

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



№ 6 — 1969



УДК 537.525

Э. М. РЕЙХРУДЕЛЬ, Г. В. СМИРНИЦКАЯ, А. Н. МАВЛЯНОВ

## ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИОННО-ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ В РАЗРЯДЕ С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Измерен усредненный по поверхности катода коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии  $\gamma_{\text{ср}}$  в разряде с осциллирующими электронами. Получены зависимости  $\gamma_{\text{ср}}$  от  $H$ ,  $p$ ,  $V_a$  и от рода ионов ( $\text{N}_2^+$ ,  $\text{He}^+$ ,  $\text{Ne}^+$ ,  $\text{Ar}^+$ ), бомбардирующих катоды. Сравниваются величины  $\gamma_{\text{ср}}$  для катодов из разных материалов (Al, Ag, Be, Bi, Cu, In, Nb, Ti, Ta, Re, Zr, W),  $\gamma_{\text{ср}}$  для молибдена. Определено значение эффективного коэффициента вторичной эмиссии  $\Gamma$  для первого режима разряда при различных давлениях газа.

Для выяснения роли процессов на катоде в зажигании и в токе разряда с осциллирующими электронами представляет интерес определение коэффициента вторичной эмиссии с поверхности катода в условиях горящего разряда. Известен ряд работ, в которых обсуждается вопрос о роли вторичной электронной эмиссии в цилиндрическом газомagnetроне и пеннинговском разряде. Так в [1] показано, что не все электроны, вышедшие с катода цилиндрического холодного диода, участвуют в развитии лавины, часть из них возвращается обратно на катод. Поэтому эффективный коэффициент вторичной эмиссии  $\Gamma$  равен  $\Gamma = \omega\gamma$ , где  $\gamma$  — коэффициент вторичной электронной эмиссии с катода под действием ионов,  $\omega$  — вероятность столкновения электрона с атомом газа при движении по циклоиде. Полагая, что электрическое поле однородно на высоте циклоиды, автор [1] вывел формулу, связывающую  $\omega$  с параметрами разряда.

В [2] с помощью двух малых источников электронов (накаленных нитей), из которых один помещен в центре, а другой у края катода, определено значение  $\Gamma$  для разных точек молибденового катода. При давлении  $\sim 10^{-5}$  тор для электронов, вышедших из центра катода,  $\Gamma \approx 0,05$ .

В [3, 4] исследовалось влияние материала катода на зажигание пеннинговского разряда. В [5] экспериментально определен коэффициент вторичной эмиссии в триодном ионном насосе, причем в одних и тех же условиях двумя путями получено два значения  $\gamma$ , сильно отличающиеся друг от друга. Последнее, по-видимому, связано с тем, что в используемой схеме измерений не было возможности выделить истинный ионный ток на коллектор и на катод.

В настоящей работе измерен коэффициент вторичной эмиссии, усредненный по поверхности катода для ионов, падающих на катод под разными углами и с различной энергией  $\gamma_{\text{ср}}$ ; кроме того, измерен эффективный коэффициент вторичной эмиссии  $\Gamma$  в разряде с осциллирующими электронами при давлениях  $10^{-5}$ — $10^{-7}$  тор в разных газах и для различных материалов катодов.

### Методика определения $\gamma_{\text{ср}}$ и $\Gamma$

В разряде с осциллирующими электронами, электроны, освобожденные из катода ударами ионов, участвуя в циклоидальном движении вокруг линий магнитного поля, направляются ко второму катоду. При этом те электроны, которые испытали упругие соударения, быстро уходят на анод и практически не играют роли в развитии лавины. Электроны, потерявшие энергию при неупругих соударениях с атомами газа, не могут достигнуть противоположного катода и участвуют в создании лавины по радиусу разряда. Электроны же, не испытавшие соударений, могут попасть на противоположный катод. Ток на один из катодов можно выразить так:

