

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 3 — 1973

УДК 537.525

Э. М. РЕЙХРУДЕЛЬ, Г. В. СМИРНИЦКАЯ, Л. Р. КУРБАНОВА

ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА КАТОДНОГО РАСПЫЛЕНИЯ В РАЗРЯДЕ С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ

Исследуется распыление катодов в разряде с осциллирующими электронами при низких давлениях в инертных газах. Измерено распределение эффективного коэффициента катодного распыления N_3 по радиусу катодов из Ag, Mo, Ta, Ti, Ni, в Ag, He, Xe. Получена зависимость от параметров разряда. Оценена роль захвата ионов в разных областях катодов.

Одним из процессов, определяющих механизм откачного действия в разряде с осциллирующими электронами, является распыление катодов, бомбардируемых ионами газа. В работе [1] рассмотрены результаты измерения эффективного коэффициента катодного распыления N_3 в таком разряде в азоте.

Величина N_3 определяется истинным распылением металла (N); захватом части ионов (N_3), бомбардирующих катод; напылением металла (N_n) с противоположного катода и обратной диффузией (N_d) захваченных атомов. Она может быть представлена в виде алгебраической суммы нескольких компонентов:

$$N_3 = N - N_n + N_d - N_3 = \frac{n_{ap} - n_{an}}{n_i} + \frac{\Delta m_d - \Delta m_3}{m_a n_i}, \quad (1)$$

где n_i — число ионов, падающих на поверхность катода в 1 сек, n_{ap} и n_{an} — числа атомов металла, распыленного ионами газа, и атомов, напыленных с противоположного катода в 1 сек, Δm_3 и Δm_d — масса ионов газа, захваченных и десорбированных катодом в 1 сек, m_a — масса атома металла.

В [1] было показано, что N_3 распределен неравномерно по радиусу катода. При откачке неинертных газов существенную роль играет хемисорбция. В случае инертных газов откачка происходит в основном за счет захвата газовых атомов электродами [2, 3].

В [4] показано, что примерно 80% аргона улавливается катодом и около 20% — анодом. Джемсен [5] объясняет возможность захвата атомов инертных газов анодом тем, что сюда поступают быстрые атомы, упруго рассеянные после нейтрализации ионов вблизи поверхности като-

дов. Доля упруго рассеянных катодом атомов инертных газов зависит от соотношения масс бомбардирующих ионов и атомов металла [6].

В настоящей работе исследуется распределение N_0 по радиусу катода в зависимости от параметров разряда. Измерения производились с инертными газами (Ag, Xe, He); катоды были из Mo, Ag, Ta, Ti, Ni и нержавеющей стали.

Результаты экспериментов и их обсуждение

При низких давлениях газов ($p < 10^{-4}$ мм рт. ст.) и соответственно малых разрядных токах процесс распыления катодов идет медленно, и измерения потребовали бы много времени, в течение которого сохранение одинаковых условий в разряде было бы затруднено. Поэтому была сконструирована разрядная трубка, позволяющая вести параллельные измерения с катодами из разных материалов.

На рис. 1 показана схема экспериментальной трубки, содержащей восемь разрядных промежутков. Один из катодов каждого промежутка

