

- [5] Новикова С. И., Абрикосов Н. Х. ФТТ, 1963, т. 5, № 7, с. 1913—1919.
 [6] Smith T. F., Birch J. A., Collins J. G. J. Phys. C, 1976, v. 9, N 24, p. 4375—4382.
 [7] Тхорик Ю. А., Хазан Л. С. Пластическая деформация и дислокации несоответствия в гетерозитаксиальных системах. Киев: Наукова думка, 1983. 304 с.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
 Физический факультет

Поступило в Редакцию
 18 декабря 1986 г.

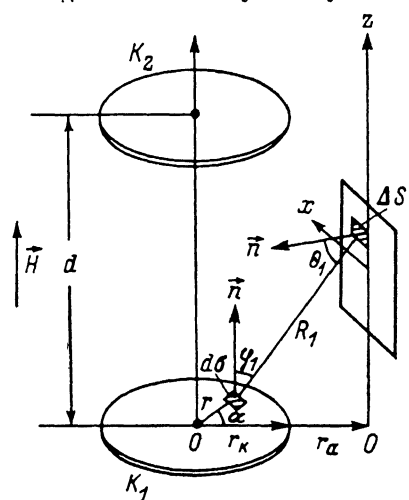
УДК 537.523.74

Журнал технической физики, т. 58, в. 2, 1988

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПЫЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПО ПОВЕРХНОСТИ АНОДА ПРИ КАТОДНОМ РАСПЫЛЕНИИ В РАЗРЯДЕ С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Г. В. Смирницкая, Е. В. Яхшиева

Теоретически и экспериментально определяются распределение напыленного металла по поверхности анода и коэффициент катодного распыления в разряде с осциллирующими электронами. Расчет проведен с учетом реального распределения потенциала и ионного тока по поверхности катода в горящем разряде для давлений, при которых длина свободного пробега распыляемых частиц больше размеров разрядного промежутка. Считается, что распыление подчиняется закону косинуса. Установлено удовлетворительное согласие экспериментов с расчетами при разряде в разных газах и с разными материалами катодов. Результаты представляют интерес в связи с использованием разряда в магнито-разрядных насосах [1] и для получения тонких пленок.



1. Вывод формулы распределения напыленного вещества по поверхности анода

На рис. 1 приведена схема ячейки разряда с осциллирующими электронами с двумя катодами K_1 и K_2 радиуса r_k и цилиндрическим анодом радиуса r_a . Выделим на катоде произвольную площадку $d\sigma$ ($d\sigma = r dr d\alpha$). Число ионов, попадающих на $d\sigma$ в единицу времени, равно

$$n_i = \frac{j(r)}{e} d\sigma, \quad (1)$$

Рис. 1. Схема разрядной ячейки.

где $j(r)$ — плотность ионного тока в данной точке катода, e — заряд электрона.

Число частиц, распыляемых с площадки $d\sigma$ в единицу времени, равно

$$\frac{j(r)}{e} k d\sigma,$$

где k — коэффициент катодного распыления. Считая, что угловое распределение вещества, распыляемого с катода, подчиняется закону косинуса, получаем число частиц ΔN , попадающих в единицу времени с катода K_1 на единицу произвольной площадки ΔS , выделенной на поверхности анода и находящейся от $d\sigma$ на расстоянии R_1

$$\frac{\Delta N}{\Delta S} = \frac{k}{e} j(r) d\sigma \frac{\cos \varphi_1 \cos \theta_1}{2\pi R_1^2}, \quad (2)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{z}{R_1}, \quad \cos \theta_1 = \frac{(r_a - r \cos \alpha)}{R_1},$$

$$R_1^2 = (r_a - r \cos \alpha)^2 + (r \sin \alpha - x)^2 + z^2.$$

Интегрируя по всей поверхности катода, получаем

$$\left(\frac{\Delta N}{\Delta S}\right)_1 = \frac{k}{e} \int_0^{r_k} j(r) r dr \int_0^\pi \frac{\cos \varphi_1 \cos \theta_1}{\pi R_1^2} d\alpha. \quad (3)$$

Аналогичное выражение получаем для частиц, поступающих на ΔS со второго катода

$$\left(\frac{\Delta N}{\Delta S}\right)_2 = \frac{k}{e} \int_0^{r_k} j(r) r dr \int_0^\pi \frac{\cos \varphi_2 \cos \theta_2}{\pi R_2^2} d\alpha, \quad (4)$$

где

$$\cos \varphi_2 = \frac{(d - z)}{R_2}, \quad \cos \theta_2 = \frac{(r_a - r \cos \alpha)}{R_2},$$

$$R_2^2 = (r_a - r \cos \alpha)^2 + (r \sin \alpha - x)^2 + (d - z)^2.$$

Для упрощения расчета расположим площадку ΔS так, чтобы $x = 0$. Последнее не отразится на общности решения.