$$I_k = I_i + \gamma_{\text{ср}} I_i - I_{ek} = \frac{1}{2} I_a, \quad (1)$$

где  $I_i$  — ионный ток на катод,  $\gamma_{\text{ср}}$  — коэффициент вторичной эмиссии, усредненный по поверхности катода для ионов, падающих на катод с различной энергией и под разными углами;  $I_{ek}$  — электронный ток на катод, который в первом режиме разряда [6] состоит из электронов, пришедших с противоположного катода, во втором режиме — в создании этого тока на катод участвуют также электроны из объема, получившие дополнительную энергию в результате взаимодействия с переменным (высокочастотным) электрическим полем, возникающим в этом режиме разряда;  $I_a$  — ток на анод.

В первом режиме разряда электронный ток с катода, созданный той частью электронов, которые испытали соударения с атомами газа, равен  $\gamma_{\text{ср}} \cdot I_i - I_{ek}$ .

Отсюда можно определить вероятность соударений  $\omega$  и эффективный коэффициент вторичной электронной эмиссии  $\Gamma$ , усредненный по поверхности катода:

$$\omega = \frac{\gamma_{\text{ср}} I_i - I_{ek}}{\gamma_{\text{ср}} I_i}$$

и

$$\Gamma = \omega \gamma_{\text{ср}} = \gamma_{\text{ср}} - \frac{I_{ek}}{I_i} = \frac{I_a}{2} - I_i. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) видно, что для определения  $\gamma_{\text{ср}}$  и  $\Gamma$  необходимо измерить разрядный ток и выделить из тока, поступающего на катод, ионный и электронный компоненты.

Измерения  $I_i$  и  $I_{ek}$  производились на установке, схема которой представлена на рис. 1. В одном из катодов  $K_1$  вырезана криволинейная щель (рис. 1, а), вдоль которой может перемещаться коллектор  $K$ , укрепленный на расстоянии 1 мм от пластины  $\Pi_1$  и изолированный от нее. Пластина  $\Pi_1$  вплотную лежит на катоде  $K_1$  и может поворачиваться вокруг оси  $O'O'$ . На рис. 1, а показаны последовательные положения коллектора  $K$  на различных расстояниях от центра катода  $K_1$ . Цифра-

ми (0, 2, ..., 14) указаны положения центра отверстия коллектора на радиусах катода в мм.

Полный ионный ток  $I_i$  на катод  $K_1$  равен сумме ионных токов, идущих на отдельные кольца катода. Ионные токи на кольца соответственно равны  $I_0 = \pi r_0^2 j_0$ ;  $I_1 = 8\pi r_0^2 j_1$ ;  $I_2 = 16\pi r_0^2 j_2$ , ...,  $I_7 = 56\pi r_0^2 j_7$ , где  $j_0, j_1, j_2, j_7$  — плотности ионных токов на соответствующие кольца