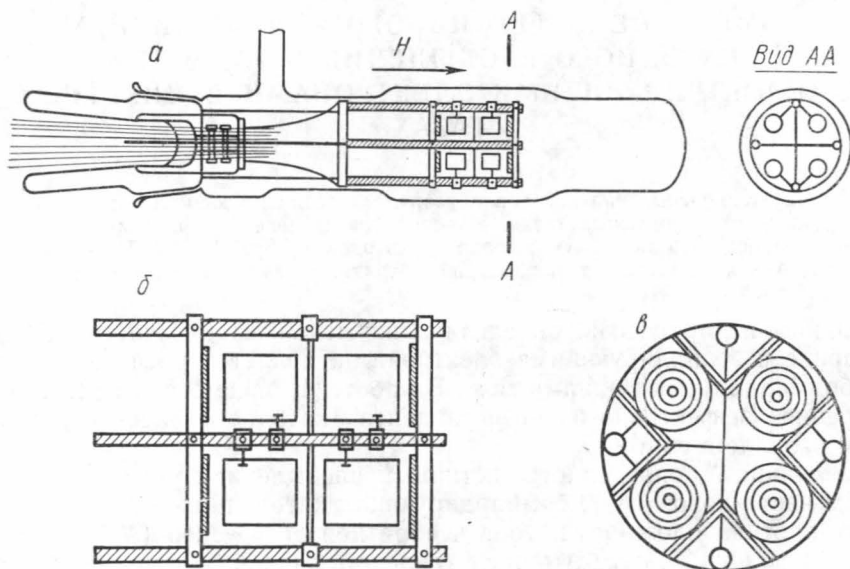


Рис. 1. Схема экспериментальной трубки с восемью разрядными промежутками: *a* — схема трубки со шлифом, *б* — расположение электродов восьми промежутков, *с* — катодная кассета с помещенными в нее катодами из разных металлов и разделенными на концентрические кольца ($r_a = 10$ мм, $r_k = 10$ мм, расстояние от катода до центра разрядного промежутка $d = 15$ мм)

был разделен на пять концентрических колец, ширина которых 2—2,5 мм. Катоды из определенного металла закладывались в специальные кассеты; разрядные промежутки для исключения взаимного напыления разделялись друг от друга экранами (рис. 1, *в*). Противоположный катод всех промежутков был из молибдена. Аноды промежутков были разделены по электрической схеме, и разрядные токи в промежутках измерялись и контролировались отдельно.

На рис. 2, *a* приведены значения N_0 для разных металлов, бомбардируемых ионами Ag в разряде при двух значениях магнитного поля H . При слабых H (330 эрст) и $p > 10^{-4}$ мм рт. ст. N_0 имеет максимальное

значение в центре катода и уменьшается к его периферии. Это объясняется тем, что наряду с распылением катода одновременно происходит и напыление на него металла с противоположного катода. При данных условиях в разряде плотность тока в центральной части катода велика (рис. 2, б) и напыляющийся сюда металл сбивается бомбардирующими ионами. На периферийных же частях катодов плотность ионного тока