Интегрируя по α , из уравнения (3) получаем

$$\left(\frac{\Delta N}{\Delta S}\right)_1 = \frac{k \cdot z \cdot r_a}{e} \int_0^{r_k} \frac{[(r_a^2 + r^2 + z^2) - 2r_a^2]}{\{(r_a^2 + r^2 + z^2)^2 - 4r_a^2\}^{3/2}} j(r) r dr. \quad (5)$$

Аналогичное выражение получаем из (4) для второго катода

$$\left(\frac{\Delta N}{\Delta S}\right)_2 = \frac{k(d - z)r_a}{e} \int_0^{r_k} \frac{[(r_a^2 + r^2 + (d - z)^2) - 2r_a^2]}{\{(r_a^2 + r^2 + (d - z)^2)^2 - 4r_a^2\}^{3/2}} j(r) r dr. \quad (6)$$

Для определения $\Delta N/\Delta S$ необходимо знать функцию распределения ионного тока по поверхности катода $j(r)$. В работе [2] выведено соотношение, дающее распределение ионного тока по поверхности катода для давлений, при которых можно пренебречь соударениями ионов с атомами газа. Расчет проведен на основе решения уравнений движения ионов с учетом ионизации электронами в разрядном промежутке. Получено выражение для плотности ионного тока, идущего в центральную часть поверхности катода радиуса Δr_k , где Δr_k определяется разбросом начальных скоростей ионов и имеет величину $\sim 10^{-2}$ мм, и для остальной части катода $r > \Delta r_k$

$$j(r) = \frac{4e\nu_i n_e l_a}{\pi^2} \left(\frac{r_a^2}{r^2} - 1\right)^{1/2}, \quad (7)$$

где ν_i — частота ионизации электронами при данном давлении газа, n_e — плотность электронов, l_a — длина анода.

Из (5) и (7) имеем

$$\left(\frac{\Delta N}{\Delta S}\right)_1 = \frac{4k\nu_i n_e l_a r_a z}{\pi^2} \int_0^{r_k} \frac{(r_a^2 + z^2 - r^2)(r_a^2 - r^2)^{1/2} dr}{\{r^4 + 2(z^2 - r_a^2)r^2 + r_a^4 + 2r_a^2 z^2 + z^4\}^{3/2}}. \quad (8)$$

Аналогичное выражение получаем для $(\Delta N/\Delta S)_2$.

Для определения количества вещества, поступающего в различные точки анода (координаты z) с разных радиусов поверхности катода r интеграл

$$F = \int_0^{r_k} \frac{(r_a^2 + z^2 - r^2)(r_a^2 - r^2)^{1/2} dr}{\{r^4 + 2(z^2 - r_a^2)r^2 + r_a^4 + 2r_a^2 z^2 + z^4\}^{3/2}} \quad (9)$$

вычислялся на машине ЕС-10-10 для следующих параметров ячейки: $r_a = 14$, $r_k = 13$, $z = 15 \div 27$ мм с шагом по $r = 1$ мм и по $z = 3$ мм. В табл. 1 приведены результаты вычисления интеграла (9) для разных координат анода z и разных значений r_k .

Таблица 1

$r_k, \text{мм}$	$z, \text{мм}$				
	15	18	21	24	27
1	0.00008	0.00005	0.00003	0.00002	0.00002
2	0.00016	0.00010	0.00007	0.00005	0.00003
3	0.00023	0.00015	0.00010	0.00007	0.00005
4	0.00031	0.00020	0.00013	0.00009	0.00006
5	0.00038	0.00025	0.00016	0.00011	0.00008
6	0.00044	0.00029	0.00019	0.00013	0.00009
7	0.00050	0.00033	0.00022	0.00015	0.00010
8	0.00056	0.00036	0.00024	0.00017	0.00012
9	0.00061	0.00040	0.00026	0.00018	0.00013
10	0.00065	0.00042	0.00028	0.00019	0.00014
11	0.00068	0.00044	0.00030	0.00020	0.00014
12	0.00071	0.00046	0.00031	0.00021	0.00015
13	0.00072	0.00047	0.00032	0.00022	0.00015

Используя значения табл. 1 и вычисляя zF , получаем распределение напыленного вещества по поверхности анода, поступающего из различных радиусов одного и двух катодов (рис. 2). Из рис. 2 видно, что материал, поступающий на анод с одного катода, распределен неравномерно по длине анода, причем неравномерность увеличивается с ростом радиуса кольца катода, с которого распыляется металл. Напыление вещества с двух противоположно расположенных катодов выравнивает распределение напыленного металла по длине анода.