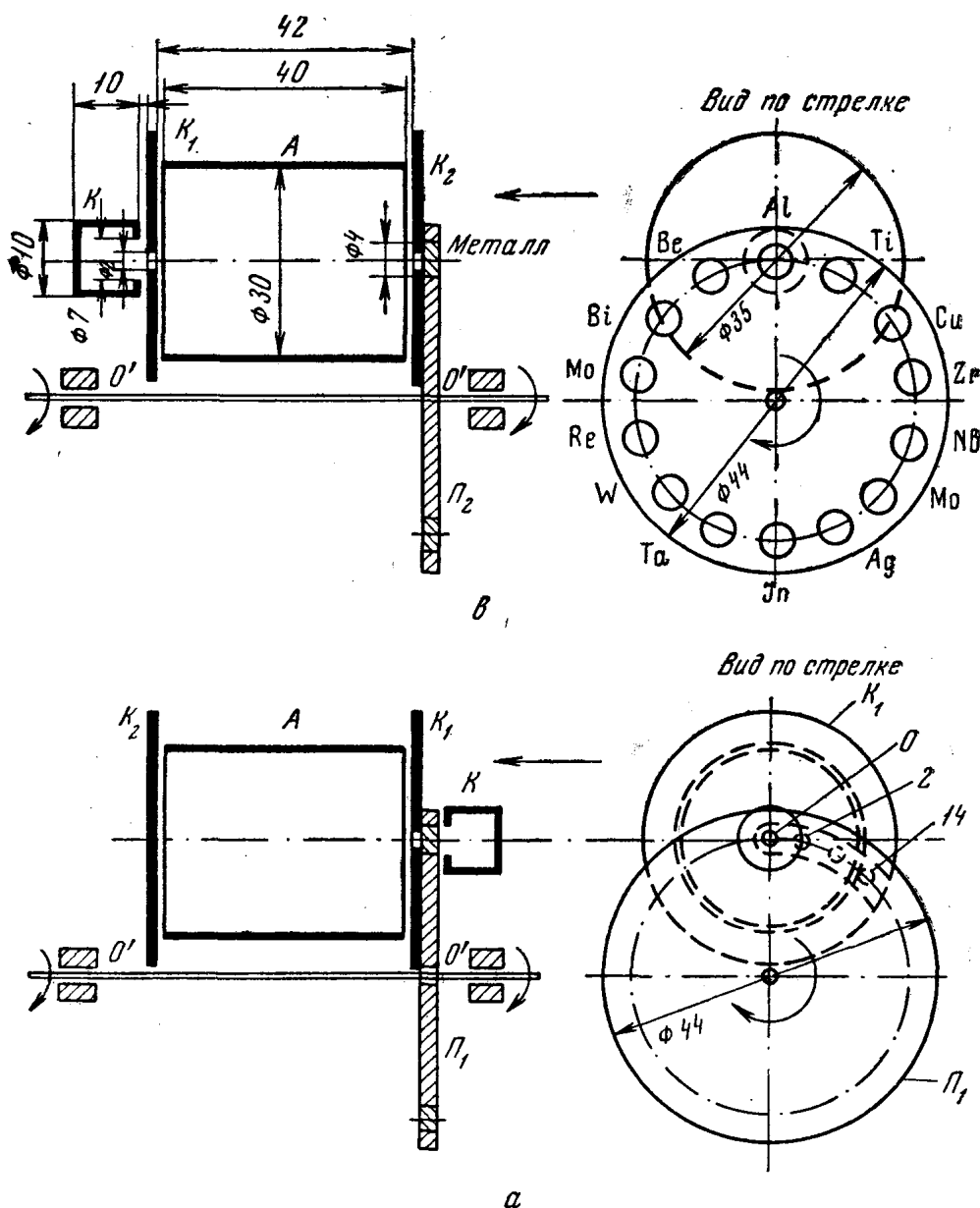


Рис. 1. Схема электродов измерительной трубки. а — схема с подвижным коллектором, б — схема с подвижным диском, устанавливающим различные металлы в центре катода

катода, определяемые из измерений токов на подвижной коллектор;  $r_0$  — радиус отверстия коллектора,  $r_0 = 1$  мм.

Измерение компонентов токов на коллектор производилось следующим образом.

Пусть  $U_{k_1}$  — потенциал коллектора  $K$  относительно катода  $K_1$ ,  $U_{k_2}$  — потенциал катода  $K_2$  относительно катода  $K_1$ . Тогда при разных значениях  $U_{k_1}$  и  $U_{k_2}$  токи на коллектор будут:

при  $U_{k_1} = 0, U_{k_2} = 0$ :

$$I_{1k} = I_{i \text{ колл}} - I_{ek} - I_{e0} + I_{e\gamma} \quad (3)$$

Здесь  $I_{ek}$  — электронный ток на коллектор,  $I_{eo}$  — ток вторичной эмиссии электронов с краев отверстия в катоде  $K_1$ ,  $I_{e\gamma}$  — ток вторичной эмиссии электронов с коллектора  $K$ .