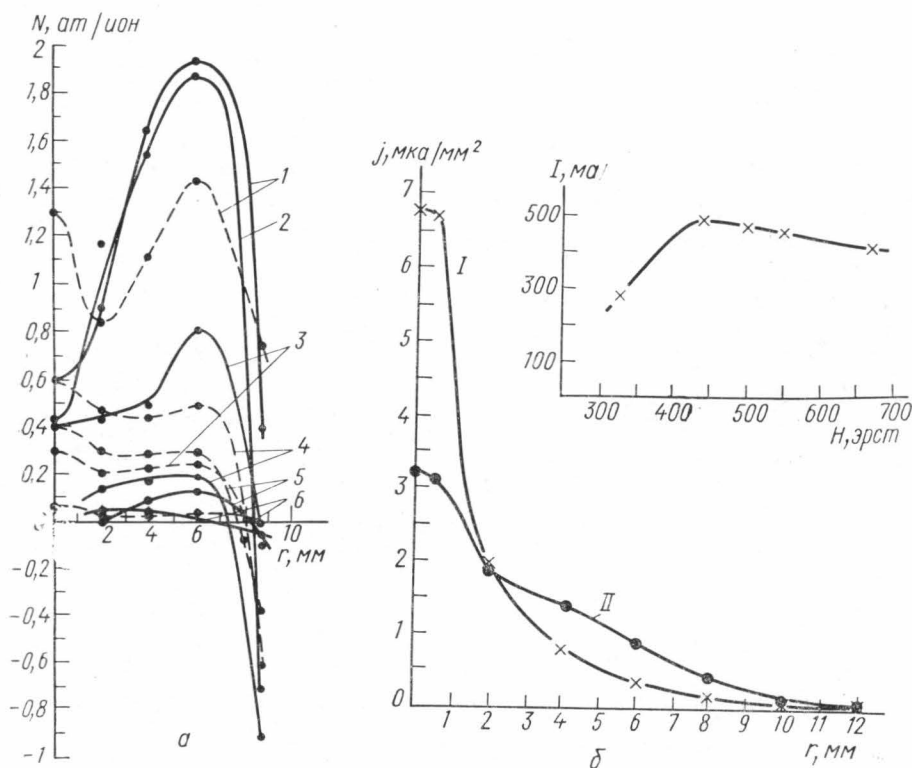


Рис. 2. а — зависимость $N(r)$ для разных металлов при различных значениях магнитного поля H , $V_a = 1,5$ кв, $p = 2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., прямая — 600 и пунктир — 330 эрс. 1 — Ag, 2 — Ni, 3 — Ti, 4 — нержавеющая сталь, 5 — Mo и 6 — Ta; б — зависимость разрядного тока I от H и распределение плотности тока j по r , I — $j(r)$ при $H = 330$ эрс и II — $j(r)$ при 600 эрс

мала, количество распыляемых атомов металла меньше количества напыляемых с противоположного катода. Это приводит к отрицательному значению N_a .

С увеличением H все большее число электронов удерживается в объеме, электрическое поле вдоль оси z ослабляется, энергия ионов, бомбардирующих центральную часть катода, а также ионный ток на нее уменьшаются, плотность тока на периферийные части увеличивается. Это сопровождается уменьшением N_a в центре и возрастанием на некотором расстоянии от него (рис. 2, а, кривые для $H = 600$ эрс).

На рис. 3 дана зависимость $N_a(r)$ для двух значений давления. При давлении $p < 10^{-4}$ мм рт. ст. основная ионизация происходит в тонком кольцевом слое около поверхности анода, ионы начинают бомбардировать в основном периферийные участки катода. Доля ионов больших энергий, идущих в центральную часть катода, уменьшается, поэтому N_a здесь меньше.

На рис. 4 представлены кривые $N_3(r)$ для Ag, бомбардируемого ионами различных газов (Ag, Xe, He, N₂). Из рисунка видно, что $N_3(r)$ растет с увеличением массы бомбардирующих ионов. Это можно объяснить увеличением импульса, передаваемого ионом, вследствие увеличения его массы и вместе с тем увеличением энергии, связанным с изменением распределения потенциала в разрядном промежутке (рис. 4, б).

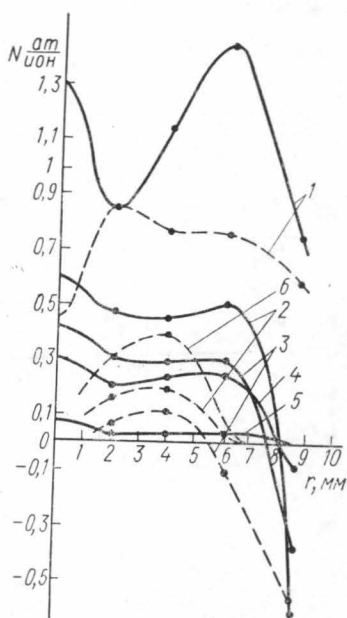


Рис. 3. Зависимость $N(r)$ для разных металлов при различных значениях $p \cdot V_a = 1,5$ кв, $H = 330$ эрст Ag; прямая — $p = 2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. и пунктир — $p = 3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. 1 — Ag, 2 — нержавеющая сталь, 3 — Mo, 4 — Ti, 5 — Ta, 6 — Ni

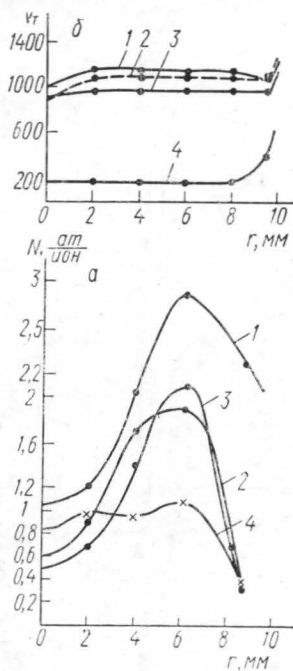


Рис. 4. Зависимость $N(r)$ для Ag в разных газах, а: $p = 2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., $V_a = 1,5$ кв, $H = 600$ эрст. 1 — Xe, 2 — N₂, 3 — Ag; 4 — He. б: распределение потенциала внутри разрядного промежутка в тех же условиях для разных газов

При разряде в Xe $N_3(r)$ в центральной части катода сильнее понижается, чем при разряде в He.

