е. $S_A = f(t)$ и $S_K = f(t)$, а также пятен на катоде и аноде $S_{ПА} = f(t)$ в динамике.

Используя осциллограмму тока, дающую зависимость $I(t) = f(t)$, получим изменение плотности тока от времени:

$$J_A(t) = \frac{I(t)}{S_A(t)} \text{ и } S_K(t) = \frac{I(t)}{S_K(t)}. \quad (1.1)$$

По величине плотности тока и площади пятна определяем динамику тока в пятне

$$I_{\Pi_K}(t) = j_K(t)S_{\Pi_K}(t) \text{ и } I_{\Pi_A}(t) = j_A(t)S_{\Pi_A}(t) \quad (1.2)$$

ЭОП-граммы дают возможность получить величину времени жизни пятна

$$\tau_{Ж_A} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i, \quad (1.3)$$

где Δt_i - время между кадрами, в которых наблюдается пятно; n – число кадров, в которых наблюдается исследуемое пятно.

Скорость перемещения пятна во времени определяется также с помощью ЭОП-грамм:

$$V_i = \frac{\Delta l_i}{\Delta t_i - \Delta t_j}. \quad (1.4)$$

где Δl_i - перемещение, которое испытывает пятно при переходе от одного кадра к другому; Δt_j - длительность кадра.

Поставив полученное значение на временную ось в точку, соответствующую переходу от одного кадра к другому, получим зависимость скорости перемещения пятна от времени.

ЭОП-граммы позволяют также найти зависимость числа электродных пятен на катоде N_K и аноде N_A от времени разряда $N_K = f(t)$ и $N_A = f(t)$.

Осциллограммы тока в разряде позволяют оценить динамику изменения величины катодного и анодного падений напряжения:

$$\begin{aligned} U_K(t) &= U(t) - E_M(R-r) - \hat{U}_A, \\ U_A(t) &= U(t) - E_M(R-r) - \hat{U}_K, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где \hat{U}_A и \hat{U}_K - осредненные значения анодного и катодного падений напряжения; E_M - среднее значение напряженности поля в столбе разряда; R – наименьшее значение размера радиуса наружного цилиндра; r – наибольшее значение размера радиуса внутреннего цилиндра.

Результаты обработки результатов экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номер эксперимента	Катод	Анод	$\tau_{кп}$, с	$\tau_{ап}$, с	$V_{кп}$, м/с	$V_{ап}$, м/с	$j_{кп}$, А/м ²	$j_{ап}$, А/м ² м/с
1	1Х18Н9Г	медь	$7 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}	$7,8 \cdot 10^2$	$1,8 \cdot 10^2$	$7 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^5$
2	1Х18Н9Г	Д16Г	$9 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^{10}$	$7 \cdot 10^5$
3	молибден	Д16Г	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^5$

Сравнение результатов, получаемых в эксперименте, с результатами обзоров свидетельствует о том, что порядок величин совпадает, а сами величины, очевидно, более достоверны.

Выводы

Предложенный метод исследования параметров электродных пятен в электродных системах ЭРД и технологических плазменных системах позволяет с высокой точностью получить значения площади пятна, плотности тока, тока в пятне, времени жизни пятна, скорости перемещения пятна и числа пятен для катода и анода в различные моменты времени развития разряда, а также

проводить оценку динамики катодного и анодного падения напряжения.

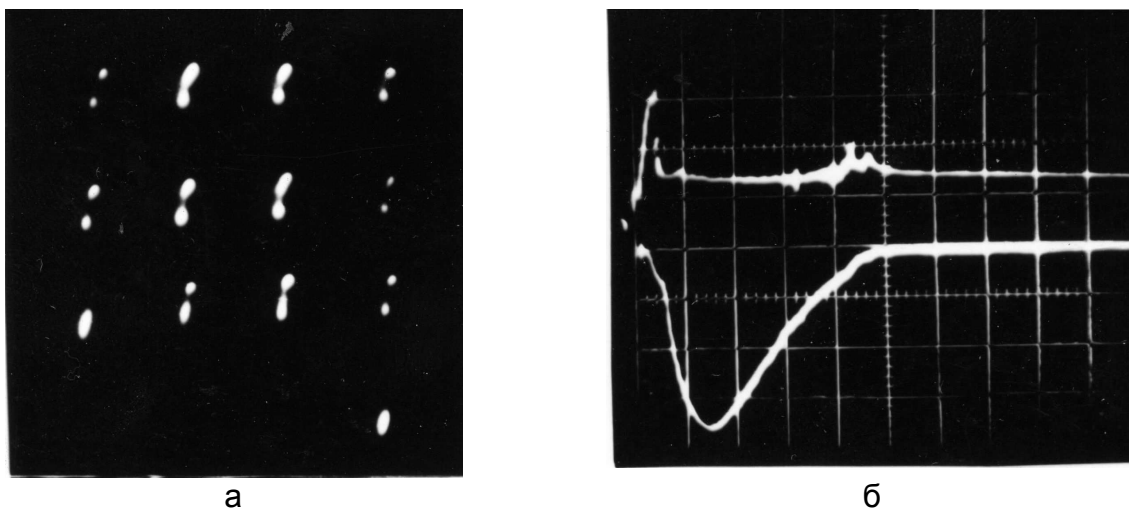


Рис. 4. Осциллограммы изменения напряжения и тока во времени (а) и ЭОП-грамма разряда ($W_p=110$ Дж) (б)