При  $U_{k_1} < 0, U_{k_2} = 0$ :

$$I_{2k} = I_{i \text{ кол}} + I_{e\gamma}; \quad (4)$$

При  $U_{k_1} = 0, U_{k_2} > 0$ :

$$I_{3k} = I_{i \text{ кол}} + I_{e\gamma} - I_{eo}; \quad (5)$$

При  $U_{k_1} > 0, U_{k_2} > 0$ :

$$I_{4k} = I_{i \text{ кол}} - I_{eo}. \quad (6)$$

Из уравнений (3)—(6) можно определить компоненты токов на коллектор. При этом  $U_{k_1}$  изменялось от  $+15$  до  $-70$  в,  $U_{k_2}$  — от 0 до 30 в. Данный метод измерений позволяет получить достаточно точные значения компонентов токов только в первом режиме, когда потенциал центра высок и используемые значения  $U_{k_1}$  и  $U_{k_2}$  не влияют существенно на энергию ионов. Во втором же режиме разряда, когда потенциал центра понижается до нескольких вольт, используемые значения  $U_{k_1}$  и  $U_{k_2}$  сильно изменяют энергию осевых ионов. Однако доля последних в общем ионном токе, идущем в центральную часть катода, составляет несколько процентов; поэтому ошибка в измерении ионного тока, поступающего в центральную часть катода  $\sim 20-25\%$ . Причем значения ионного тока получаются завышенными, а электронного — заниженными. Поскольку при определении  $\gamma_{\text{ср}}$  и  $\Gamma$  нас интересует полный ионный ток на катод, в котором доля ионов, идущих в центральную часть катода, составляет  $\sim 50\%$ , ошибка в определении  $\gamma_{\text{ср}}$  и  $\Gamma$  для второго режима разряда будет также  $\sim 25\%$ . При давлениях  $< 10^{-6}$  тор ошибка в определении  $\Gamma$  возрастает. При измерениях контроль состава газа производился с помощью прибора ИПДО-1. Вакуумная система откачивалась ионным (электроразрядным) насосом, что исключало образование пленок, сильно влияющих на величину  $\gamma$ .

### Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 2 приведены кривые  $\gamma_{\text{ср}} = f(H)$  для катодов из молибдена при разряде в разных газах (He, Ne, Ar, N<sub>2</sub>).

При слабых магнитных полях, когда разрядный ток  $I_a$  с ростом  $H$  растет (первый режим разряда),  $\gamma_{\text{ср}}$  мало меняется с увеличением магнитного поля. Дальнейшее увеличение  $H$  приводит к резкому уменьшению разрядного тока  $I_a$  и переходу разряда во второй режим, который характеризуется сильным уменьшением падения потенциала по оси. Ионизация вблизи оси и энергия осевых ионов уменьшаются, это приводит к уменьшению  $\gamma_{\text{ср}}$ .

Из рис. 2 видно, что  $\gamma_{\text{ср}}$  зависит от рода ионов газа. С увеличением массы ионов инертного газа  $\gamma_{\text{ср}}$  уменьшается. Это совпадает с результатами других работ [7—9]. В таблице 1 приведены измеренные нами значения  $\gamma_{\text{ср}}$  для ионов разных газов при слабых  $H$  и значения  $\gamma$ , полученные в работах [7—9] для энергий ионов 200—2000 эв.

Из рис. 2 видно, что увеличение анодного потенциала при слабых  $H$  приводит к росту  $\gamma_{\text{ср}}$ , при сильных же магнитных полях значение  $\gamma_{\text{ср}}$  не зависит от  $V_a$ . Такой ход зависимости объясняется тем, что при слабых магнитных полях (I режим) с увеличением  $V_a$  осевое падение потенциала и энергия ионов, образовавшихся вблизи оси, растут. При

переходе разряда во второй режим (сильные  $H$ ) осевое падение потенциала уменьшается и мало изменяется с ростом  $V_a$ ;  $\gamma_{\text{ср}}$  при этом уменьшается и не зависит от  $V_a$ .