Для объяснения особенностей кривых $N_3(r)$ рассмотрим влияние различных процессов (формула (1)) на величину эффективного коэффициента катодного распыления с учетом соотношения масс, бомбардирующих ионов и атомов, бомбардируемого металла.

Расчет N_3 произведен с учетом закона косинуса и соотношения площадей катодных колец. В таблице приведены эффективные коэффициенты катодного распыления для ячеек с катодами из Mo в разрядах с аргоном и ксеноном и катодом из серебра в разряде с гелием. Из таблицы видно, что в случае аргона $N_3(r)$ меняется с расстоянием от центра катода, причем для центрального штифта он близок по величине к чистому коэффициенту распыления N . Например, для четвертого кольца N_3 приобретает отрицательный знак, т. е. преобладает захват ионов газа и напыление металла с противоположного катода.

Большие значения N , полученные для последнего кольца катодов в Ag ($N=1$) и в Xe ($N=6$), объясняются тем, что поверхность этого кольца не является чисто металлической; она покрыта слоем, состоящим из металла, насыщенного газами. Этот слой связан с кристаллической структурой основного металла катода, он легко стирается, отщепляется,

	$S, \text{ см}^2$ 10^2	$I_i, \text{ а}$ 10^6	$n_i, \text{ сек}^{-1}$ 10^{-14}	$m_i, \text{ г} \cdot \text{сек}^{-1}$ 10^8	$N, \text{ ат}$ ион	$n_a, \text{ сек}^{-1}$ 10^{-14}	$m_a, \text{ г} \cdot \text{сек}^{-1}$ 10^8	$n_H, \text{ сек}^{-1}$ 10^{-12}	$m_H, \text{ г} \cdot \text{сек}^{-1}$ 10^{10}	$\Delta t, \text{ г} \cdot \text{сек}^{-1}$ 10^3	$N_{\text{э}}, \text{ ат}$ ион
№ кольца											
газ — аргон; материал катода — Мо; H — 330 эрст											
0	3	46	2,84	1,88	0,45	1,28	-2	1,0	1,58	-1,66	$0,42 \pm 0,07$
1	25	200	12,6	8,3	0,45	5,7	-9	9,3	1,44	-4,44	$0,31 \pm 0,05$
2	50	85	5,4	3,6	0,45	2,4	-3,3	18,6	29,0	-1,66	$0,29 \pm 0,05$
3	98	39	2,46	1,62	0,45	1,1	-1,17	36	57	-0,56	$0,30 \pm 0,05$
4	135	8	0,5	0,33	1,0	0,5	-0,79	50	79	+0,28	$0,37 \pm 0,06$

газ — ксенон; материал катода — Мо; H — 330 эрст

0	3	40	2,5	5,45	1,4	3,5	-5,6	3,3	5,2	-1,36	$0,37 \pm 0,06$
1	25	185	11,6	25,0	1,4	17,5	-27,0	27,0	43,5	-5,5	$0,32 \pm 0,05$
2	50	87	5,4	12,0	1,4	7,6	-12,0	55,0	87,0	-5,0	$0,60 \pm 0,1$
3	98	31	1,94	4,2	1,4	2,7	-4,3	110,0	172,0	-3,6	$1,25 \pm 0,2$
4	135	6	0,38	0,8	6	2,3	3,6	148,0	235,0	0,45	$0,12 \pm 0,02$

газ — гелий; материал катода — Ag; H — 600 эрст

0	3	16	1,1	0,07	0,9	0,99	-1,78	0	0	-1,8	$0,92 \pm 0,15$
1	25	88	5,5	0,36	0,9	4,96	-8,9	0	0	-7,6	$0,8 \pm 0,13$
2	50	85	5,3	0,35	0,9	4,75	-8,5	0	0	-8,2	$0,8 \pm 0,13$
3	98	88	5,5	0,36	0,9	4,95	-8,9	0	0	-7,8	$0,82 \pm 0,13$
4	135	54	3,4	0,22	0,9	3,05	-5,5	0	0	-2,4	$0,25 \pm 0,04$

