

**ИССЛЕДОВАНИЯ ЯВЛЕНИЙ ПЕРЕНОСА МАТЕРИАЛА  
С ЭЛЕКТРОДОВ В ПРОЦЕССЕ ИМПУЛЬСНОГО ПРОБОЯ  
ВЫСОКОГО ВАКУУМА**

**В. И. ЭШКЕНАЗИ**

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института  
ядерной физики)

В последних работах по исследованию электрического пробоя высокого вакуума большое внимание уделяется тем электродным меткам, которые остаются на электродах после пробоя 1, 2, 3, 4. Однако все исследования касаются или предпробойной стадии с током до 2 ма, или полного пробоя, и не было работы, где были бы изучены явления на электродах при импульсном пробое одного зазора при одном напряжении на разных стадиях от предпробойной до полного пробоя.

Экспериментальная установка состояла из генератора прямоугольных импульсов с фронтом 1 нсек, амплитудой до 50 кв, длительностью до 0,5 мсек и коаксиальной вакуумной камеры, один из электродов которой подсоединялся к кабелю  $L_3$  с импульсом, а другой к такому же согласующему кабелю  $L_4$  [5] (рис. 1).

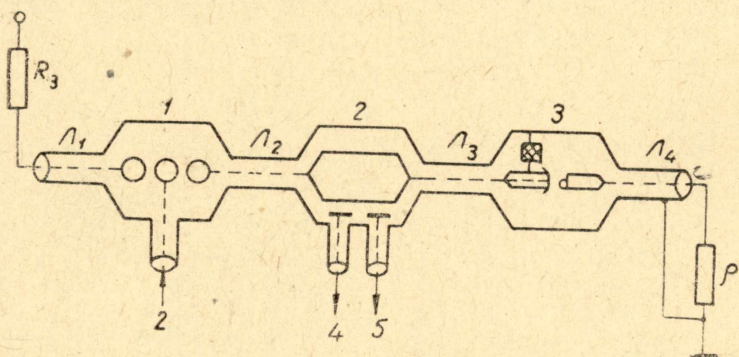


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — разрядник с азотом при давлении 10 атм, 2 — ввод поджигающего импульса,  
3 — делитель напряжения, 4 — пуск осциллографа, 5 — наблюдаемый сигнал,  
6 — вакуумная камера со срезающим разрядником и исследуемым зазором,  
 $L_1 \div L_4$  — кабели РК-3

Коаксиальный емкостной делитель с разрешением не хуже  $10^{-10}$  сек для регистрации явления устанавливался на некотором расстоянии перед камерой. Источником информации о процессе в камере служил сигнал, отраженный от камеры.

Камера и делитель проверялись на отсутствие искажений импульсами с фронтом  $t_{\phi} = 5 \cdot 10^{-10}$  сек от генератора Г5-12.

При замкнутых электродах регистрировались импульсы на входе и выходе камеры, а при разомкнутых — отраженный импульс. Наблюдение осциллограм производилось осциллографом С1-14 с разрешением  $10^{-10}$  сек.

Параллельно кабелю с импульсом в вакууме устанавливался срезающий разрядник, в котором регулируется время запаздывания разряда по поверхности диэлектрика в вакууме. Изменяя это время запаздывания разряда по диэлектрику, стало возможным не доводить основной зазор до полного пробоя и исследовать полученные таким образом электродные метки.

Вакуум в камере  $5 \cdot 10^{-6}$  тор создавался агрегатом ВА-0,5—1 с термоэлектрической ловушкой ТВЛ-500.

Катод был выполнен из меди и представлял собой плоскость диаметром 44 мм с профилем Роговского, а анодом служила полусфера  $\varnothing 22$  мм из молибдена. Анод — полусфера по отношению к катоду — плоскости был расположен эксцентрично на 11 мм от оси. Такая геометрия электродов создавала равномерное электрическое поле в зазоре до 1 мм. Устройство камеры позволяло изменять расстояние между электродами и устанавливать исследуемый зазор с точностью 0,0005 см и, вращая плоскость вокруг своей оси, получать каждый раз в новом месте на плоскости метки от единичных пробоев.