На рис. 3 приведены зависимости  $\gamma_{\text{ср}}$  от давления газа. Уменьшение  $\gamma_{\text{ср}}$  при уменьшении давления газа при слабых магнитных полях

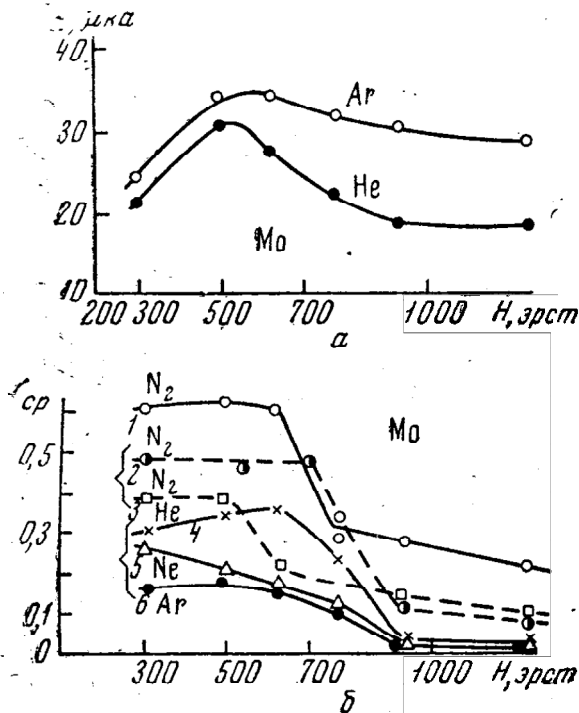


Рис. 2. Зависимость  $I_a=f(H)$  и  $\gamma_{\text{ср}}=f(H)$  в разных газах. а — при  $V_a=2000$  в,  $p=3 \cdot 10^{-6}$  тор; б — 1 —  $V_a=2000$  в,  $p=3 \cdot 10^{-6}$  тор; 2 —  $V_a=3000$  в,  $p=5 \cdot 10^{-7}$  тор; 3 —  $V_a=2000$  в,  $p=5 \cdot 10^{-7}$  тор; 4, 5, 6 —  $V_a=2000$  в,  $p=3 \cdot 10^{-6}$  тор

риерные части катода также увеличивается. Это приводит к очистке периферийной части катодной поверхности от адсорбированного газа и к независимости  $\gamma_{\text{ср}}$  от давления.

Для определения зависимости  $\gamma_{\text{ср}}$  от рода металла катода использовалась схема, представленная на рис. 1, в. В центре катода  $K_2$  имелось отверстие  $\phi_2=4$  мм. За катодом  $K_2$  располагалась пластина  $P_2$ , на которой укреплялись различные металлы. Пластина  $P_2$  вплотную прилегала к катоду  $K_2$  и могла поворачиваться вокруг оси  $O'O'$ , при этом в отверстии катода  $K_2$  устанавливался нужный металл. За отверстием  $\phi_1=2$  мм в центре катода  $K_1$ , находился коллектор  $K$ , позволяющий измерять токи, идущие в центр катода  $K_1$ .

Пусть ионный ток, идущий в центр катода  $K_1$  при различных металлах, помещенных в центре катода  $K_2$ , одинаков. Тогда относительный коэффициент вторичной эмиссии  $\gamma_{\text{отн}}$  равен

$$\gamma_{\text{отн}} = \frac{\gamma_{M_1}}{\gamma_{M_2}} = \frac{I_{ek_1}}{I_{ek_2}},$$

где  $I_{ek_1}$  — электронный ток на коллектор, поступающий из центральной части катода  $K_2$  с помещенного там заданного металла;  $I_{ek_2}$  — то же для другого металла.