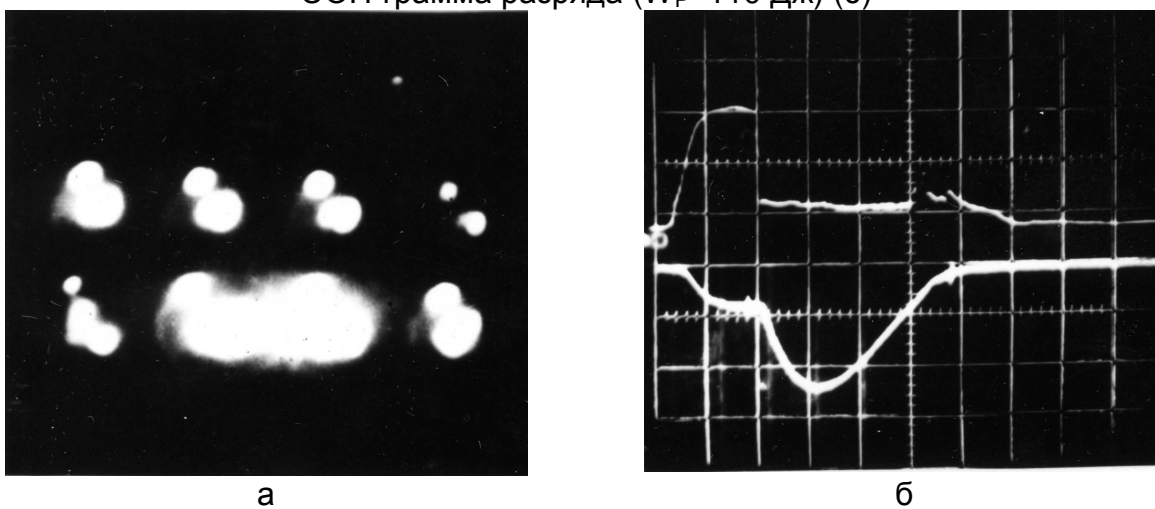


Рис. 5. Осциллограммы изменения напряжения и тока во времени (а) и ЭОП-грамма разряда ($W_p=220$ Дж) (б)

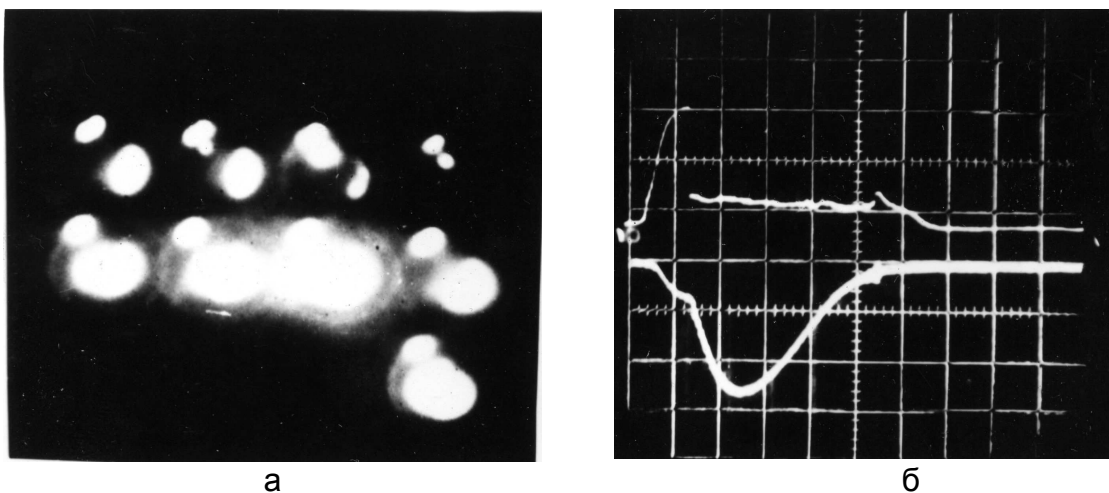


Рис. 6. Осциллограммы изменения ЭОП-грамма разряда ($W_p=330$ Дж) (а), напряжения и тока во времени (б)

Список литературы

1. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] Кн. 1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. — 596 с.
2. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. — 482 с.
3. Белан, Н.В. Физические основы стойкости электродов плазменных ускорителей и технологических плазменных устройств [Текст]: учеб. для вузов / Н.В. Белан, Г.И. Костюк, Е.П. Мышелов – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1986. – 206 с.
4. Раховский, В.И Физические основы коммуникации электрического тока в вакууме [Текст] / В.И. Раховский. – М.:Наука, 1970. – 536 с.
5. Аксенов, И.И. Вакуумная дуга. Источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное моделирование [Текст] / И.И. Аксенов, А.А. Андреев, В.А. Белоус и др. – К.: Наук. думка, 2012. – 727 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И.Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 19.09.2013

Експериментальне дослідження параметрів катодних і анодних плям в технологічних плазмових пристроях

Наведено методики та результати дослідження терміну життя, густини струму, швидкості переміщення катодних та анодних плям на основі розшифрування ЕОП-грам, отриманих за допомогою лупи часу ЛП-04.

Ключові слова: електродна пляма, щільність струму, час життя, швидкість переміщення, струм в плямі, площа плями, число плям.

Experimental study of the parameters of the cathode and anode spots in technological plasma devices

The technique and results of a study of the lifetime and the density of the current speed of the anode and cathode spots based decoding IC-gram obtained using a magnifier time LP-04.

Keywords: spot electrode, current density, time of life, moving speed, the current in the spot, spot area, the number of spots.