Электроды тщательно механически полировались. Глубина рисков была не выше 0,1 микрона. Перед установкой в камеру электроды обезжиривались четыреххлористым углеродом, спиртом и просушивались.

В настоящей статье описываются результаты исследования зазора в 0,35 мм. Электрический пробой такого зазора происходит при  $u=35$  кВ

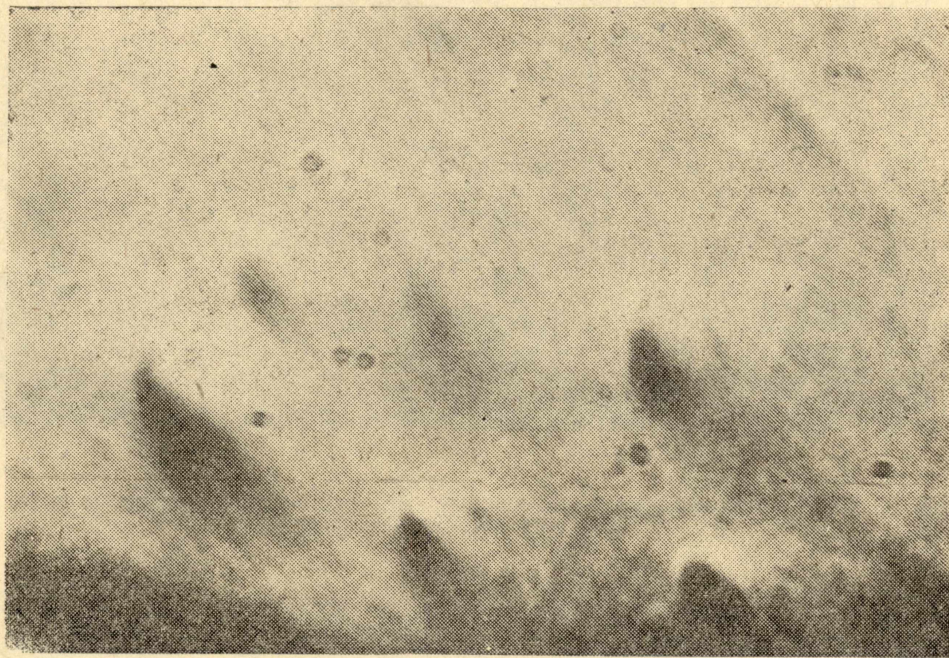


Рис. 2. Выступы на молибденовом аноде, образовавшиеся в результате электронной бомбардировки с катода за время 12 нсек. Увеличение  $2000 \times$ .

и  $\tau_{\text{фр}} = 1$  нсек за 30 нсек. Используя срезающий разрядник, удалось получить на электродах метки от пробоев в незавершенной стадии через 12, 18 и 30 нсек.

По фотографиям, полученным с электродов на металлографическом микроскопе МИМ-8 с максимальным увеличением 2000 в косом свете, что позволило более четко выявить микрорельеф, перенос материала с одного электрода на другой представился следующим.

После прохождения импульса длительностью 12 *нсек* на поверхности анода видны образовавшиеся выступы высотой около 1 *мк*,  $\varnothing$  2 *мк*, в количестве около 20 штук на поверхности в 0,2 *мм*<sup>2</sup> (рис. 2).

На катоде после 12 *нсек* видны следы перенесенных шариков  $\varnothing$  1 микрон и менее на площади в 0,3 *мм*<sup>2</sup>.

После прохождения импульса длительностью 18 *нсек* на аноде видны выступы высотой до 2 *мк* с диаметром у основания 3,6 *мк* и у вершины 1,6 *мк* и выступов высотой 1 *мк* и диаметром 2 *мк* на площади в 0,2 *мм*<sup>2</sup>.

На катоде после 18 *нсек* видны следы перенесенного молибдена, причем среди шариков диаметром 1 *мк* четко видны следы обособленных пятен, (рис. 3).



Рис. 3. Частицы молибдена, перенесенные незавершенным разрядом в 18 *нсек* на катод. Увеличение 800 $\times$

После завершения пробоя на аноде остается пятно  $\varnothing$  0,3 *мм*, состоящее из мелких кратеров  $\varnothing$  1—5 *мк* в количестве около  $10^4$  (рис. 4).