Таким образом, для определения относительного коэффициента  $\gamma_{\text{отн}}$  необходимо измерить электронные токи на коллектор при разных металлах в отверстии катода  $K_2$  и при постоянных значениях ионных то-

Таблица 1

газ	He <sup>+</sup>	Ne <sup>+</sup>	Ar <sup>+</sup>
Mo			
$\gamma_{\text{ср}}$	0,32	0,27	0,19
$\gamma$	0,30 [9]	0,25 [9]	0,10 ÷ ÷0,16 [8]
	0,26 ÷ ÷0,44 [7]	0,26 [8] ÷ ÷0,40 [7]	0,12 [9]

может быть объяснено изменением толщины слоя газа, который адсорбируется на периферийных частях катода. Работа выхода электронов с этой части катодной поверхности также будет изменяться с изменением давления. При увеличении  $H$  (II режим разряда) основная область ионизации приближается к катоду и угол падения ионов на катод растет. Ионный ток на перифе-

ков. Перед измерениями каждый металл обезгаживался бомбардировкой ионами  $He^+$  и  $Ne^+$  в одинаковых условиях. Все измерения проводились в смеси газов 61,4%  $He$  + 38,3%  $Ne$  + 0,2%  $N_2$  + 0,1% ( $Ar, H_2O, CO_2$ ) при парциальных давлениях  $p_{He} = 3,5 \cdot 10^{-6}$  и  $p_{Ne} = 2,2 \cdot 10^{-6}$  тор. В качестве контрольного металла использовался  $Mo$ . В таблице 2 приведены значения коэффициентов вторичной эмиссии для разных металлов относительно  $Mo$  ( $\gamma_{ср.отн}$ ), а также соответствующие значения работы выхода  $\phi$  и значения  $\phi_{отн}$  по отношению к  $Mo$ .

Из таблицы 2 видно, что  $\gamma_{ср}$  несколько различно для материалов с разной работой выхода. Наибольшее значение  $\gamma_{ср}$  получается в случае алюминия, у которого работа выхода имеет наименьшее значение.

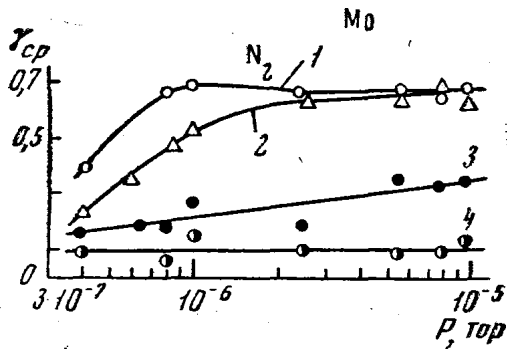


Рис. 3. Зависимость  $\gamma_{ср} = f(p)$ . Параметр — напряженность магнитного поля.  $V_a = 2000$  в,  $H: 1 = 310, 2 = 620, 3 = 930, 4 = 1240$  эрст

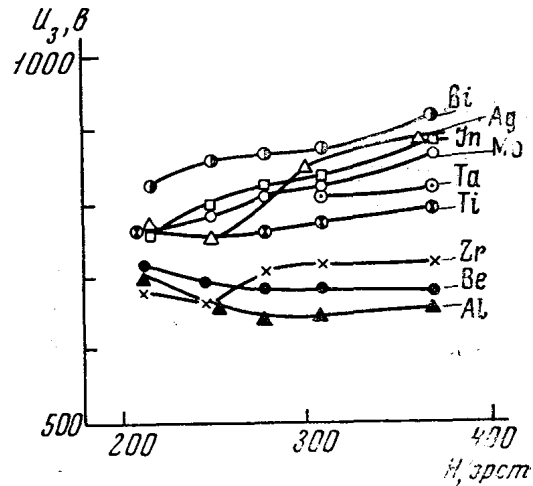


Рис. 4. Зависимость потенциала зажигания от  $H$  для различных материалов в центральной части катода

На рис. 4 приведены кривые зажигания, снятые для различных материалов, установленных в центре катода  $K_2$ .