S — площадь кольца, I_i — ток на кольцо, n_i — число ионов, бомбардирующих в сек, m_i — масса бомбардирующих ионов в сек, N — истинный коэффициент катодного распыления; n_a и m_a — число и масса выбитых атомов металла в сек; n_H и m_H — число и масса атомов, напыленных с противоположного катода; Δt — измеренное изменение массы катода в сек; $N_{\text{э}}$ — эффективный коэффициент катодного распыления, m_{Ag} , m_{Xe} , m_{He} , m_{Mo} , m_{Ag} — массы атомов, равные соответственно $6,66 \cdot 10^{-23}$ г, $2,18 \cdot 10^{-22}$ г, $6,7 \cdot 10^{-24}$ г, $1,6 \cdot 10^{-22}$ г и $1,8 \cdot 10^{-22}$ г. (Напряжение на аноде $V_a = 1500$ в, $p = 2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.; длина анода $l_a = 20$ мм, радиус анода $r_a = 10$ мм, расстояние от центра промежутка до катода $d = 15$ мм.)

а когда на него попадает пучок ионов, он, распыляясь, выделяет большое количество газа. Последнее в наших опытах было порядка 10^{16} молекул в 1 сек.

В случае бомбардировки ионами Хе $N_{\text{э}}$ в центре уменьшается. Это связано с тем, что масса ионов Хе больше, чем масса атомов Мо; поэтому увеличивается число и общая масса ионов, захваченных решеткой металла.

В случае бомбардировки катодов ионами Не вследствие малости массы ионов Не компоненты $N_{\text{з}}$, $N_{\text{н}}$, $N_{\text{д}}$ становятся малыми, и $N_{\text{э}}$ почти на всей поверхности катода, кроме последнего (периферийного) кольца, приблизительно равен истинному коэффициенту катодного распыления.

В заключение следует сделать некоторые выводы.

Эффективный коэффициент катодного распыления в разряде с осциллирующими электронами в инертных газах распределен неравно-

мерно по радиусу катода и зависит от параметров разряда (p , H , V_a).

При увеличении H и уменьшении p область больших значений $N_3(r)$ смещается от центра к средним областям катода. Максимальное значение $N_3(r)$ возрастает с увеличением массы бомбардирующих ионов.

Опыты с различными металлами катодов показали увеличение N_3 по мере заполнения d -оболочки атомов металла. Большие значения N_3 получены для Ag, Cu, Ni. Полученная зависимость аналогична известной из литературы зависимости $N(m_2)$.

Полученные результаты необходимо учитывать при рассмотрении механизма откачного действия разряда с осциллирующими электронами и при конструировании ионных насосов.

Авторы выражают благодарность Л. Н. Ерехинской за большую помощь при организации экспериментов и при оформлении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В., Курбанова Л. Р. «Изв. АН СССР», серия физич., **35**, № 2, 414, 1971.
2. Lafferty J. M., Vanderslice T. N. «Proc. IRE», **49**, No. 7, 1136, 1961.
3. Bächler W., Hennig H. Proc. 4-th Intern. Vac. Congr. Manchester, 1968, 365; Bächler W. «Vakuum-Technik», **17**, No. 3, 59, 1968.
4. Andrev D., Sethna D. R., Weston I. F. Proc. 4-th Intern. Vac. Congr. Manchester, 1968, 337; Andrev D. «Brit. J. Appl. Phys.», **D-2**, No. 11, 1609, 1969.
5. Jepsen R. L. Proc. 4-th Int. Vac. Congr. Manchester, 1968, 327.
6. Snoek C. G., Kistemaker J. «Adv. in Electr. and Electr. Phys.», **21**, 67, 1965.

Поступила в редакцию
10.8 1971 г.

Кафедра общей физики
для естественных факультетов.