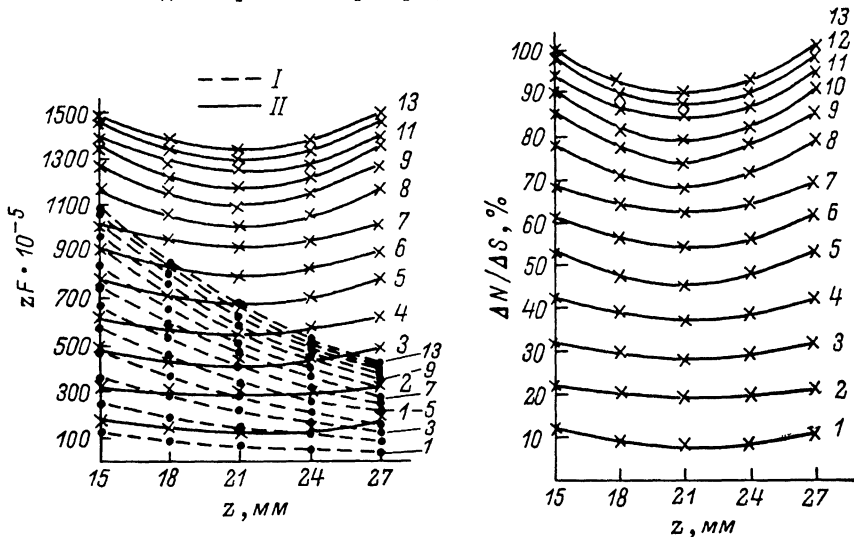


Рис. 2. Распределение по поверхности анода вещества zF , поступающего из различных радиусов одного (I) и двух (II) катодов.

Рис. 3. Распределение по длине анода материала (в %), напыленного из различных радиусов с двух катодов.

На рис. 3 приведено распределение (в %) материала по длине анода, напыленного из различных радиусов катодов. Неравномерное распределение плотности ионного тока по поверхности катода приводит к тому, что основная доля металла (~60 %) поступает на анод из центральной области катода (~6 мм). Уменьшение плотности ионного тока на краях катода сопровождается уменьшением доли материала, напыленного на анод из этих областей катода.

2. Сравнение теории с экспериментом

Решение уравнения (8) позволяет определить $\Delta N / \Delta S$, если известен коэффициент катодного распыления k , а также из измерений $\Delta N / \Delta S$ вычислить значения k .

Измерения $\Delta N/\Delta S$ проводились при анодном напряжении $V_a=2.5$ кВ, $Hr_a=385$ Э·см, $v_a=2.7$ см при разряде в Аг и Кг для катодов из Co, Ni, Dy, Gd. Стеклоподложки располагались у поверхности анода за щелевыми прорезями в нем. Методика получения пленок описана в работе [3]. Из измерений толщины пленок, считая, что молекулы напыленного металла имеют плотную упаковку, вычислялось среднее количество молекул металла катода, поступающих на единицу площади анода в единицу времени при данных значениях параметров разряда.

Значения n_e и v_i вычислялись из уравнений, приведенных в работе [4]. При указанных выше параметрах разряда и давлении $p_{Ag}=4.4 \cdot 10^{-2}$ Па имеем: $n_e=1 \cdot 10^9$ эл./см³, $v_{e1}=1.05 \times 10^{10}$ 1/с, вероятность ионизации $w_i=0.2$. Для Ni катодов и ионов Ag с энергией 500 эВ $k=1.45$ [5]. При разряде в Кг при тех же значениях параметров и $p_{Kt}=2.6 \cdot 10^{-2}$ Па имеем: $k=2.1$ [5], $n_e=1.1 \cdot 10^9$ эл./см³, $v_{e1}=1.35 \cdot 10^{10}$ 1/с, $v_{i1}=2.7 \cdot 10^9$ 1/с [4]. Из решения уравнений (8) и (9) получаем значения $\Delta N/\Delta S$ для разных z при распылении всей поверхности катода (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

	$(\Delta N/\Delta S) \cdot 10^{14}$ мол./мм ² · мин				
	z , мм				
	15	18	21	24	27
Аг	1.47	1.36	1.33	1.36	1.47
Кг	1.68	1.56	1.52	1.56	1.68

Т а б л и ц а 3

	$(\Delta N/\Delta S) \cdot 10^{14}$ мол./мм ² · мин	
	теор.	экспер.
	Аг	1.40 ± 0.06
Кг	1.60 ± 0.06	1.45 ± 0.09

Неоднородность распределения плотности напыленного металла по длине анода не превышает 10 %. В табл. 3 даны средние значения $(\Delta N/\Delta S)_{cp}$, вычисленные и полученные экспериментально.