На катоде после завершения пробоя остается пятно из *Mo*, занимающее 0,3 *мм*<sup>2</sup>.

По изложенным результатам картина инициирования и развития разряда от предпробойной стадии в дуговую представляется следующей. Под действием электрического поля с поверхности катода, покрытой пленкой адсорбированного газа и масла, начинают эмиттироваться электроны. Этим предпробойным током нагревается поверхность анода,

на которой растут выступы, и часть материала анода с разогретых острий этих выступов в виде частиц  $\varnothing$  1 мк покрывает поверхность катода. Выступы на аноде растут локально до 2 мк высотой в количестве около 10 шт. На катоде мы видим следы молибдена, который испа-

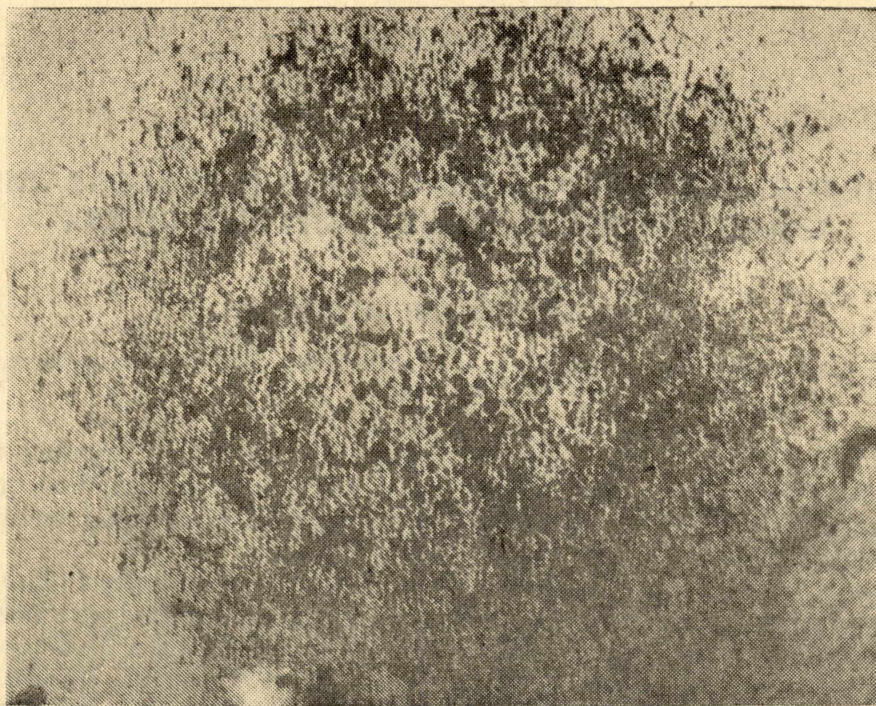


Рис. 4. Кратер на молибденовом аноде от одного полного пробоя, состоящий из мелких кратеров. Увеличение 280 $\times$

рился с этих выросших выступов. Дальнейший рост тока в промежутке, который ограничен волновым сопротивлением кабеля, ведет к испарению анода, к образованию на аноде большого пятна, состоящего из  $10^4$  мелких кратеров, и переносу всей массы испарившегося молибдена на катод.

В данной работе обнаружены рост выступов на аноде из материала анода и рост микроострий на катоде за счет испарения выступов на аноде.

Фотография рис. 4 подтверждает данные Майтланда [1] об электродных пучках, разогревающих анод.

Отсутствие переноса материала с анода на катод, и наоборот, в первые 5 нсек отрицает роль частиц Кренберга [6] в инициировании вакуумного пробоя и гипотезу Майтланда [1].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Maitland A., 1961. J. Appl. Phys. 32, 2399—407.
2. Hawley R., 1963, Nature Lond 199, 978—80.
3. Little R. P. and Whitney W. I. 1963, J. Appl. Phys. 34, 2430—2.
4. Maitland A., Hawley R., Brit. J. Appl. Phys. 1965, 1591—92, 16.
5. Г. А. Воробьев, Г. А. Месяц. Техника формирования в. в, нсек. импульсов. Госатомиздат, 1963.
6. Granberg L. 1952, J. Appl. Phys. 23, 518—22.