Таблица 2

Металл	$\gamma_{отн} = \frac{\gamma_M}{\gamma_{Mo}} \pm 0,04$			$\phi_{отн} = \frac{\phi_M}{\phi_{Mo}}$	$\phi, \text{ в}$ [10,11]
	$V_a = 1000 \text{ в}$ $H = 260 \text{ эрст}$	$V_a = 2000 \text{ в}$ $H = 300 \text{ эрст}$	$V_a = 3000 \text{ в}$ $H = 300 \text{ эрст}$		
Ве-технич. пластинка	0,76	1,10	1,28	0,77—0,91	3,4—3,92
Al	1,59	1,56	1,53	0,69—0,99	2,98—4,25
Ti	1,12	1,13	1,15	0,91	3,95
Cu	1	1,03	0,99	1—1,01	4,35—4,4
Zr	1,3	1,51	1,64	0,83—0,95	3,60—4,1
Nb	1,02	1,15	1,04	0,92	3,99
Mo	1	1	1	1	4,33
Ag-0,999	0,87	0,96	0,95	0,99—1,03	4,31—4,45
In	0,93	0,90	0,91	0,95	4,09
Ta-технич. листов. прокат	1,14	1,21	1,20	0,95—0,96	4,1—4,12
W-технич. листов. прокат 0,98	1,02	1,02	1,06	1,01—1,06	4,38—4,6
Re-технич. проволока 0,99	0,92	1	1,04	1,06—1,15	4,6—5
Bi	0,92	1,02	0,92	1,01—1,06	4,4—4,6

Потенциал зажигания с увеличением  $\gamma_{\text{ср}}$  уменьшается. Аналогичные зависимости для центральной части катода из Al, Cu, Mo, Ta были получены в работе [4]. Влияние материала центральной части на зажигание разряда говорит о том, что в развитии лавины принимают участие в основном электроны, вышедшие из центральной части катода.

Из уравнения (2) видно, что, измеряя описанным выше методом ионный компонент тока, идущего на катод в I режиме разряда, можно определить значение эффективного коэффициента вторичной эмиссии  $\Gamma$ .

Таблица 3

$p, \text{ тор}$	$\Gamma$
$1 \cdot 10^{-5}$	0,13
$5,6 \cdot 10^{-6}$	0,056
$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,041

В таблице 3 приведены значения  $\Gamma$ , вычисленные по уравнению (2) для различных давлений газа при разряде в воздухе для Mo-катодов ( $V_a=2000 \text{ в}$ ,  $H=300 \text{ эрст}$ ).

С уменьшением давления вероятность столкновения и ухода электронов от оси уменьшается, это приводит к уменьшению  $\Gamma$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Redhead P. A., *Canad. J. Physics*, 37, 1260, 1959; 36, No. 3, 255, 1958.
2. Knauer W. *J. Appl. Phys.*, 33, No. 6, 2093, 1962.
3. Исакаев Э. Х., Рейхрудель Э. М. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 3, 124, 1966.
4. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В., Баберцян Р. П. «Радиотехника и электроника», 11, 2095, 1966.
5. Kenneth B. Weag. *J. Appl. Phys.*, 38, No. 4, 1936, 1967.
6. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В., Нгуен Хыу Ти. *Contrib. Papers on the 8-th Intern. Confer. on Phenom. in Ionized Gases*, Vienna, 1967, p. 187.
7. Арифов У. А., Рахимов Р. Р., Джуракулов Х. «Радиотехника и электроника», 8, № 2, 299, 1963.
8. Арифов У. А., Рахимов Р. Р. ДАН УзССР, № 12, 15, 1958; «Изв. АН УзССР», сер. физ.-мат. наук, № 5, 1958.
9. Hagstrum, Homer D. *Phys. Rev.*, 104, 672, 1959.
10. Физико-химические свойства элементов. Справочник, 1965.
11. Фоменко В. С. Эмиссионные свойства элементов и химических соединений. Справочник, 1964.

Поступила в редакцию  
24.1 1969 г.

Кафедра  
общей физики для биологов