Измерение $\Delta N/\Delta S$ для разных материалов катода при разряде в разных газах позволяет из решения уравнения (8) определить значение k , усредненное по поверхности катода.

Т а б л и ц а 4

Материал катода	Аг			Кг		
	вычисленное	из [°]	из [°]	вычисленное	из [°]	из [°]
		$E_{ион} = 500 \div 1000$ эВ				
Co	1.09 ± 0.06	1.2	1.36	1.27 ± 0.05	1.1	1.33
Ni	1.54 ± 0.06	1.45	1.52	1.71 ± 0.03	2.1	1.5
Dy	0.84 ± 0.03	0.9		0.9 ± 0.03	1.2	
Gd	0.69 ± 0.03	0.8		0.77 ± 0.03	0.6	

Из табл. 4 видно удовлетворительное согласие полученных значений k с результатами, известными из литературы.

Знание распределения по поверхности анода напыленного материала, поступающего из кольцевых зон катода, находящихся на различных расстояниях от центра, позволяет вычислить значение k для разных точек катода. Вычисления показывают постоянство k до $r=8$ мм и дальнейшее его уменьшение приблизительно на 1.5 % для области катода $r=8 \div 13$ мм.

Выводы

1. Проведен расчет распределения напыленного металла по поверхности анода в разряде с осциллирующими электронами.
2. Определено количество металла, поступающего на анод из различных кольцевых зон катода.
3. Измерено среднее количество вещества, напыляемого на единицу площади анода в единицу времени $(\Delta N/\Delta S)_{cp}$ при разряде в Аг и Кг для разных материалов катодов.
4. Вычислен коэффициент катодного распыления k для разных материалов катода при разряде в разных газах.

5. Вычисленные значения $(\Delta N/\Delta S)_{cp}$ и k находятся в удовлетворительном соответствии с измеренными и известными из литературы.

6. Результаты представляют интерес в связи с использованием разряда в магниторазрядных насосах и для получения тонких пленок.

Авторы выражают благодарность Э. М. Рейхруделю за участие в обсуждении полученных результатов.

Литература

- [1] Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В. ЖТФ, 1963, т. 33, № 12, с. 1405—1429.
- [2] Смирницкая Г. В., Нгуен Хыу Ти. ЖТФ, 1969, т. 39, № 9, с. 1625—1631.
- [3] Кононова Н. Н., Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В. ЖТФ, 1980, т. 50, № 3, с. 509—605.
- [4] Смирницкая Г. В., Нгуен Хыу Ти. ЖТФ, 1969, т. 39, № 6, с. 1044—1051.
- [5] Методы анализа поверхностей / Под ред. Зандерны А. М.: Мир, 1979, с. 29.
- [6] Плишицев Н. В. Катодное распыление. М.: Атомиздат, 1968, с. 70—71.

Московский государственный
университет им. М. В. Ломоносова
Физический факультет

Поступило в Редакцию
22 декабря 1986 г.

УДК 537.312.62

Журнал технической физики, т. 58, в. 2, 1988

ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПЛЕНОЧНОГО КРИОТРОНА

А. П. Кашин, М. Э. Максимов, О. В. Марченко

В работе [1] для объяснения экспериментальной вольт-амперной характеристики (ВАХ) криотрона предложена модель, основанная на тепловом механизме разрушения сверхпроводящего состояния пленки. В результате решения уравнения Лапласа полное сопротивление рабочего участка структуры R и увеличение плотности тока между остриями сверхпроводящих электродов K выражены через функции

$$f_1(\alpha) = \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \frac{\sin n\alpha}{n}, \quad (1)$$

$$f_2(\alpha) = \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \frac{\sin n\alpha}{n^2} \quad (2)$$

и имеют вид

$$R = R_0 \frac{\pi\alpha}{2f_2(\alpha)}, \quad K = f_1(\alpha)/f_2(\alpha).$$

Однако эти ряды слабо сходятся, особенно при малых углах α , когда происходит наиболее существенное изменение крутизны ВАХ. Так, например, при $\alpha=0.1$ для вычисления $f_1(\alpha)$ с точностью до двух значащих цифр требуется просуммировать более двухсот членов ряда.

Очевидно, авторы [1] не заметили, что ряды типа (1), (2) выражаются через элементарные функции и интегралы от них. Действительно, воспользовавшись обобщенными методами суммирования [2], нетрудно показать, что

$$L(\rho, \alpha) = \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \rho^{n-1} \frac{\sin n\alpha}{n} = \frac{1}{2\rho} \arctg \frac{2\rho \sin \alpha}{1 - \rho^2}$$

и, следовательно,

$$f_1(\alpha) = L(1, \alpha) = \frac{\pi}{4}, \quad \alpha > 0,$$